



Arbeitsbereich Additive Fertigung

Ressourcenoptimierte Fahrzeugteile für die Elektromobilität durch den Einsatz generativer Fertigung

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 34494/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Jannic Oswald, Matthias Metzen, Christoph Thurn und Christian Blume

der Kooperationspartner e-bility GmbH, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg und LIGHTWAY
GmbH & Co. KG

Februar 2020

Kumpun
electric

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	4
Abkürzungsverzeichnis.....	5
1. Einleitung.....	6
2. Projektdurchführung.....	7
2.1. Methoden und Verfahren.....	7
2.2. Stand der Technik und Potential der generativen Fertigung	8
2.3. Konzeptentwicklung und -vergleich	10
2.3.1. Bisheriges Konzept	11
2.3.2. Konzeptidee 1 (LIGHTWAY): Scharniergelenk mit elektrischem Sperrbolzen ...	11
2.3.3. Konzeptidee 2 (LIGHTWAY): Zwischengelenk	12
2.3.4. Konzeptidee 3 (e-bility): Zylindergelenk mit mechanischem Sperrbolzen	12
2.3.5. Konzeptidee 4 (e-bility): Art Trommelbremse	13
2.3.6. Konzeptidee 5 (e-bility): Art Kupplung.....	14
2.3.7. Konzept konventionell (ähnlich Kumpan 1950 bisher)	14
2.3.8. Konzeptauswahl	15
2.4. Konstruktion	18
2.5. Optimierung der Topologie und Einbau einer Lattice Struktur.....	22
2.6. Fertigung und Testing von Zugproben	28
2.7. Life Cycle Assessment.....	31
2.8. Projektauswertung	33
3. Fazit	34
4. Literaturverzeichnis.....	35
Anhang	38

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des SLM Verfahrens [1]	8
Abbildung 2: Klappmechanismus bisheriger Kumpfan 1950	11
Abbildung 3: Scharniergelenk mit elektrischer Arretierung	12
Abbildung 4: Knickgelenk mit Zwischengelenk	12
Abbildung 5: Zylindergelenk mit mechanischem Sperrbolzen	13
Abbildung 6: Konzept nach Art der Trommelbremse	13
Abbildung 7: Konzept nach Art einer Kupplung	14
Abbildung 8: Bisheriges Konzept des Schnellspanners	15
Abbildung 9: Bewertungsbogen über die Konzepte, ausgefüllt von den Projektpartnern und gemittelt	17
Abbildung 10: Explosionszeichnung des Kugelknickgelenks als Demonstrationsobjekt; b) Ansicht auf Kugelknickgelenk im ausgeklappten Zustand; Schnittansicht c) im ausgeklappten Zustand; d) beim Einklappen; e) im eingeklappten Zustand; f) Einbausituation der Feder und Vorspannen der Feder während des Drucks	19
Abbildung 11: für das Knickgelenk neu konstruierter Tretroller mit eingezeichneter möglicher Position des Knickgelenks als Ersatz einer starren Verbindung	21
Abbildung 12: konstruiertes Knickgelenk in CAD nach abgeänderter Konzeptidee 3	21
Abbildung 13: links: Schnitt durch Sperrbolzen und Bereich der einzulegenden Feder; rechts: seitlicher Schnitt der Einrastmöglichkeiten des Bolzens	22
Abbildung 14: Lastfall Vorderrad-Vollbremsung des Tretrollers und wirkende Kräfte [15]....	23
Abbildung 15: Vereinfachung einer Knochenstruktur zu einer 1D-Stabstruktur (Lattice); bearbeitetes Bild [16]	24
Abbildung 16: a) Ergebnis der Topologie-Optimierung des Beispielobjekts; b) Integration einer Lattice-Struktur; c) Überprüfung der Spannungen mit definiertem Lasteintrag und fester Einspannung; d) Metall 3D-Druck durch LIGHTWAY im SLM-Verfahren	24
Abbildung 17: a) Ergebnis einer Topologie-Optimierung des Außenzylinders mit Freeze-Bereich in rot und Designraum in blau; b) nachkonstruierter Außenzylinder mit Bereichen für Lattice-Struktur in grün; c) Außenzylinder mit Lattice-Struktur [15]	25
Abbildung 18: Optimierung mit sehr feiner Lattice-Struktur [15]	26
Abbildung 19: konzeptionierter Tretroller mit Einbau des 3D-gedruckten Knickelements	27
Abbildung 20: eingeklappter Tretroller	28
Abbildung 21: Rahmenfertigung des neu entwickelten Tretrollers bei e-bility, ohne Knickgelenk	28
Abbildung 22: Zeichnung der genutzten Probengeometrie	29
Abbildung 23: Verteilung der Proben auf der Platte und mittlere Zugfestigkeit R_m und Bruchdehnung A_{30}	30
Abbildung 24: Globale-Erwärmung-Potential über 100 Jahre des durch Strangextrusion und Fräsen hergestellten Knickgelenks (nach CLM)	32
Abbildung 25: Globale-Erwärmung-Potential über 100 Jahre des durch SLM hergestellten Knickgelenks (nach CLM)	32

Abkürzungsverzeichnis

SLM	Selective Laser Melting
LCA	Live Cycle Assessment
H-BRS	Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
CAD	Computer-Aided Design
FEM	Finite Elemente Methode
CNC	Computerized Numerical Control
FDM	Fused Deposition Modeling

1. Einleitung

Die Elektromobilität hat sich der Nachhaltigkeit und dem Umweltschutz im Sektor Transport und Verkehr verschrieben. Über die Energiegewinnung und den Energieverbrauch zum Antrieb hinaus ist auch die Herstellung der Fahrzeuge ein essentieller Aspekt, um eine vergleichbare Ökobilanz zu konventionellen Antrieben ziehen zu können. Neben dem in der Herstellung energieaufwändigen Akku verspricht auch die Herstellung des Fahrzeug durch alternative Fertigungskonzepte eine Ressourcenoptimierung. Insbesondere bei Mechaniken aufwändiger Montage- und Fügeart und komplexem Aufbau ist der Einsatz der additiven Fertigung in einem Prozess als Ersatz mehrstufiger Form- und Fügeprozesse interessant. Ein Vergleich wird in Kapitel 2.2 aufgeführt.

Das Ziel dieses Projekts ist es, diese additive Fertigung auf ein Fahrzeug der Firma e-bility GmbH, einen elektrisch betriebenen Tretroller des Modells „Kumpan 1950“, anzuwenden. Im Speziellen soll das Knickgelenk des faltbaren Rollers, welches bisher in der Fertigung und Montage aufwändig und in der Anwendung umständlich ist und aus 24 Einzelteilen unterschiedlicher Fertigungsart, überarbeitet werden. Durch den Einsatz der generativen Fertigung im SLM-Verfahren (Selective Laser Melting) sollen der Herstellungsprozess und die Bauteilgeometrie optimiert werden, um Ressourcen und Energie gegenüber der bisherigen, konventionellen Herstellungsart einzusparen. Hierfür wird zunächst ein Mechanismus entwickelt, welches auf die neue Herstellungsart abgestimmt ist und die Integration von materialfremder Bauteile im Fertigungsprozess vorsieht.

Die gestellten Aufgaben an das Projekt gliedern sich auf in:

- Konzeptfindung und -auswahl des Knickgelenks
- Konstruktion des favorisierten Konzepts und Optimierung durch Anpassen der Topologie und durch Einsatz an die Bionik angelehnte Strukturen
- Fertigung des Modells und Integration in ein neu entwickeltes Fahrzeug
- Erstellung eines Life-Cycle-Assessment (LCA) konventioneller und generativer Herstellungsart und vergleichen der Ergebnisse

Das Konsortium des Projekts besteht aus dem Elektrofahrzeug-Hersteller e-bility GmbH (nachfolgend nur e-bility), dem Fertiger für additive Fertigungstechnologie im SLM-Verfahren LIGHTWAY GmbH & Co. KG (nachfolgend nur LIGHTWAY) und der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg (nachfolgend H-BRS). Für e-bility bietet das Projekt die Möglichkeit, mit der Weiterentwicklung des in der Herstellung und Montage aufwändigen Modells Kumpan 1950 die Aspekte CO₂-Bilanz, Qualität, Benutzerfreundlichkeit und Wirtschaftlichkeit zu verbessern. LIGHTWAY ermöglicht das Projekt die Anwendung und Integration ihrer angebotenen Technik in der Fahrzeugbranche und die Aussicht auf eine Serienproduktion bei neuen Modellen. Zudem können neue Verfahren wie die Integration von Bauteilen im Prozess getestet werden. Der H-BRS sichert das Projekt die Verzahnung in die lokale Wirtschaft, baut den Bereich der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung zu innovativen Techniken aus und schafft durch Abschlussarbeiten den Studierenden Einblicke in praxisnahe Tätigkeiten. Statements der Projektpartner zu den Chancen des Projekts finden sich in Anhang A.

2. Projektdurchführung

Die Zusammenarbeit der drei geographisch nah beieinander liegenden Projektpartner ist über mehrere Treffen aller Beteiligten oder mit mindestens einem Vertreter der Partner organisiert, in denen der bisherige Projektfortschritt reflektiert wird und zukünftige Arbeiten besprochen und verteilt werden. Zwischen den Treffen arbeiten die Partner überwiegend für sich oder in kleinen Arbeitsgruppen zweier Partner und der Workflow verschiebt sich je nach Projektstand von Partner zu Partner. Beispielsweise ist zu Zeiten der Konstruktion überwiegend e-bility ausgelastet, wohingegen bei der Topologieoptimierung und Integration von Lattice-Strukturen der Arbeitsschwerpunkt bei der H-BRS liegt. Dennoch sind die regelmäßigen Treffen aller Beteiligten wichtig, um Rückmeldung über Durchführbarkeit zu erhalten und Wissensaustausch zu generieren. Eine Einschätzung zum Beispiel seitens LIGHTWAY über die Fertigbarkeit eines Konzepts und der daraus resultierenden Konstruktion von e-bility oder der H-BRS verhindert frühzeitig Mehrarbeiten infolge von Revisionen und Neukonzeptionierung.

In Kapitel 2.1 werden die eingesetzten Methoden skizziert. Kapitel 2.2 befasst sich mit dem Stand der Technik und den zu Projektstart bestehenden Erwartungen an die neuartige Fertigungsart. Die im Projekt entwickelten Konzepte werden in Kapitel 2.3 vorgestellt und die Umsetzung und Optimierung des präferierten Konzepts in Kapitel 2.4 und 2.5 behandelt. In Kapitel 2.6 wird auf die Herausforderungen, die die additive Fertigung mit sich bringt, näher eingegangen. Warum es schwierig ist, eine prägnante Aussage über den Lebenszyklus und die CO₂-Bilanz der neuartigen Fertigungsart treffen zu können, wird in Kapitel 2.7 beantwortet. Eine Projektauswertung folgt in Kapitel 2.8.

2.1. Methoden und Verfahren

Die generative Fertigung benötigt und ermöglicht eine gänzlich andere Herangehensweise und Anforderung, wie der betrachtete Anwendungsfall, das Knickgelenk eines Tretrollers, technisch umgesetzt wird. Um möglichst unvoreingenommen Diversität in der Ideenfindung zu erreichen, wird bei der Konzeptfindung die Methode des Wettbewerbs mit Gewinnversprechen als Anreiz gewählt.

In einem gewichteten Bewertungsverfahren werden die Konzepte verglichen und nach Punkten bewertet. Das Konzept mit der höchsten Punktzahl wird nach Freigabe aller Partner weiterverfolgt.

Die Umsetzung des Konzepts erfolgt mittels Computer-Aided Design (CAD) im Programm CATIA V5. Die Optimierungen zur Gewichtsreduktion unter Berücksichtigung angenommener Lastfälle geschieht auf numerischer Grundlage der Finite Elemente Methode (FEM) durch die Programme Inspire und OptiStruct.

Gefertigt werden soll das Bauteil im SLM-Verfahren, bei dem ein Laser die für jede gedruckte Schicht nach Modell vorgesehene Kontur über einem Pulverbett mit Metallpartikeln abfährt und diese mit den darunterliegenden, bereits gedruckten Konturen verschmelzt. So entsteht ein Objekt im dreidimensionalen Raum. Das verbliebene, nicht verschmolzene Pulver kann ohne Aufarbeitung wiederverwendet werden. Abbildung 1 enthält das Schema dieser Fertigungsart.

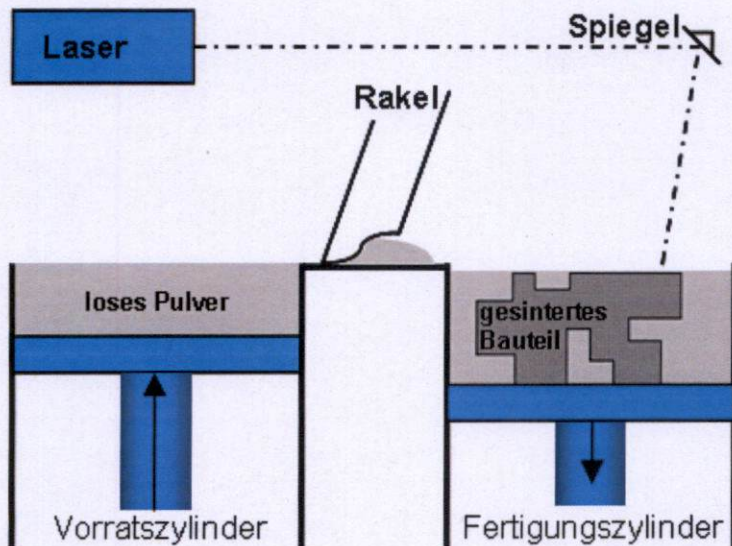


Abbildung 1: Schematische Darstellung des SLM Verfahrens [1]

2.2. Stand der Technik und Potential der generativen Fertigung

Die Energieeffizienz eines an einem Fahrzeug verbauten Bauteils über dessen Lebenszyklus umfasst die rationelle Verwendung von Energie bei der Entwicklung und Herstellung des Bauteils, bei der Montage inklusive Transport und Logistik, für den Betrieb des Bauteils während der Gebrauchsdauer und schließlich für dessen Recycling.

Konventionelle Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz betreffen oftmals nur einen oder einige dieser Aspekte.

Für die Herstellung von Bauteilen für die Fahrzeuge der e-bility GmbH werden derzeit konventionelle Fertigungsverfahren wie CNC-Dreh- und Frästechnik, Urformverfahren wie Feinguss, oder Umform- und Fügeverfahren eingesetzt. Die Gestaltung der Bauteile ist dabei stark abhängig von dem gewählten Fertigungsverfahren, wodurch einer Optimierung hin zum Leichtbau Grenzen gesetzt sind. Zum hier geplanten Vorhaben wird mit dem additiven Fertigungsverfahren SLM eine Technologie angewendet, die die größtmögliche Gestaltungsfreiheit bietet. Hohlräume, Hinterschnitte, variable Materialstärken sowie innere Strukturen können gezielt eingesetzt werden.

Am Bauteil wird nur dort Material eingesetzt, wo es auch Kräfte und Funktionen abbilden muss. Vorbilder solcher gewichtsoptimierten Strukturen finden sich in der Natur, beispielsweise im Knochenaufbau großer Wirbeltiere oder auch im Aufbau von Elementarstrukturen wie Kristallen.

Neuartige additive Fertigungsverfahren wie das SLM-Verfahren bieten die Möglichkeit, die Energieeffizienz über den gesamten Produktlebenszyklus zu optimieren. Dazu wurde bereits durch EADS und die Firma EOS eine Studie [2] erarbeitet, in der das SLM Verfahren mit einem Gießverfahren hinsichtlich Energieeffizienz verglichen wird. Das Ergebnis zeigt, dass laut dieser Studie das SLM Verfahren, wenn die verschiedenen Materialausnutzungsgrade betrachtet werden, 30 % effizienter ist. Der Materialnutzungsgrad ist in der Studie auf Titan berechnet, dieser Werkstoff hat anders wie bei Aluminium einen hohen Schmelzpunkt. Folglich wird dieser Wert bei Aluminium noch effizienter sein.

Werden die für den Sinterprozess bekannten Zahlen zugrunde gelegt, beträgt der Energiebedarf der pulvermetallurgischen Rohstoffherstellung im Schnitt 29 MJ pro Kilogramm des

Endproduktes, während dieser Wert für Gießverfahren auf 30 bis 38 MJ/kg und für zerspanende Herstellverfahren wie Fräsen auf ca. 60 – 75 MJ/kg kommt [3].

Der günstigeren Energiebilanz liegt die bessere Werkstoffausnutzung zugrunde, die bei dem SLM-Verfahren bedingt z.B. durch Anschmelzperlen im Randbereich der Bauteilkontur, ca. 95 % erreichen [4, 5]. Zum Vergleich, Gießverfahren liegen üblicherweise im Bereich von 90% und spanende Verfahren bei 40-50% [3]. Die additiv hergestellten Bauteile haben eine poren- und rissfreie Struktur mit 100% Dichte des Ausgangsmaterials, die mechanischen Eigenschaften sind grundsätzlich vergleichbar mit konventionell hergestellten Serienbauteilen, oder übertreffen diese sogar [5].

Ein zentraler Ansatzpunkt zur Steigerung der Energieeffizienz bietet der Leichtbau. Zum einen benötigt die ressourceneffiziente Herstellung durch die oben beschriebene Materialeinsparung der gewichtsoptimierten Struktur bereits weniger Energie. Zum anderen werden auch für den Betrieb gerade bei an Fahrzeugen verbauten Bauteilen Energie eingespart, und damit auch Emissionen verringert.

Durch die sehr hohe Automatisierung und Flexibilität der additiven Fertigung sind auch die Anstrengungen bei der Entwicklung und In-Serie-Bringung neuer Bauteile optimiert. Mit konventionellen Fertigungsverfahren stellt der Einstieg in ein neues Produkt oftmals eine große finanzielle und logistische Herausforderung dar. Investitionsintensive Werkzeuge müssen angeschafft, Produktionslinien müssen umgestellt, Arbeiter an neuen Maschinen angelernt werden, usw. In der additiven Fertigung müssen lediglich die Herstelldaten generiert und das Rohmaterial ausgetauscht werden. Die Rüstzeiten bestehen im Prinzip nur aus der Übertragung der Konstruktionsdaten des jeweiligen Produkts zum 3D-Drucker [6]. Dementsprechend konnte z.B. bei Airbus bei additiv hergestellten Bauteilen die Zeit der Bauteilentwicklung auf einen Monat verkürzt werden, gegenüber rund sechs Monaten für konventionell hergestellte Bauteile. [5]

Der hohe Automatisierungsgrad macht außerdem die additive Fertigung auch in Hochlohnländern wie Deutschland rentabel. Z.B. fertigt Adidas dank der 3D-Drucktechnik in seiner 2017 im fränkischen Ansbach neu aufgebauten Fabrik zum ersten Mal seit knapp drei Jahrzehnten wieder „Made in Germany“. Ein derartiger langfristig angelegter Produktionsstandort ist sinnvoller als eine sich gemäß den Lohnkosten laufend verlagernde Produktion. Nicht mehr das Lohnniveau diktiert den Standort, andere, insbesondere ökologische Aspekte treten in den Vordergrund. Beispielsweise Verbraucher- oder Rohstoffnähe, wodurch der weltweite Waren- und/oder Rohstofftransport reduziert wird. Oder auch die Verfügbarkeit und Nutzung von erneuerbarer Energie am Produktionsstandort. Die Steigerung der Nutzung zur Erhöhung der Standortattraktivität wäre auch ein Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Produktion im Sinne der Sustainable Development Goals.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz, die in dem geplanten Vorhaben umgesetzt werden soll, ist das Einbringen von Funktionsbauteilen wie die Klappmechanik oder Sensoren direkt im Fertigungsprozess. Diese Print-in-Place genannte Technologie, der Druck beweglicher Teile oder Einbettung art-ungleicher Materialien, kann im 3D-Druck durch die Weiterentwicklung der Druckstrategie erreicht werden. Dadurch können Fertigungs- und Montageschritte reduziert werden, oder komplett entfallen.

Ideen zur Einbettung von Bauteilen und mechanischen Funktion wie die Klappmechanik sind für das in dem Vorhaben zu untersuchende Fahrzeugkonzept derzeit nicht bekannt. Die Optimierung von Bauteilen mittels 3D-Druck hinsichtlich (bionischer) Leichtbaustrukturen ist derzeit Thema vielfältiger Forschungstätigkeiten. Neben der äußeren Gestalt (Topologie, Shape) bietet vor allem die Gestaltung des inneren Aufbaus, z.B. durch die Verwendung von Zell- oder

Gitterstrukturen neue Möglichkeiten [7, 8]. Von EDAG und Bosch wird ein Fahrzeug projiziert, in dem die Karosserie in bionischen Strukturen abgebildet werden soll [9].

Der Fahrradhersteller Empire Cycles und der Maschinenbauer Renishaw haben einen Fahrradrahmen bionisch optimiert und im additiven Verfahren hergestellt [10].

Ein Konsortium aus den Firmen EDAG, BLM, LZN und Concept Laser zeigt auf, wie in der Zukunft Rahmenstrukturen bionisch und additiv hergestellt werden können [11]. Die einzelnen Entwicklungen zielen operativ auf Nischenanwendungen oder sind Technologiebeispiele. Das beabsichtigte Vorhaben schöpft mit der Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus und der geplanten Serienproduktion das ökologische Potential zur Steigerung der Energieeffizienz, und damit verbunden der Emissionsverringerung, voll aus. Das grundsätzlich hohe Marktpotential des 3D-Drucks in der industriellen Fertigung spiegelt sich an dem noch vergleichsweise geringen Marktanteil wieder (10 Milliarden EUR in 2016 weltweit) [12]. Zum Vergleich, der Umsatz des deutschen Maschinenbaus in 2015 betrug rund 247 Milliarden EUR). Besonders im Prototypen- und Modellbau und der Sonderanfertigung ist der 3D-Druck in der Industrie, aber auch in der Medizin, Architektur und Kunst fester Bestandteil geworden [13].

Zusammenfassend grenzen sich die Innovationen zum Stand der Technik zum einen durch die Einbringung von beweglichen, artungleichen Funktionsbauteilen in den 3D-Druckprozess ab; zum anderen auch durch den konsequenten Einsatz der 3D-Drucktechnologie über den gesamten Produktlebenszyklus [2]. Insbesondere kann durch die fortlaufende Dokumentierung der Energieeffizienzsteigerung in den einzelnen Produktentstehungsphasen auch ein Beitrag zur Erhöhung der Akzeptanz der neuen generativen Fertigungsverfahren geleistet werden.

Und schließlich kann zwar die Erforschung, und zumindest für Nischenanwendungen auch schon der Einsatz bionischer, im 3D-Druck hergestellter Strukturen in technischen Systemen bereits zum Stand der Technik gezählt werden, insbesondere im Leichtbau. Für eine Ablösung konventioneller Bauweisen und Fertigungstechnologien bedarf es aber nach wie vor innovativer Forschungsarbeit auf diesen Gebieten.

2.3. Konzeptentwicklung und -vergleich

Der Projektplan sieht eine Konzeptentwicklung mittels Wettbewerb an Hochschulen vor. Die im Projektantrag angedachten drei Hochschulen werden um weitere ergänzt, um höhere Erfolgchancen und eine rege Beteiligung zu erzielen. Als Anreiz wird ein Elektroroller Kumpan 1953 als Preis versprochen. Die Wettbewerbsdauer wird auf drei Monate angesetzt. Die Ausschreibung ist im Anhang B aufgeführt. Die ausgewählten Studiengänge siedeln sich im Bereich Design und Technik an und sind beispielsweise Produktdesign, Industrial Design, Maschinenbau oder Fahrzeugtechnik. Insgesamt werden 15 Hochschulen mit Follow-up E-Mail angeschrieben mit der Bitte zur Weiterleitung der Wettbewerbsausschreibung. Von sieben Hochschulen wird die Weiterleitung bestätigt. Eine Übersicht über die Anfragen an die Hochschulen gibt Anhang C.

Trotz breiter Fächerung der Ausschreibung und Gewinnmöglichkeit geht keine Bewerbung ein. Eine genauere Ursachenforschung, warum die Teilnahme am Wettbewerb für die Studierenden nicht ausreichend attraktiv erscheint, wird nicht durchgeführt, da dies den Rahmen des Projekts sprengen würde. Vermutet wird, dass der Zeitraum Juli – September in entweder vorlesungsfreie Zeit beziehungsweise Prüfungszeit – je nach Hochschule – fällt und Studierende anderwärtig beschäftigt sind.

Infolgedessen wird die Aufgabe der Konzeptentwicklung an die Projektpartner übertragen. Dies erhöht den Arbeitsaufwand und verlängert den zeitlich angedachten Rahmen des Projekts. Die Konzeptpräsentation wird somit ebenfalls ausschließlich intern erfolgen. E-bility legt drei Konzepte vor, LIGHTWAY zwei, die nachfolgend vorgestellt werden.

2.3.1. Bisheriges Konzept

Derzeit besteht der Klappmechanismus aus einem Scharniergelenk mit einem Exzenter Spanner als Arretierung. Insgesamt gliedert sich der Mechanismus in 24 Bauteile auf, die in mehreren unterschiedlichen Fertigungsprozessen (Strangpressen, Gießen, Stanzen, Drehen, Fräsen, Bohren, Biegen) gefertigt, und anschließend zusammengebaut werden. Abbildung 2 zeigt das Klappgelenk des bisherigen Modells.

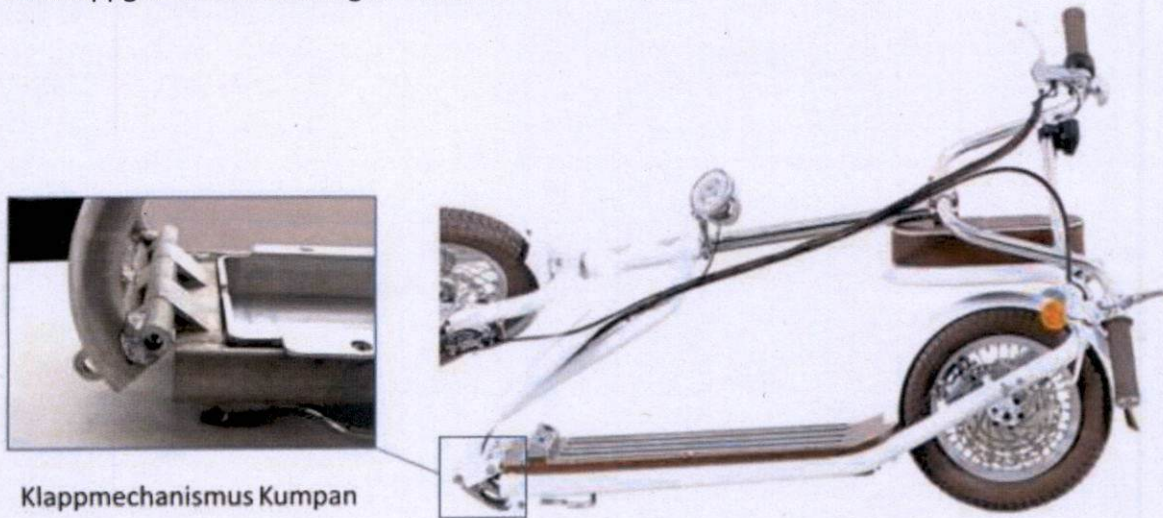


Abbildung 2: Klappmechanismus bisheriger Kumpfan 1950

Das eigentliche Gelenk wird über eine gedrehte Achse lenkerseitig durch 3 Flansche und Fußbrettseitig durch 2 Flansche gebildet. Beide Anbindungen sind Alu-Strangpressprofile, die durch Fräsen und Bohren nachbearbeitet werden. Zwei weitere nachbearbeitete Strangpressprofile lenkerseitig führen die zwei Spanner zur Arretierung und die zwei Hebel zur Betätigung, jeweils gebogene und gestanzte Bleche. Die Spanner greifen Fußbrettseitig in zwei kleine Gussteile zur Verriegelung. Der Mechanismus ragt unter der Bodenwanne raus und verringert deutlich die Bodenfreiheit und führt bei Bodenwellen, steiler Kurvenfahrt und Bordsteinüberfahrten zu Kollisionen mit dem Boden.

2.3.2. Konzeptidee 1 (LIGHTWAY): Scharniergelenk mit elektrischem Sperrbolzen

In dieser Idee steht die Herstellbarkeit mittels generativer Fertigung im Fokus, mit der Geometrieforderung, dass in einem Schritt die Komponente mit integrierter Funktionsweise herstellbar ist. Als Ergebnis des Findungsprozesses wird festgehalten, dass bei der Geometrieauswahl beide Körper der zwei Seiten des Gelenks im Druckprozess nicht miteinander verbunden werden. Der lenkerseitige Körper gleicht einem Zylinder mit rotatorischem Freiheitsgrad um die Längsachse. Gefasst wird der rotierbare Körper rahmenseitig von zwei außenliegenden Flanschen. Das Konzept wird in Abbildung 3 visualisiert.

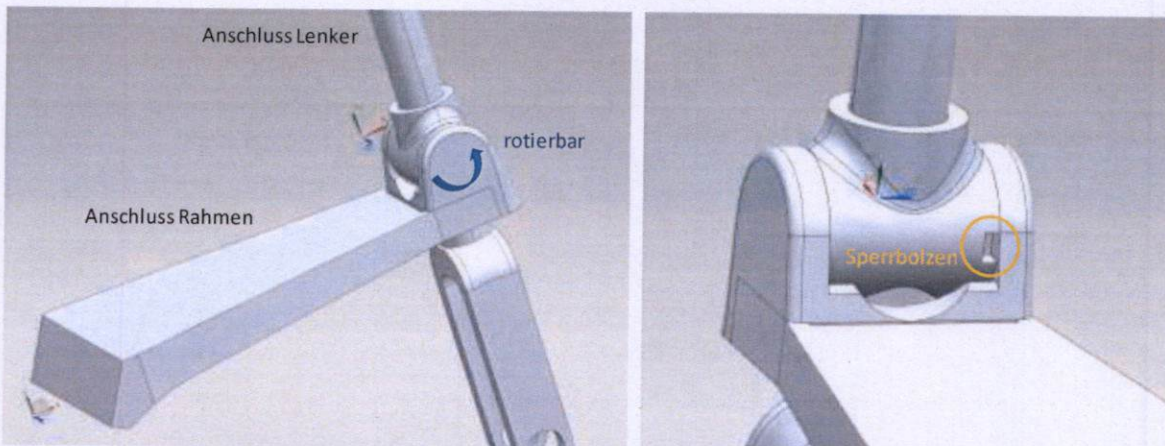


Abbildung 3: Scharniergelenk mit elektrischer Arretierung

Zu sehen sind beide Anschlüsse, an Rahmen und an Lenker, die um eine Achse zueinander rotierbar sind. In dem in Abbildung 3 gelb gekennzeichneten Bereich wird ein elektrisch angesteuerter Sperrbolzen als Zukaufteil installiert, der das Gelenk im ein- und ausgeklappten Zustand arretiert. Ein integrierter Sensor des Bolzens könnte den Zustand ausgeben und so nur im ausgeklappten Zustand eine Fahrbarkeit und Ansteuerung des Motors zulassen.

2.3.3. Konzeptidee 2 (LIGHTWAY): Zwischengelenk

In diesem Entwurf soll die Mechanik über ein Gelenksystem erfolgen (Abbildung 4), bei dem die beiden Endlagen das Aus- und Einklappen über den in der Abbildung blau markierten Bereich mit einer Überwurfmuffe fixiert werden sollen. Diese bewegt sich bei Betätigung über das Gelenk und stellt sicher, dass es formschlüssig verbunden ist.

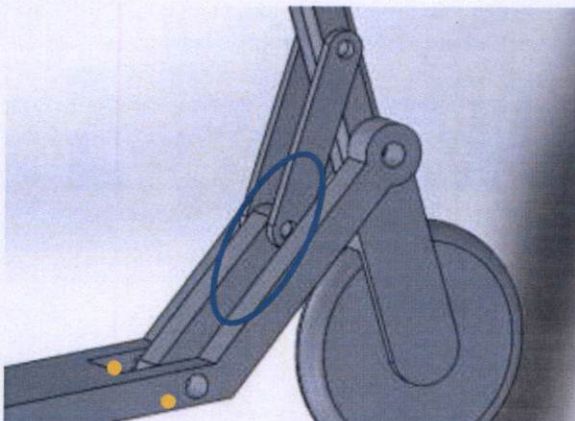


Abbildung 4: Knickgelenk mit Zwischengelenk

Eine weitere Idee ist es, die Endlagen nach Aus- und Einklappen über Rastelemente in Form von Kugeldruckstücken zu arretieren (gelber Punkte in Abbildung 4). Dieses Konzept lässt sich nach erster Bewertung mittels generativer Fertigung abbilden. In der Fertigung werden die Rastelemente im Bauprozess eingelegt.

2.3.4. Konzeptidee 3 (e-bility): Zylindergelenk mit mechanischem Sperrbolzen

Diese Idee ähnelt angesichts des Prinzips der Konzeptidee 1, jedoch mit mechanischer Betätigung per Hand. Abbildung 5 ist der Aufbau zu entnehmen.

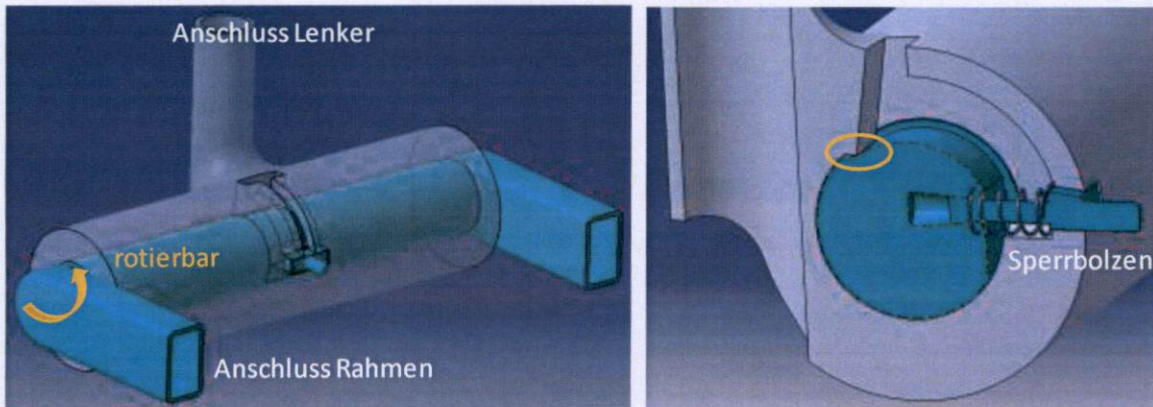


Abbildung 5: Zylindergelenk mit mechanischem Sperrbolzen

Ein keilförmiger Bolzen wird eingedrückt, wodurch die Arretierung gelöst und die Rotation zum Einklappen des Lenkers ermöglicht wird. Im ausgeklappten Zustand werden große Kräfte z.B. beim Bremsen durch eine Einkerbung aufgenommen (gelbe Markierung rechtes Bild). Die Feder wird während des Druckvorgangs eingelegt. Sie sichert den Bolzen im ausgefahrenen, arretierten Zustand. Der Bolzen kann aus demselben Material gedrückt werden.

2.3.5. Konzeptidee 4 (e-bility): Art Trommelbremse

Diese Konzeptidee ist angelehnt an die Trommelbremse. Sie ist in Abbildung 6 skizziert.

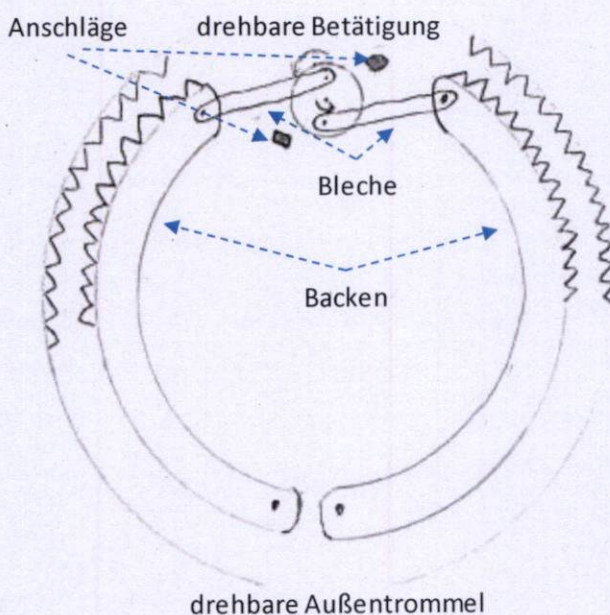


Abbildung 6: Konzept nach Art der Trommelbremse

Der Formschluss zwischen Backen und der Außentrommel geschieht über Zacken/ Zähne. An der drehbaren Betätigung hängen rotierbare Bleche, die je nach Drehwinkel nach außen oder innen bewegt werden. Sind sie horizontal ausgerichtet, ist der Maximalpunkt erreicht und die innenliegenden Backen werden mit der größten Kraft an die Außentrommel gedrückt. Wird die Betätigung weitergedreht, blockieren Anschläge die Bleche. Dieser Zustand beschreibt den ein- oder ausgeklappten Zustand. Es bietet sich an, die Außentrommel beweglich zu gestalten und diese lenkerseitig anzubinden.

2.3.6. Konzeptidee 5 (e-bility): Art Kupplung

Einer Kupplung ähnelnd geschieht die Fixierung der beweglichen Teile in diesem Konzept über Scheiben/ Lamellen. Da kein Schleifpunkt benötigt wird, kann dies formschlüssig über eine Verzahnung passieren. Abbildung 7 beinhaltet eine Skizze dieses Konzepts.

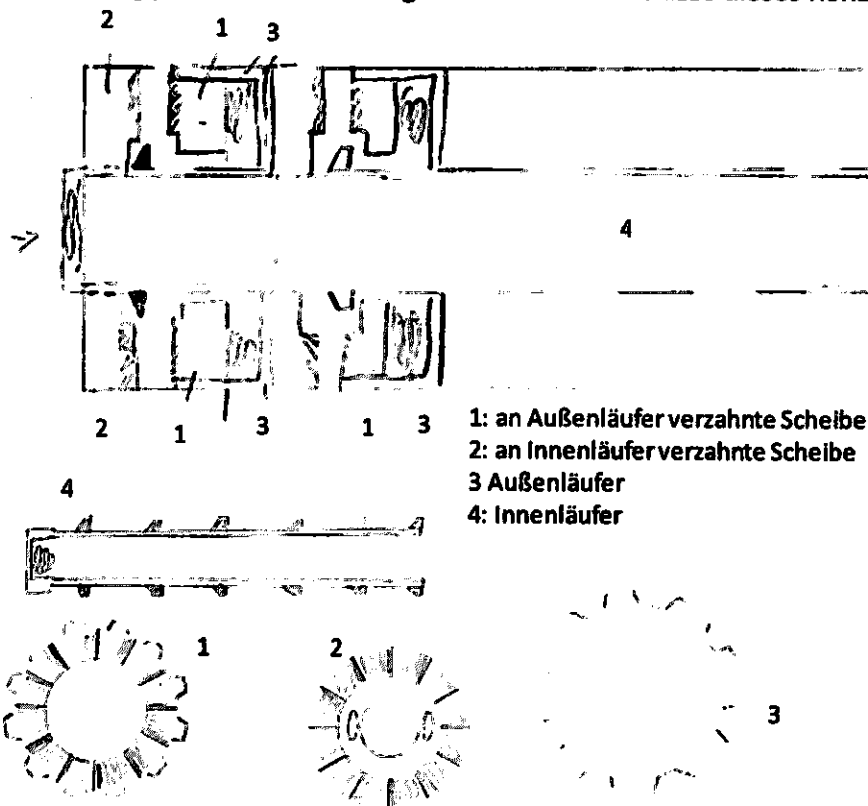


Abbildung 7: Konzept nach Art einer Kupplung

Durch Trennen der Scheiben, indem der Innenläufer in Achsrichtung verschoben wird und dieser die Scheiben 1 von den Scheiben 2 trennt, wird der Formschluss aufgehoben und Innen- und Außenläufer können zueinander verdreht werden. Im unbenutzten Zustand pressen Federn die Scheiben des Außenläufers (1) auf die des inneren (2). Die Reduktion auf nur eine Feder ist bei Umsetzung zu empfehlen.

2.3.7. Konzept konventionell (ähnlich Kumpan 1950 bisher)

Auch das bisherige Konzept soll in den Vergleich mit aufgenommen werden und beurteilt werden, ob zwar die Fertigung neu, aber das Konzept in eventuell anderer Ausführung und Lage am Fahrzeug das gleiche bleiben kann. Die Befestigung durch einen Schnellspanner ist in Abbildung 8 zu sehen.



Abbildung 8: Bisheriges Konzept des Schnellspanners

2.3.8. Konzeptauswahl

Für die Auswahl des am besten zum Erreichen des Projektziels geeigneten Konzepts wird ein Bewertungsbogen erstellt. Die Bewertung geschieht nach gewichteter Punktzahl. Jeder der Projektpartner gibt eine Bewertung ab. Bewertet wird nach folgenden Kriterien (in Klammern Gewichtung, in Summe 1):

- Machbarkeit und Herstellbarkeit (0,2)
- Fertigungsaufwand und Kosten (0,15)
- ökologische Nachhaltigkeit (0,2)
- Bedienbarkeit und Funktionalität (0,125)
- Lastresistenz und Langlebigkeit (0,125)
- Innovationsgrad (0,2)

Die Punkteskala reicht von 0-10 mit folgenden Abstufungen: 0: Absolut unbrauchbare Lösung; 1: sehr mangelhafte Lösung; 2: schwache Lösung; 3: tragbare Lösung; 4: ausreichende Lösung; 5 befriedigende Lösung; 6: gute Lösung mit geringen Mängeln; 7: gute Lösung; 8: sehr gute Lösung; 9: über Zielvorstellung hinausgehende Lösung ; 10: Ideallösung.

Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse des Bewertungsverfahrens. Konzeptideen 4 und 5 (Prinzip Trommelbremse und Kupplung) schneiden unterdurchschnittlich ab und scheitern an der Machbarkeit, dem Aufwand und der Nachhaltigkeit, die mit dem jeweils komplexem Aufbau der Konstruktion zu begründen sind. Die Konzeptideen 2 (Zwischengelenk) und die konventionelle Technik schneiden durchschnittlich ab, unterliegen jedoch den Konzeptideen 1 und 3, die sich im Aufbau sehr ähneln und nur durch die elektrische oder mechanische Betätigung unterscheiden. Konzeptidee 1 erreicht zwar die beste Bewertung bei Innovationsgrad und Bedienbarkeit/ Funktionalität, wird jedoch in den vier weiteren Kriterien von Konzeptidee 3 übertroffen, die in allen Punkten eine Bewertung über oder gleich 5 Punkte erreicht und somit keine Schwächen aufweist und im Schnitt mit 6,07 Punkten den besten Wert erreicht.

Die Entscheidung fällt somit auf das Konzept 3 mit Zylindergelenk und mechanisch betätigtem Sperrbolzen und eingelegter Feder. Da in der Konzeptfindungsphase der Schwerpunkt auf dem Prinzip und der Funktion liegt, wird in weiteren Schritten die Umsetzbarkeit des Konzepts und die Anforderung der Fertigung ausgearbeitet und verfeinert. Zunächst wird die Druckrichtung im SLM-Verfahren bestimmt und in Achsrichtung festgelegt (in Abbildung 5 von links nach rechts, sodass der Zylinder auf dem Druckbett „steht“). Nach Einschätzung des Fertigers LIGHTWAY ist hierdurch eine Neupositionierung des Betätigungsbolzens mit eingelassener Feder zwingend notwendig, da ansonsten das Einlegen der Feder unmöglich ist. Ähnliches Vorgehen wird auch beim Druck des Demonstrationsobjekts aus dem Projektantrag praktiziert

(siehe Abbildung 10), bei dem die Federachse ebenfalls in Druckrichtung liegt, also von unten nach oben. In Konzeptidee 3 befindet sich die Federachse noch quer zur Druckrichtung und wird für die Fertigbarkeit in der Phase der Konstruktion im nachfolgenden Kapitel 2.4 angepasst.

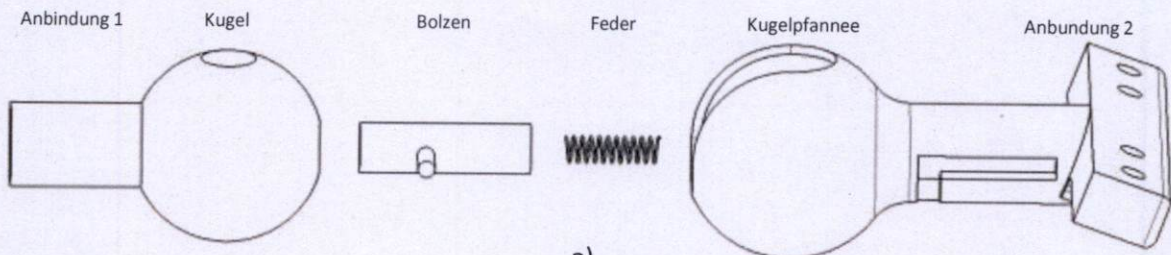
Abbildung 9: Bewertungsbogen über die Konzeptidee, ausgefüllt von den Projektpartnern und gemittelt

Variante	Konzeptidee 1		Konzeptidee 2		Konzeptidee 3		Konzeptidee 4		Konzeptidee 5		Konventionell/ alter		
Kurzform	Scharniergelenk mit elektr. Sperrbolzen		mit Zwischengelenk		Zylindergelenk mit mech. Sperrbolzen		Prinzip Trommelbremse		Prinzip Kupplung		Schnellspanner mit Exzenter		
Beschreibung	Ähnlich Kniegelenk. Fokus auf Druckbarkeit. Elektromagnetischer Sperrbolzen		Zwischengelenk wird mit Überwurfschale oder Rastnasen fixiert		Ähnlich Konzept 1, mechanische Betätigung		Backen werden an eine Außentrommel gepresst, formschlüssige Fixierung		Lamellen werden getrennt/ verbunden und ermöglichen/ verhindern die Bewegbarkeit		Bei den meisten Klappfahrrädern und Sattelstützen üblicher Mechanismus. Auch beim "alten" Kumpan		
	Gewichtung	unge-wichtet	ge-wichtet	unge-wichtet	ge-wichtet	unge-wichtet	ge-wichtet	unge-wichtet	ge-wichtet	unge-wichtet	ge-wichtet	unge-wichtet	gewichtet
Machbarkeit/ Druckbarkeit	0,20	6,00	1,20	4,67	0,93	6,33	1,27	2,00	0,40	1,00	0,20	6,00	1,20
Fertigungsaufwand und Kosten	0,15	4,67	0,70	5,00	0,75	6,33	0,95	2,67	0,40	2,33	0,35	6,00	0,90
ökol. Nachhaltigkeit	0,20	4,67	0,93	4,67	0,93	6,33	1,27	3,00	0,60	2,33	0,47	6,00	1,20
Bedienbarkeit/ Funktionalität	0,13	8,00	1,00	4,00	0,50	6,33	0,79	3,67	0,46	3,00	0,38	4,33	0,54
Festigkeit/ Langlebigkeit	0,13	4,67	0,58	4,33	0,54	6,33	0,79	5,00	0,63	4,67	0,58	4,33	0,54
Innovationsgrad	0,20	6,00	1,20	3,67	0,73	5,00	1,00	5,67	1,13	5,00	1,00	2,00	0,40
SUMME PUNKTE		34,00	5,62	26,33	4,39	36,67	6,07	22,00	3,62	18,33	2,98	28,67	4,78
<p>Punkteskala von 0-10: 0: Absolut unbrauchbare Lösung; 1: sehr mangelhafte Lösung; 2: schwache Lösung; 3: tragbare Lösung; 4: ausreichende Lösung; 5 befriedigende Lösung; 6: gute Lösung mit geringen Mängeln; 7: gute Lösung; 8: sehr gute Lösung; 9: über Zielvorstellung hinausgehende Lösung ; 10: Ideallösung</p>													

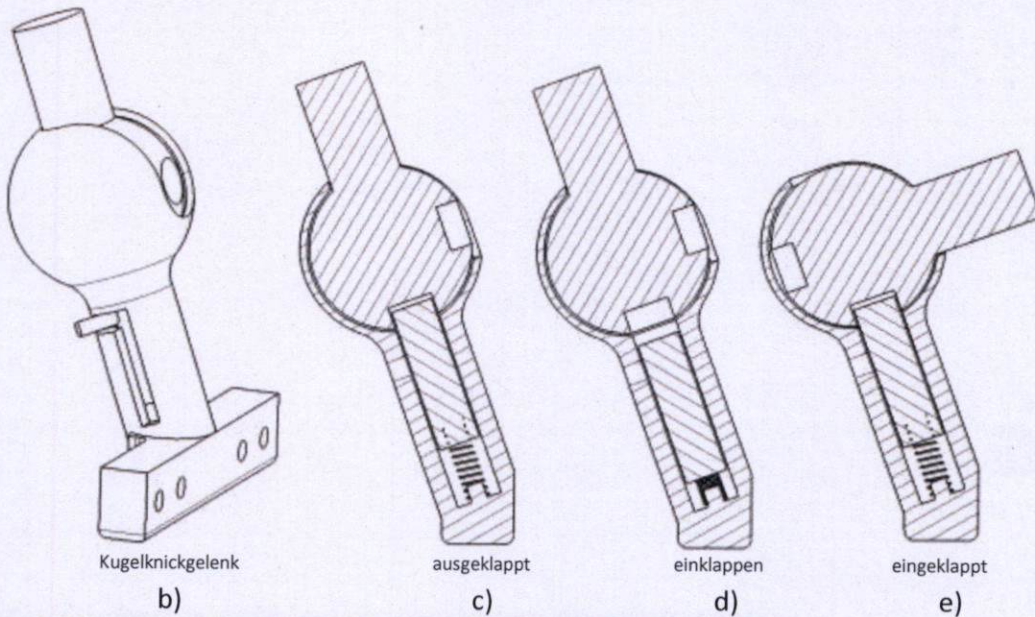
Kumpan
electric-

2.4. Konstruktion

Im Verlauf des Projekts wird für einen Blogeintrag der Plattform nachhaltig.digital [14] das im Projektantrag aufgeführte Demonstrationsobjekt nochmals konstruiert und mittels Fused Deposition Modeling (FDM) bei e-bility gedruckt. Beim FDM mit Kunststoff wird Filament, in diesem Fall PLA, geschmolzen und durch eine Düse gedrückt, die über dem Druckbett die Kontur einer jeden Druckschicht abfährt und das zu druckende Modell so dreidimensional aufbaut. Abbildung 10 zeigt den Aufbau und die Funktion dieses Kugelgelenks und den Vorgang des Einlegens der Feder beim Druck.



a)



Kugelknickgelenk

b)

ausgeklappt

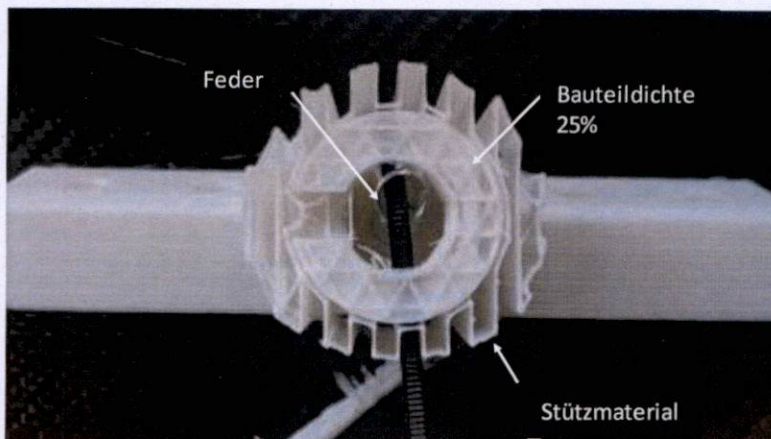
c)

einklappen

d)

eingeklappt

e)



Einbau der Feder während des Druckes

f)

Abbildung 10: Explosionszeichnung des Kugelknickgelenks als Demonstrationsobjekt; b) Ansicht auf Kugelknickgelenk im ausgeklappten Zustand; Schnittansicht c) im ausgeklappten Zustand; d) beim Einklappen; e) im eingeklappten Zustand; f) Einbausituation der Feder und Vorspannen der Feder während des Druckes

Anwendungsfall dieses Gelenks könnte auch das Zusammenfallen des Tretrollers sein, der im ausgeklappten Zustand, siehe Abbildung 10 c) fahrtüchtig und im eingeklappten Zustand, siehe Abbildung 10 e) zusammengefallen ist. Zum Einklappen muss ein Bolzen gegen eine eingebaute Feder gedrückt werden, um Bewegungsfreiheit der Kugel in der Schale zu ermöglichen, siehe Abbildung 10 d).

Da die ineinander liegenden Verbindungen der Kugelpfanne und der Kugel sowie der Anbindung 2 und des Bolzens, Abbildung 10 a), das nachträgliche Zusammensetzen einzelner Teile zu einer gesamten Bauteilgruppe verhindern, wäre die Montage nach konventioneller Fertigungstechnik mit gefrästen, gegossenen, geschweißten oder anderwärtig gefertigten Teilen nicht ohne aufwändige Bearbeitung möglich. Die drei beweglichen Teile ungeachtet der Feder müssten in weitere Elemente aufgeteilt und wieder zusammengefügt werden, oder alternativ eine andere Technik verwendet werden.

Der 3D-Druck ermöglicht es, nicht nur die Stückzahl bei drei Teilen plus Feder zu belassen, sondern auch, das gesamte Gelenk als Baugruppe in einem Schritt zu fertigen. Durch die Verwendung von Stützmaterial können die Bauteile voneinander getrennt werden und auch Überhänge können „frei in die Luft“ gedruckt werden. Während des 3D-Druckprozesses muss eine Feder eingebaut und vorgespannt werden. Dafür wird der Druckvorgang pausiert, siehe Abbildung 10 f).

Dieses Gelenk demonstriert hervorragend die Vorzüge und Möglichkeiten des 3D-Drucks, sofern der Anwendungsfall derart benötigt wird. Angesichts des Prinzips ähnelt dieses Demonstrationsobjekt dem ausgewählten Konzept 3 mit eingelegter Feder, die einen Druckbolzen zur Arretierung vorspannt und bei dem durch Betätigung des Sperrbolzens der Zustand „eingeklappt“ und „ausgeklappt“ geändert werden kann. Einzig der grundsätzliche Anwendungsfall eines Kugelgelenks mit mehrdimensionaler Drehbarkeit ist nicht auf den Klappmechanismus des Trerollers zutreffend. So gesehen ist das Konzept 3 mit nur einachsiger Verstellbarkeit eine Anpassung des Demonstrationsobjekts des Projektantrags auf den Klappmechanismus.

Die Umsetzung des ausgewählten Konzepts 3 wird von e-bility durchgeführt. Dreidimensional gezeichnet wird mit dem CAD-Programm Catia V5, in dem u.a. Flächen und Körper erstellt werden können. Um den Bauraum, faltbarkeit und zu erwartende Kräfte bestimmen zu können, wird ein neues Modell eines Trerollers konstruiert. Abbildung 11 stellt dieses Konzept des Trerollers dar.

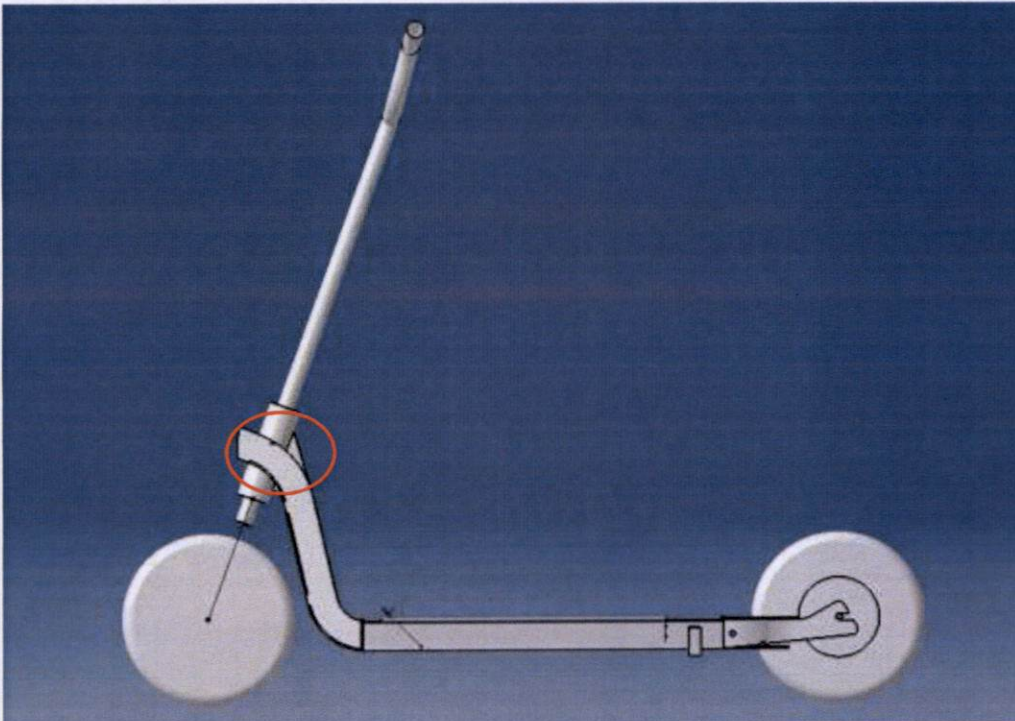


Abbildung 11: für das Knickgelenk neu konstruierter Tretroller mit eingezeichneter möglicher Position des Knickgelenks als Ersatz einer starren Verbindung

Die Position des Gelenks wird im Vergleich zum bisherigen Modell Kumpfan 1950 vom Unterboden an die Lagerung des Lenkrohrs verlegt, um eine bessere Erreichbarkeit und Bedienbarkeit zu ermöglichen (bisher musste der Tretroller seitlich auf den Boden gelegt werden). Zudem wird das Packmaß des Rollers im eingeklappten Zustand verringert. Die Bodenfreiheit wird erhöht, sodass Bodenkollisionen vermieden werden können.

Auf Grundlage des neuen Modells des Rollers kann das Knickgelenk konstruiert werden. Dieses ist in Abbildung 12 zu sehen

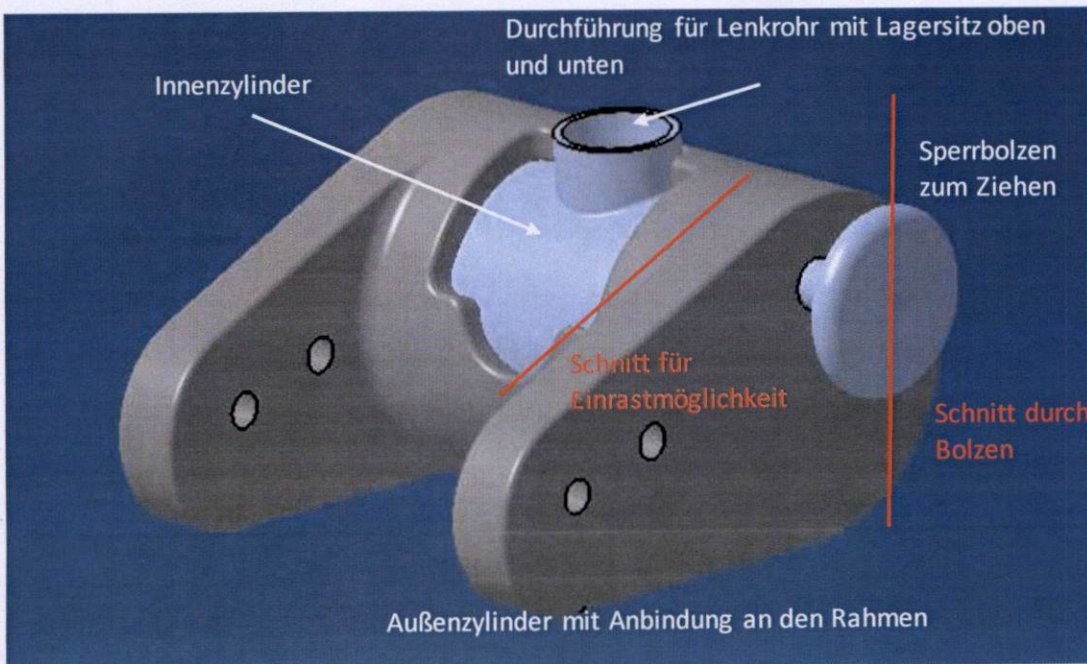


Abbildung 12: konstruiertes Knickgelenk in CAD nach abgeänderter Konzeptidee 3

Das Gelenk ist im Vergleich zum Konzeptentwurf (Abbildung 5) deutlich schmaler. Der Sperrbolzen ist seitlich platziert und nicht mehr mittig und wird durch Ziehen und nicht wie im Entwurf durch Drücken entriegelt. Die eingezeichneten Schnitte finden sich in Abbildung 13 wieder.



Abbildung 13: links: Schnitt durch Sperrbolzen und Bereich der einzulegenden Feder; rechts: seitlicher Schnitt der Einrastmöglichkeiten des Bolzens

Druckrichtung ist in Abbildung 13 links von links nach rechts, in Achsrichtung des Bolzens und der Feder, für die ein Hohlraum vorgesehen ist. In der rechten Abbildung sind die zwei Einrastpositionen des Bolzens für ein- und ausgeklappten Zustand des Rollers zu sehen. Durch die Hinterschnitte, die der Hohlraum für die Feder bildet, wäre eine Fertigung nach konventioneller Art sehr aufwändig. Zudem wird deutlich, dass die Bauteile sehr massiv sind und daher ein hoher Materialaufwand und ein hohes Gewicht aufweisen. Mit der Reduktion des Gewichts befasst sich das anschließende Kapitel.

2.5. Optimierung der Topologie und Einbau einer Lattice Struktur

Ziel dieses Vorgehens ist primär eine Gewichtsreduktion des Bauteils bei gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften, indem Material reduziert wird, wo keine oder kaum Belastungen auftreten und keine weiteren Funktionen erfüllt werden müssen. Die Optimierung geschieht im Zuge eines Masterprojekts und einer Masterarbeit an der H-BRS. Die Masterarbeit trägt den Titel „Numerische Methode zur Optimierung einer Lattice-Struktur im Rahmen einer Fahrzeugentwicklung“ [15]. Das Vorgehen und die Ergebnisse sind nachfolgend aufgeführt.

Für die Optimierungen wird die Finite Elemente Methode (FEM) genutzt. Sie ist ein Verfahren zur numerischen Lösung von komplexen Problemstellungen verschiedener Art. Da für komplexe Geometrien meist keine analytische Lösung mehr existiert oder diese zu aufwendig ist, kann durch die FEM näherungsweise eine Lösung gefunden werden. Hierzu wird die tatsächliche Geometrie in eine endliche (finite) Anzahl von Teilgebieten bzw. Elementen aufgeteilt. Für diese Teilbereiche werden Ansatzfunktionen definiert, welche die physikalischen Eigenschaften in diesem Bereich abbilden können. Je feiner das Netz und komplexer die Elemente, so genauer in der Regel ist das Ergebnis aber auch desto größer der Rechenaufwand. Der Nutzer trifft somit einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand.

Die **Topologie-Optimierung** ist ein computerbasiertes Verfahren, bei dem in einem gegebenen Bauraum (Designraum) das nicht benötigte Material dezimiert wird. Der Bereich, der vom Optimierer nicht verändert wird, also nicht Teil des Designraums ist, wird Freeze-Bereich genannt. I.d.R. arbeitet der Optimierer dabei mit einer Gewichtsrestriktion bzw.

Volumenrestriktion. Dabei wird das verbleibende Material so verteilt, dass die Spannungen minimiert werden. Der in diesem Projekt genutzte Solver des Optimierungsproblems ist OptiStruct, welches im Programm Inspire von Altair eingebunden ist. Die Optimierung bedarf Restriktionen, die eine Belastung am Bauteil bewirken. Diese Belastung wird von einem oder mehreren Lastfällen abgeleitet. Am Beispiel des elektrischen Tretrollers ist der von den Projektpartnern als für das Knickgelenk am kritischsten erachtete Lastfall eine Vorderrad-Vollbremsung mit Abstützen des Fahrers am Lenker, sodass der Lenker als langer Hebel ein Drehmoment auf das Knickgelenk erzeugt. Abbildung 14 zeigt die für das Knickgelenk kritischen auftretenden Kräfte bei einer Vorderrad-Vollbremsung.

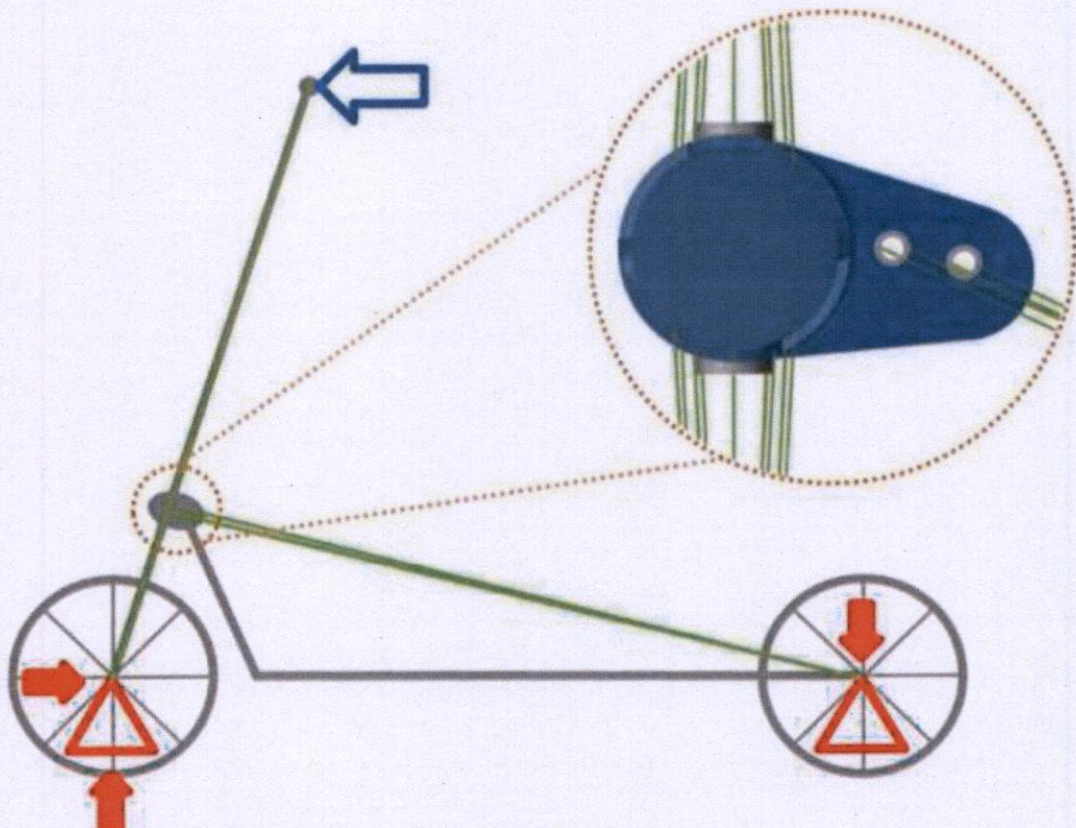


Abbildung 14: Lastfall Vorderrad-Vollbremsung des Tretrollers und wirkende Kräfte [15]

Die Kraft, die am Lenker in Fahrtrichtung wirkt, wird dabei mit 350 N angenommen. Der Lastfall wird als statisch betrachtet und am Vorderrad zweifach eingespannt (gegen die Fahrtrichtung durch Bremsen und gegen die Erdbeschleunigung durch den Aufstand) und am Hinterrad einfach eingespannt (gegen die Erdbeschleunigung durch den Aufstand). Die Geometrie des Rahmens und der Lenkstange wird als starr festgelegt und durch virtuelle Stabelemente vereinfacht (in Abbildung 14 in grün dargestellt). Als Material wird die Aluminiumlegierung AlSi10Mg, eine im Metall 3D-Druck verbreitete Legierung, mit in das Modell aufgenommen, bei der als maximale Spannung 97 MPa zugelassen werden [15].

Zielfunktion der Berechnung ist somit das minimale Gewicht, die zulässige Spannung mit Sicherheitsfaktor ist die Restriktion.

Im Anschluss auf eine Topologie-Optimierung kann durch Integration einer **Lattice-Struktur** weiter Gewicht eingespart werden. Lattice-Strukturen sind aus den Erkenntnissen der Bionik, welche Mechanismen, Prozesse und Strukturen aus der Natur in die Technik überträgt,

entwickelt. Die Lattice-Struktur bildet sich durch ein Gitter mehrerer Balken oder Stäbe. Abbildung 15 zeigt die Übertragung einer Knochenstruktur in ein Stab-Gitter (Lattice).

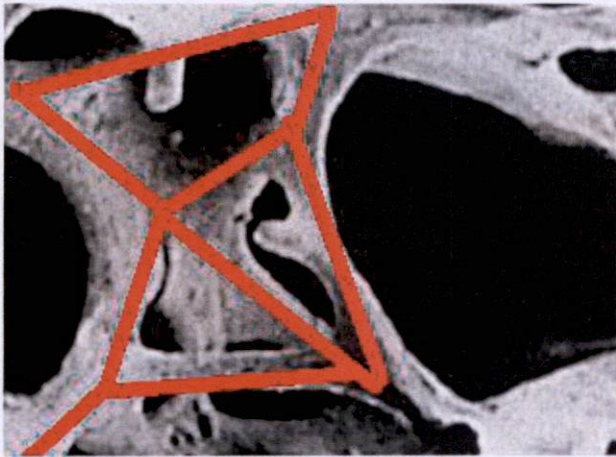


Abbildung 15: Vereinfachung einer Knochenstruktur zu einer 1D-Stabstruktur (Lattice); bearbeitetes Bild [16]

Um das Optimierungsverfahren besser kennenzulernen und die Umsetzung im SLM-Verfahren des Metall 3D-Drucks zu erproben, wird ein Beispielobjekt optimiert und gefertigt. Dieses ist zunächst ein zweiseitig eingespannter Quader. Die zweiseitige Einspannung ist der Freeze-Bereich, da sie als Anbindung vollumfänglich gebraucht wird, alles weitere ist Designraum, der für eine optimierte Struktur genutzt werden kann. Das Vorgehen ist in Abbildung 16 zu sehen.

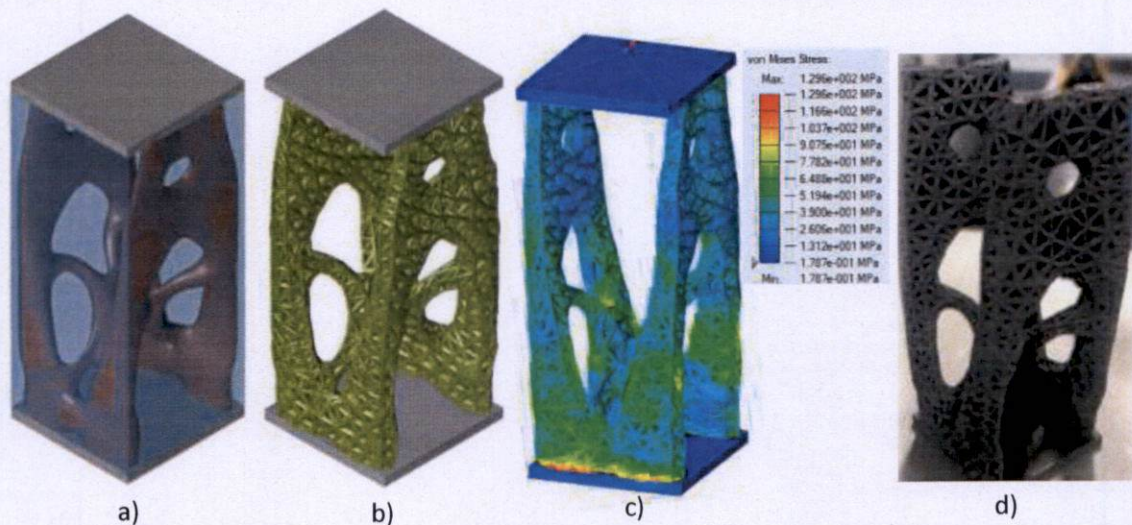


Abbildung 16: a) Ergebnis der Topologie-Optimierung des Beispielobjekts; b) Integration einer Lattice-Struktur; c) Überprüfung der Spannungen mit definiertem Lasteintrag und fester Einspannung; d) Metall 3D-Druck durch LIGHTWAY im SLM-Verfahren

Wie Abbildung 16 a) zeigt, wird eine deutliche Volumeneinsparung und somit eine Gewichtersparnis durch die Topologie-Optimierung erreicht, die durch den Einsatz einer Lattice-Struktur in Abbildung 16 b) weitergeführt wird. Das Beispielobjekt wird, wie in Abbildung 16 c) zu sehen ist, belastet und die Spannungen beurteilt und bei Einhaltung vordefinierter Maximalwerte durch LIGHTWAY gedruckt, Abbildung 16 d). Beim Begutachten des fertigen Teils fällt auf, dass einige Stabelemente fehlen oder fehlerhaft angebunden sind. Die Erkenntnis daraus ist, dass die Stabelemente und deren Verbindung nicht zu klein sein dürfen und bei der Auslegung eine ausreichende Sicherheit im Falle des Ausfalls einzelner Bereiche veranschlagt

werden muss. Eine Fehlersuche und Ursachenforschung bei der Fertigung wird in Kapitel 2.6 diskutiert.

Das erprobte Vorgehen wird nun auf das Knickgelenk aus Kapitel 2.4 angewandt. Hierbei wird lediglich der Außenzylinder mit Anbindung an den Rahmen optimiert. Der Innenzylinder kann als dünnwandiges Rohr mit Lenkerstangenführung quer dazu ebenso wie der Sperrbolzen und die Feder für eine Gewichtsreduktion außen vor gelassen werden. Da das Ergebnis insbesondere der Topologie-Optimierung nicht ansehnlich und eine für ein Sichtteil unübliche Oberfläche aufweist, wird im Anschluss an die Topologie-Optimierung die Geometrie näherungsweise nachkonstruiert. In weniger belasteten Innenflächen und -räumen wird das Vollmaterial durch eine Lattice-Struktur ersetzt. Abbildung 17 zeigt die einzelnen Schritte.

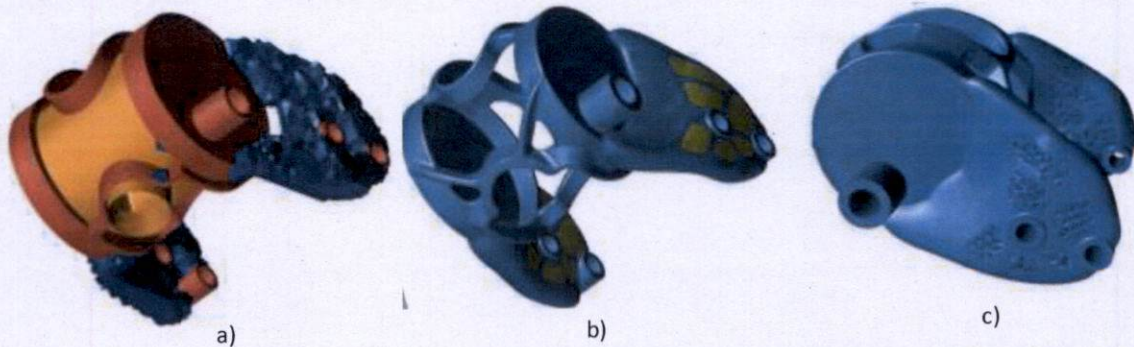


Abbildung 17: a) Ergebnis einer Topologie-Optimierung des Außenzylinders mit Freeze-Bereich in rot und Designraum in blau; b) nachkonstruierter Außenzylinder mit Bereichen für Lattice-Struktur in grün; c) Außenzylinder mit Lattice-Struktur [15]

Als Funktionsflächen, in Abbildung 17 a) alle in rot gekennzeichnet, werden die innenliegende Führung des Innenzylinders, die Durchführung für den Sperrbolzen, die Anschläge der Lenkstange und die Verschraubbohrungen deklariert und als Freeze-bereich unangetastet belassen. Mit Einfügen einer Lattice-Struktur in Abbildung 17 c) beträgt das Gewicht des Außenzylinders statt 2160 g in seiner ursprünglich konstruierten Form nun noch 640 g und somit nur noch 30 % des ursprünglichen. In weiteren Verfahren gelingt es Thurn, das Gewicht durch Verwendung sehr kleiner Stäbe auf 450 g und durch die Vernetzung mit sehr kleinen Elementen bei reiner Topologie-Optimierung auf 360 g zu reduzieren, wobei in diesen Fällen eine Herstellbarkeit mittels SLM-Verfahren nicht mehr gewährleistet werden kann. In allen Fällen werden die Festigkeitskriterien mit einer Sicherheit von 1,2 eingehalten. Abbildung 18 beinhaltet das Modell mit sehr feiner Lattice-Struktur und Balkenelementen à 0,2mm – 0,4mm Radius und Ausgangselementlänge von 2mm [15].

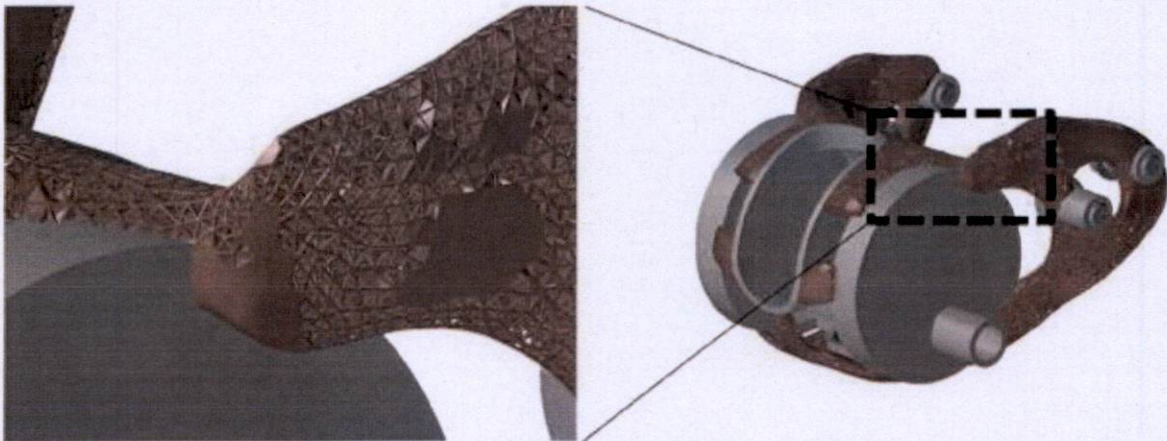


Abbildung 18: Optimierung mit sehr feiner Lattice-Struktur [15]

Für das weitere Vorgehen und die Fertigung wird das Modell aus Abbildung 17 c) jedoch ohne Lattice-Struktur weiterverfolgt, um keine Fehler im Bauteil durch das SLM-Verfahren zu riskieren. Das von der H-BRS überarbeitete Modell wird bei e-bility in das Gesamtfahrzeugmodell im CAD Programm integriert. In Abbildung 19 ist das Knickgelenk an der vorgesehenen Position aus Abbildung 11 angebracht.

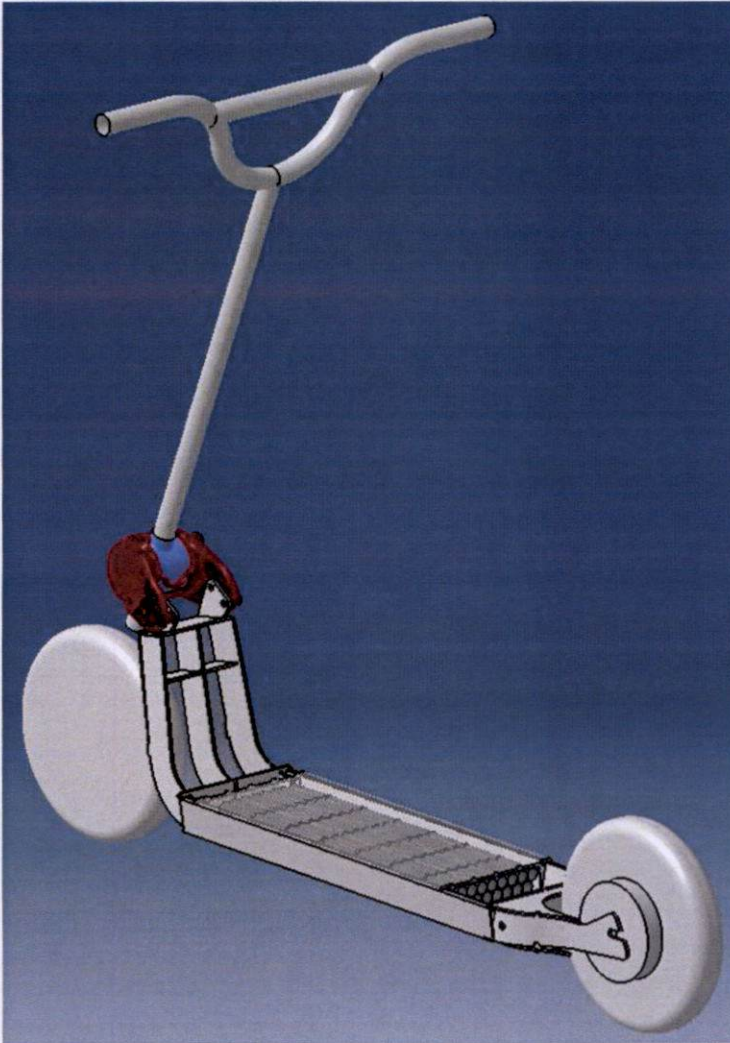


Abbildung 19: konzeptionierter Tretroller mit Einbau des 3D-gedruckten Knickelements

Die Bedienung des Sperrbolzens zur Entriegelung des Mechanismus ist seitlich im Stand gut zu erreichen, ohne dass der Roller wie bisher flach auf den Boden gelegt werden muss. Das bisherige Gelenk ist als tiefster Punkt einer Verschmutzung ausgesetzt, welche den Mechanismus blockieren kann. Dieses Hindernis ist nun nicht mehr zu erwarten, da Schmutz durch ein Schutzblech abgehalten werden kann. Auch Einbußen der Bodenfreiheit und Kollisionen mit Unebenheiten wie bisher sind nun nicht mehr relevant. Abbildung 20 zeigt den eingeklappten Zustand des Tretrollers.

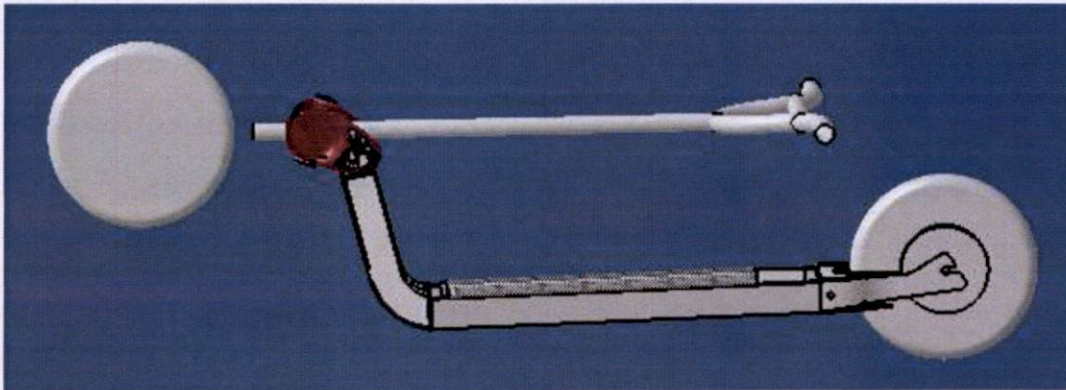


Abbildung 20: eingeklappter Tretroller

Für einen Prototypen eines Rollers können der Lenker, beide Räder mit Motor und Motorcontroller und die Bremseneinheit des bisherigen Modells genutzt werden. Der Rahmen des neuen Tretrollers wird zur Vorbereitung als Prototyp bei e-bility gefertigt, siehe Abbildung 21.



Abbildung 21: Rahmenfertigung des neu entwickelten Tretrollers bei e-bility, ohne Knickgelenk

Der Rahmen besteht aus Aluminium Blechen und Rohren. Das abgebildete Fußbrett (schwarz) ist in Kunststoff 3D gedruckt und kann später in der Serie als Alu-Strangpressteil ausgeführt werden. Es beinhaltet zugleich einen 3-fach größeren Akku als der bisherige Roller und kann als Tausch-Akku entnommen werden.

Nachdem es zu Fehlern im Druck des Beispielobjekts aus Abbildung 16 gekommen ist, ist eine Untersuchung der Qualität eines gedruckten Aluminiumteils insbesondere auf mechanische Eigenschaften vonnöten, bevor das Knickgelenk im SLM-Verfahren gefertigt werden kann. Eine gute Herangehensweise ist das Testen mit genormten Zugproben, um erwartbare und nach Datenblatt angegebene Festigkeitswerte zu überprüfen. Dem widmet sich das nachfolgende Kapitel.

2.6. Fertigung und Testing von Zugproben

Beim SLM-Druckprozess sind die Eigenschaften stark von Nachbearbeitung und gewählten Maschinenparametern abhängig. Um das Material hinsichtlich Datenblättern und Literatur einordnen zu können, werden Größen wie Zugfestigkeit und Bruchdehnung betrachtet. Mit den Projektteilnehmern wird in einer Sitzung beschlossen, dass eine erste Untersuchung der Einfluss des Bauraums und die Orientierung der Geometrie sein soll. Durch Zuhilfenahme der statistischen Versuchsplanung DoE (Design of Experiments) werden diese Einflüsse mit einem Minimum an Versuchen untersucht.

Die Zugproben werden an die Proben mit Form B aus der DIN 50125 angelehnt. Abweichungen treten fertigungsbedingt an der Oberfläche und an der Einspannung auf. Die Probe und die Zeichnung werden von e-bility konstruiert, die Fertigung übernimmt LIGHTWAY, die Untersuchung und Auswertung die H-BRS. In Abbildung 22 ist die Zugprobe dargestellt.

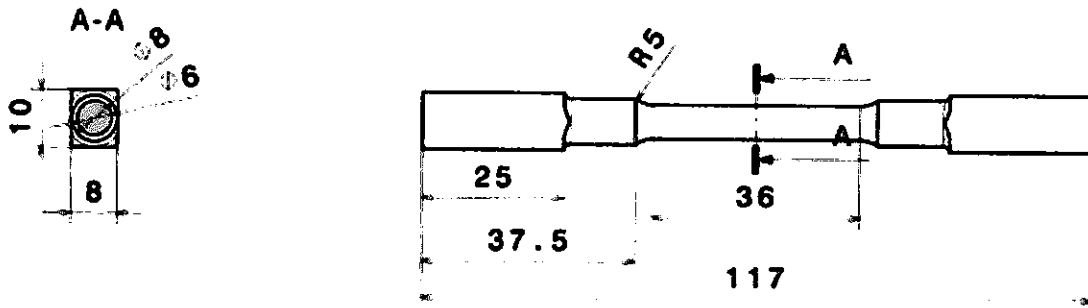


Abbildung 22: Zeichnung der genutzten Probengeometrie

Die Proben werden an den äußeren Vierkantflächen eingespannt, in der Abbildung 22 mit 25 bemaßt. Gezogen wird bis zum Bruch, gemessen wird der E-Modul und die Zugfestigkeit und Dehnung bei Bruch. Aus dem E-Modul soll die Streckgrenze (Übergang von elastischer zu plastischer Verformung) bestimmt werden, auf die in der Mechanik in der Regel Bauteile ausgelegt werden.

Unter Berücksichtigung der Oberflächenrauheit wird als kleinster passender Durchmesser statt des in der Zeichnung angegebenen Werts von 6mm der Wert 5,9 mm angenommen. Bei der Prüfung der Proben kann dieser Wert bestätigt werden, sodass die Geometrie der Proben korrekt gefertigt ist.

Die Eigenschaften der Aluminium-Silizium-Legierungen AlSi10Mg wird vom Materialhersteller für LIGHTWAY wie folgt angegeben:

- E-Modul $75 \pm 10 \text{ GPa}$
- Zugfestigkeit $460 \pm 20 \text{ MPa}$
- Streckgrenze $270 \pm 10 \text{ MPa}$
- Bruchdehnung $9 \pm 2 \%$

Untersucht werden sollen zwei mögliche Einflüsse auf die Qualität: die Position auf dem Druckbett und die Orientierung 0° (liegend), 45° (schräg) und 90° (stehend). Um nicht jede Möglichkeit der Position und der Orientierung abdecken zu müssen ($3^3 = 27$ Proben), werden die Proben wie in Abbildung 23 angeordnet (9 Proben).

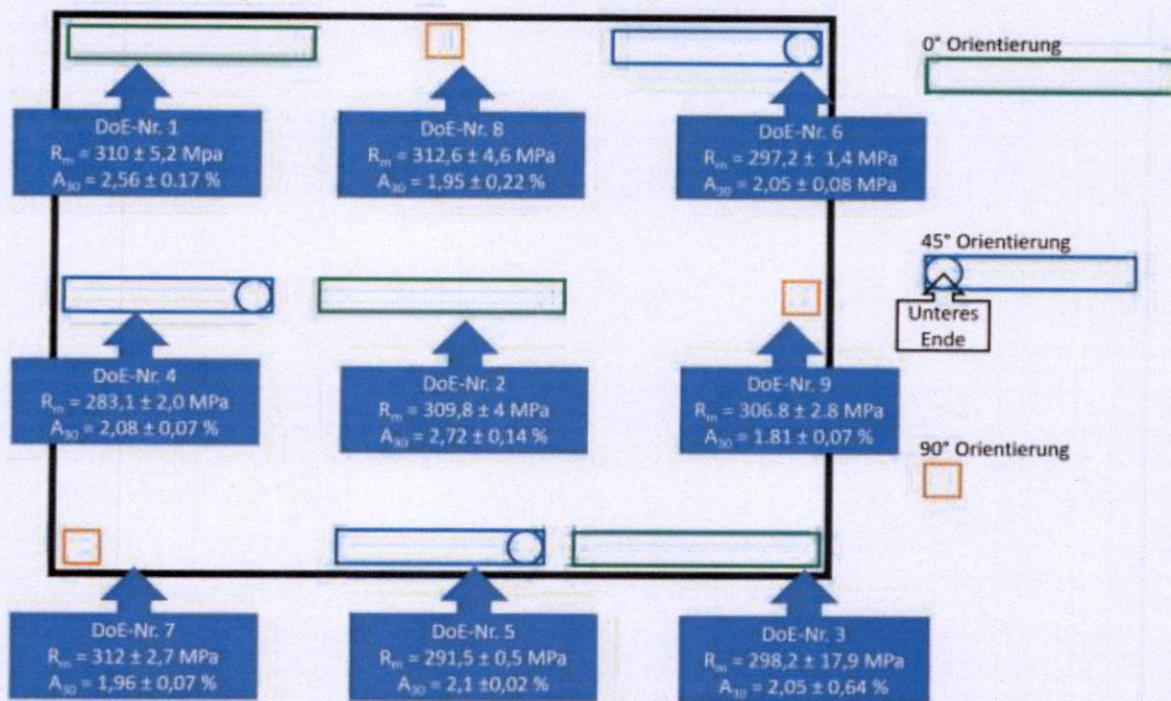


Abbildung 23: Verteilung der Proben auf der Platte und mittlere Zugfestigkeit R_m und Bruchdehnung A_{30}

Um Ausreißer identifizieren zu können, werden 5 Chargen (A-E) und somit in Summe 45 Proben von LIGHTWAY gefertigt. Die Proben mit der Nummer DoE 1-3 sind liegend auf dem Druckbett positioniert. Bei DoE 1 brechen eine und bei DoE 3 sogar zwei Proben der jeweils 5 Chargen bereits bei der Fertigung aufgrund der Eigenspannung während des Abkühlvorgangs. Da die beiden äußeren Enden mit dem Druckbett verschweißt sind, ist ein Längenausgleich beim Abkühlen nicht möglich, was zu großen Eigenspannungen oder Bruch führt. DoE 4 – 9 sind von dieser Problematik der starren Anbindung am Druckbett nicht betroffen, da sie auf Stützmaterial (DoE 4-6 bei 45°) oder nur auf der kleinen seitlichen Oberfläche der Klemmbereiche (DoE 7-9 bei 90°) mit dem Druckbett verbunden sind und keine derartigen Spannungen zum Druckbett aufgebaut werden.

Beim Zugversuch weisen die Proben starke Unterschiede in der Bruchart (gerade, gemischt oder schräg) und eine Bruchposition sowohl mittig als auch weit außermittig außerhalb des zu erwartenden Bereichs auf ($\pm 18 \text{ mm}$ ausgehend von 0). Bei der Messung des E-Moduls werden nicht plausible Werte ermittelt. Nach einer Expertenabschätzung werden Messfehler als Grund dafür herangezogen. Die aus dem E-Modul berechnete Streckgrenze kann somit auch nicht verlässlich bestimmt werden.

Der Median über alle Chargen ist für die einzelnen Proben für Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Abbildung 23 mit aufgeführt. Die Zugfestigkeit reicht von 283 MPa der Probe 4 mit 45° Orientierung bis $312,6 \text{ MPa}$ mit 90° Orientierung. Die Spanne beträgt somit 30 MPa . Die Bruchdehnung ist über einen sehr großen Bereich von 0.6% bis fast 6% verstreut, mit einem Erwartungswert bei ca. 2%. Somit liegen sowohl die Zugfestigkeit weit unter den im Datenblatt angegebenen $460 \pm 20 \text{ MPa}$ als auch die Bruchdehnung unter den genannten $9 \pm 2 \%$. Die deutlich sprödere Eigenschaft ist für den Anwendungsfall des Kickgelenks ungünstig, da es neben dem normalen Fahrbetrieb insbesondere beim Ein- und Ausklappen Schläge erfährt.

Die deutlich verminderte Zugfestigkeit und Bruchdehnung und die nicht bekannte Streckgrenze schränken die Optimierungsmaßnahmen nach Kapitel 2.5 ein.

2.7. Life Cycle Assessment

Ziel der Lebenszyklusanalyse ist ein Vergleich zwischen einem durch Aluminium-Strangextrusion und Fräsen hergestellten Knickgelenk, die zwei Fertigungsverfahren, die massebezogen das bisherige Knickgelenk zum Großteil ausmachen, und einem Topologie-optimierten generativ gefertigten Knickgelenk für den Tretroller. Verglichen werden sollen die Fertigungsverfahren im Hinblick auf Meeres-, Frischwasser- und Land-Eutrophierung, abiotische Erschöpfung, Klimawandel- und Erderwärmungs-Potential, Versauerungs-Potential und Rohstofferschöpfung. Die Systemgrenzen sind auf der Anfangsseite die Primär-Aluminium Herstellung, auf der Endseite das fertige Knickgelenk. Miteinbezogen wird das Recycling von anfallenden Aluminiumabfällen, die Fertigung der Bauteile erfolgt allerdings ausschließlich aus Primär-Aluminium. Nicht in die Bilanzierung einfließen sollen Transportwege, da die Herkunft der Teile nicht geklärt ist. Die Entsorgung und die Lebensdauer der Bauteile ist auch ausgenommen, da keine Lebensdauerabschätzungen existieren. Das Bewertungskriterium ist also die Existenz des fertigen Bauteils.

Beim Erarbeiten einer Bilanz für das generativ gefertigte Knickgelenk offenbaren sich einige Hürden und Hindernisse für eine belastbare und präzise Analyse. Insbesondere die Verbrauchsdaten der SLM-Anlage sind nicht bekannt, eine vorhandene Angabe von 6 kW wird als maximal mögliche Leistungsaufnahme angenommen. Je nach Orientierung und Lage und dementsprechend benötigtes Stützmaterial mit einhergehender Nachbearbeitung und je nach Schichtdicke sind die Parameter in mehreren Größenordnungen abweichend. Die gesamte Auswertung wird dem vorliegenden Bericht beigelegt. Abbildung 24 und Abbildung 25 beinhalten Diagramme zum globalen Erwärmungs-Potential, angegeben als CO₂-Äquivalent.

GWP 100 years

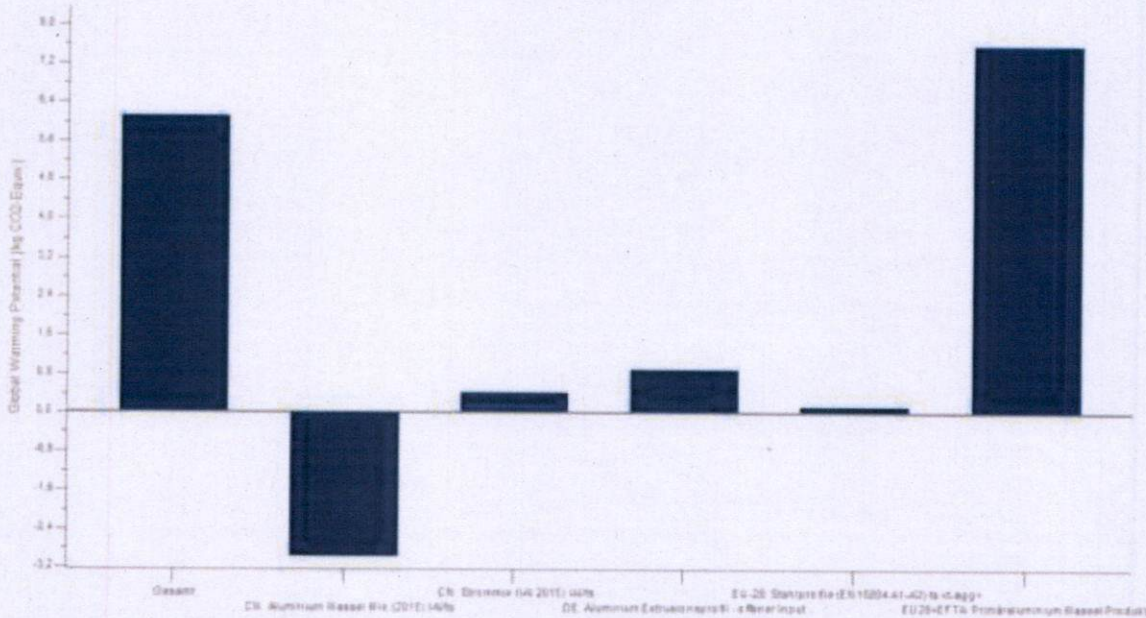


Abbildung 24: Globale-Erwärmung-Potential über 100 Jahre des durch Strangextrusion und Fräsen hergestellten Knickgelenks (nach CLM)

Die Gesamtbelastung des Knickgelenks nach konventioneller Fertigung durch Strangextrusion und Fräsen beläuft sich wie in Abbildung 24 auf 6,2 kg. Der Großteil fällt hierbei auf die Herstellung des Primäraluminiums.

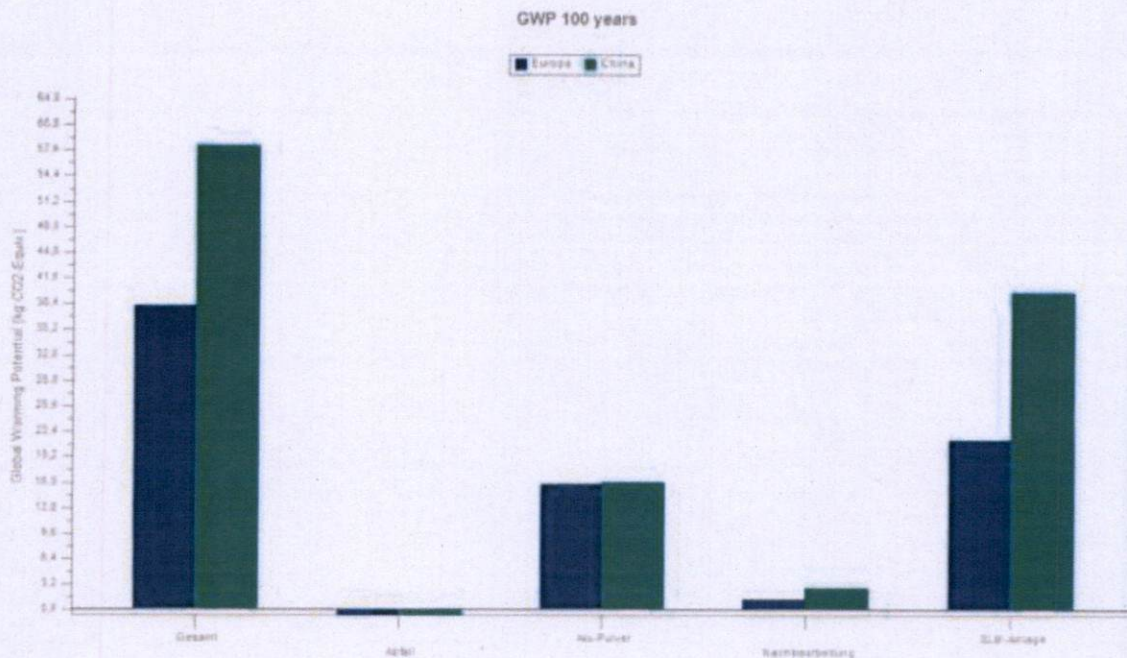


Abbildung 25: Globale-Erwärmung-Potential über 100 Jahre des durch SLM hergestellten Knickgelenks (nach CLM)

Die Gesamtbelastung gefertigt durch das SLM-Verfahren liegt mit europäischem Strommix bei ungefähr 38,4 kg Kohlendioxid-Äquivalenz, mit chinesischem Strommix bei ungefähr 58,2 kg Kohlendioxid-Äquivalenz, wobei der Druckprozess selbst durch den hohen Energieverbrauch

den größten Anteil ausmacht. Bei Fertigung in Europa wäre die Belastung bei generativer Fertigung um das 6-fache höher, als bei konventioneller Fertigung.

Abschließend lässt sich festhalten, dass sich der Vergleich der beiden Fertigungsverfahren Strangextrusion und Fräsen gegenüber SLM schwierig gestaltet. Durch die generative Fertigung spielen große Ungewissheiten in die Bewertung und Erstellung der Lebenszyklusanalyse mit ein. Die Pulverherstellung ist ein energieaufwändiger Prozess, für den keine belastbare Datenbasis existiert. Auch die generative Fertigung kann prozessbedingt nicht pauschalisiert werden, da zu viele Parameter die Fertigungsdauer, den Energiebedarf und die nötige Nacharbeit beeinflussen. Ein Vergleich der beiden Fertigungsverfahren mithilfe der vorliegenden Daten ist nicht möglich. Eine Analyse von einem bereits in der Serie befindlichen Bauteil mit den entsprechenden konkreten Parametern ist anzustreben.

2.8. Projektauswertung

Auf Grundlage der Unsicherheiten in der Fertigung durch schwankende Materialkennwerte (Zugfestigkeit und Bruchdehnung), die durchweg deutlich unter denen im Datenblatt liegen und die Tendenz der Ökobilanz, dass durch das SLM Verfahren keine erkenntlichen umweltschonende Auswirkungen zu erwarten sind und die Tendenz eher zu höheren Belastungen zeigt, wird das konstruierte und optimierte Knickgelenk nicht durch LIGHTWAY produziert. Schwerpunkt der Fertigung im Projekt liegt darin, das Beispielobjekt und die Prüfkörper herzustellen.

Die im Projektantrag und in Kapitel 1 formulierten Ziele werden weitestgehend erreicht. Bei der Konzeptfindung führt der Designwettbewerb zu keinem Ergebnis, da sich keine Teilnehmer finden lassen. Bei einer internen Konzeptfindung werden 5 Konzepte vorgestellt. Bei einem Bewertungsprozess wird das favorisierte Konzept weiterverfolgt. Die erweiterte Konzeptfindung überschreitet die gesetzten Ziele und bedeutet einen zusätzlichen Aufwand. Für eine Fertigbarkeit wird das ausgewählte Konzept in der Konstruktionsphase angepasst. Zur Gewichtsreduktion werden erfolgreich eine Topologie-Optimierung und Integration einer Lattice-Struktur umgesetzt. Bei der Erprobung der Technologie an einem Beispielobjekt treten Probleme bei kleinen Strukturen auf. Daraufhin wird das SLM-Verfahren genauer untersucht und Zugversuche durchgeführt. Diese genauere Untersuchung des Verfahrens ist nicht im Projektplan enthalten und bedeutet wie die Konzeptfindung einen zusätzlichen Aufwand. Die Erstellung eines Life-Cycle-Assessments wird durch ungenaue oder nicht bekannte Parameter und Daten erschwert und das Ergebnis ist nicht belastbar.

Aufgrund des Mehraufwands, der während des Projekts entstanden ist, und der Unsicherheit der tatsächlichen mechanischen Eigenschaften des gedruckten Knickgelenks, aber auch mit der Tendenz aus der Ökobilanz, dass das derart gefertigte Gelenk nicht die erhofften ökologischen Verbesserungen mit sich bringt, wird es nicht mittels SLM-Verfahren gefertigt. Hier wird das Projektziel verfehlt. Der parallel dazu aufgebaute neue Tretroller wird entsprechend nicht weiter verfolgt.

Die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern ist als gut zu bewerten. Regelmäßige Treffen sichern den aktuellen Wissenstand aller Beteiligten, engere Zusammenarbeit weniger Beteiligter findet auch dazwischen statt. Da in diese Arbeiten nicht alle Beteiligten mit eingebunden sind und bei den Treffen nicht immer alle Beteiligten anwesend sind, sind einige nicht auf dem gleichen Kenntnisstand über den Projektfortschritt. Hierbei wird deutlich, wie wichtig die

Kommunikation ist über eine solch lange Projektzeit mit vielen Projektpartnern und unterschiedlichen Arbeitspaketen und Teilprojekten.

3. Fazit

Im Gemeinschaftsprojekt Rofee mit den Projektpartnern e-bility GmbH, LIGHTWAY GmbH & Co. KG und der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg wird für einen neuen elektrisch betriebenen Tretroller ein Knickgelenk zum Zusammenfallen des Rollers entwickelt, konstruiert und gewichtsbezogen optimiert. Besonderheit ist die generative Fertigung, bei der sich nahezu grenzenlose geometrische Möglichkeiten bieten und eine komplexe Mechanik wie ein Gelenk in einem Fertigungsschritt realisierbar ist. Das Ziel ist es, durch Vereinfachen des Prozesses Energie und Ressourcen einzusparen. Die Konzeptentwicklung und -umsetzung kann erfolgreich durchgeführt werden. Bei der Gewichtsoptimierung kann durch Topologie-Optimierung und den Einbau einer Lattice-Struktur das Gewicht eines Bauteils auf ein Drittel reduziert werden. Bei der Fertigung treten Probleme auf, eine sehr feine Lattice-Struktur zu drucken. Bei Zugversuchen 3D gedruckter Aluminiumproben ist eine geringe Prozesssicherheit festzustellen, da große Abweichungen bei Zugfestigkeit und Bruchdehnung zwischen den Proben und zu den Angaben im Datenblatt auftreten. Dies ist bei etwaiger Fertigung und bei den Optimierungsmaßnahmen zu berücksichtigen und mit einer ausreichenden Sicherheit auszugleichen. Bei der Aufstellung einer Ökobilanz erschweren fehlende Daten und große Schwankungen in Abhängigkeit der Druckparameter (Lage, Orientierung, Schichtdicke, Nachbearbeitungsaufwand, etc.) eine präzise Erfassung der ökologischen Auswirkungen der generativen Fertigung des Knickgelenks. Mit sehr vereinfachten Annahmen geht die Tendenz in Richtung höherer Umweltbelastungen durch die generative Fertigung im Vergleich zur konventionellen Fertigung und erzielt nicht wie erhofft eine Verbesserung. Aufgrund dessen und infolge der Prozessunsicherheiten wird das an seine Belastungsgrenzen optimierte Bauteil letztlich nicht gefertigt.

Für zukünftige Arbeiten ist bei der Betrachtung der Ökobilanz auch der Werkzeugbau und nicht nur die reine Fertigung zu beachten. Besonders bei Guss- und Schmiedeteile, aber auch beim Strangextrudieren müssen energie- und rohstoffintensive Werkzeuge mit bis zu mehreren Tonnen Gewicht gefertigt werden. Besonders bei geringen Stückzahlen, in Übergangszeiten und im Prototypenbau ist der 3D-Druck ohne jegliches Werkzeug alternativlos. Zu Demonstrationszwecken kann für die Projektvorstellung das Gelenk falls nötig gedruckt werden, auch wenn es nicht im Roller verbaut wird.

4. Literaturverzeichnis

- [1] RWTH Aachen, „Lasersintern oder Laserschmelzen?“ [Online]. Available: <http://feuerfestkolloquium.de/www/pages/keramik/lasersintern-de.html>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [2] eos, „Gemeinsame Studie "Life Cycle Cooperation" von EADS IW und EOS,“ Oktober 2013. [Online]. Available: https://cdn0.scrvt.com/eos/public/10ede2705da718b1/a8d351a6c741b553906a2b8b42ac7218/EADS_White_Paper_de.pdf. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [3] industrieanzeiger, „Schneller als Zerspanen und genauer als Gießen,“ [Online]. Available: <https://industrieanzeiger.industrie.de/allgemein/schneller-als-zerspanen-und-genauer-als-giessen/>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [4] 3d-laserdruck.de, „Selektives Laserschmelzen,“ [Online]. Available: <https://www.3d-laserdruck.de/leistungen/selektives-laserschmelzen>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [5] scope-online, „Interview: "3D-Druck ermöglicht bionische Flugzeugkonstruktionen",“ 14 November 2014. [Online]. Available: <https://www.scope-online.de/werkstoffe/interview-----3d-druck-ermoeglicht-bionische-flugzeugkonstruktionen-.htm>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [6] Fraunhofer Institut Lasertechnik, „Neue Perspektiven zum Rapid Manufacturing von Aluminiumbauteilen für die Serienproduktion,“ 20 Oktober 2008. [Online]. Available: <https://www.foundry-planet.com/de/d/neue-perspektiven-zum-rapid-manufacturing-von-aluminiumbauteilen-fuer-die-serienproduktion/>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [7] R. Lachmayer, R. Lippert und T. Fahlbusch, 3D-Druck beleuchtet - Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung, Berlin Heidelberg: Springer-Vieweg, 2016.
- [8] E. Miller, „Phoenix Analysis & Design Technologies,“ 2 März 2015. [Online]. Available: http://www.padtinc.com/blog/wp-content/uploads/2015/02/Design-Simulation-for-3d-Printing-2015_02_03-1.pdf. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [9] A. Krämer, „3d-grenzenlos,“ 12 Februar 2016. [Online]. Available: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/zukunft-visionen/edag-soulmate-auto-aus-3d-drucker-27158073/>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [10] P. Funk, „Ingenieur.de,“ 2 Februar 2014. [Online]. Available: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/cad-cam/weltweit-erstes-fahrrad-metall-3d-drucker/>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [11] Provido, „3druck.com,“ 9 Mai 2016. [Online]. Available: <https://3druck.com/featured/nextgen-spaceframe-edag-blm-lzn-und-concept-laser-im-experteninterview-zum-thema-leichtbau-und-mehr-flexibilitaet-in-der-fertigung-von-automobilen-2344626/>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [12] B. Yusuf, „Ernst&Young: German Companies Lead in 3D Printing Usse,“ 25 Juli 2016. [Online]. Available: <https://all3dp.com/ernst-young-global-3d-printing-report/>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [13] D. E. Marquardt, „Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren,“ April 2016. [Online]. Available: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/vdi-handlungsfelder-additive-fertigungsverfahren>. [Zugriff am 11 02 2020].

- [14] J. Oschwald, „nachhaltig.digital,“ 14 November 2018. [Online]. Available: <https://nachhaltig.digital/index.php?menuecms=2830&id=296>. [Zugriff am 13 Februar 2020].
- [15] C. Thurn, „Numerische Methode zur Optimierung einer Lattice-Struktur im Rahmen einer Fahrzeugentwicklung,“ Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Sankt Augustin, 2019.
- [16] Cortana, „Normal Histology and Composition,“ 23 Oktober 2017. [Online]. Available: <https://www.orthogate.org/press/musculoskeletal-medicine/biology/bone/normal-histology-composition/>. [Zugriff am 12 Februar 2020].
- [17] U. Petschow, J.-P. Ferdinand, S. Dickel, H. Flämig, M. Steinfeldt und A. Worobei, „Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit,“ in *Schriftenreihe des IÖW 206/14*, Berlin, 2014.
- [18] H. Lipson und M. Kurmann, *Fabricated the new world printing*, Hoboken: Wiley-Blackwell, 2013.
- [19] M. Bühner, „First LCA on 3D Printer Sustainability Green Manufacturing Revolution or Overrated Gadget?,“ 02 Juli 2013. [Online]. Available: <https://www.ipoint-systems.com/blog/first-lca-on-3d-printer-sustainability-green-manufacturing-revolution-or-overrated-gadget/>.
- [20] J. Woodcock, „Additive Manufacturing and the Environment,“ *tct magazine / Ausgabe 4(18)*, pp. 33-36, 2011.
- [21] S. H. Huang, L. Peng, A. Mokusdar und L. Hou, „Additive Manufacturing and Its Societal Impact: a literature Review,“ *International Journal of Advanced Manufacturing Technology / Ausgabe 62*, pp. 1-13, 2012.
- [22] D. L. Bourell, M. C. Leu und D. W. Rosen, *Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Fabrication. Roadmap for Additive Manufacturing Workshop*, Arlington: University of Texas, 2009.
- [23] Institute for the Future, „The Future of Open Fabrication – Report,“ August 2011. [Online]. Available: http://www.iftf.org/uploads/media/SR-1390_FutureOfOpenFab.FINAL_sm.pdf.
- [24] *Industrieanzeiger*, „Industrieanzeiger: Schneller als Zerspanen und genauer als Gießen,“ 28 11 2019. [Online]. Available: <https://industrieanzeiger.industrie.de/allgemein/schneller-als-zerspanen-und-genauer-als-giessen/>.

Kumpas
electric

Anhang

A Kommentare der Projektpartner zu den Chancen dieses Kooperationsprojekts

Prof. Dr. Welf Wawers, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg: Die Vorteile der Kooperation der H-BRS mit den Unternehmen e-bility und LIGHTWAY liegen zum einen in der Nutzung der für das aktuelle Projekt nötigen und bei den Projektpartnern vorhandenen technologischen Kompetenzen und Einrichtungen. Speziell mit dem Projektpartner Lightway bietet sich der H-BRS die Möglichkeit zum praktischen Einstieg in die neuartige 3D-Drucktechnologie für metallische Bauteile.

Darüber hinaus wird durch derartige Kooperationen sichergestellt, dass die Hochschule die Nähe zur Industrie bzw. zur Berufspraxis beibehält. Außerdem können dadurch auch praxisnahe Bachelor- und Masterarbeiten angeboten werden. Und schließlich ermöglichen solche Industriekooperationen nicht selten auch den Absolventen der Hochschulen den beruflichen Einstieg nach Abschluss des Studiums.

Thomas Hilger, Geschäftsführer bei der LIGHTWAY GmbH & Co. KG: LIGHTWAY als junges StartUp Unternehmen mit einer neuen Fertigungstechnologie sieht die Vorteile der Kooperation mit der Hochschule-BRS und dem mittelständigen Unternehmen e-bility darin, dass neuartige 3D gedruckte Bauteile in ein verkaufsfähiges Produkt integriert werden. Dabei bietet die H-BRS als einer der Projektpartner LIGHTWAYS die Möglichkeit, ganz neue Designansätze zu durchdenken und analytisch zu betrachten. Des Weiteren bietet das Unternehmen e-bility uns die Möglichkeit, ein sehr leichtes 3D gedrucktes Bauteil in einer Serienanwendung zu integrieren. Nicht selten werden aus solchen Kooperationen Wettbewerbsvorteile der einzelnen Projektpartner generiert.

Jannic Oswald, Entwicklungsingenieur bei der e-bility GmbH: Mit der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, e-bility und Lightway werden Forschung, Entwicklung und Fertigung zusammengeführt. Für uns als kleines, produzierendes Unternehmen ist eine solche Kollaboration von immensem Vorteil, um ein ehrgeiziges Projekt mit Kompetenzen zu erweitern und auf starke Partner aufzuteilen. Die innovative 3D-Druck Fertigung erfordert neue Ansätze und Ideen, für die der Austausch und die Konversation förderlich sind und wofür Lightway als Spezialist wichtigen Input liefert. Im Rahmen von Abschlussarbeiten an der H-BRS lassen sich diese Ansätze auch in der Tiefe verfolgen und mit dem Stand der Technik abgleichen. Nicht zuletzt erleichtert die lokale Nähe aller Partner die Zusammenarbeit deutlich.

B Ausschreibung für den Design-Wettbewerb zur Konzeptionierung des 'Faltmechanismus'



Design-Wettbewerb Faltmechanismus

Projektarbeit zur Erarbeitung eines 'Faltmechanismus' für den elektrischen Tretroller Kumpan 1950

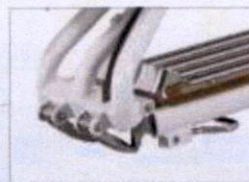
MOTIVATION

Design trifft auf Technik. Auf kaum ein anderes Produkt trifft das so sehr zu wie auf den Kumpan 1950. Der elektrische Klapp-Tretroller im Retro-Design geht in die zweite Runde. Für das neue Modell des 1950er wird der Klappmechanismus überarbeitet. Derzeit besteht er aus einem Scharniergelenk mit einem Exzenter Spanner als Arretierung (siehe Abbildung). Er besteht aus 24 Bauteilen, die in mehreren unterschiedlichen Fertigungsprozessen (Gießen, Stanzen, Drehen, Fräsen, Bohren, Biegen) gefertigt und zusammengebaut werden. Ziel der Änderung ist ein aus möglichst wenigen Bauteilen aufgebauter, im **3D-Metalldruckverfahren** in bestenfalls einem Druckprozess herstellbarer Mechanismus. Das Einfügen eines Fremdbauteils in den Druckprozess kann mit eingeplant werden (z.B. Einsetzen einer Feder)

PROJEKT BESCHREIBUNG

Die Dauer des Wettbewerbs ist 3 Monate, startend Anfang Juli. Ziel ist nicht ein fertiges Produkt, sondern ein gut durchdachtes, funktionierendes Konzept. Folgende Vorgaben sind zu beachten:

- Fahrzeug möglichst kompakt zusammenfaltbar
- Möglichst wenige Bauteile vorhanden
- Beidseitige Anbindung möglich (Schraubverbindung, Schweißverbindung, Klemmverbindung...)
- Bewertet wird zudem nach Design im Gesamtfahrzeug-Zusammenhang, Umsetzbarkeit, Stabilität und Kosten.



Klappmechanismus Kumpan

Haben wir Ihr Interesse geweckt? Dann bewerben Sie sich bis zum **13. Juli 2018** und gewinnen Sie einen neuen Kumpan 1953. Abgabefrist ist der **30. September 2018**.

Als Preis für die beste Idee wird ein neuer **Kumpan 1953** vergeben!



Kontakt: jannic.oschwald@ebilty.de | 02642 - 999 80 - 25

Kumpun
electric

Hochschule	Standort	Fachbereich	Studiengang	Ansprechpartner			Angefragt	Follow-up	Verteilt
				Name	Fachbereich	Emailadresse			
Design									
Hochschule Fresenius	Idstein/ Wiesbaden	Wirtschaft und Medien	3D-Design und Management	Prof. Dr. phil. Achim Menges	Studiendekan	menges@hs-fresenius.de	Ja	Ja	Ja
	Köln			Prof. Christopher Wickenden	Studiendekan 3D-Design & Management (B.A.)	christopher.wickenden@hs-fresenius.de			
FH Münster University of Applied Sciences	Münster	School of Design	Produktdesign	Prof. Dipl.- Des.Torsten Wittenberg	Produktdesign Konzeption und Entwurf	wittenberg@fh-muenster.de	Ja	Ja	
Köln International School of Design	Köln		Design for Manufacturing	Prof. Hatto Grosse	Design for Manufacturing	hatto.grosse@th-koeln.de	Ja	Ja	
TH Köln	Köln	Ingenieurwissen- schaften	Produktdesign und Prozessentwicklung Fahrzeugtechnik (Bachelor)	Prof. Thomas Münster	Studienberater Ingenieurwesen	thomas.muenster@th-koeln.de	Ja	Ja	Ja
Media Akademie Hochschule Stuttgart	Stuttgart	Design	Industrial Design	Prof. Andreas Fischer	Lehrstuhls Industrial-Design	fischer@media-hs.de	Ja	Ja	
Hochschule Niederrhein	Krefeld	Design	Produkt und Objekt-design	Prof. Boris Gorin	Objekt-design	boris.gorin@hs-niederrhein.de	Ja		
Folkwang Universität der Künste	Essen	Design	Industrial Design	Prof. Stefan Neudecker	Industrial Design, Design by Technology	stefan.neudecker@folkwang.uni.de	Ja	Ja	
Bergische Universität Wuppertal	Wuppertal	Design	Industrial Design	Prof. Schönherr	Studienfachberatung	schoenhe@uni-wuppertal.de	Ja	Ja	
Ecosign	Köln	Design	Produkt-design			akademie@ecosign.net	Ja	Ja	Ja
Technik									
TH Bingen	Bingen	Maschinenbau	Maschinenbau	Prof. Dr.-Ing. Arno Zürbes	Ansprechpartner Maschinenbau	zuerbes@th-bingen.de	ja	Ja	
Hochschule Kaiserslautern	Kaiserslautern	Maschinenbau	Maschinenbau	Prof. Dr.-Ing. Norbert Gilbert	Ansprechpartner Maschinenbau	norbert.gilbert@hs-kl.de	ja	Ja	
Hochschule Koblenz	Koblenz	Maschinenbau	Maschinenbau	Prof. Dr. Thomas Schnick	Dekan Maschinenbauer	schnick@hs-koblenz.de	ja	Ja	Ja
Hochschule Trier	Trier	Maschinenbau	Maschinenbau Fahrzeugtechnik Elektromobilität	Prof. Dr. Otten	Ansprechpartner Maschinenbau	otten@fh-trier.de	ja	Ja	Ja
Hochschule Bochum	Bochum	Elektromobilität	Elektromobilität	Frau Ellen Höhner	Sekretariat	ellen.hoehner@hs-bochum.de	ja		ja
H-BRS	Siegburg	Maschinenbau	Maschinenbau	Elvira Jankowski		Elvira.Jankowski@h-brs.de	ja		ja