

Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe
Fachbereich 7 – Produktions- und Holztechnik



Lastenräder aus Sperrholz – Eine Machbarkeitsanalyse

Vorgelegt von:

Melwin Röllecke

melwin.r@web.de

Studiengang: Holztechnik

Abgabe: 18.05.2024

Betreuer: Prof. Dr.-Ing Adrian Riegel

Korreferent: Dipl.-Ing. Volker Buchholz

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VI
0 Zusammenfassung	1
1 Einleitung.....	3
1.1 Problemstellung.....	3
1.2 Ziel der Arbeit	4
1.3 Vorgehensweise	4
2 Stand der Technik.....	6
2.1 Einsatzmöglichkeiten von Lastenfahrrädern	6
2.2 Bauformen von Lastenrädern	7
2.2.1 Das Lieferbike	8
2.2.2 Das Longjohn	9
2.2.3 Das Longtail	10
2.2.4 Das Lastentrike.....	10
2.2.5 Das Schwerlastenfahrrad	11
2.3 Lastenfahrräder aus Holzwerkstoffen	13
2.3.1 Lastenfahrrad aus Birkensperrholz Projekt 1	13
2.3.2 Lastenfahrrad aus Bambussperrholz Projekt 2	14
2.3.3 Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex	15
2.3.4 Das Wik-E-Cargo-Bike.....	16
2.3.5 Das Woody Cargo	17
2.3.6 Kommerzielles Lastenfahrrad mit Elektro-Motor	17
2.4 Dimensionierung von Lastenfahrrädern	19
2.4.1 Rechtliche Grundsätze bei der Auslegung von Lastenfahrrädern..	19
2.4.2 Anforderungen und Prüfverfahren für Transport- und Lastenfahrräder nach DIN 79010:2020-02.....	20
2.4.3 Eigenschaften von Sperrholz.....	21

2.4.4	Händische Auslegung von Lastenfahrrädern	24
2.4.5	Leichte einspurige und mehrspurige Lastenfahrräder nach DIN EN 17860	26
2.4.6	Elektromotorisch unterstützte Räder nach DIN EN 15194	28
3	Projekthistorien der Lastenfahrräder und Review des Designs	29
3.1	Projekthistorie des Longjohns	29
3.2	Weiterentwicklung zum Lastentrike	34
3.3	Konstruktionsdetails und Review des Designs	38
3.3.1	Einzapfungen	38
3.3.2	Profilleisten	39
3.3.3	Auskreuzung und Verrippung	40
3.3.4	Klebenähte aus Epoxidharz	41
3.3.5	Einsatz von kohlefaserverstärktem Kunststoff	43
3.3.6	Bohrungen zur Positionierung	44
3.3.7	Konstruktiver und chemischer Holzschutz	45
3.3.8	Ausgießen von Bohrungen	46
3.3.9	Sicherung der Sitzfläche	47
3.3.10	Einsatz von Aluminium-Profilen	48
3.3.11	Freies Holzbiegen	50
3.3.12	Herstellung von Formlagenholz	51
4	Prüfung des Longjohns nach DIN 79010:2020-02	52
4.1	Dynamische Prüfung mit pedalerenden Kräften	52
4.2	Dynamische Prüfung mit horizontalen Kräften	54
4.3	Dynamische Prüfung mit einer vertikalen Kraft auf die Sattelstütze	56
4.4	Dynamische Prüfung mit einer vertikalen Kraft auf die Lastenaufnahme	57
4.5	Transfer der Prüfergebnisse	59
5	Fazit und Ausblick	61
	Literaturverzeichnis	VII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung eines Lieferbikes	8
Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung eines Longjohns	9
Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung eines Longtails	10
Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung eines Lastentrikes	11
Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung eines Schwerlastenfahrrads	12
Abbildung 6: Lastenfahrrad aus Birkensperrholz, Version 1	13
Abbildung 7: Lastenfahrrad aus Bambussperrholz.....	14
Abbildung 8: Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex	15
Abbildung 9: Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex	16
Abbildung 10: Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex	17
Abbildung 11: Kommerzielles Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex	18
Abbildung 12: Skizzierung einer möglichen Longjohn-Konstruktion aus Sperrholz	29
Abbildung 13: Überprüfung der Funktionalität der Transportkiste	31
Abbildung 14: Simulation der Verformungen des Sperrholzrahmens mit Hilfe der FEM.....	32
Abbildung 15: Fahrbereites Longjohn aus Birkensperrholz	33
Abbildung 16: Lastentrike aus Birkensperrholz nach der Fertigstellung	36
Abbildung 17: Austauschbare Fußstütze des Lastentrikes für den Transport von Erwachsenen.....	37
Abbildung 18: Zapfenverbindung zwischen Vorderstück und Radkastendeckel .	38
Abbildung 19: Profilleisten aus Sipo.....	39
Abbildung 20: Gewichtsreduzierung zwischen Ober- und Unterboden der Transportkiste durch Verrippungen	41
Abbildung 21: Klebenähte aus Epoxidharz in den Innenecken der Bauteilübergänge.....	42
Abbildung 22: Verstärkung des Holms des Lastentrikes mit CFK.....	43
Abbildung 23: Bohrungen im Holm des Lastentrikes für die Positioniergenauigkeit der geflanschten Kugellagereinheiten	44
Abbildung 24: Öffnungen im Unterboden der Transportkiste	45
Abbildung 25: Abführen von stehendem Wasser mit Hilfe einer Bohrung in einer Innenecke.....	46
Abbildung 26: Hohlraum im Tretlagerblock zwischen Sattelstange und Tretlager	47

Abbildung 27: Lösbare Verbindung der Sitzfläche.....	48
Abbildung 28: Aussteifung der Transportkiste mit einem Aluminium-Profil.....	49
Abbildung 29: Freies Biegen der Sipo-Leisten nach dem Dämpfvorgang.....	50
Abbildung 30: Vorrichtung zur Herstellung der horizontalen Kettenstrebe aus Formlagenholz.....	51
Abbildung 31: Dynamische Prüfung des Rahmens mit pedalierenden Kräften nach DIN 79010:2020-02	53
Abbildung 32: Dynamische Prüfung des Rahmens mit pedalierenden Kräften im Prüfstand	54
Abbildung 33: Dynamische Prüfung des Rahmens mit horizontalen Kräften nach DIN 79010:2020-02	55
Abbildung 34: Dynamische Prüfung des Rahmens mit horizontalen Kräften im Prüfstand	55
Abbildung 35: Dynamische Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf der Sattelstütze nach DIN 79010:2020-02	56
Abbildung 36: Dynamische Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf der Sattelstütze im Prüfstand	57
Abbildung 37: Dynamische Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf die Lastaufnahmen nach DIN 79010:2020-02	58
Abbildung 38: Dynamische Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf die Lastaufnahmen im Prüfstand	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strukturbedingte Einflussfaktoren auf die Eigenschaften von Sperrholz
..... 22

Abkürzungsverzeichnis

CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIY	Do-it-yourself
FEM	Finite-Elemente-Methode

0 Zusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorthesis werden zwei abgeschlossene Projekte zu Lastenfahrrädern aus Sperrholz dargestellt, die 2022 und 2023 in Fachmodulen des Studiengangs Holztechnik an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe durchgeführt wurden.

Das Lastenfahrrad ist ein Fortbewegungsmittel, das sich in den letzten Jahren vor allem in Großstädten immer weiter etabliert hat. Nicht nur Singles und Familien nutzen es zum Transport von Lasten und/oder Personen, sondern auch der Logistiksektor greift zunehmend für kommerzielle Zwecke auf den Einsatz von Lastenfahrrädern zurück. Besonders im innerstädtischen Verkehr können Lastenfahrräder ihre Stärken ausspielen, sodass sie z. B. für die Zustellung von Paketen genutzt werden. Da sie bisher überwiegend aus energieintensiven Werkstoffen wie Aluminiumlegierungen hergestellt werden, zielen die beiden Projekte darauf ab, einen nachhaltigeren Lösungsansatz aus dem Werkstoff Holz zu liefern. Im Zuge dessen wird im ersten Projekt ein Longjohn konstruiert, bei dem der Rahmen und die Transportkiste überwiegend aus 6 mm Sperrholz bestehen. Im zweiten Projekt wird das Longjohn zu einem inklusiven Lastentrike weiterentwickelt. Beide Lastenfahrräder sollen an der Hochschule durch die Angehörigen der Hochschule ausgeliehen werden können und die Ergebnisse sollen zum Nachbau für den DIY-Bereich veröffentlicht werden.

Zunächst werden im Kapitel Stand der Technik fünf Lastenfahrrad-Konstruktionen porträtiert, die für den privaten und kommerziellen Einsatz geeignet sind und sich auf dem Markt etabliert haben. Außerdem werden bereits vorhandene Lastenfahrräder aus Holzwerkstoffen vorgestellt, die jedoch überwiegend aus der DIY-Szene stammen. Es werden die verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten von Lastenfahrrädern erläutert. Zudem werden der Holzwerkstoff Sperrholz als Ausgangsmaterial und aktuell geltende Normen, Richtlinien, Konzepte und Methoden dargestellt, die bislang die Dimensionierung von Lastenfahrrädern ermöglichen.

Anschließend folgt die Zusammenfassung der beiden Projekte. Dazu werden die jeweiligen Entwicklungsphasen und Projektergebnisse des Longjohns und des Lastentrikes erörtert. Es werden die eingesetzten konstruktiven Features und Verfahren erläutert, mit deren Hilfe die beiden Lastenfahrräder erfolgreich in der Praxis gefertigt werden konnten. Im Zuge dessen erfolgt auch die rechtliche Betrachtung der Projekte. Da sich die Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe mit Blick auf

die Ausleihmöglichkeit der Lastenfahrräder und die veröffentlichten Ergebnisse rechtlich absichern wollte, wurde ein Haftungsausschluss verfasst.

Zur Überprüfung der Rahmen-Konstruktion des Longjohns wurde ein Prototyp im Holzlabor der Hochschule vier Prüfverfahren nach DIN 79010:2020-02 unterzogen. Es werden sowohl der Prüfaufbau als auch Abweichungen zur Norm und die Prüfergebnisse dargestellt. Der Rahmen des Longjohns bestand alle durchgeführten Prüfungen.

Aus zeitlichen Gründen wurde für das Lastentrike kein Prototyp gebaut. Es wird die Übertragbarkeit der Prüfergebnisse des Longjohns auf das Lastentrike diskutiert. Mit der Veröffentlichung der Open-Source-Dokumentation, die die Bauanleitungen sowie die 2-D- und 3-D-Daten beider Lastenfahrräder enthält, wurden die beiden Projekte erfolgreich abgeschlossen.

1 Einleitung

In den Kapiteln der Einleitung werden zunächst die Problemstellung erläutert, das Ziel der Arbeit dargestellt und die Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfrage der Bachelorthesis beschrieben.

1.1 Problemstellung

Eine im Jahr 2017 in Deutschland durchgeführte Studie ergab, dass bei 75 % aller Personenkilometer im Individualverkehr Fahrzeuge mit Motor zur Fortbewegung genutzt wurden. Um die Mobilitätswende weiter voranzutreiben, bedarf es neuer Denkansätze und Technologien, um einen Individualverkehr weiterhin zu ermöglichen, diesen jedoch nachhaltiger zu gestalten (Wagner & Beschler, 2024). Zudem stellt das steigende Logistik- und Paketaufkommen durch Änderungen des Konsumverhaltens große Logistikunternehmen vor neue Herausforderungen (Cox & Rzewnicki, 2015). Abhilfe können bei dieser Entwicklung Lastenfahrräder schaffen, die in den letzten Jahren immer populärer geworden sind und in Großstädten bereits das Stadtbild mitprägen.

Der Handel bietet überwiegend schwere Lastenfahrrad-Konstruktionen aus Aluminium- oder Stahllegierungen an. Im Bereich von Do-it-yourself (DIY) lassen sich dagegen auch Projekte finden, die Anleitungen für den Bau von Lastenfahrrädern aus Massivholz oder Holzwerkstoffen zur Verfügung stellen. Dennoch ergibt sich das Problem, dass leichte und nachhaltige Konstruktionen aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz auf dem Markt bisher unterrepräsentiert sind, obwohl Holzwerkstoffe im Gegensatz zu Stahl oder Aluminium bei der Herstellung eine niedrigere CO₂-Bilanz aufweisen. Holz ist zudem eine Kohlenstoffsenke, da es CO₂ aus Atmosphäre bindet (Kluge & Eichhorn, 2021). Es braucht daher neue Herangehensweisen, um leichte Lastenfahrräder auch aus Holzwerkstoffen wie Sperrholz konstruieren und fertigen zu können, die gleichzeitig konkurrenzfähig zu derzeit auf dem Markt gängigen Modellen sind. Im Zuge dessen gab es an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe, im Rahmen von Fachmodulen des Studiengangs Holztechnik, zwei Projekte, in denen Studierende mit einem Dozenten zwei verschiedene Lastenfahrräder aus 6 mm Birkenlaminat konstruiert haben. Im Sommersemester 2022 wurde in einem ersten Projekt ein Lastenfahrrad in Form eines Longjohns konstruiert, das durch die Angehörigen der Hochschule genutzt und ausgeliehen werden kann. Das Longjohn wurde anschließend im Wintersemester

2023 durch Studierende zu einem Lastentrike mit inklusiven Features umkonstruiert und steht ebenfalls an der Hochschule zur Benutzung und Ausleihe bereit.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, einen Lösungsansatz aufzuzeigen, um schlanke und leichte Lastenfahrräder aus Sperrholz konstruieren und fertigen zu können. Es werden im Zuge dessen jedoch nur die Dimensionierungsmöglichkeiten aus der Literatur und die in den Projekten eingesetzten konstruktiven Features und Verfahren vorgestellt, die sich auf den Rahmen und die Transportkiste des Longjohns und des Lastentrikes beziehen. Die weiteren Anbauteile eines Lastenfahrrads wie z. B. Lenker, Sattelstütze oder Bremsen, die in den Projekten nicht aus Holz gefertigt werden, sind dagegen nicht Teil der Arbeit. Ein weiteres Ziel der Arbeit ist die Darstellung der beiden Projekte Longjohn und Lastentrike an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe. Durch eine Open-Source-Dokumentation, die unter anderem die Zeichnungen und Baupläne beider Lastenfahrräder sowie die vorliegende Arbeit enthält und zum Abschluss der Projekte auf der Internetseite der Hochschule veröffentlicht wird, soll ein nachhaltiger Beitrag zur Verkehrswende geleistet werden. Mit Blick auf die Veröffentlichung der Ergebnisse und den daraus entstehenden wissenschaftlichen Diskurs zielt die Arbeit weiterhin darauf ab, die eingesetzten konstruktiven Features und Verfahren vorzustellen, so dass diese auch in zukünftigen Lastenfahrrad-Projekten eingesetzt, aber auch auf andere Konstruktionen angewandt werden können.

1.3 Vorgehensweise

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird zunächst nach Durchführung der Literaturrecherche der Stand der Technik dargestellt. In diesem werden jedoch nicht nur die aktuell geltenden Normen zu Lastenfahrrädern vorgestellt, sondern auch Normen, Bauvorschriften und Richtlinien, die allgemeine Hinweise zur Verarbeitung und Gestaltungsgrundsätze von Sperrhölzern beinhalten. Dieser Teil der Bachelorthesis dient zur literarischen Beantwortung der Forschungsfrage, indem anhand der Literaturlauswertung erläutert wird, wie die Auslegung von Lastenfahrrädern gelingen kann. Der Stand der Technik enthält außerdem die Vorstellung der derzeitigen Einsatzmöglichkeiten und verschiedenen Bauformen von Lastenfahrrädern sowie rechtliche Aspekte, die bei der Konstruktion von Lastenfahrrädern zu beachten sind.

Es folgt die Zusammenfassung der Projekte Longjohn und Lastentrike. Da die Projekthistorie des Longjohns zu Beginn der Bachelorthesis bereits abgeschlossen ist und an diesem nicht persönlich mitgewirkt wurde, wurden die Projektergebnisse in Gesprächen durch den Modulbeauftragten erörtert. Durch die Teilnahme am Lastentrike-Projekt erfolgt die Zusammenfassung des Projekts anhand der eigenen Erfahrungswerte. Zur weiteren Beantwortung der Forschungsfrage, inwiefern Lastenfahrräder aus Sperrholz realisiert werden können, werden die konstruktiven Features und eingesetzten Verfahren erläutert, anhand derer die beiden Lastenfahrräder gefertigt und montiert werden konnten.

Anschließend erfolgt die Auswertung der Prüfungen des Prototyps des Longjohns im Prüfstand nach 79010:2020-02. Die Informationen zu den Ergebnissen stammen vom verantwortlichen Labormitarbeiter. In einem Gespräch wurden die Abweichungen des Prüfaufbaus zur Norm und die Prüfergebnisse erläutert, sodass diese gegenübergestellt werden können. Danach wird diskutiert, inwiefern die Ergebnisse der Longjohn-Prüfung auf das Lastentrike übertragbar sind.

Abschließend werden die Ergebnisse der Bachelorthesis im Fazit zusammengefasst. Im Ausblick werden Vermutungen zur Auswirkung der Arbeit geäußert sowie Vorschläge zu potenziellen zukünftigen Untersuchungen vorgestellt.

2 Stand der Technik

In Kapitel 2.1 werden zunächst die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von Lastenfahrrädern und aktuelle Entwicklungstrends beschrieben. In Kapitel 2.2 werden anschließend die verschiedenen Bauformen von Lastenfahrrädern dargestellt. Das Kapitel 2.3 enthält die Ergebnisse der Recherche zu bereits vorhandenen Lastenfahrrädern aus Holzwerkstoffen. Abschließend folgt in Kapitel 2.4 die Einführung in verschiedene Normen, Richtlinien und Methoden zur Auslegung, Gestaltung und Prüfung von Lastenfahrrädern.

2.1 Einsatzmöglichkeiten von Lastenfahrrädern

Ein aktueller Trend, der sich besonders in den Großstädten Europas erkennen lässt, ist die Rückkehr des Lastenfahrads als nachhaltiges Fortbewegungsmittel. Im Jahr 2016 befand sich in Europa der Großteil der Hersteller in Deutschland, Dänemark, Großbritannien und den Niederlanden. Durch den positiven Imagewandel erfreuen sich Lastenfahrräder im privaten Bereich immer größerer Beliebtheit, da diese in der Gesellschaft als Symbol für nachhaltige Mobilität gelten. Vor allem Familien mit Kindern setzen zunehmend vermehrt auf Lastenfahrräder, da mit einigen Bauformen wie dem Longjohn oder dem Lastentrike sowohl Lasten als auch Personen gleichzeitig und umweltschonend transportiert werden können. (Vetter, 2023).

Die globalen Bestrebungen zur Senkung der CO₂-Emissionen betreffen aber auch die Transport- und Logistikbranche (Cox & Rzewnicki, 2015). Im Jahr 2004 betrug die Treibhausgas-Emissionen dieser Branche 23 % am gesamten weltweiten CO₂-Ausstoß (Metz et al., 2007). Das veränderte Konsumverhalten im 21. Jahrhundert und Veränderungen im Handel resultieren in einem steigenden Transportaufkommen, sodass Just-in-time-Lieferungen in allen Bereichen der Logistik zu steigenden Kosten führen. Durch das hohe Verkehrsaufkommen kommt es bei der Zustellung von Gütern auf den letzten Kilometern zum Endverbraucher im städtischen Bereich zu Staus und Lieferverzögerungen. Zudem gibt es Platzprobleme beim Parken, sodass vor allem Autos, Lieferwagen und LKW betroffen sind (Cox & Rzewnicki, 2015). Abhilfe für Lieferungen auf den letzten Kilometern können daher Lastenfahrräder schaffen, die zunehmend in verschiedenen Bereichen der Logistik eingesetzt werden (Schliwa et al., 2015). Große Vorteile von Lastenfahrrädern im urbanen Raum sind der geringere Platzbedarf für die Be- und Entladung am Straßenrand sowie die Nutzung von Fahrrad- und Busspuren. Infolgedessen

können bei hohem Verkehrsaufkommen Staus umfahren werden (Leonardi et al., 2012). Da es in Städten Bemühungen zur Verkehrsreduzierung gibt und diese in zeitlich begrenzten Einschränkungen für Lieferdienste resultieren können, stellen Lastenfahrräder eine interessante Alternative für die Logistik- und Transportbranche sowie den Einzelhandel dar (Cox & Rzewnicki, 2015). Durch ihren Einsatz können Bereiche, in denen Fahrverbote für motorisierte Fahrzeuge gelten, trotzdem befahren werden (Leonardi et al., 2012). Für Umwelt und Unternehmen wirkt sich außerdem positiv aus, dass bei der Fahrt keine Treibhausgase ausgestoßen werden. Dies führt zu einem anerkennenden gesellschaftlichen Image des Lastenfahrrads. Gegenüber motorisierten Fahrzeugen haben Lastenfahrräder geringere Anschaffungs- und Betriebskosten. Der aktuelle Trend, dass die Fahrradinfrastruktur weiter ausgebaut wird, wirkt sich ebenfalls positiv auf die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von Lastenfahrrädern aus (Leonardi et al., 2012).

Derzeit werden Lastenfahrräder, vor allem mit Elektroantrieb, für Post-, Kurier- und Expressdienste auf den letzten Kilometern zum Empfänger eingesetzt (Bogdanski et al., 2018; Schliwa et al., 2015). In Mikro-Depots, die als innerstädtische Verteilungszentren fungieren, werden sie beladen (Bogdanski et al., 2018). Verschiedene globale Logistikunternehmen wie DHL, UPS oder FedEx haben dazu bereits eigenständige Bauformen und Lösungen entwickelt. Eine weitere Möglichkeit zum Einsatz von Lastenfahrrädern stellen verschiedene Dienstleistungs- und Handwerksbetriebe dar, vor allem wenn diese zur Ausübung der Tätigkeit nur einen geringen Einsatz an Werkzeug benötigen (Maes, 2017). Auch im Werksverkehr werden Lastenräder bereits eingesetzt. In diesem Fall werden die Räder jedoch weniger für die innerbetriebliche Logistik eingesetzt, sondern für den Transport von Personen. Für die Zukunft gibt es jedoch bereits Pläne und Vorhaben in der Automobilbranche, Lastenfahrräder verstärkt für Transporte innerhalb eines Unternehmens einzusetzen (Gruber, 2021).

2.2 Bauformen von Lastenrädern

Das Lastenfahrrad hat eine lange Historie. Durch verschiedene zeitliche Ereignisse, sozio-kulturelle Gegebenheiten und sich ändernde Bedürfnisse der Menschheit haben sich folglich verschiedene Bauformen von Lastenfahrrädern entwickelt und etabliert. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Eigenschaften und Besonderheiten verschiedener Lastenfahrräder beschrieben. Die dargestellten

Bauformen beschränken sich auf die häufig genutzten Lastenfahrzeugtypen: Lieferbikes, Longjohn, Longtail, Lastentrike und Schwerlastenfahrrad.

2.2.1 Das Lieferbike

Das Lieferbike, auch Bäckerrad genannt, ist ein schmales einspuriges Lastenfahrzeug mit zwei Rädern, das in der grundlegenden Konzeption eine große Ähnlichkeit zu den heutzutage gängigen Fahrrädern aufweist (Gruber, 2021; Schulz et al., 2012). Aufgrund der Konstruktion kann es für den Transport von Lasten sowohl auf kleinen als auch großen Strecken eingesetzt werden (Gruber, 2021). Das Lieferbike zeichnet sich durch zwei Ladungszonen aus, die wie Abbildung 1 zeigt, über dem Vorder- und Hinterrad angebracht sind.



Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung eines Lieferbikes

Quelle: In Anlehnung an Gruber & Rudolph, 2019, S. 14

Die Ladungszone kann entweder als Fläche, Korb oder als geschlossener Volumenkörper ausgeführt werden und je nach Konstruktion des Lieferbikes in Dimension und Verteilung der Lasten variieren. Die mögliche Nutzlast der Ladungszone liegt zwischen 50 und 79 kg. Obwohl es gegenüber anderen Lastenrad-Bauformen eher leicht ist, sind sowohl der Fahrradrahmen als auch die beiden Ladungszonen für hohe Belastungen im Betrieb dimensioniert. Der Fahrkomfort lässt sich mit dem eines herkömmlichen Fahrrads vergleichen (Gruber, 2021). Vor allem durch die Zuladung der vorderen Ladungszone kann es jedoch zur Veränderung des Fahrverhaltens kommen. Durch die Verschiebung des Massenschwerpunktes nach vorne, in Richtung des Vorderrads, ändert sich das Verhalten beim Bremsen und Lenken, sodass sich ein Fahrer daran zunächst gewöhnen muss (Schulz et al., 2012).

2.2.2 Das Longjohn

Das Longjohn zählt aufgrund seiner zwei Räder zu den einspurigen Lastenrädern. Durch die Anordnung der großvolumigen Ladungszone zwischen Lenkstange und Vorderrad, die wie in Abbildung 2 dargestellt meist als Transportkiste ausgeführt wird, ist ein Longjohn länger als ein herkömmliches Fahrrad.



Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung eines Longjohns

Quelle: In Anlehnung an Gruber & Rudolph, 2019, S. 14

Das Volumen der Ladungszone kann je nach Größe zwischen 150 und 300 Litern betragen, sodass darin Nutzlasten von 80 bis 100 kg transportiert werden können. Im Vergleich zum Vorderrad ist das Hinterrad des Longjohns größer dimensioniert. Anders als beim klassischen Fahrrad wird das Vorderrad nicht direkt über eine Lenkstange gelenkt, sondern über ein Schubstangen- oder Seilzugsystem (Gruber, 2021). Dies hat im Vergleich zum Lieferbike den Vorteil, dass es beim Transport von großen Nutzlasten nicht zur Änderung des Lenkverhaltens kommt, da sich die Last nicht direkt über dem Vorderrad befindet. Aufgrund der größeren möglichen Zuladung ist jedoch mit einer Verlängerung des Bremsweges zu rechnen. Zudem vergrößert sich durch die Länge des Longjohns der Wendekreis (Schulz et al., 2012). Das Lastenrad eignet sich auf kurzen, aber besonders auch auf langen Strecken für die Beförderung von unterschiedlich hohen Nutzlasten (Gruber, 2021).

Das Modell Longjohn wird in Städten oft von Familien für den Personentransport, insbesondere für den Transport von Kindern, eingesetzt. Durch die gute Fahrdynamik lässt es sich besser manövrieren als Fahrräder mit Anhängern für Kinder (Schulz et al., 2012). Dennoch kann sich das Fahren eines Longjohns für den

Fahrer durch das ungewohnte dynamische Stabilitätsverhalten zunächst gewöhnungsbedürftig anfühlen.

2.2.3 Das Longtail

Das Longtail weist Ähnlichkeiten zum Longjohn auf (Schulz et al., 2012). Es zählt ebenfalls zu den einspurigen Lastenfahrrädern. Die Breite entspricht der eines herkömmlichen Fahrrads (Gruber, 2021). Die Ladungszone zwischen Sattel und Hinterrad, die wie in Abbildung 3 oft als Fläche ausgeführt wird, führt zu einer Verlängerung des Radstandes (Gruber, 2021).



Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung eines Longtails

Quelle: In Anlehnung an Gruber & Rudolph, 2019, S. 14

Durch die Anordnung der Last hinter dem Fahrer verhält sich das Longtail bei der Fahrt ähnlich zu klassischen Fahrrädern (Schulz et al., 2012). Die Ladefläche des Longtails ist für Nutzlasten von 70 bis 105 kg ausgelegt. Ein Vorteil der Position der Ladefläche ist, dass anders als beim Longjohn die Ladung nicht zu Sichtbehinderungen führen kann. Das Einsatzgebiet ist vielseitig. Das Longtail ist sowohl für Kurzstrecken als auch für Langstrecken mit unterschiedlichen Zuladungen geeignet (Gruber, 2021). Der Transport von Kindern ist ebenfalls möglich. Es ist jedoch zu beachten, dass diese bei der Fahrt nicht im Sichtfeld des Fahrers sind (Schulz et al., 2012).

2.2.4 Das Lastentrike

Im Vergleich zu den bereits vorgestellten Bauformen zählt das Lastentrike durch seine drei Räder zu den mehrspurigen Lastenfahrrädern, wodurch es breiter als

herkömmliche Fahrräder ist. Die Ladungszone befindet sich zwischen den beiden Vorderrädern (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung eines Lastentrikes

Quelle: In Anlehnung an Gruber & Rudolph, 2019, S. 14

Sie ist als Transportkiste ausgeführt und hat ein Volumen von bis zu 330 Litern. In der Transportkiste können Lasten mit einem Gewicht von bis zu 120 kg transportiert werden. Das Lastentrike ist sowohl für kurze als auch für mittlere Distanzen geeignet (Gruber, 2021). Des Weiteren ist auch der Transport von Kindern möglich. Der Sitzkomfort in der Kiste ist im Vergleich zum Longjohn jedoch geringer (Schulz et al., 2012). Eine Besonderheit des Lastentrikes sind die beiden Vorderräder. Sie verbessern zwar die Standsicherheit, in Verbindung mit einer Drehschemellenkung neigt das Lastentrike in Kurven jedoch zum Umkippen. Daher ist die Geschwindigkeit in Kurven zu reduzieren (Gruber, 2021). Die Anordnung der Räder führt außerdem zu einem ungewohnten Fahrverhalten und einem vergrößerten Wendekreis (Schulz et al., 2012). Neben Ausführungen mit Drehschemellenkung gibt es auch Lastentrikes, die eine Neigung nach vorne aufweisen. Diese Bauform führt zu einer besseren Fahrdynamik bei Kurvenfahrten und bietet sich daher auch für Langstrecken an (Gruber, 2021).

2.2.5 Das Schwerlastenfahrrad

Das Schwerlastenfahrrad kann je nach Bauform mit drei oder vier Rädern ausgestattet sein. Bei der dreirädrigen Bauweise befinden sich zwei Räder hinten. Es zählt durch seine Breite zu den mehrspurigen Lastenfahrrädern und ist für den Transport von schweren Lasten ausgelegt (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung eines Schwerlastenfahrrads

Quelle: In Anlehnung an Gruber & Rudolph, 2019, S. 14

Im Vergleich zum herkömmlichen Fahrrad ist es nicht nur breiter, sondern auch länger und durch die Ladungszone auch höher. Die Ladungszone befindet sich über dem Hinterrad und kann ein Volumen von 1300 bis 2300 Litern aufweisen, wodurch Lasten von bis zu 200 kg transportiert werden können. Die Grundfläche der Ladungszone ist so dimensioniert, dass der Transport von Europaletten möglich ist. Das Schwerlastenfahrrad zeichnet sich aufgrund des zusätzlichen Hinterrads durch seine Standsicherheit aus. Je nach Zuladung ist bei der Fahrt auf eine angemessene Geschwindigkeit zu achten. Neben offenen Schwerlastenfahrrädern gibt es auch Bauweisen mit Anbauteilen zum Schutz des Fahrers vor Wettereinflüssen, wodurch diese auch für den kommerziellen Einsatz geeignet sind (Gruber, 2021).

2.3 Lastenfahrräder aus Holzwerkstoffen

Im folgenden Kapitel werden Lastenfahrräder aus verschiedenen Holzwerkstoffen und mit unterschiedlichen Materialstärken vorgestellt. Es werden sowohl DIY-Projekte, die sich an Nachbauer aus dem DIY-Bereich richten, als auch ein kommerziell vertriebenes Lastenfahrrad vorgestellt.

2.3.1 Lastenfahrrad aus Birkenperrholz Projekt 1

Das in Abbildung 6 dargestellte Lastenfahrrad ist das erste von zwei Projekten des Industriedesigners Michael Downes und des Bootsbauers Jeff Saylor.



Abbildung 6: Lastenfahrrad aus Birkenperrholz, Version 1

Quelle: Maus, 2011

Beide entwickelten und fertigten im amerikanischen Portland zwischen den Jahren 2010 und 2011 ein Lastenfahrrad in Form eines Longjohns. Das Longjohn wurde nicht mit einer Transportkiste, sondern mit einer Ladefläche ausgeführt. Für die Konstruktion des Rahmens wurde 5-lagiges Birkenperrholz mit einer Dicke von $\frac{1}{4}$ Zoll bzw. 6,35 mm verwendet. Die Einzelteile wurden mit Hilfe einer CNC-Maschine gefräst und der Rahmen anschließend zusammengebaut. Unter dem Einsatz von Verrippungen zur Aussteifung der Konstruktion, die auch im Bootsbau Anwendung finden und Klebenähten aus Epoxidharz zur Verbindung der Einzelkomponenten entstand ein Lastenfahrrad in Leichtbauweise, das ein

Gesamtgewicht von lediglich 23 kg aufwies. Durch die Integration von Teilen eines gebrauchten Lastenfahrrads in den neuen Rahmen aus Sperrholz bot das Projekt die Möglichkeit zum Upcycling alter Fahrräder. Das Lastenfahrrad wurde nicht kommerziell vertrieben, sondern war lediglich ein DIY-Projekt. Es wurden keine Pläne zum Nachbau im Internet veröffentlicht (Maus, 2011).

2.3.2 Lastenfahrrad aus Bambussperrholz Projekt 2

In einem zweiten Projekt wurde das Longjohn aus Birkenperrholz durch Michael Downes und Jeff Saylor im Jahr 2011 weiterentwickelt. Bei der Konstruktion des Rahmens wurde unter anderem, wie in Abbildung 7 zu sehen, die Ladefläche des Longjohns durch eine Transportkiste ersetzt.



Abbildung 7: Lastenfahrrad aus Bambussperrholz

Quelle: Pinterest, o. D.

Außerdem wurde das Birkenperrholz als Ausgangsmaterial des Rahmens durch 5-lagiges Bambussperrholz ersetzt, da es optisch ansprechender war und eine höhere Steifigkeit aufwies (Downes, 2011a). Die Materialstärke von $\frac{1}{4}$ Zoll bzw. 6,35 mm wurde beibehalten. Wie im vorherigen Projekt wurden alle Einzelteile mit Hilfe einer CNC-Maschine gefräst und anschließend beim Zusammenbau miteinander verklebt. Für die Verklebung des Rahmens kam PVAc-Holzleim der Beanspruchungsgruppe D4 zum Einsatz. Auch das zweite Projekt bot die Möglichkeit zum Up-Cycling alter Fahrräder durch das Verwenden gebrauchter Teile (Downes, 2011b). Bei der Weiterentwicklung des Longjohns handelte es sich ebenfalls um

ein DIY-Projekt, sodass kein kommerzieller Vertrieb des Lastenfahrrads stattfand. Auch nach Abschluss des zweiten Projekts wurden keine Dateien zum Nachbau des Longjohns veröffentlicht.

2.3.3 Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex

Das durch Oliver Haller konzipierte und gefertigte Lastenfahrrad ist ein weiteres Beispiel für ein nicht kommerziell vertriebenes Lastenfahrrad aus dem DIY-Bereich. Das Lastenfahrrad wurde, wie in Abbildung 8 dargestellt, in Form eines Longjohns konstruiert und beinhaltet eine Transportkiste.



Abbildung 8: Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex

Quelle: lifeCYCLE Magazin, 2019

Der Auslöser für das Projekt war ein Bruch des Rahmens seines bisherigen Fahrrads. Die weiteren Einzelkomponenten des Fahrrads wurden wiederverwendet und in den neuen Rahmen integriert. Der Rahmen des Longjohns wurde aus Birke-Multiplex hergestellt, indem die Bauteile verklebt und verschraubt wurden. Für den Bau der Transportkiste kamen Siebdruckplatten zum Einsatz, die mit Hilfe von Winkelverbindern verbunden wurden. Aufgrund des hohen Gesamtgewichts des Longjohns wurde ein Elektromotor nachgerüstet. Das Hinterrad wird dabei direkt über eine Rolle angetrieben (lifeCYCLE Magazin, 2019). Es wurden keine Pläne zum Nachbau des Longjohns veröffentlicht.

2.3.4 Das Wik-E-Cargo-Bike

Das Wik-E-Cargo-Bike ist ein DIY-Projekt der digitalen Werkstatt CNC Craft aus Cornwall. Das Lastenfahrrad wurde in Form eines Longjohns konstruiert. Für den Transport von Personen oder Lasten wurde eine Transportkiste integriert. Zudem ist das Longjohn mit einem Elektromotor ausgestattet. Sowohl für den Rahmen als auch für die Transportkiste wurde 18 mm Birke-Multiplex verwendet. Die Einzelteile wurden auf einer CNC-Maschine gefräst. Der Zusammenbau des Longjohns wurde, wie in Abbildung 9 zu sehen, durch Einzapfungen an den Bauteilen ermöglicht.



Abbildung 9: Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex

Quelle: Moore, 2023

Durch die Einzapfungen wird der Zusammenbau für Personen mit lediglich handwerklichen Grundfähigkeiten erleichtert. Die Rahmenkonstruktion des Longjohns wurde verklebt. Für die Montage und Druckausübungen wurden daher lediglich Schraubzwingen verwendet. Die weiteren Komponenten zur Komplettierung des Longjohns konnten von gebrauchten Fahrrädern verwendet werden. Das Wik-E-Cargo-Bike wurde nicht kommerziell vertrieben. Auf der Homepage von CNC Craft wurden die Baupläne und Zeichnungen, in Form von 2-D-Daten zum Fräsen der Einzelteile, als Open-Source-Dateien veröffentlicht (Moore, 2023).

2.3.5 Das Woody Cargo

Im Rahmen eines DIY-Projekts wurde durch Federico Chiummento ein weiteres Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex, wie in Abbildung 10 dargestellt, in Form eines Longjohns gefertigt.



Abbildung 10: Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex

Quelle: Chiummento, 2019

Sowohl der gesamte Rahmen als auch die Transportkiste wurden aus Holzwerkstoffplatten hergestellt. Dazu wurde 12 mm Birke-Multiplex verwendet. Die Einzelteile wurden mit Hilfe einer CNC-Maschine gefräst. Die Bauteile wurden mit wasserfestem PVAc-Holzleim der Beanspruchungsgruppe D4 verklebt. Das Gewicht des Rahmens betrug 18 kg und das Gesamtgewicht des Longjohns 35 kg. Wie auch in den vorherigen dargestellten Projekten bietet auch dieses Longjohn die Möglichkeit zum Upcycling gebrauchter Fahrrad-Komponenten. Das Longjohn wurde nicht vermarktet, sondern ist ein DIY-Projekt. Eine umfangreiche Open-Source-Dokumentation ist verfügbar. Diese beinhaltet die Zeichnungen, eine Anleitung zum Zusammenbau und eine Liste mit den weiteren notwendigen Anbauteilen (Chiummento, 2019).

2.3.6 Kommerzielles Lastenfahrrad mit Elektro-Motor

Im Zuge der Literaturrecherche wurde lediglich ein kommerziell vertriebenes Lastenfahrrad gefunden, bei dem sowohl der Rahmen als auch die Transportkiste aus

Holzwerkstoffen hergestellt werden. Dabei handelt es sich, wie in Abbildung 11 zu sehen, um ein Lastenfahrrad in Form eines Longjohns des deutschen Herstellers rethink.



Abbildung 11: Kommerzielles Lastenfahrrad aus Birke-Multiplex

Quelle: Binova GmbH, o.D.

Im Onlineshop des Herstellers kann das Longjohn konfiguriert und verschiedene Anbauteile und Zubehör ausgewählt werden. Das Longjohn ist 2,60 m lang und weist ein Gesamtgewicht von 42,5 kg auf. Das zulässige Gesamtgewicht beträgt 215 kg. Der Rahmen und auch die Transportkiste werden aus Birke-Multiplex hergestellt. Die Einzelteile werden dazu auf einer CNC-Maschine gefräst. Das Longjohn ist außerdem mit einem Elektromotor ausgestattet (Binova GmbH, o. D.; Escher, 2023).

2.4 Dimensionierung von Lastenfahrern

Im folgenden Kapitel werden verschiedene Möglichkeiten zur Auslegung von Lastenfahrern aus Sperrholz vorgestellt. Zunächst erfolgt eine rechtliche Betrachtung für die Dimensionierung von Lastenfahrern. Anschließend werden Normen, die sich explizit auf Lastenfahrern beziehen, vorgestellt. Zudem werden auch Normen und Richtlinien für die Dimensionierung anderer Fahrzeuge vorgestellt, da sich darin allgemeine Informationen und Verarbeitungshinweise zu Sperrhölzern finden lassen. Außerdem wird der Werkstoff Sperrholz porträtiert.

2.4.1 Rechtliche Grundsätze bei der Auslegung von Lastenfahrern

Im Gegensatz zu Gesetzen, die rechtlich bindend sind, basiert die Verwendung von Normen stets auf freiwilliger Basis, es sei denn Gesetze fordern im Gesetzestext die explizite Einhaltung der Norm. Trotzdem werden DIN-Normen im Falle von Prozessen, bei denen es um Haftungsfragen geht, obgleich die Verwendung einer Norm zwischen zwei Vertragspartnern schriftlich festgehalten wurde oder nicht, von Gerichten herangezogen. Im Zweifelsfall verweisen die Gerichte in Gerichtsverfahren auf die Einhaltung von Normen, da der Hersteller beim Inverkehrbringen eines Produkts in Europa die geltenden technischen Grundsätze und Bestimmungen einzuhalten hat. Infolgedessen dienen einem Hersteller die Verwendung von DIN-Normen und weiteren anerkannten technischen Vorschriften als rechtliche Sicherheit. Die Nutzung von DIN-Normen wird folglich empfohlen. (Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages, 2019).

Die Verwendung von Fahrrad- und Lastenrad-Normen ist grundsätzlich nicht reglementiert, da sie gesetzlich nicht explizit gefordert wird. Aus den oben genannten Gründen werden bei der Konstruktion des Longjohns und des Lastentrikes jedoch zunächst die allgemein anerkannten Regeln der Technik eingehalten. Um das Longjohn und das Lastentrike auf öffentlichen Straßen nutzen zu können, müssen davon abgesehen jedoch die Anforderungen der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) zwingend eingehalten werden. Dazu werden die Lastenfahrern mit weiteren Anbauteilen wie Bremsen, Lichtern, Reflektoren, Klingel und rutschfesten Pedalen ausgestattet. Die in den beiden Projekten verwendeten anerkannten Regeln der Technik werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

2.4.2 Anforderungen und Prüfverfahren für Transport- und Lastenfahrräder nach DIN 79010:2020-02

Die DIN 79010:2020-02 enthält verschiedene Prüfverfahren und grundlegende Forderungen an ein- wie auch mehrspurige Lastenfahrräder für die Beförderung von Lasten und Personen. Sie ist für einspurige Lastenfahrräder mit einer maximalen Breite bis zu 1 m und einem zulässigen Gesamtgewicht von 250 kg gültig. Ein optionaler Elektromotor für die Fahrunterstützung darf eine maximale Nenndauerleistung von 250 W bis zu einer Geschwindigkeit von 25 km/h aufweisen. Für mehrspurige Lastenfahrräder gilt eine maximale Breite von 2 m und ein zulässiges Gesamtgewicht von 300 kg. Auch bei dieser Bauform kann ein Elektromotor den Fahrer mit einer Nenndauerleistung von 250 W unterstützen. Bei einer Geschwindigkeit von mehr als 25 km/h ist die Unterstützung des Motors automatisch abzuschalten. Die Norm kann einerseits für die Lastannahmen bei der Auslegung des Rahmens und andererseits für die dynamische Prüfung des Rahmens verwendet werden.

Die Norm legt Anforderungen an die Oberflächenausführung fest. So sind scharfkantige Ecken und Kanten von Bauteilen, die bei der Fahrt und der Instandhaltung des Lastenfahrads zu Verletzungen des Fahrers führen könnten, durch geeignete Maßnahmen wie das Abrunden oder Entgraten der Bauteile zu unterbinden. Die Unversehrtheit des Fahrers ist ebenfalls durch eine geringe Oberflächenrauheit der Bauteile zu gewährleisten.

Neben den Anforderungen enthält die Norm zudem verschiedene Prüfverfahren des Rahmens, die in einem geeigneten Prüfstand durchzuführen sind. Die im Projekt des Longjohns durchgeführten Prüfungen werden in Kapitel 4 ausführlich dargestellt. Die jeweilige Prüfung wird in der Norm mit Worten und anhand von Abbildungen detailliert beschrieben. Falls nicht angegeben, sind die notwendigen Formeln zur Berechnung der aufzubringenden Kräfte und der Position der Krafteinleitung gegeben. Der Rahmen wird in den Prüfungen mit unterschiedlich angreifenden Kräften, die auch in der Realität bei der Fahrt auftreten können, belastet. Diese Kräfte führen zu einer Verformung des Rahmens. Die Prüfungen umfassen die dynamische Prüfung des Rahmens durch Krafteinleitung in die Pedale, die dynamische Prüfung der Sattelstütze durch eine senkrecht wirkende Kraft, die dynamische Prüfung mit horizontal wirkenden Kräften, die dynamische Prüfung der Nutzfläche des Lastenfahrads mit einer senkrecht wirkenden Kraft und die dynamische Prüfung mit lateralen Kräften, die bei Kurvenfahrten von Lastenfahrrädern von

mindestens drei Rädern auftreten und zu dessen Umkippen führen können. Je nach Prüfung ist der Rahmen einer unterschiedlichen Anzahl an Prüfzyklen zu unterziehen. Die genannten Prüfungen gelten als bestanden, wenn es an keiner Stelle des Rahmens zu einem sichtbaren Riss oder dem Bruch des Bauteils kommt (DIN 79010:2020-02).

2.4.3 Eigenschaften von Sperrholz

Der Anwendungsbereich von Sperrhölzern ist vielseitig. Es kommt sowohl im Möbel- und Holzbau als auch im Bootsbau und für die Herstellung von Sportgeräten und Spielzeugen zum Einsatz (Gougeon Brothers, 1986; Informationsdienst Holz, 2008; Kalweit, 2006). Zudem wurde es beispielsweise in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts für den Bau von Segelflugzeugen verwendet (Georgii, 1934). Für die Konstruktion der Lastenfahrrad-Rahmen werden in beiden Projekten 6 mm Birken-sperrholz verwendet. Sperrholz zählt neben Sternholz und Schichtholz zu den Furnierwerkstoffen. Zur Herstellung von Sperrholz werden mindestens drei Furniere kreuzweise verklebt und unter Druck verpresst. Beim Schichtholz liegen die Fasern der Furniere dagegen parallel und beim Sternholz in einem Winkel von 15° zueinander (Niemz et al., 2007). Neben der Herstellung von normalem Sperrholz, das im Handel überwiegend verfügbar ist und in den Teilen 1 bis 3 der Normungsreihe DIN EN 635 klassifiziert wird, wird mit Blick auf höhere Qualitätsstufen weiterhin in Flugzeugsperrholz und Marinesperrholz unterschieden. Für diese beiden Sperrholzarten werden Furniere höchster Qualität und mit geringer Anzahl an Holzfehlern verwendet. Bei der Auswahl der Furniere kann bei der Herstellung zudem bereits auf eine hohe natürliche Dauerhaftigkeit der Holzarten geachtet werden. Für die Verklebung der Furniere kommen wasserfeste Klebstoffe zum Einsatz (Georgii, 1934; Informationsdienst Holz, 2008).

Die elastomechanischen Eigenschaften von Sperrhölzern ergeben sich aufgrund verschiedener Einflussfaktoren. Die Gewichtung der Einflüsse wird in der folgenden Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Strukturbedingte Einflussfaktoren auf die Eigenschaften von Sperrholz

Einflussfaktor	Biegefestigkeit, E-Modul	Zugfestigkeit	Quellung	Klimabeständigkeit	Verarbeitungseigenschaften
Holzart	2	2	1	1	2
Holzqualität	2	2	1	1	1
Lagendicke	2	2	1	1	1
Klebstoffart	1	1	2	3	1
Klebstoffanteil (einschl. Tränken)	3	2	2	2	2
Streckmittelzusatz	2	2	1	2	2
Faser-Last-Winkel zwischen den Lagen	3	3	3	1	1
Verdichtung der Lagen	3	3	2	1	2
Aufbaufaktor	3	3	2	1	2

Einfluss: 1 – relativ gering; 2- deutlich; 3 - dominierend

Quelle: Niemz & Sonderegger, 2017, S. 59

Es zeigt sich, dass Sperrhölzer mit Hilfe der dominierenden Einflussfaktoren so modelliert werden können, dass sie die elastomechanischen Eigenschaften von Vollholz nicht nur erreichen, sondern auch übertreffen können (Niemz & Sonderegger, 2017).

In DIN EN 635-2:1995-08 und DIN EN 635-3:1995-08 werden die zulässige Ausprägung von Holzmerkmalen für die Erscheinungsklassen E, I, II, III und IV für Sperrhölzer aus Laub- und Nadelholz festgelegt (DIN EN 635-2:1995-08; DIN EN 635-3:1995-08). Mit zunehmender Anzahl an Holzfehlern sinken die Festigkeitseigenschaften von Sperrhölzern (Niemz & Sonderegger, 2017). Zu den Holzfehlern zählen z. B. Punkstäbe, fest verwachsene und lose Äste, Risse, Schädlings- und Pilzbefall, eingewachsene Rinde oder Faserabweichungen (DIN EN 635-2:1995-08). Je nach Holzart können die verschiedenen Holzmerkmale dabei unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Die elastomechanischen Eigenschaften sind weiterhin abhängig von der Beanspruchungsart des Sperrholzes, in Kombination mit der Lage der Deckfurniere (Neuhaus, 2017). Bei der Konstruktion der Lastenrad-

Rahmen ist daher darauf zu achten, dass die Faserrichtung der Deckschicht optimal zu den wirkenden Kräften ausgerichtet ist.

Der Holzwerkstoff Sperrholz ist inhomogen und anisotrop, da das verwendete Furnier aus dem inhomogenen und anisotropen Rohstoff Holz hergestellt wird. Das Quellen und Schwinden von Sperrhölzern wird in Plattenebene durch die kreuzweise Verleimung der Furniere stark behindert. Senkrecht zur Plattenebene ist das Quellen und Schwinden um den Faktor 10 bis 20 höher. Folglich handelt es sich bei Sperrholz um einen sehr formstabilen Holzwerkstoff, sodass aus ihm großflächige Bauteile hergestellt werden können. Sperrhölzer weisen ein hygroskopisches Verhalten auf, da sie sich dem Feuchtegehalt der Umgebung anpassen. Bei der Verwendung von Birken-sperrholz in der Nutzungsklasse 3 nach DIN EN 1995-1-1:2023-10, die einer Bewitterung im Außenbereich entspricht, ist sowohl auf einen konstruktiven Holzschutz der Bauteile zu achten als auch ein geeigneter Oberflächenschutz, wie in Kapitel 3.3.7 dargestellt, aufzubringen (Neuhaus, 2017). Die Dauerhaftigkeit von Sperrhölzern ist folglich sowohl von der Oberflächenbeschichtung, des verwendeten Klebstoffes bei der Herstellung und der verwendeten Holzart abhängig (Informationsdienst Holz, 2008).

Ein großer Vorteil von 6 mm Birken-sperrholz ist, dass es auf dem Markt gut verfügbar ist, mit Blick auf die elastomechanischen Eigenschaften ein gutes Preis-Leistungsverhältnis aufweist und sich somit die Beschaffung des Materials für etwaige Nachbauer der Lastenfahrräder unkompliziert gestaltet. Unbeschichtetes Birken-sperrholz lässt sich mit einfachen Werkzeugen und mit verschiedenen Verfahren der Holzverarbeitung bearbeiten. Die Verklebung von Birken-sperrholz ist unproblematisch und mit gängigen, auf dem Markt verfügbaren Klebstoffsystemen unter Einhaltung der Herstellerhinweise möglich. Außerdem kann der Holzwerkstoff mittels verschiedener Auftragsverfahren und Beschichtungssystemen veredelt werden. Auf dem Markt werden Sperrhölzer mit Edelfurnieren als Deckschicht oder mit harzprägnierten Schichtstoffen angeboten (Informationsdienst Holz, 2008). Im Vergleich zu Stahl hat Sperrholz eine höhere Korrosionsbeständigkeit. Bei der Behandlung von Birken-sperrholz-Oberflächen mit umweltverträglichen Ölen zum Schutz vor Witterungseinflüssen, kann bei regelmäßiger Wartung die Lebensdauer von Bauteilen aus Birken-sperrholz zusätzlich verlängert werden (Niemz & Sonderegger, 2017).

2.4.4 Händische Auslegung von Lastenfahrrädern

Eine Grundlage zur händischen Dimensionierung von Lastenfahrrädern bieten verschiedene Normen, Richtlinien und Vorschriften. Mit Hilfe der DIN EN ISO 12215-5:2020-03 können kleine Wasserfahrzeuge dimensioniert werden. Die Norm enthält Entwurfsspannungen sowie Berechnungsformeln und Tabellen zur Auslegung von Bootsbauteilen aus Sperrholz. Sie wird durch allgemeine Hinweise zur Verarbeitung von Sperrhölzern und Empfehlungen zur Lage der Deckschichten bei unterschiedlichen Lastfällen ergänzt. Die Norm bietet im Anhang eine Übersicht über die elastomechanischen Eigenschaften von Sperrholz. Diese beziehen sich jedoch nicht konkret auf verschiedene Holzarten, sondern sind in Abhängigkeit der Rohdichte in Klassen eingeteilt. Für die Dimensionierung von Bauteilen aus Birken-sperrholz müssen folglich dessen Materialkennwerte aus anderer Literatur herangezogen werden (DIN EN ISO 12215-5:2020-03).

Auch die noch aktuell geltenden Bauvorschriften für Gleit- und Segelflugzeuge aus dem Jahr 1934 sowie die Bauvorschriften für Segelflugzeuge aus dem Jahr 1940 enthalten Verarbeitungshinweise zu Sperrholz. Diese umfassen Informationen zum Zuschnitt, zum Faserverlauf, zur Verwendung von Leimen und zum Schäften von Sperrhölzern. Im Gegensatz zur DIN EN ISO 12215-5 sind die Materialkennwerte, Lagerungshinweise und allgemeine Anforderungen an den Aufbau und die Beschaffenheit von Sperrholz explizit auf Birkenholz bezogen. Außerdem enthalten beide Bauvorschriften Angaben zur Ermittlung der Zugfestigkeit, Biegefestigkeit und Wasserbeständigkeit von Sperrhölzern (Georgii, 1934; Reichsluftfahrtministerium, 1940).

Die Richtlinien für die Gestaltung von Holzteilen im Flugzeugbau der Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG von 1944 enthalten ebenfalls zahlreiche Angaben und Gestaltungsgrundsätze für Bauteile aus Sperrholz, insbesondere für Flugzeug-Elemente. In ihr finden sich Hinweise zur Gestaltung von Schäftungen aus Sperrholz. Zudem sind Angaben zur Herstellung von Formhölzern aus Sperrholz und Berechnungstabellen für die Realisierung von Biege-Radien bei Sperrholzplatten enthalten. Je nach Holzart, Werkstoffdicke, Biegeachse und Verarbeitungszustand, d. h. ob der Werkstoff vorher im Wasserbad gedämpft wurde oder nicht, ergeben sich unterschiedliche Mindestradien. Die Richtlinie bietet weiterhin Formeln und Vorschriften zur Ausbildung von Verrippungen bei unterschiedlich ausgebildeten Trägern und Gurten, zur Kompensation des geringen Schubmoduls und der geringen Schubfestigkeit von Sperrholz. Zahlreiche Diagramme für

unterschiedlich auftretende Spannungen bei verschiedenen Flugzeugbauteilen ergänzen die Richtlinie (Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG, 1944b).

Die Richtlinien der Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG werden weiterhin durch die werkseigenen Normen erweitert. Die Normen der Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG beinhalten verschiedene elastomechanische Eigenschaften für Vollholz unterschiedlicher Holzarten und Holzwerkstoffe aus Buchen- und Birkenholz. Die Werkstoffkennwerte der Sperrhölzer sind in Abhängigkeit von Sortierklasse, Holzfeuchte, Dicke des Holzwerkstoffs, Anzahl der Lagen und der Rohdichte angegeben. Es sind die Kennwerte für Zugfestigkeit, Biegefestigkeit, Schubfestigkeit, Scherfestigkeit, Lochleibungsfestigkeit, Schubmodul, Biege-E-Modul, Bruchdehnung und bleibende Dehnung in Abhängigkeit verschiedener Belastungsfälle aufgeführt. Darüber hinaus enthält die Werksnorm Zugspannungs-Dehnungs- und Druckspannungs-Dehnungs-Diagramme für Buchensperrholz unterschiedlicher Dicken. Aus weiteren Diagrammen lassen sich zudem die Zugfestigkeit und der E-Modul für Zug- und Druckbeanspruchungen, infolge unterschiedlicher Winkel zwischen Last- und Faserrichtung und in Abhängigkeit der Sperrholzdicke, ablesen (Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG., 1944a).

Die Inhalte aus den aufgeführten Normen, Richtlinien und Bauvorschriften bilden eine gültige Basis zur Dimensionierung von Bauteilen eines Lastenfahrrades aus Sperrholz. Es ist jedoch darauf zu achten, dass in die Berechnungsformeln die für die jeweils verwendete Holzart korrekten Werte der elastomechanischen Eigenschaften eingesetzt werden. Zudem sind die teils veralteten Angaben zu Klebstoffen und Leimen durch aktuell geltende Normen oder die Herstellerangaben zu ersetzen.

Eine weitere Möglichkeit zur Dimensionierung von Lastenfahrrädern bietet die wissenschaftliche Arbeit von Kluge und Eichhorn (2021). Die Ausarbeitung beinhaltet zwei verschiedene Konzepte zur Auslegung von Bauteilen aus Holz im Maschinenbau für statische Lastfälle. Die Konzepte bestehen aus einem Berechnungskonzept und einem Simulationskonzept. In weiteren geplanten Untersuchungen sollen Konzepte für dynamische Lastfälle entwickelt werden.

Das Berechnungskonzept findet Anwendung bei der händischen Auslegung wenig komplexer Bauteile. Es basiert auf der Normungsreihe DIN EN 1995, die Bemessungs- und Konstruktionsgrundlagen für Bauwerke aus Holz enthält. Diese Grundlagen werden auf den Maschinenbau, insbesondere auf die Anforderungen leichter Konstruktionen, übertragen. Daraus resultiert ein semiprobabilistisches

Sicherheitskonzept für die Auslegung von Bauteilen aus Holzwerkstoffen für den Maschinenbau. Dieses Konzept bezieht dabei die Ingenieurskonstanten und Versagenskriterien von Holz mit ein und gibt diese in Form von Teilsicherheitsbeiwerten wieder. Zu den für Holz bedeutenden Ingenieurskonstanten zählen der Elastizitätsmodul, der Schubmodul und die Poissonzahl. Die Versagenskriterien für Holz setzen sich aus den Festigkeitswerten und Verzerrungen zusammen. Sowohl für die Ingenieurskonstanten als auch die Versagenskriterien werden in einer Datenbank die Kennwerte für Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Birke (*Betula* L.) eingepflegt. Die ermittelten Werte beruhen dabei auf eigens durchgeführten Prüfversuchen und auf Erfahrungswerten. Aus der Kombination von berechneten und zulässigen Beanspruchungen eines Bauteils mit den Teilsicherheitsbeiwerten ergibt sich die Führung des Sicherheitsnachweises. Je nach Holzart und Lastfall kann der Konstrukteur auf die für das jeweils zu dimensionierende Bauteil relevanten Kennwerte aus der angelegten Datenbank zurückgreifen.

Bei der Berechnung und Dimensionierung komplexer Bauteilstrukturen kommt dagegen das Simulationskonzept zum Einsatz. Im Zuge dessen wurden Randbedingungen entwickelt, die für verschiedene Anwendungs- und Lastfälle die relevanten Einflussgrößen des Materials beinhalten. Anhand der Randbedingungen kann mit Hilfe von Software und der Finite-Elemente-Methode (FEM) das Bauteilverhalten simuliert werden (Kluge & Eichhorn, 2021).

2.4.5 Leichte einspurige und mehrspurige Lastenfahrräder nach DIN EN 17860

Der Entwurf der Normungsreihe DIN EN 17860 enthält zahlreiche Anforderungen, Prüfverfahren und Konstruktionsempfehlungen für den Bau leichter, einspuriger und mehrspuriger Lastenfahrräder und besteht aus mehreren Teilen.

Die DIN EN 17860-2:2022-08 ist sowohl für einspurige Lastenfahrräder mit als auch ohne unterstützenden Elektromotor gültig. Das zulässige Gesamtgewicht darf dabei 300 kg nicht überschreiten. Für die Lenkung gilt, dass der Lenkeinschlag beidseitig mindestens 30° betragen muss. Ein zusätzlicher Endanschlag zur Vermeidung eines zu großen Lenkeinschlags und der Überlastung der Lenkung ist zu montieren. Zur Prüfung des Rahmens liefert die Norm verschiedene Prüfverfahren. Bei der dynamischen Prüfung mit pedalerenden Kräften, die beim Anfahren und bei Steigungsfahrten auftreten, wird eine Prüfkraft abwechselnd auf die Pedale eingebracht. Mithilfe der Prüfung mit horizontal wirkenden Kräften werden Kräfte,

wie sie beim Bremsvorgang auftreten, in den Rahmen geleitet. Bei den dynamischen Prüfungen, bei denen einerseits eine Kraft vertikal in den Sattel und andererseits in die Vorrichtung zur Lastenaufnahme geleitet wird, werden die Auswirkungen des Fahrers und des Beifahrers, beziehungsweise der Ladung auf den Rahmen, geprüft. Bei der Stoßprüfung des Rahmens wird dieser mit vorgegebenen Kräften an verschiedenen Punkten belastet, angehoben und aus einer definierten Höhe fallengelassen. Die Prüfungen gelten als bestanden, wenn keine Risse oder Brüche sichtbar werden. Für die dargestellten Prüfverfahren gelten jeweils unterschiedliche Prüfbedingungen, je nach Art der Nutzung. Im Zuge dessen ist zu unterscheiden, ob das Lastenfahrrad für private oder kommerzielle Zwecke eingesetzt wird. Bei der Konstruktion des Rahmens und der Ladungszone ist darauf zu achten, dass diese einen möglichst niedrigen Schwerpunkt aufweisen. Um eine Ladung vor bei der Fahrt plötzlich auftretenden Bremskräften und schnellen Lenkbewegungen zu sichern, sind Vorrichtungen wie Ösen oder Bohrungen am Rahmen anzubringen. An ihnen können Netze oder Sicherungsgurte befestigt werden (DIN EN 17860-2:2022-08).

Im Gegensatz zur DIN EN 17860-2:2022-08 werden in Teil 3 der DIN EN 17860, die für leichte mehrspurige Lastenfahrräder gültig ist, die Prüfverfahren um vier weitere für diese Arbeit relevante Verfahren ergänzt. Bei der Beladung der Ladungszone des Lastenfahrrads ist die Stabilität beim Parken zu prüfen. Da mehrspurige Lastenfahrräder mit drei Rädern, je nach Konstruktion und Gesamtschwerpunkt, bei Kurvenfahrten und auf schiefen Ebenen zum Kippen neigen, ist die Konstruktion des Lastenfahrrads anhand dreier verschiedener Prüfverfahren zu untersuchen. Einerseits muss bei der statischen Kippstabilität nachgewiesen werden, dass unter einem bestimmten Neigungswinkel kein Rad den Bodenkontakt verliert. Andererseits wird mit der Überprüfung der dynamischen Kippstabilität das Kippverhalten bei Kreisfahrten untersucht. Auch bei dieser Prüfung darf kein Rad den Kontakt zum Boden verlieren. Bei der dynamischen Prüfung mit lateralen Kräften werden die bei Kurvenfahrten auftretenden Querkräfte in den Rahmen eingeleitet. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn sowohl an der Radaufhängung als auch am Rahmen keine erkennbaren Risse oder Brüche des Materials zu sehen sind (DIN EN 17860-3:2022-08).

In Teil 6 der DIN EN 17860 werden explizite Anforderungen an den Personentransport mittels Lastenfahrräder definiert. Sie gilt für Personen, die mit Blick in oder gegen die Fahrtrichtung transportiert werden. Der Anwendungsbereich beschränkt sich außerdem nur auf gemäßigte Fahrten. Dazu zählen Pendelfahrten oder

Fahrten in der Freizeit. Die Norm gilt folglich nicht für den kommerziellen Transport von Personen. In der DIN EN 17860-6:2024-02 wird die maximale Anzahl an Mitfahrern durch das zulässige Gesamtgewicht des Lastenfahrrads begrenzt. Für die Prüfung der Sitzmöglichkeiten bietet die Norm drei verschiedene Prüfverfahren. Bei der Prüfung der Sitze mit dynamischen Belastungen dürfen unter einer bestimmten Last keine Risse oder Brüche in der Sitzfläche entstehen. Dies gilt ebenfalls, wenn für den Personentransport Sitzbänke vorgesehen sind. Für die statische Sitzprüfung gelten die gleichen Anforderungen wie für die dynamische Sitzprüfung. Mithilfe des Prüfverfahrens der Fußstützen kann die Tragfähigkeit gegen vertikal auftretende Kräfte ermittelt werden. Diese treten vor allem beim Einstieg von Personen in den Sitzbereich der Ladungszone auf. Wenn keine plastische Verformung nach der Prüfung verbleibt, gilt sie als bestanden. Es gilt zudem die Anforderung, dass jede Sitzfläche mit einer Fußstütze auszustatten ist. Der Boden der Ladungszone zählt dabei bereits als Fußstütze. An die Armlehnen von Lastenfahrrädern stellt die Norm die Anforderung, dass nach Aufbringen einer vertikalen Kraft, wie sie beim Festhalten beim Einstieg einer Person auftreten, kein sichtbarer Riss oder ein Bruch des Materials zu erkennen ist. Für alle Kanten und überstehenden Teile im Sitzbereich der Ladungszone gilt, dass diese nicht scharfkantig sein dürfen. Folglich können sie entweder gerundet, gebrochen oder gefast ausgeführt werden. Die Norm enthält weiterhin einzuhaltende Maße, die die Geometrie des Sitzbereichs betreffen. Diese können anhand einer Tabelle ermittelt werden. Für die Rückenlehne der Sitzfläche wird ein Winkel von mindestens 90° zur Sitzfläche gefordert (DIN EN 17860-6:2024-02).

2.4.6 Elektromotorisch unterstützte Räder nach DIN EN 15194

Der Anwendungsbereich der DIN EN 15194:2023-03 umfasst verschiedene Sicherheitsaspekte für die Dimensionierung von Fahrrädern mit Unterstützung durch einen Elektromotor. Die Norm gilt für Fahrräder, die auf öffentlicher Infrastruktur benutzt werden. Obwohl die Norm den Schwerpunkt auf sicherheitsrelevante Teile wie Bremsen oder Beleuchtungssysteme legt, enthält sie auch allgemeine Anforderungen an scharfe Kanten von Bauteilen. Diese dürfen nicht scharfkantig sein, um die Beine und die Hände des Benutzers bei der Durchführung von Wartungsarbeiten nicht zu verletzen. Dazu können die Kanten gebrochen oder mit einer Rundung bzw. Fase versehen werden. Des Weiteren umfasst die Norm Anforderungen an den Inhalt einer Gebrauchsanleitung, die dem Lastenfahrrad beiliegen muss (DIN EN 15194:2024-03).

3 Projekthistorien der Lastenfahrräder und Review des Designs

Das folgende Kapitel 3 beinhaltet die Zusammenfassung beider Lastenfahrzeug-Projekte an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe. In Kapitel 3.1 wird die Projekthistorie des Longjohns und in Kapitel 3.2 die Projekthistorie des Lastentrikes dargestellt. Es werden die jeweilige Ausgangsidee der Projekte sowie die Durchführung und die Fertigstellung der Lastenfahrräder beschrieben. In Kapitel 3.3 werden die Konstruktionsdetails und das Review des Designs vorgestellt.

3.1 Projekthistorie des Longjohns

Zu Beginn des Projekts bestand die Idee eines Dozenten, im Rahmen des Studienprojekts im 4. Semester des Fachbereichs Produktions- und Holztechnik ein nachhaltiges Lastenrad aus Sperrholz zu entwickeln (siehe Abbildung 12).

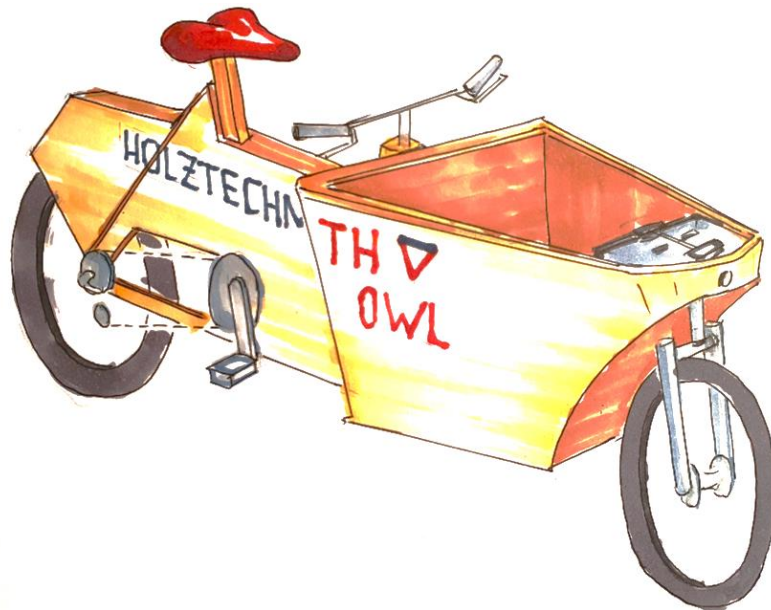


Abbildung 12: Skizzierung einer möglichen Longjohn-Konstruktion aus Sperrholz

Quelle: Riegel, 2024

Im Internet lassen sich zahlreiche Pläne und Konzepte von Lastenfahrrädern zum Nachbauen finden. Für den Bau des Rahmens werden jedoch meistens Legierungen aus Aluminium oder Stahl verwendet, für deren Verarbeitung anspruchsvolle Verfahren notwendig sind, die die handwerklichen Fähigkeiten einer Privatperson übersteigen können. Die Studierenden des Projekts sollten daher eine alternative Möglichkeit aus Sperrholz konstruieren und entwickeln. Das entwickelte

Lastenfahrrad sollte aus Teilen eines alten 26-Zoll-Fahrrads bestehen und in Kombination mit einem Sperrholz-Rahmen die Möglichkeit zum Upcycling alter Fahrräder bieten. Um der Hochschule einen Mehrwert zu bieten, sollte es einerseits durch alle Angehörigen der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe für den Personen- und Lastentransport zur Verfügung stehen und ausleihbar sein. Andererseits bestand die Idee, die Zeichnungen und Baupläne zum Nachbau entweder auf dem Internetauftritt der Hochschule zu veröffentlichen oder die Einzelteile durch die Hochschule zu vermarkten. Da sich daraus unterschiedliche Haftungsfragen ergeben und eine finale Entscheidung seitens der Hochschule zu Beginn des Projekts noch ausstand, waren die Verwendung der anerkannten Regeln der Technik und die Durchführung der Prüfungen nach DIN 79010:2020-02 nicht nur aus konstruktiver, sondern zunächst auch aus rechtlicher Sicht für die Hochschule wichtig. Das Lastenfahrrad sollte anschließend in begrenzter Zahl durch interessierte Studierende im Labor der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe gefertigt werden können.

Im Zuge des Studienprojekts im Sommersemester 2022/2023 wurde durch die Studierenden, anhand von Vorüberlegungen und eines gegebenen Grundkonzeptes des Dozenten, ein Lastenfahrrad in Form eines Longjohns, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, konstruiert. Das Konzept gab den Studierenden vor, dass ein durchgehender, tragender Holm unter der vorderen Transportkiste für die Verbindung des hinteren Teils des Rahmens mit dem Vorderrad vorgesehen war. Als Ausgangsmaterial sollten für den Rahmen des Longjohns 6 mm Birkensperrholz und für weitere Bauteile Birke-Multiplex und Sipo (*Entandrophragma utile* (DAWE & SPRAGUE) SPRAGUE) verwendet werden. Die ursprüngliche Idee bestand darin, die Einzelteile auf einer Wasserstrahlschneidanlage zu schneiden. Aufgrund mangelnder Verfügbarkeit wurden die Einzelteile auf dem Bearbeitungszentrum des Holzlabors der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe gefräst. Um die Montage der Einzelteile zu vereinfachen und die Toleranzen beim Fügen zu gewährleisten, wurde eine Reihe von konstruktiven Features eingesetzt. Diese werden ausführlich im Review des Designs in Kapitel 3.3 vorgestellt. Zunächst wurden die Lastannahmen aus der DIN 79010:2020-02, die Anforderungen und Prüfverfahren für ein- und mehrspurige Fahrräder enthält, herangezogen. Die Lastannahmen dienen dazu, den Studierenden aufzuzeigen, welche Kräfte in der Praxis auftreten und an welchen Stellen sie auf das Lastenfahrrad wirken. Dies war für die Auslegung der Einzelteile notwendig. Im Weiteren wurde das Design des Lastenfahrrads anhand verschiedener Workshops erarbeitet und stetig verbessert.

Nach der Fertigstellung des Designs und des Grundkonzepts wurde ein physikalisches Mock-Up im Maßstab 1:1 gebaut, um anhand dessen die Praxistauglichkeit der Transportkiste im Zuge des Reviews des Designs zu überprüfen. Dazu wurde getestet, ob ein Kleinkind im Kindergartenalter in der Lage ist, ohne die Hilfe einer anderen Person in die Transportkiste zu klettern. Die Abbildung 13 zeigt im Folgenden den Aufbau des Mock-Ups und die Durchführung des Tests mit einem Kleinkind vor dem Laborgebäude der Hochschule.



Abbildung 13: Überprüfung der Funktionalität der Transportkiste

Quelle: Kiwitt, 2023

Da die Testergebnisse des Mock-Ups positiv bewertet wurden und damit auch das Design erfolgversprechend erschien, folgte die Auslegung des Longjohns nach den in Kapitel 2.4. beschriebenen anerkannten Regeln der Technik. Unter deren Zuhilfenahme ließen sich die Teile aus Birkenperrholz durch die Studierenden differenziert auslegen. Um die Ausleihe des Longjohns und die Fahrt auf öffentlichen Straßen zu ermöglichen, wurden außerdem die Anforderungen der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) eingehalten. Diese umfassen die Montage von verkehrsrelevanten Bauteilen wie Klingel, Bremsen, Reflektoren und Lichtern.

Da sich bei der Auslegung des Rahmens der geringe Schubmodul und die geringe Schubfestigkeit des Sperrholzes als Schwachstellen herausstellten, wurden Verstärkungen in Form von Verrippungen, wie sie im Bootsbau üblich sind, in die Konstruktion integriert. Um die unterschiedlichen Auswirkungen der Positionierung der Verrippungen, des Unterbodens und einer zusätzlichen Sitzfläche auf die

Steifigkeit des Rahmens des Longjohns zu überprüfen, untersuchte ein Teilnehmer des Projekts verschiedene Konstruktionsvarianten unter Einsatz der FEM. Da der Einsatz der Software nur als schnelle Möglichkeit zur Optimierung der Konstruktion dienen sollte, wurden aus zeitlichen Gründen lediglich statische Randbedingungen gewählt. Die Abbildung 14 zeigt die simulierten Verformungen der Rahmen mit Hilfe der FEM bei unterschiedlichen Konstruktionsprinzipien des Longjohns.

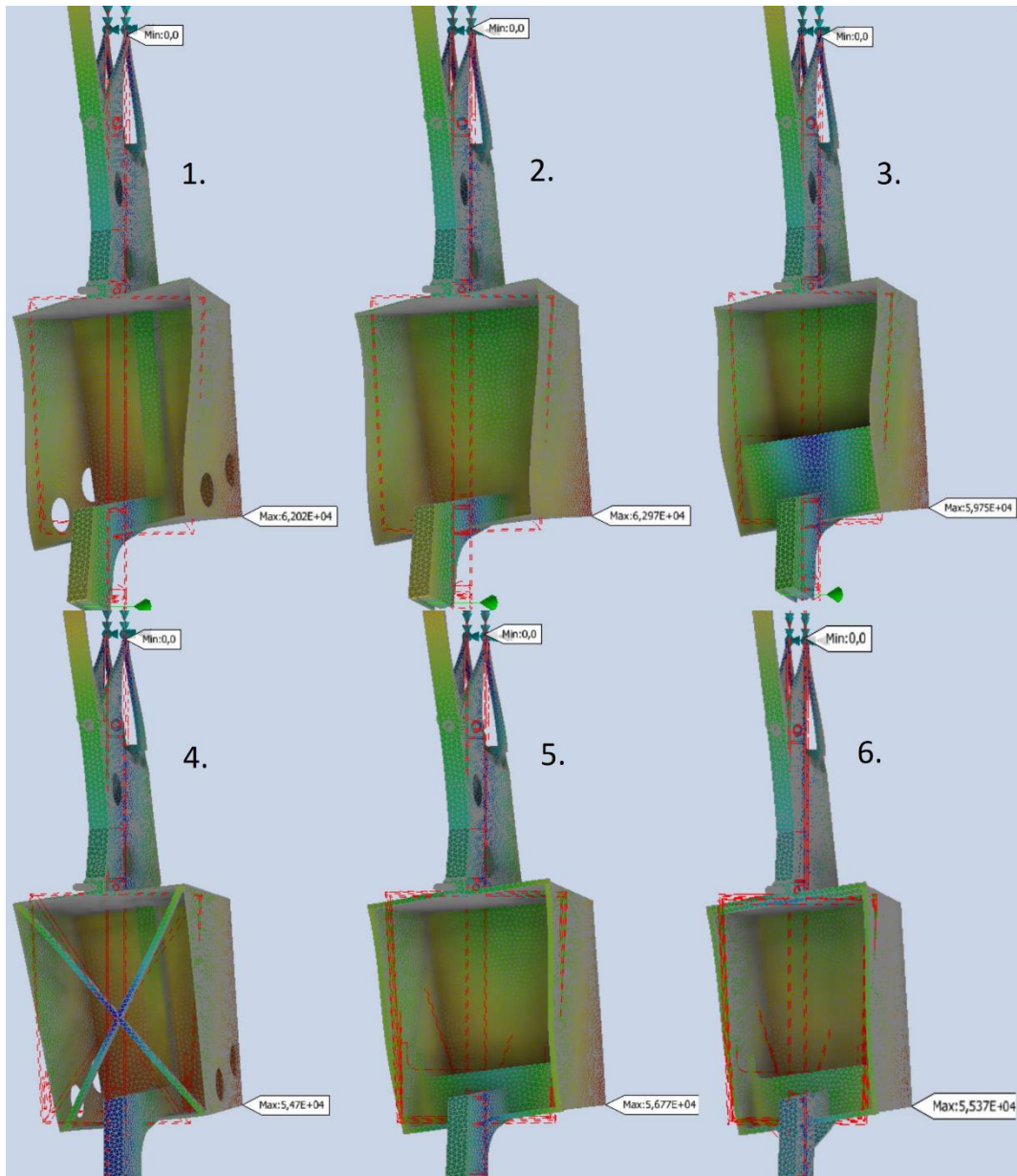


Abbildung 14: Simulation der Verformungen des Sperrholzrahmens mit Hilfe der FEM

Quelle: Vogt, 2023

In der Software wurden die hinteren Ausfallenden fest eingespannt. An der Vordergabel wurde ein Drehmoment aufgebracht. Die Anisotropie des Birkensterrholzes wurde außer Acht gelassen. Es ist zu erkennen, dass das Design 6 zu einer

geringeren Verformung der Konstruktion im Vergleich zum ursprünglichen Design 1 neigte. Dadurch verringerte sich auch die Maximalspannung in Design 6. Dies wurde durch die Verschiebung des Unterbodens über den durchgehenden, tragenden Holm in Kombination mit einer eingezapften Sitzfläche im hinteren Bereich der Transportkiste und den Abschlussprofilen aus Sipo am oberen Rand der Transportkiste erreicht. Aufgrund dessen wurde das alte Design des Longjohns verworfen und das optimierte Design 6 weiterverfolgt.

Im weiteren Verlauf des Projekts erfolgte der Bau eines Longjohn-Prototyps. Dabei wurden die Studierenden durch das Laborpersonal der Hochschule unterstützt. Der Prototyp wurde so weit komplettiert, dass die Prüfungen des Rahmens des Longjohns durchgeführt werden konnten. Der Prototyp-Rahmen wurde im Prüfstand des Laborgebäudes der Hochschule getestet. Dazu wurde der Prüfstand, der für die Prüfung von Möbeln ausgelegt ist, an die normativen Anforderungen angepasst. Das Longjohn wurde insgesamt vier verschiedenen Prüfungen unterzogen. Diese erfolgten nach der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen DIN 79010:2020-02 und wurden erfolgreich bestanden. Sowohl der jeweilige Prüfaufbau als auch die Prüfergebnisse werden in Kapitel 4 dargestellt. Nach Durchführung der Prüfungen des Rahmens wurde das Longjohn komplettiert. Im Zuge einer anderen Bachelorthesis wurden am fertigen Longjohn zudem die Standsicherheit und die Bremsen nach DIN 79010:2020-02 geprüft. Die Arbeit wurde zwar nicht abgeschlossen, dennoch wurde mündlich überliefert, dass die Prüfungen bestanden wurden. Die Abbildung 15 zeigt das Longjohn im fertigen Zustand.



Abbildung 15: Fahrbereites Longjohn aus Birkensperrholz

Quelle: Riegel, 2024

Zum Abschluss des Projekts fertigten die teilnehmenden Studierenden jeweils ein eigenes Longjohn. Bei der Wahl der Anbauteile wurden aus Budgetgründen unterschiedliche Entscheidungen getroffen. Zudem kamen zur Verbesserung der Fahrdynamik unterschiedliche Lenkungen zum Einsatz. Aufgrund dessen musste das Design des Longjohns bei einigen Studierenden individuell angepasst werden. Die Kosten für das Material eines Longjohns aus Sperrholz, inklusive einer kostengünstigen Ausstattung, beliefen sich auf 400 bis 500 Euro. Die Fahrdynamik des Longjohns wurde von den Teilnehmern als wettbewerbsfähig bewertet. Mit Erreichen der Ziele des Dozenten wurde das Longjohn-Projekt erfolgreich abgeschlossen.

3.2 Weiterentwicklung zum Lastentrike

Im Rahmen des Schwerpunkt-Moduls Maschinen- und Vorrichtungsbau des Studiengangs Holztechnik, wurde im Wintersemester 2023/2024 die Weiterentwicklung des Longjohns zu einem Lastentrike angestrebt. Das Lastentrike sollte, wie auch das Longjohn, durch die Angehörigen der Hochschule für den Personen- und Lastentransport genutzt werden können. Im Gegensatz zum Longjohn wurde bei der Entwicklung des Lastentrikes jedoch ein inklusiver Ansatz verfolgt, um die Voraussetzungen für einen barrierefreien Personentransport zu erfüllen. Als Projektbudget standen 1000 Euro für sämtliche Zukaufteile zur Verfügung. Sowohl das Sperrholz als auch das Laborpersonal wurden durch die Hochschule bereitgestellt.

Da gewährleistet werden sollte, dass ein Mensch mit Behinderung, der im Rollstuhl sitzt und bei der Umsetzung aus einem Rollstuhl in die Transportkiste des Lastenfahrrads auf die Hilfe des Fahrers angewiesen ist, wurde das Lastentrike aus Standsicherheitsgründen mit zwei Vorderrädern und einem Hinterrad ausgestattet.

Aus rechtlichen Gründen wurden wie auch beim Longjohn zunächst alle geltenden Normen, Richtlinien und anerkannten Regeln der Technik beachtet. Dies hatte den Hintergrund, dass zu Beginn des Projekts noch keine Entscheidung der Hochschule vorlag, in welchem Umfang die Ergebnisse des Lastentrikes veröffentlicht werden und ob die Einzelteile kommerziell angeboten werden sollen. Die Lastannahmen für Lastenfahrräder wurden wie auch beim Longjohn aus der DIN 79010:2020-02 entnommen. Das zulässige Gesamtgewicht sollte 250 kg betragen. Dadurch würde der Transport von Personen oder Lasten mit einem Gewicht von bis zu 110 kg sichergestellt werden. Weiterhin sollte das Lastentrike optional mit einem Elektroantrieb ausgestattet werden können. Dazu wurden bei der

Auslegung die Anforderungen der DIN EN 15194:2024-03, die in Kapitel 2.4.6 beschrieben wurden, eingehalten. Die Wahl des Antriebs fiel auf einen Nabenmotor-Nachrüstsatz, der am Hinterrad montiert wurde. Da der Motor nur eine Trittmunterstützung bis maximal 25 km/h liefert und danach abschaltet, galt das Lastentrike in dieser Ausführung aus rechtlicher Sicht als Pedelec. Durch den Einsatz eines Elektromotors waren außerdem die Bestimmungen der EG-Maschinenverordnung 2023/1230 zu beachten. Aufgrund des Motors wäre beim Lastentrike im Falle eines kommerziellen Vertriebs eine CE-Kennzeichnung benötigt worden. Nach Einhaltung aller Vorschriften wäre diese am Lastenfahrrad gut sichtbar befestigt worden. Im Rahmen eines Workshops wurde im Projekt daher eine Risikoanalyse durchgeführt, die für die Erlangung der CE-Kennzeichnung notwendig gewesen wäre.

Da beim Longjohn die Fahrdynamik im Vergleich zu einem konventionellen Fahrrad von den Teilnehmern des vorangegangenen Projekts als ungewöhnlich beschrieben wurde, sollte diese beim Lastentrike durch den Einsatz einer Drehscheimellenkung mit Gestänge verbessert werden. Da die den Rahmen betreffenden gewählten konstruktiven Features und Verfahren, die in Kapitel 3.3 dargestellt werden, beim Longjohn zum Erfolg des Projekts geführt haben, wurden diese auch für das Lastentrike weitestgehend übernommen. Es wurden lediglich die Positionierung und Abmessungen einiger Features angepasst und verbessert. Außerdem wurde das Konstruktionsprinzip des hinteren Teils des Rahmens des Longjohns inklusive der hinteren Ausfallenden übernommen.

Um den ergonomischen Transport einer Person gewährleisten zu können, wurden bei der Dimensionierung der Transportkiste entsprechende geometrische Empfehlungen aus der DIN 33402-2:2020-12 entnommen. Im Zuge dessen wurde der vordere Teil der Transportkiste umrüstbar gestaltet. Neben einem geschlossenen Schott für den Transport von Kindern oder Lasten wurde eine einhängbare Fußstütze für den Transport eines Erwachsenen konstruiert. Es folgte wie auch beim Longjohn der Bau eines Mock-Ups, um beim Review des Designs die Praxistauglichkeit der Transportkiste zu prüfen. Dazu erklärte sich eine Person mit einer Gehbehinderung, die im Rollstuhl saß, bereit. Im Gegensatz zum Longjohn wurde jedoch lediglich ein 1:1-Modell der Transportkiste gebaut, da sich die Konstruktion des hinteren Teils des Rahmens bereits bewährt hatte. Im Test wurde deutlich, dass nur wenige konstruktive Anpassungen notwendig waren, da die Bedürfnisse von Menschen mit Behinderungen in der Praxis ohnehin stark variieren würden. Es konnte jedoch davon ausgegangen werden, dass das Design der

Transportkiste für einen Großteil dieser Zielgruppe praktikabel sei. Die Überprüfung des Designs wurde anhand der Prüfung des Mock-Ups erfolgreich abgeschlossen.

Entgegen der Vorgehensweise beim Longjohn wurde beim Lastentrike jedoch aufgrund der Erfahrungswerte des Longjohn-Projekts auf eine Optimierung der Sperrholz-Konstruktion mit Hilfe einer FEM-Analyse verzichtet. Außerdem wurde vom Bau eines Prototypen für die Durchführung der Prüfungen des Rahmens nach DIN 79010:2020-02 abgesehen, da, wie in Kapitel 4.5 beschrieben, von einer Übertragbarkeit der Prüfergebnisse des Longjohns auf das Lastentrike ausgegangen wurde.

Der Bau des Lastentrikes erfolgte ohne die Studierenden, durch den Dozenten und das Laborpersonal. Während der Bauphase war es notwendig, einige Bauteile umzukonstruieren und weitere Anbauteile hinzuzufügen. Es fiel auf, dass sich aufgrund der Komplexität der Zusammenbau des Lastentrikes noch anspruchsvoller gestaltete als der des Longjohns. Im Folgenden zeigt die Abbildung 16 das Projektergebnis des Lastentrikes in der Ausführung für den Transport von Lasten und/oder Kindern.



Abbildung 16: Lastentrike aus Birkensperrholz nach der Fertigstellung

Quelle: Eigene Darstellung

Um das Lastentrike inklusiv zu gestalten, wurde wie bereits erläutert eine austauschbare Fußstütze konstruiert, die von oben eingesteckt werden kann. Die nachfolgende Abbildung 17 zeigt die umgerüstete Transportkiste des Lastentrikes für den Transport einer erwachsenen Person.



Abbildung 17: Austauschbare Fußstütze des Lastentrikes für den Transport von Erwachsenen

Quelle: Eigene Darstellung

Das Projekt wurde durch die Erstellung verschiedener Dokumente für das Lastentrike und das Longjohn abgeschlossen. Diese bestanden aus den allgemeinen Nutzungsbedingungen, einem Ausleihformular, einer Checkliste, die vor Beginn einer Fahrt abgearbeitet werden muss, um die Fahrtauglichkeit der Lastenfahrräder zu gewährleisten, einem Wartungsheft und einer Bedienungsanleitung. Die Bedienungsanleitung enthält Angaben zum Projekt inklusive eines 3-D-Modells, Informationen zum bestimmungsmäßigen Gebrauch des Lastentrikes, die allgemeine Funktionsweise sämtlicher Bauteile einschließlich der Elektronik, Hinweise zum Beladen und Sichern von Gütern und Personen, Anweisungen zur fachgerechten Wartung in Form des Wartungsheftes, Hinweise zu potenziellen Gefahren, deren Entstehung und deren Vermeidung, sowie Angaben zur Umwelt und Entsorgung des jeweiligen Lastenfahrrads.

Mit Blick auf die zukünftige Ausleihmöglichkeit beider Lastenfahrräder durch die Angehörigen der Technischen Hochschule wurde ein Haftungsausschluss formuliert. In diesem wurde schriftlich festgehalten, dass die Technische Hochschule für keinerlei Schäden haftet, die bei der Nutzung der Lastenfahrräder entstehen können, außer bei Vorsatz und Fahrlässigkeit. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich um einen Prototyp handelt und kein Versicherungsschutz seitens der Hochschule gewährleistet wird. Dennoch wird erwähnt, dass bei der Konstruktion beider Lastenfahrräder die allgemein anerkannten Regeln der Technik eingehalten

wurden. Ein Ausleihformular, das vor einer Fahrt ausgefüllt und unterschrieben werden muss, dient der Hochschule als rechtliche Absicherung.

Außerdem wurde die Open-Source-Dokumentation auf dem Internetauftritt der Hochschule veröffentlicht. Diese enthält eine Bildaufbereitung des Projekts sowie sämtliche Pläne und 2-D- und 3-D-Datensätze zum Bau der Lastenfahrräder. Es wird darauf hingewiesen, dass aufgrund der Komplexität der Lastenfahrräder die Umsetzung sehr anspruchsvoll ist. Sie wird daher nur ambitionierten Personen mit großer technischer und handwerklicher Erfahrung empfohlen. Die Hochschule verlangt für die Nutzung der Pläne, dass zu Werbezwecken das Logo der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe an beiden Seiten der Transportkiste anzubringen ist.

3.3 Konstruktionsdetails und Review des Designs

Im folgenden Kapitel 3.3 werden die verschiedenen eingesetzten konstruktiven Features und Verfahren dargestellt, die beim Longjohn und Lastentrike zu einer erfolgreichen Umsetzung der Rahmen-Konstruktion und der Transportkiste aus Birkenperrholz geführt haben.

3.3.1 Einzapfungen

Für die Verbindung zweier Sperrholz-Bauteile in verschiedenen Plattenebenen wird sowohl beim Longjohn als auch beim Lastentrike das Konstruktionsprinzip des Einzapfens verwendet. Die Einzapfungen bestehen aus einem rechteckigen Zapfen an einem Bauteil und einem passenden Zapfenloch am anderen Bauteil (siehe Abbildung 18).



Abbildung 18: Zapfenverbindung zwischen Vorderstück und Radkastendeckel

Quelle: Eigene Darstellung

Durch die Geometrie des Zapfenlochs zählen Einzapfungen zu den formschlüssigen Verbindungen, da mindestens ein Freiheitsgrad eingeschränkt wird. Zapfenverbindungen können Schubkräfte aufnehmen und in andere Bauteile weiterleiten. Sie lassen sich z. B. mit dem Eurocode 5 differenziert auslegen. Da die Bauteile ohne Zapfen nach der Angabe von Leim zum Verrutschen neigen würden, vereinfacht der Formschluss der Einzapfungen die Verklebung. Dies erleichtert vor allem einer unerfahrenen DIY-Person die Verklebung der Elemente. Durch die präzise Fertigung der Sperrholzteile auf dem Bearbeitungszentrum können mit Hilfe der Zapfen die Positioniergenauigkeit der einzelnen Elemente zueinander und die Fügertoleranzen sichergestellt werden. Bei der Verklebung wirken sich die Zapfen zudem positiv auf die Stabilität der Verbindung aus, da sich dadurch die Leimfläche vergrößert. Ursprünglich sollte die Verklebung der Sperrholzteile mit Epoxidharz erfolgen. Dies wurde jedoch verworfen, da sich die korrekte Einhaltung der Mischungsverhältnisse für den ungeübten Anwender als zu schwierig erwies und es zu Fehlverklebungen kam. Im Zuge einer weiteren Testverklebung wurde sich außerdem gegen den Einsatz eines einkomponentigen Polyurethan-Klebstoffes entschieden, da dieser bei der Verklebung aufschäumt und dadurch anschließend zu viel Nacharbeit notwendig war. Aufgrund dessen wird für die Verklebung der Sperrholzteile PVAc-Holzleim der Beanspruchungsgruppe D4 verwendet. Dieser zeichnet sich durch seine Wasserfestigkeit aus und schützt die Verklebungen der Verbindungen des Lastenfahrads vor hoher Luftfeuchtigkeit und verschiedenen Witterungseinflüssen im Freien.

3.3.2 Profilleisten

Beim Longjohn und Lastentrike kommen vier verschiedene Profilleisten-Arten aus Sipo zum Einsatz (siehe Abbildung 19).

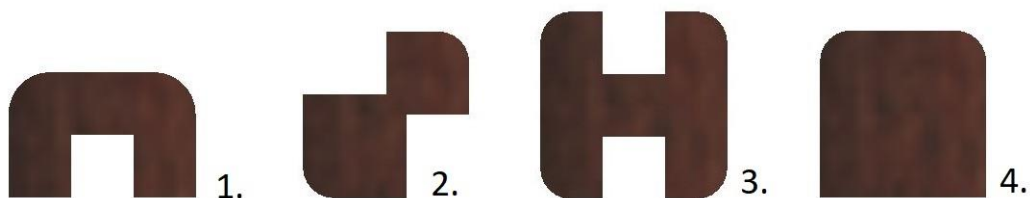


Abbildung 19: Profilleisten aus Sipo

Quelle: Eigene Darstellung

Das rot-bräunliche Sipo-Holz zeichnet sich durch eine gute Verarbeitbarkeit, ein gutes Stehvermögen, gute Möglichkeiten zur Oberflächenbehandlung und gute Eigenschaften bei der Verklebung aus (Wagenführ & Wagenführ, 2022).

Das einseitig genutete und oberseitig abgerundete Profil wird für den oberen Abschluss der Kiste verwendet (1.). Es fungiert dabei außerdem als Armlehne für den Personentransport. Ein Standardprofil, das zwei große Leimflächen aufweist, wird für die Eckverbindungen der Transportkiste und teilweise für die Montage des Rahmens verwendet (2.). Durch die Verwendung dieser beiden Profilleisten-Typen wird die Steifigkeit der Transportkiste und des Rahmens bei beiden Lastenfahrrädern erhöht. Zudem können durch das erste Profil der Verschleiß und die direkte Bewitterung der Sperrholz-Schmalflächen vermieden werden. Das zweiseitig genutete Doppel-U-Profil (3.) wird einseitig mit dem Vorderteil der Transportkiste verleimt. Die zweite Nut dient zum losen Einstecken eines Schotts aus Sperrholz, wodurch die Transportkiste geschlossen werden kann. Es fungiert außerdem für die Aufnahme eines Schotts zum Ablegen der Füße beim Transport einer erwachsenen Person. Das in der Abbildung 19 rechts zu sehende Profil (4.) wird diagonal am hinteren Teil des Lastentrike-Rahmens montiert und dient zur Aussteifung der Konstruktion.

Alle Profilleisten überdecken entweder scharfe Kanten oder sind so konstruiert, dass sie selbst durch Rundungen nicht scharfkantig sind. Für die Verklebung wird ebenfalls, wie für die Einzapfungen, PVAc-Holzleim der Beanspruchungsgruppe D4 verwendet. Neben den technischen Vorteilen des Einsatzes von Profilleisten sorgen die Leisten auch für einen optisch ansprechenden Abschluss der Schmalflächen. Der Kontrast zwischen dem hellen Birkenperrholz und den dunkleren Leisten aus Sipo führt zur Aufwertung beider Lastenfahrrad-Designs.

3.3.3 Auskreuzung und Verrippung

Das Einbringen von Auskreuzungen und Verrippungen in Konstruktionen bringt mehrere Vorteile mit sich. Beide Verfahren dienen der Verstärkung von Elementen und erhöhen die Torsionssteifigkeit und die Biegesteifigkeit der Bauteile. Dies gelingt durch die senkrechte Anordnung zu einer anderen Plattenebene. Sie werden außerdem für die Positioniergenauigkeit der Bauteile verwendet, da sie den Abstand von verschiedenen Sperrholzteilen zueinander sichern. Durch die geschickte Anordnung von Kreuzen und Rippen ergeben sich Dreiecke, wodurch der Bauteilverbund steifer wird, da das Verformen von Dreiecken nur durch Biegung einer

Seite möglich ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich durch die Verrippungen Hohlkörper ergeben, wodurch eine Gewichtsoptimierung möglich ist (siehe Abbildung 20).



Abbildung 20: Gewichtsreduzierung zwischen Ober- und Unterboden der Transportkiste durch Verrippungen

Quelle: Eigene Darstellung

Je nach Konstruktion kann bei gleichen Festigkeiten der Materialeinsatz deutlich verringert werden. Zudem kann aufgrund dessen die maximal zuzuladende Nutzlast erhöht werden. Sowohl die Auskreuzungen als auch die Verrippungen dienen außerdem für die Lastabtragung zwischen verschiedenen Bauteilebenen. Bei den beiden Lastenfahrädern kommen daher beide Konstruktionsprinzipien beim Rahmen und auch bei der Transportkiste zum Einsatz. Da bei der überschlägigen Berechnung, im Zuge der Auslegung der Bauteile, der geringe Schubmodul und die geringe Schubfestigkeit des Birkenperrholzes als Schwachpunkt des Materials auserkoren wurden, konnte diese mit Hilfe von entsprechenden Verrippungen verbessert werden.

3.3.4 Klebenähte aus Epoxidharz

Der Einsatz von Klebenähten aus Epoxidharz ist ein gängiges Verfahren, das ursprünglich aus dem industriellen Yacht-Bau stammt. Die Klebenähte werden an allen Übergängen von Sperrholzteilen, die senkrecht aufeinander stehen, aufgebracht (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21: Klebenähte aus Epoxidharz in den Innenecken der Bauteilübergänge

Quelle: Eigene Darstellung

Dies betrifft vor allem die Verbindungen der Transportkiste. Mithilfe eines Fugenspachtels wird die Naht rund oder als Fase ausgeführt. Es ist bei der Verarbeitung auf die richtige Viskosität des Epoxidharzes zu achten, da die Nähte bei zu geringer Viskosität beim Aushärten andernfalls verlaufen können. Neben der Verklebung der Bauteile mit PVAc-Holzleim führen die Klebenähte aus Epoxidharz in Kombination mit den Profilleisten zu einer Erhöhung der Steifigkeit des Lastenfahrrads. Eine weitere Aufgabe der Klebenähte ist die Überbrückung offener Fugen. Diese entstehen zwangsläufig durch die Toleranzen der Sperrholzplatten und durch das Fräsen auf dem Bearbeitungszentrum. Zudem treten sie aufgrund des Designs der Transportkiste auf, da dort Zapfenverbindungen auftreten, bei denen Bauteile in einem Winkel von 95° aufeinandertreffen. Da das Bearbeitungszentrum lediglich drei Achsen aufweist, entstehen im Bereich der Zapfenlöcher folglich offene Fugen. Die Klebenähte verhindern außerdem an den Verbindungen das Eindringen von Feuchtigkeit in die Konstruktion.

Das Epoxidharz wird mit rot-bräunlichem Füllstoff in Form von Microballoons versetzt, sodass es den Profillisten aus Sipo ähnlich sieht. Dadurch ergibt sich ein optisch ansprechender Abschluss und ein farblicher Kontrast zum hellen Birken-sperrholz, der sich positiv auf das Erscheinungsbild des Lastenfahrrads auswirkt. Durch die Zugabe von weißen Microspheres zum Epoxidharz kann aber auch der Farbton des Birken-sperrholzes nachgeahmt werden.

3.3.5 Einsatz von kohlefaserverstärktem Kunststoff

Ein Flechtschlauch aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) wird beim Lastentrike, wie in Abbildung 22 zu sehen, sowohl vom Übergang des Rahmens zum Holm als auch am gesamten Holm unterhalb der Transportkiste aufgebracht.



Abbildung 22: Verstärkung des Holms des Lastentrikes mit CFK

Quelle: Eigene Darstellung

Das CFK wird in zwei Schichten aufgebracht, sodass der Holm doppelt ummantelt wird. Die Fasern des CFK-Schlauches liegen nach dem Glattziehen in einem Winkel von 45° zur Faserrichtung der Deckschicht des Sperrholzes. Der CFK-Schlauch wird mit Harz getränkt. Zum Aufbringen des Pressdrucks wird zunächst Stretch-Folie verwendet und anschließend bringen Schraubzwingen über Zulagen den notwendigen Pressdruck auf. Folglich kann auf den Einsatz von Vakuum zum Aufbringen des Drucks verzichtet werden, sodass die Technik auch für den DIY-Bereich geeignet ist. Das überschüssige Harz wird entfernt.

Hohe Kräfte, die zur Biegung und Torsion des Holmes führen, treten vor allem bei dynamischen Belastungen, z. B. bei Kurvenfahrten, auf. Da der kreuzweise Aufbau der Furnierschichten bei handelsüblichem Sperrholz für diese Belastungen nicht optimal angeordnet ist, dient der kohlefaserverstärkte Flechtschlauch am Anschlussbereich vom Rahmen zum Holm und am Holm selbst zur Erhöhung der Biege- und Torsionssteifigkeit. Das CFK dient außerdem zur Unterdrückung der Delamination zwischen dem kohlefaserverstärkten Flechtschlauch und dem Birkenperrholz. Die Trennung beider Schichten kann durch das Quellen- und Schwinden des Sperrholzes und der sehr geringen thermischen Dehnung des CFK-Schlauches in Verbindung mit dynamischen Belastungen auftreten. Durch die gesamte Umschließung des Holms kann die Delamination jedoch stark begrenzt werden. Lediglich am Anschlussbereich vom Rahmen zum Holm bleibt eine

geringe Delaminationsgefahr bestehen. Dieser kann mit einer an den Enden auslaufenden Klebnaht aus Epoxidharz oder PU-Klebstoff entgegengewirkt werden.

Beim ersten Prototypen des Longjohns wurde der gesamte Untergurt des Holms bis zu den horizontalen Kettenstreben noch mit CFK verstärkt, in der finalen Ausführung des Longjohns jedoch nicht mehr. Im Vergleich zum Lastentrike wird der Montageprozess des Longjohns dadurch für weniger handwerklich geschickte Personen vereinfacht. Mit Blick auf die Verwendung nachhaltiger Materialien kann der Einsatz von CFK in Verbindung mit Epoxidharz kritisch hinterfragt werden.

3.3.6 Bohrungen zur Positionierung

Sowohl beim Longjohn als auch beim Lastentrike werden aus konstruktiven Gründen an verschiedenen Positionen Bohrungen eingebracht. Mithilfe der Bohrungen für die Positioniergenauigkeit kann durch den Einsatz von CNC-Technik die Einhaltung der Toleranzen sichergestellt und damit beispielsweise die spätere Funktionsfähigkeit der Tretlager gewährleistet werden (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23: Bohrungen im Holm des Lastentrikes für die Positioniergenauigkeit der geflanschten Kugellagereinheiten

Quelle: Eigene Darstellung

Dadurch, dass die Bohrungen größtenteils auf dem Bearbeitungszentrum eingebracht werden, sind bei den Sperrholzteilen keine weiteren Vorrichtungen zum Bohren notwendig, sodass die Fehleranfälligkeit, die sich beim manuellen Ausrichten einer Bohrvorrichtung ergibt, ausgeschlossen werden kann. Bei der Montage der Anbauteile wie z. B. der Kugellager auf dem durchgehenden Holm, im Bereich des Drehpunktes der Transportkiste, vereinfachen die Bohrungen den Montageprozess. Durch den Formschluss zwischen Bohrloch und Kugellager kann bei der

Verschraubung auf die Verwendung von Schraubzwingen zur Fixierung der Position verzichtet werden. Des Weiteren wird die Fertigungszeit der Sperrholzteile durch das Einbringen der Bohrungen während des Fräsprozesses auf dem Bearbeitungszentrum verringert.

3.3.7 Konstruktiver und chemischer Holzschutz

Um eine lange Lebensdauer der Lastenfahrräder zu gewährleisten, wird bei der Konstruktion der Lastenfahrräder auf den konstruktiven Holzschutz geachtet. Alle Bauteile der Lastenfahrräder, die aus Birkenlaminat oder Massivholz hergestellt werden, werden für den Einsatz im Außenbereich mit einem Leinöl-Tungöl-Gemisch, das stark schichtaufbauend ist und oxidativ aushärtet, geölt. Zur Aufrechterhaltung des Oberflächenschutzes der Holzteile kann es zu gegebener Zeit notwendig sein, diese nachzuölen. Da die Lastenfahrräder jedoch geschlossene Bereiche aufweisen, werden sie durch geeignete Aussparungen geöffnet, um das Nachölen der ansonsten nicht zugänglichen Bereiche zu ermöglichen. Die Öffnungen weisen einen Mindestdurchmesser von 160 mm auf, um genug Platz zum Durchstecken einer Hand zu gewährleisten. Die Öffnungen finden sich teilweise am hinteren Teil des Rahmens, aber überwiegend am Unterboden der Transportkiste (siehe Abbildung 24).



Abbildung 24: Öffnungen im Unterboden der Transportkiste

Quelle: Eigene Darstellung

Da die beiden Vorderräder in dem fast komplett geschlossenen Radkasten laufen, werden die Sperrholz-Teile durch aufgewirbelte Schmutzpartikel und Wasser hoch

beansprucht. Folglich wird auch der Radkasten durch kreisförmige Ausschnitte an den Seitenteilen der Transportkiste geöffnet, sodass das punktuelle Nachölen der Innenseite des Radkastens ermöglicht wird.

Die Öffnungen dienen weiterhin zur Be- und Hinterlüftung der Konstruktion. Die Rücktrocknung von Feuchtigkeit, die durch Niederschläge oder durch Kondensation an den Bauteilen auftreten kann, wird somit gewährleistet. Die Öffnungen dienen zudem zur Gewichtsreduzierung der gesamten Konstruktion.

Mit Hilfe der Öffnungen am hinteren Rahmen wird außerdem die Montage und Verkabelung der Fahrradtechnik, die vom Lenker durch den Rahmen zu den Bremsen und zum optionalen Akku geführt wird, ermöglicht.

Da sich das aufgetragene Leinöl-Tungöl-Gemisch nicht mit stehendem Wasser verträgt, werden weitere konstruktive Maßnahmen zum Schutz des Sperrholzes der Transportkiste vorgenommen. Im Zuge dessen werden halbkreis- und viertelkreisförmige Bohrungen in die Ecken aller horizontal verbauten Sperrholzteile gefräst (siehe Abbildung 25).



Abbildung 25: Abführen von stehendem Wasser mit Hilfe einer Bohrung in einer Innenecke

Quelle: Eigene Darstellung

Dadurch kann Wasser, das bei Niederschlägen in den Ecken der Transportkiste stehen bleiben würde, nach unten ablaufen.

3.3.8 Ausgießen von Bohrungen

Ein weiteres konstruktives Feature stellt das Ausgießen von Bohrungen dar, das häufig auch im Bootsbau verwendet wird. Das Rohr für die Sattelstange und die Tretlager werden in die vorgesehene Bohrung im Tretlagerblock aus Birke-Multiplex gesteckt (siehe Abbildung 26).



Abbildung 26: Hohlraum im Tretlagerblock zwischen Sattelstange und Tretlager

Quelle: Riegel & Grüter, 2023

Anschließend werden die noch offenen Hohlräume im Tretlagerblock in mehreren Durchgängen mit flüssigem Epoxidharz ausgegossen. In dem so entstandenen Bauteilverbund ergibt sich nach dem Aushärten des Harzes sowohl ein Form- als auch ein Stoffschluss.

3.3.9 Sicherung der Sitzfläche

Da das Lastenfahrrad für den Personentransport und auch für den alleinigen Transport von Lasten dienen soll, muss die Verbindung zwischen Sitzfläche und Transportkiste lösbar ausgeführt werden, um eine einfache Demontage für die unterschiedlichen Einsatzgebiete des Fahrrads zu ermöglichen. Dazu werden bei der Fertigung der Sitzfläche aus Birke-Multiplex, zwei Zapfen im hinteren Bereich der Sitzfläche angefräst, die jeweils senkrecht zur Plattenebene ein Langloch aufweisen (siehe Abbildung 27).



Abbildung 27: Lösbare Verbindung der Sitzfläche

Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Herstellung der Rückenlehne wird das dazu passende Zapfenloch gefräst. Die Sitzfläche kann für den Transport einer gehbehinderten Person auf dem Radkastendeckel nach vorne zum Einstieg bewegt werden. Anschließend wird die Person mit der Sitzfläche nach hinten zur Rückenlehne geschoben. Nachdem die Zapfen der Sitzfläche die Rückenlehne durchdrungen haben, werden die beiden Zapfen jeweils mit einem vertikal eingebrachten T-förmigen Keil gesichert. Durch das Verkeilen ergibt sich ein Formschluss der Verbindung. Zudem sorgen die Kräfte zwischen den Breitflächen des Keils und der Rückenlehne durch die Form des Keils für einen Kraftschluss.

3.3.10 Einsatz von Aluminium-Profilen

Beim Einstieg in die Transportkiste treten durch das Festhalten an der Kiste große Verformungen an den Seitenteilen auf. Die Verformung kann zudem beim Umsetzen einer gehbehinderten Person verstärkt werden, wenn sich diese aufgrund von motorischen Problemen stärker an der Transportkiste festhalten muss. Um die Ecken der Transportkisten im Einstiegsbereich zu verstärken, werden auf beiden Seiten quadratische Sonderprofile aus Aluminium montiert (siehe Abbildung 28).



Abbildung 28: Aussteifung der Transportkiste mit einem Aluminium-Profil

Quelle: Eigene Darstellung

Die Profile werden in beiden Innenecken zwischen den Seitenteilen und dem Vorderstück montiert. Durch die Bohrungen in der Lasche des Profils können die Sperrholzteile miteinander verschraubt werden. Dadurch ergibt sich beim Einstieg eine ausreichend steife Verbindung der Bauteile. Die Aluminium-Profile dienen außerdem als Führung der integrierten innenliegenden Stützen. Diese sind beim Einstieg einer Person in die Transportkiste des Lastentrikes aus Sicherheitsgründen notwendig, da die Gefahr eines Nose-Wheelies gegeben ist, wenn der Fahrer bereits abgestiegen ist. Die Stütze wird so konzipiert, dass sie vom Fahrer, ohne vorher abzusteigen, ausgelöst werden kann.

Für die Konstruktion der Fußstütze des Lastentrikes, die für die Beförderung einer erwachsenen Person bei Bedarf eingehängt werden kann, kommen L-Profile aus Aluminium zum Einsatz. Diese dienen zur Aussteifung der Fußstütze und zum Anschluss der Fußstütze an die Transportkiste. Die Flanke des L-Profils greift dazu in das doppelt genutete U-Profil aus Sipo, das in Kapitel 3.3.2 vorgestellt wurde. Dadurch kann eine formschlüssige und leicht demontierbare Verbindung zwischen der Fußstütze und der Transportkiste realisiert werden. Da bei dieser Lösung das Gewicht der Füße jedoch nur auf die Flanke der Nut wirkt, ist bei zukünftigen Projekten der Einsatz von F-Profilen zu empfehlen. Die zweite Flanke des F-Profils würde dazu führen, dass die horizontale Kraft der Füße auch über die Breitfläche des U-Profils abgeleitet werden könnte.

3.3.11 Freies Holzbiegen

Für die Montage der hinteren Ausfallenden zur Aufnahme des Hinterrads kommen beim Longjohn und Lastentrike Profile aus Formlagenholz und Sipo zum Einsatz. Da die Hinterachse breiter als der Rahmen der Lastenfahrräder ist, muss der Sperrholz-Rahmen an dieser Stelle aufgebogen werden. Eine Sipo-Leiste, die diagonal an beiden Seiten des Sperrholz-Rahmens befestigt wird, steift diesen Bereich aus. Dazu ist es notwendig, sowohl den Sperrholzrahmen als auch die Leiste durch Umformen an die neue Form anzupassen. Im Zuge dessen werden die Verfahren Vollholz- und Sperrholzbiegen angewandt. Zunächst werden die Sipo-Leisten für 3 bis 5 Stunden gedämpft. Der Sperrholz-Rahmen wird ebenfalls gedämpft, indem der entsprechende Bereich für 90 Minuten mit kochendem Wasser begossen wird. Durch die im Wasserdampf enthaltene Wärme wird das Lignin in den Holzzellen plastifiziert, wodurch es sich besser biegen lässt. Das Wasser dient dazu, der übermäßigen Trocknung des Holzes durch die Zufuhr von Wärme entgegenzuwirken und verhindert, dass die Leiste für die Biegung zu spröde wird (Niemz et al., 2007). Analog zu dieser Vorgehensweise wird auch das vordere obere Sipo-Profil der Transportkiste des Longjohns gedämpft. Zur Formgebung werden die Leisten aus Sipo nach dem Dämpfen frei gebogen und unter Zuhilfenahme von Schraubzwingen, Zulagen und Bankhaken auf einer Hobelbank in ihrer Lage fixiert (siehe Abbildung 29).



Abbildung 29: Freies Biegen der Sipo-Leisten nach dem Dämpfvorgang

Quelle: Riegel & Grüter, 2023

Der Sperrholzrahmen wird während des Übergießens mit siedendem Wasser schrittweise gespreizt. Nach der Trocknung verbleiben die Bauteile weitestgehend in der vorgegebenen Form. Dadurch, dass nicht alle Holzfasern plastisch verformt werden, können die verbliebenen elastischen Holzfasern zum Spring-Back-Effekt führen. Beim Auftreten von Faserabweichungen sinken die elastomechanischen

Eigenschaften des Holzes, da sich der Faser-Last-Winkel vergrößert. Aufgrund dessen neigt das Holz beim Biegen zur Rissbildung und/oder zum Bruch. Dies wird außerdem durch Äste begünstigt (Niemz & Sonderegger, 2017). Bei der Holz Auswahl ist daher auf die Fehlerfreiheit der Hölzer zu achten.

3.3.12 Herstellung von Formlagenholz

Die horizontale Kettenstrebe, die als Verbindung der hinteren Ausfallenden und des Sperrholz-Rahmens fungiert, ist bei der Fahrt hohen Belastungen ausgesetzt. Sie wird daher nicht aus Massivholz hergestellt, indem sie wie die Sipo-Leisten gedämpft und gebogen wird, sondern wird aus Formlagenholz gefertigt (siehe Abbildung 30).



Abbildung 30: Vorrichtung zur Herstellung der horizontalen Kettenstrebe aus Formlagenholz

Quelle: Riegel & Grüter, 2023

Der Vorteil besteht darin, dass bei der Auswahl von Starkfurnieren, im Gegensatz zu Vollholz, die Holzfehlerfreiheit gewährleistet werden kann. Innenliegende, nicht sichtbare Holzfehler würden bei der Vollholzleiste zur Verringerung der elastomechanischen Eigenschaften führen. Nach der Furnierauswahl werden die Starkfurniere mit PVAc-Holzleim der Beanspruchungsgruppe D4 verklebt. Zur Formgebung wird eine Schablone gefertigt, in die die beleimten Furniere eingelegt werden. Anschließend wird der nötige Pressdruck mit Hilfe von Schraubzwingen aufgebracht.

4 Prüfung des Longjohns nach DIN 79010:2020-02

Um eine valide Aussage über die Qualität und Dauerhaftigkeit des konstruierten Rahmens des Longjohns treffen zu können, wurde ein Prototyp im Jahr 2022 vier verschiedenen Prüfverfahren nach DIN 79010:2020-02 unterzogen. In den folgenden Kapiteln werden der Prüfaufbau nach Norm sowie etwaige Abweichungen von der Norm bei der Durchführung der Prüfungen beschrieben. Zudem werden der Prüfaufbau nach Norm und im Prüfstand anhand von Bildern gegenübergestellt und die Prüfergebnisse dargestellt. Anschließend wird die Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf das Lastentriple diskutiert.

4.1 Dynamische Prüfung mit pedaliierenden Kräften

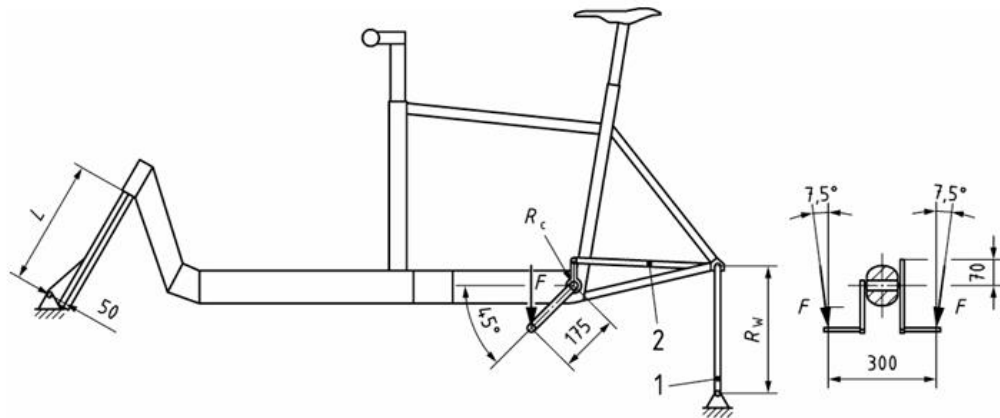
Die Prüfversuche fanden in der Möbelprüfvorrichtung des Holzlabors an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe statt. Bei der verwendeten Prüfmaschine handelte es sich um eine Ausführung des Prüftechnik-Herstellers Weinmann. Die Ausführung im Holzlabor bot die folgenden Prüfvorrichtungen: 4-Achsenprüfung, Side-to-Side-Prüfung, Sitz- und Rückenprüfung sowie Linear 2000.

Bei der Prüfung des Rahmens mit pedaliierenden Kräften, die nach Kapitel 5.9.3 der DIN 79010:2020-02 durchgeführt wurde, wurde geprüft, wie sich die Rahmenkonstruktion unter der Einwirkung von abwechselnd auf den Pedalen aufgetragenen Prüfkraften verhält. In der Realität tritt diese Belastung auf, wenn der Fahrer für die Beschleunigung aus dem Sattel geht und sein gesamtes Körpergewicht auf einem Pedal lastet.

Wie in der Norm beschrieben, wurde die Vordergabel zunächst durch eine Ersatzprüfgabel ersetzt und diese anschließend fest eingespannt. Die Ausfallenden im hinteren Bereich des Rahmens wurden mit einer Achse verbunden, die dann in einem Aluminiumprofil mit quadratischem Querschnitt gelagert wurde. An dem Aluminiumprofil wurde eine senkrechte Stütze montiert, die sich oben frei um diese drehen konnte. Alle weiteren Freiheitsgrade wurden am oberen Ende der Stütze jedoch eingeschränkt. Die Lagerung des unteren Endes der senkrechten Stütze erfolgte durch ein Kugelgelenk. Zum Aufbringen der Prüfkraft wurde eine Einheit aus Tretkurbel, Kettenblatt und Kette verwendet. Die Tretkurbeln wurden in einem Winkel von 45° zur Horizontalen positioniert. Aufgrund der Nutzung von drei Kettenblättern wurde die Kette auf das mittlere Kettenrad aufgelegt und das Kettenende in einem Winkel von 90° zur Hinterachse mit dieser verbunden. Eine nach

unten wirkende Prüfkraft von 1200 N wurde in einem Winkel von $7,5^\circ$ zur Senkrechten abwechselnd auf beide Pedale aufgebracht. Der Abstand zwischen dem Krafteinleitungspunkt zur Mittelachse des Lastenfahrrad-Rahmens betrug auf beiden Seiten 150 mm. In Abbildung 31 wird der Prüfaufbau nach DIN 79010:2020-02 dargestellt.

Maße in Millimeter

**Legende**

- R_w Höhe der starren Befestigung und des vertikalen Verbindungsstücks
- R_c Länge des vertikalen Hebelarmes
- L Länge der Ersatzprüfgabel
- 1 Kugelgelenk
- 2 Zugstange
- F Prüfkraft

Abbildung 31: Dynamische Prüfung des Rahmens mit pedalierenden Kräften nach DIN 79010:2020-02

Quelle: DIN 79010:2020-02, S.38

Die Prüfeinrichtung wurde so eingestellt, dass bevor die Prüfkraft in das andere Pedal eingeleitet wird, eine Absenkung der Prüfkraft auf dem ersten Pedal auf $\leq 5\%$ erfolgte. Die Norm sieht eine Prüfzyklen-Anzahl von 100.000 vor. Diese wurde jedoch abweichend von der Norm in zwei Durchgänge á 50.000 Zyklen aufgeteilt, da ein vorheriger Bruch des Rahmens oder Risse im Rahmen erwartet wurden. Die Prüffrequenz wurde nach DIN EN ISO 4210-3:2015-01 ermittelt. Daraus ergab sich eine Prüfgeschwindigkeit von 5 Zyklen pro Minute. Pro Zyklus wurde auf beiden Pedalen die Prüfkraft abwechselnd aufgebracht. Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt den Prüfaufbau im Prüfstand des Holzlabors an der Hochschule.



Abbildung 32: Dynamische Prüfung des Rahmens mit pedalerenden Kräften im Prüfstand

Quelle: Grüter, 2023

Nach Durchführung der ersten 50.000 Prüfzyklen wies der Rahmen weder Risse auf, noch war ein Bruch an einem der Bauteile zu erkennen. Folglich wurden die weiteren 50.000 Zyklen durchgeführt. Auch nach den insgesamt geforderten 100.000 Zyklen wies der Rahmen keinerlei sichtbare Beschädigungen auf. Die Prüfung galt somit als bestanden.

4.2 Dynamische Prüfung mit horizontalen Kräften

Die Prüfung des Rahmens mit horizontalen Kräften wurde nach Kapitel 5.9.4 der DIN 79010:2020-02 durchgeführt. Es handelt sich dabei um eine Prüfung mit wechselnden Belastungen, da diese zur stärkeren Beschädigung des Rahmens führen würden. Mit Hilfe dieser Prüfung wurde die Dauerhaftigkeit der Rahmenkonstruktion, unter der Einwirkung einer Kraft an der Vordergabel in und gegen die Fahrtrichtung untersucht.

Die hinteren Ausfallenden des Rahmens wurden mit einer Hinterachse verbunden und diese, wie in der Norm beschrieben, eingespannt. Mit Hilfe einer Vorrichtung aus Holz konnten die Prüfkräfte, abwechselnd nach vorne und hinten gerichtet, horizontal in die Vordergabel eingeleitet werden. Die Vorderradgabel wurde dazu in der Vorrichtung fest eingespannt, sodass alle Freiheitsgrade eingeschränkt wurden. Die Prüfvorrichtung selbst ließ sich nur in Richtung der horizontalen Prüfkräfte bewegen. Eine Verschiebung zur Seite und in vertikaler Richtung war nicht möglich. Die Bestimmung der Prüfkraft erfolgte nach Kapitel 5.9.2.3. Zunächst wurde der Gesamtschwerpunkt des Rahmens berechnet und das Gesamtgewicht der

Konstruktion ermittelt. Die daraus resultierende aufzubringende Prüfkraft F betrug ± 500 N. Im Folgenden zeigt Abbildung 33 den Prüfaufbau nach Norm.

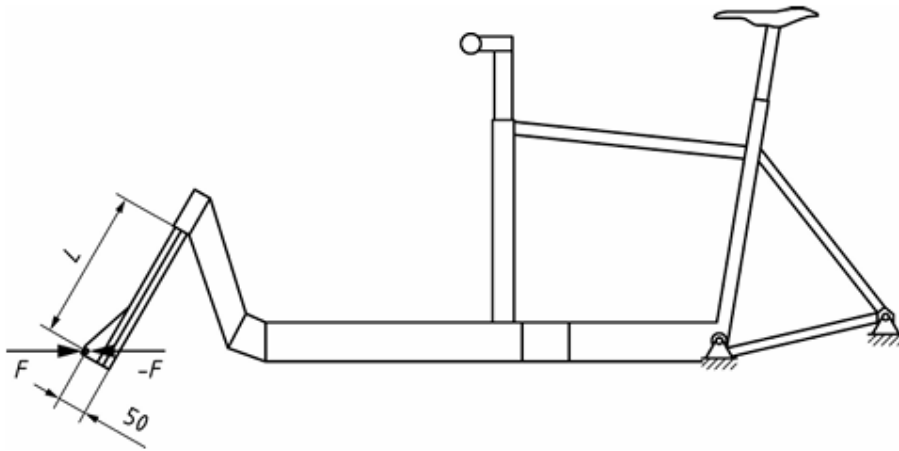


Abbildung 33: Dynamische Prüfung des Rahmens mit horizontalen Kräften nach DIN 79010:2020-02

Quelle: DIN 79010:2020-02, S. 40

In der Norm werden insgesamt 100.000 Prüfzyklen gefordert. Ein Zyklus besteht aus der abwechselnd vorwärts und rückwärts aufgebrauchten Prüfkraft. Abweichend von der Norm wurden jedoch zunächst nur 50.000 Prüfzyklen durchgeführt, da ein vorzeitiges Bauteilversagen erwartet wurde. Anschließend durchlief der Rahmen die weiteren 50.000 Prüfzyklen. Unter Zuhilfenahme der DIN EN ISO 4210-3:2015-01 wurde vorab die Prüffrequenz ermittelt. Daraus resultierte eine Prüfungsgeschwindigkeit von 3 Zyklen pro Minute. Im Vergleich zu Abbildung 33, zeigt Abbildung 34 den Prüfaufbau im Prüfstand des Holzlabors an der Hochschule.

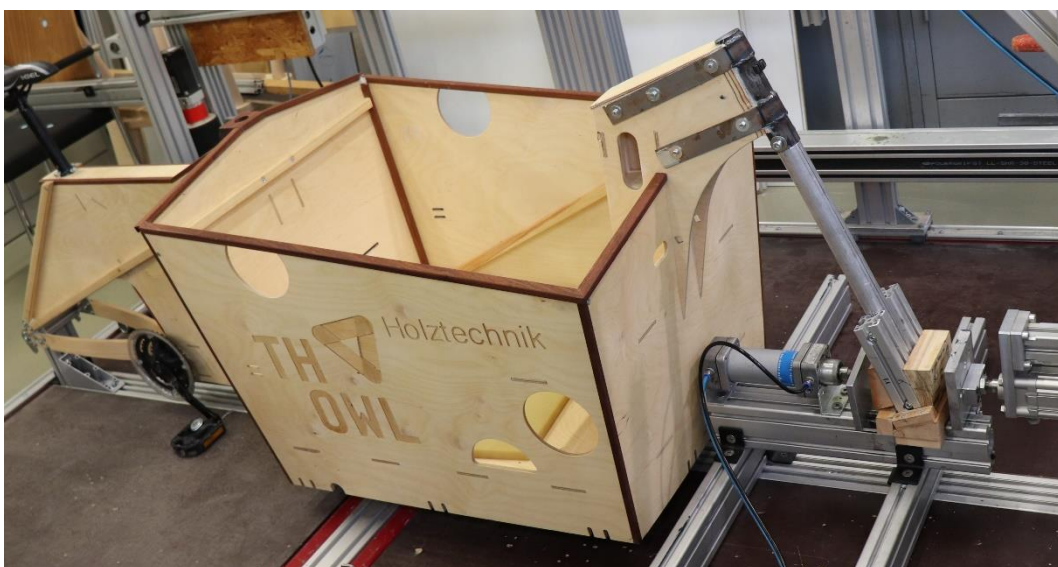


Abbildung 34: Dynamische Prüfung des Rahmens mit horizontalen Kräften im Prüfstand

Quelle: Grüter, 2023

Sowohl nach der Durchführung der ersten 50.000 Prüfzyklen als auch nach den insgesamt geforderten 100.000 Prüfzyklen wies der Rahmen keine sichtbaren Risse oder Brüche am Rahmen auf, wodurch die Prüfung bestanden wurde.

4.3 Dynamische Prüfung mit einer vertikalen Kraft auf die Sattelstütze

Die Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf die Sattelstütze wurde nach Kapitel 5.9.5 der DIN 79010:2020-02 durchgeführt. Sie diente zur Prüfung der Rahmen-Konstruktion, unter der Einwirkung einer sitzenden Person auf dem Sattel.

Wie im Prüfaufbau beschrieben, wurde die Vordergabel zunächst fest eingespannt. Die hinteren Ausfallenden wurden mit einer Achse verbunden. Die Lagerung der Achse erfolgte in einem Aluminiumprofil mit quadratischem Querschnitt. Das horizontale Aluminiumprofil wurde an einem weiteren senkrechten Profil montiert und dieses fest eingespannt. Durch die Lagerung der Achse im Profil, war eine Drehung des Rahmens um die Achse möglich. Die Anforderung der Norm wurde erfüllt, da sich dadurch der Abstand der Räder unter der Lasteinwirkung auf der Sattelstütze verändern konnte. Die Höhe der Sattelstütze wurde anhand der Herstellerangabe eingestellt. Die Norm forderte eine aufzubringende Prüfkraft F von 1200 N. Diese wurde abweichend zur Norm nicht auf einem auskragenden Ausleger, sondern senkrecht, 70 mm hinter der Mittelachse der Sattelstütze, auf dem Sattel aufgebracht. Die nachfolgende Abbildung 35 zeigt den Prüfaufbau nach Norm.

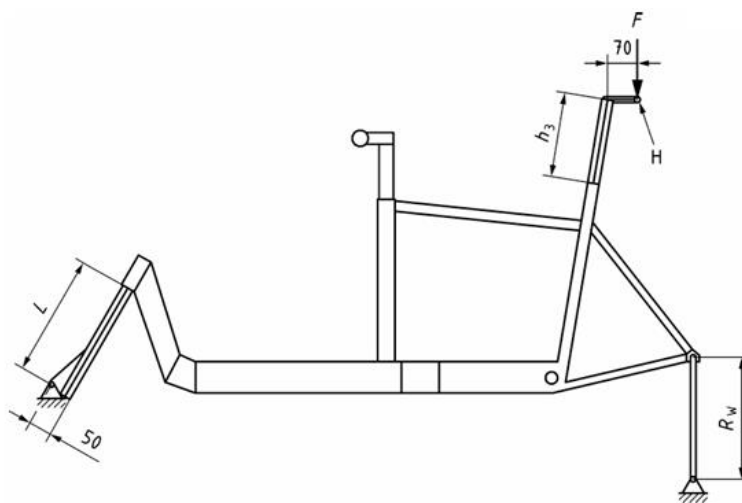


Abbildung 35: Dynamische Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf der Sattelstütze nach DIN 79010:2020-02

Quelle: In Anlehnung an DIN 79010:2020-02, S. 41

Die Norm fordert für das Prüfverfahren die Durchführung von 50.000 Prüfzyklen. Ein Zyklus besteht aus der Be- und Entlastung des Sattels mit der Prüfkraft. Da mit einem vorzeitigen Bauteilversagen gerechnet wurde, erfolgte abweichend zur Norm zunächst die Durchführung von 25.000 Prüfzyklen und nach einer Sichtprüfung des Rahmens die weiteren 25.000 Prüfzyklen. Die Prüffrequenz wurde anhand von DIN EN ISO 4210-3:2015-01 ermittelt. Pro Minute wurden 9 Prüfzyklen durchlaufen. In Abbildung 36 wird der Prüfaufbau im Prüfstand des Holzlabors an der Hochschule dargestellt.



Abbildung 36: Dynamische Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf der Sattelstütze im Prüfstand

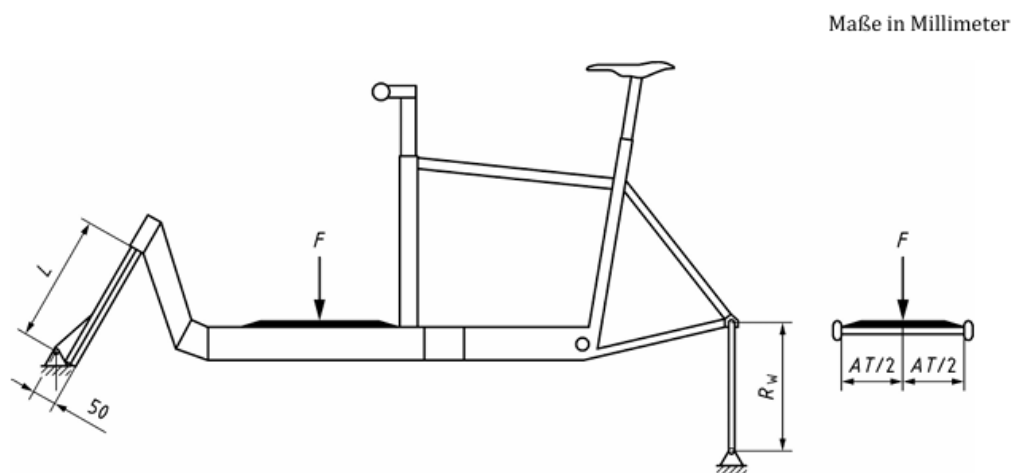
Quelle: Grüter, 2023

Nach der Durchführung von 25.000 Prüfzyklen traten am Rahmen keine sichtbaren Risse oder Brüche auf. Da auch nach insgesamt 50.000 Prüfzyklen keine Beschädigungen am Rahmen sichtbar waren, galt die Prüfung als bestanden.

4.4 Dynamische Prüfung mit einer vertikalen Kraft auf die Lastenaufnahme

Die dynamische Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf die Lastaufnahmen wurde nach Kapitel 5.9.6 der DIN 79010:2020-02 durchgeführt. Das Prüfverfahren diente dazu, die Dauerhaftigkeit der Konstruktion der Transportkiste des Longjohns unter der Einwirkung einer vertikalen Last zu ermitteln. In der Realität tritt diese Belastung durch das Beladen der Kiste oder beim Personentransport auf.

Die hinteren Ausfallenden wurden, wie in der Norm gefordert, mit einer Achse verbunden. Durch die Lagerung der Hinterachse war eine freie Drehung des Rahmens um die Hinterachse möglich. Die Vordergabel wurde fest in einer Vorrichtung eingespannt. Bei der Konstruktion der Vorrichtung wurde darauf geachtet, dass sich der Abstand der Achsen unter einer Lasteinwirkung verlängern und verkürzen konnte. Die aufzubringende Prüfkraft wurde nach Kapitel 5.9.6.2 der DIN 79010:2020-02 ermittelt und betrug 1620 N. Die Prüfkraft F wurde mit Hilfe eines linienförmigen Druckstempels über eine Platte der Fläche 400 mm x 300 mm auf den Boden der Transportkiste aufgebracht. In Abbildung 37 wird im Folgenden der normgerechte Prüfaufbau dargestellt.



Legende

AT	Spurweite
L	Länge der Prüfgabel
R_w	Radradius
F	Prüfkraft

Abbildung 37: Dynamische Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf die Lastaufnahmen nach DIN 79010:2020-02

Quelle: DIN 79010:2020-02, S. 42

Die Norm fordert die Durchführung von insgesamt 100.000 Prüfzyklen. Ein Zyklus besteht aus der Be- und Entlastung der Transportkiste mit der ermittelten Prüfkraft. Es wird jedoch auch bei dieser Prüfung mit einem vorzeitigen Konstruktionsversagen gerechnet. Aus diesem Grund wurden zunächst lediglich 50.000 Prüfzyklen durchgeführt, die Konstruktion auf sichtbare Risse oder Brüche untersucht und der Rahmen anschließend den weiteren 50.000 Prüfzyklen unterzogen. Da in der Norm keine Angaben zur Prüffrequenz festgelegt werden, wurde in der Prüfmaschine eine Zyklusdauer von 8 Sekunden eingestellt. Die Abbildung 38 zeigt den Prüfaufbau im Prüfstand des Holzlabors an der Hochschule.

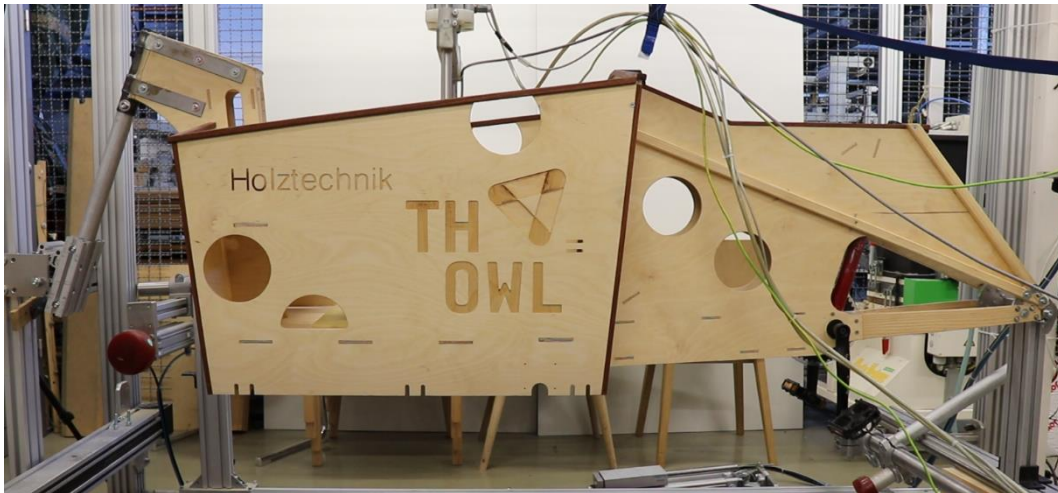


Abbildung 38: Dynamische Prüfung des Rahmens mit einer vertikalen Kraft auf die Lastaufnahmen im Prüfstand

Quelle: Grüter, 2023

Nach der Durchführung von 50.000 Prüfzyklen waren am Rahmen keinerlei Beschädigungen zu erkennen. Da auch nach Durchlaufen der geforderten 100.000 Prüfzyklen keine Risse oder Brüche am Rahmen auftraten, wurde die Prüfung ebenfalls bestanden.

4.5 Transfer der Prüfergebnisse

Mit Blick auf die Dauerhaftigkeit der Konstruktion stellt sich die Frage, inwiefern die Prüfergebnisse des Longjohns auf das Lastentrike übertragbar sind und ob ein Prototyp des Lastentrikes gebaut und die Prüfungen nach DIN 79010:2020-02 ein weiteres Mal durchgeführt werden müssen.

Bei der Konstruktion des Lastentrikes wurde der hintere Teil des Longjohns zum größten Teil übernommen. Es wurde lediglich die Positionierung der Zapfen verbessert und ein aussteifendes diagonales Sipo-Profil am Rahmen ergänzt. Zudem wurden bei beiden Lastenfahrrädern die gleichen konstruktiven Features und Verfahren eingesetzt. Der Holm des Lastentrikes wurde im Vergleich zum Longjohn zusätzlich mit kohlefaserverstärktem Kunststoff verstärkt. Durch den Einsatz des Sonderprofils aus Aluminium konnten die vorderen Ecken der Transportkiste weiter ausgesteift werden. Außerdem erfolgte im Vergleich zum Longjohn die Lastabtragung der Nutzlasten in der Transportkiste beim Lastentrike über zwei Räder. Bei der Auslegung des Lastentrikes wurde ebenfalls auf die Verwendung der anerkannten Regel der Technik geachtet.

Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass die Prüfergebnisse des Longjohns auf das Lastentriek übertragbar sind. Daraus resultiert, dass kein Prototyp des Lastentrikes gebaut werden muss und der Rahmen des Lastentrikes nach Durchführung der Prüfverfahren keine sichtbaren Risse oder Brüche aufweisen würde.

5 Fazit und Ausblick

Die Konstruktion und der Bau leichter Rahmenkonstruktionen von Lastenfahrrädern aus Sperrholz sind in der Praxis umsetzbar. In den Projekten an der Technischen Hochschule Ost-Westfalen-Lippe konnten ein Longjohn und ein inklusives Lastentrike aus 6 mm Birkenperrholz erfolgreich konstruiert und gefertigt werden. Das Longjohn und das Lastentrike stehen nach Abschluss der Projekte an der Hochschule fahrtüchtig bereit und bieten den Angehörigen der Hochschule einen Mehrwert.

Die gute Verarbeitbarkeit, die niedrigen Materialkosten und die gute Verfügbarkeit von Birkenperrholz sowie das Potential zum Up-Cycling alter Fahrräder machen den Nachbau beider Lastenfahrräder für die DIY-Szene interessant. Im Vergleich zu kommerziell angebotenen Lastenfahrrädern und DIY-Lastenfahrrädern aus metallischen Werkstoffen sind die gefertigten Sperrholz-Lastenfahrräder wettbewerbsfähig. Dies wurde einerseits durch die Auslegung des Rahmens anhand der geltenden Normen und Richtlinien sowie der Einhaltung der Anforderungen der StVZO ermöglicht. Andererseits führte die präzise Fertigung der Einzelteile auf einer CNC-Maschine und die Verwendung von konstruktiven Features wie z. B. Einzapfungen, Klebenähte aus Epoxidharz, kohlefaserverstärkter Kunststoff und Vollholz-Profile zu einer steifen Konstruktion. Folglich wurden die vier Prüfungen des Longjohns-Prototypen nach DIN 79010:2020-02 erfolgreich bestanden. Durch die erfolgreich durchgeführten Tests der Mock-Ups sind das Longjohn und das Lastentrike gebrauchstauglich.

Aus zeitlichen Gründen wurde im zweiten Projekt kein Prototyp des Lastentrikes gebaut. Die Prüfergebnisse des Longjohns können auf das Lastentrike übertragen werden, da in beiden Projekten die anerkannten Regeln der Technik eingehalten wurden. Dies wurde außerdem durch die Verwendung derselben konstruktiven Features in beiden Projekten und der Weiterentwicklung und Verbesserung der Features im Lastentrike-Projekt erreicht. Durch die rechtlich sichere Vorgehensweise in den Projekten wäre ein kommerzieller Vertrieb der Sperrholzteile der Lastenfahrräder durch die Hochschule möglich gewesen.

Die Weitergabe des Knowhows aus den Projekten in Form der Open-Source-Dokumentation vereinfacht die Montage zukünftiger Nachbauten. Durch die umfangreiche Veröffentlichung beider Projekte, wird im Zuge der Mobilitätswende ein Beitrag zu einem nachhaltigeren Individualverkehr geleistet.

In Zukunft wird sich zeigen, wie dauerhaft die Konstruktionen bei der Nutzung im Außenbereich sind und inwiefern dabei der konstruktive Holzschutz der Lastenfahrräder funktioniert.

Mit Blick auf die Veröffentlichung der Open-Source-Dokumentation zum Longjohn und zum Lastenfahrrad auf dem neuen Internet-Auftritt der Hochschule, bleibt abzuwarten, auf welche Resonanz die beiden Projekte treffen und wie viele Lastenfahrräder letztlich in der Praxis gebaut werden. Es ist davon auszugehen, dass im Zuge dessen die Konstruktion der Rahmen weiter optimiert und an die individuellen Bedürfnisse des jeweiligen Nachbauers angepasst wird. Da die Verantwortlichen der Projekte explizit um Kontaktaufnahme und Feedback beim Nachbau der Lastenfahrräder bitten, können durch den entstehenden wissenschaftlichen Diskurs etwaige Schwachstellen der Lastenfahrräder identifiziert und behoben werden. Zudem können die verwendeten konstruktiven Features und Verfahren in weiteren Lastenfahrrad-Projekten angewandt, aber auch auf andere Konstruktionen projiziert werden. Der kommunikative Austausch kann weiterhin zur Optimierung der Fertigungsabläufe und Montageprozesse beim Nachbau für DIY-Zwecke führen.

Neben dem Up-Cycling-Gedanken alter Fahrräder in Kombination mit dem nachhaltigen Holzwerkstoff Sperrholz stellt sich die Frage, inwiefern die Rahmenkonstruktionen der Lastenfahrräder aus ökologischer Sicht durch weitere nachhaltige Materialien verbessert werden können. In weiteren Projekten könnte dazu der Einsatz nachhaltigerer Klebstoffe für die Herstellung von Sperrhölzern und als Ersatz für Epoxidharz untersucht werden.

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass Lastenfahrräder aus Holzwerkstoffen auf dem Markt bisher kaum angeboten werden und die Hersteller vorwiegend auf Konstruktionen aus Aluminium- oder Stahllegierungen setzen. Daraus ergibt sich in einer zukünftigen Studie die Möglichkeit, mit Hilfe einer Marktstudie das Marktpotenzial nachhaltiger Lastenfahrräder aus Holz zu untersuchen und Marketingstrategien zu entwickeln. Zur Umsetzung einer kommerziellen Vermarktung wäre es zudem notwendig, die Fertigungs- und Montageprozesse in weiteren Forschungsarbeiten zu optimieren. Im Zuge dessen wäre auch zu überprüfen, inwiefern die Konstruktion der Rahmen dazu angepasst werden müsste und in welchem Umfang die Fertigung zu automatisieren wäre.

Es lässt sich abschließend feststellen, dass das Thema „Lastenfahrräder aus Sperrholz“ auch in Zukunft noch Möglichkeiten für Projekte und Abschlussarbeiten bietet, um die Nachhaltigkeit der eingesetzten Materialien weiter zu steigern und

mit Hilfe von Technologieentwicklungen und einer kommerziellen Vermarktung einen nachhaltigen Beitrag zu einer umweltschonenden Mobilität zu leisten.

Literaturverzeichnis

- Binova GmbH (Hrsg.). (o.D.) [*Produktseite des rethink E-Lastenfahrrads aus Birkenperrholz*]. <https://shop.rethink-bikes.de/rethink-LJ-215-Konfigurator>
- Chiummento, F. (2019). *Woody Cargo*. http://builderslabs.eu/woody_cargo.html
- Cox, P. & Rzewnicki, R. (2015). Cargo bikes: Distributing consumer goods. In P. Cox (Hrsg.), *Cycling cultures* (1. publ, S. 130–151). Univ. of Chester Press. <https://chesterrep.openrepository.com/bitstream/handle/10034/554288/cox%26rzewnicki-CC6.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- DIN 79010:2020-02 (2020). *DIN 79010:2020-02, Fahrräder_ - Transport- und Lastenfahrrad_ - Anforderungen und Prüfverfahren für ein- und mehrspurige Fahrräder*. Beuth Verlag GmbH. <https://dx.doi.org/10.31030/3119900>
- DIN EN 15194:2024-03 (2024). *DIN EN 15194:2024-03, Fahrräder_ - Elektromotorisch unterstützte Räder_ - EPAC; Deutsche Fassung EN_15194:2017+A1:2023*. Beuth Verlag GmbH. <https://dx.doi.org/10.31030/3354413>
- DIN EN 17860-2:2022-08 (2022). *DIN EN 17860-2:2022-08, Lastenfahrräder_ - Teil_2: Leichte einspurige Lastenfahrräder_ - Mechanische Aspekte; Deutsche und Englische Fassung prEN_17860-2:2022*. Beuth Verlag GmbH. <https://dx.doi.org/10.31030/3338183>
- DIN EN 17860-3:2022-08 (2022). *DIN EN 17860-3:2022-08, Lastenfahrräder_ - Teil_3: Leichte mehrspurige Lastenfahrräder_ - Mechanische Aspekte; Deutsche und Englische Fassung prEN_17860-3:2022*. Beuth Verlag GmbH. <https://dx.doi.org/10.31030/3338184>
- DIN EN 17860-6:2024-02 (2024). *DIN EN 17860-6:2024-02, Lastenfahrräder_ - Teil_6: Personentransport; Deutsche und Englische Fassung prEN_17860-6:2024*. Beuth Verlag GmbH. <https://dx.doi.org/10.31030/3515513>
- DIN EN 635-2:1995-08 (1995). *DIN EN 635-2:1995-08, Sperrholz_ - Klassifizierung nach dem Aussehen der Oberfläche_ - Teil_2: Laubholz; Deutsche Fassung EN_635-2:1995*. Beuth Verlag GmbH. <https://dx.doi.org/10.31030/2792716>
- DIN EN 635-3:1995-08 (1995). *DIN EN 635-3:1995-08, Sperrholz_ - Klassifizierung nach dem Aussehen der Oberfläche_ - Teil_3: Nadelholz; Deutsche Fassung EN_635-3:1995*. Beuth Verlag GmbH. <https://dx.doi.org/10.31030/2792690>

- DIN EN ISO 12215-5:2020-03 (2020). *DIN EN ISO 12215-5:2020-03, Kleine Wasserfahrzeuge_- Rumpfbauweise und Dimensionierung_- Teil_5: Entwurfsdrücke für Einrumpffahrzeuge, Entwurfsspannungen, Ermittlung der Dimensionierung (ISO_12215-5:2019); Deutsche Fassung EN_ISO_12215-5:2019*. Beuth Verlag GmbH. <https://dx.doi.org/10.31030/3019873>
- Escher, A. (2023). *Rethink Truck im Test: Nachhaltiges E-Lastenrad aus Holz*. <https://www.bike-x.de/e-bike/elektrobike-test-lastenrad-rethink-truck-truck/>
- Georgii. (1934). *Bauvorschriften für Gleit- und Segelflugzeuge BVS*. [https://www.j2mcl-planeurs.net/dbj2mcl/planeurs-biblio/fac-similes/Bauvorschriften_f%C3%BCr_Gleit-und_Segelflugzeuge_\(Georgii_1934\).pdf](https://www.j2mcl-planeurs.net/dbj2mcl/planeurs-biblio/fac-similes/Bauvorschriften_f%C3%BCr_Gleit-und_Segelflugzeuge_(Georgii_1934).pdf)
- Gougeon Brothers. (1986). *Moderner Holzbootsbau* (F. Hartz, Übers.). von d. Linden Verlag. https://www.toplicht.de/media/pdf/e6/92/1b/MODERNER_HBB_D.pdf
- Gruber, J. (2021). *Das E-Lastenrad als Alternative im städtischen Wirtschaftsverkehr. Determinanten der Nutzung eines „neuen alten“ Fahrzeugkonzepts* [Dissertation]. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin. https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/23166/dissertation_gruber_johannes.pdf
<https://doi.org/10.18452/22349>
- Gruber, J. & Rudolph, C. (2019). *Ich entlaste Städte. Das Lastenrad-Testangebot für gewerbliche und öffentliche Nutzer. Projekt 03KF0066 der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesumweltministeriums. Schlussbericht*. https://www.researchgate.net/publication/355436614_Ich_entlaste_Stadte_Das_Lastenrad-Testangebot_fur_gewerbliche_und_offentliche_Nutzer_Projekt_03KF0066_der_Nationalen_Klimaschutzinitiative_des_Bundesumweltministeriums_Schlussbericht/link/61f2b183c5e3103375c4bee4/download
- Grüter, S. (2023) [*Bereitstellung von Bildern der Lastenrad-Projekte an der TH OWL zur Nutzung in der vorliegenden Bachelorthesis*].
- Informationsdienst Holz. (2008). *Informationsdienst Holz Spezial Sperrholz*. https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/3_Spezial/Spezial_Sperrholz_2008.pdf
- Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG. (1944a). *Normen Band 2, Abschnitt 7, Holz*.
- Junkers Flugzeug- und Motorenwerke AG. (1944b). *Richtlinien für die Gestaltung von Holzteilen im Flugzeugbau*.

- Kalweit, A. (Hrsg.). (2006). *Handbuch für Technisches Produktdesign: Material und Fertigung; Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-45919-4>
- Kiwitt, C. (2023) [*Bereitstellung von Bildern der Lastenfahrrad-Projekte an der TH OWL zur Nutzung in der vorliegenden Bachelorthesis*].
- Kluge, P. & Eichhorn, S. (2021). Holz im Maschinenbau (HoMaBa) – Kennwertermittlung, Berechnung, Simulation. In M. Gehde, U. Wagenknecht & P. Bloß (Hrsg.), *Technomer 2021: 27. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren, 04. und 05. November 2021 (online) : Vorträge, Posterbeiträge : Kurzfassungen* (S. 1–7). Technische Universität Chemnitz Institut für Fördertechnik und Kunststoffe. <https://monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A76917/attachment/ATT-0/>
- lifeCYCLE Magazin (Hrsg.). (2019). *Das Selfmade Lastenrad aus Holz*. <https://lifecyclemag.de/holz-lastenrad/>
- Maus, J. (2011). *Industrial designer, boat builder team up on plywood cargo bike*. <https://bikeportland.org/2011/05/19/industrial-designer-boat-builder-team-up-on-plywood-cargo-bike-53297>
- Moore, A. (2023). *The Wik-E-Cargo Bike*. <https://cnccraft.co.uk/cargo-bike/>
- Neuhaus, H. (2017). *Ingenieurholzbau*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-14178-3>
- Niemz, P., Bächle, F., Sonderegger, W., Junghans, K. & Herbers, Y. (2007). *Grundlagen der Holzbe- und Verarbeitung*. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005433202>
- Niemz, P. & Sonderegger, W. U. (2017). *Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe : mit zahlreichen Bildern und Tabellen*. Hanser Verlag. <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446445260>
- Pinterest (Hrsg.). (o.D.) [*Abbildung des Lastenfahrrads aus Bambussperrholz von Downes und Saylor in hoher Qualität*]. <https://www.pinterest.de/pin/620652392368086418/>
- Reichsluftfahrtministerium (Hrsg.). (1940). *Bauvorschriften für Segelflugzeuge (BVS)*.
- Riegel, A. (2024) [*Bereitstellung von Bildern der Lastenfahrrad-Projekte an der TH OWL zur Nutzung in der vorliegenden Bachelorthesis*].
- Riegel, A. & Grüter, S. (2023) [*Bereitstellung von Bildern der Lastenfahrrad-Projekte an der TH OWL zur Nutzung in der vorliegenden Bachelorthesis*].

- Schulz, W. H., Franck, O. & Smolka, S. (2012). *Das Lastenfahrrad: Alles rund um Lastenfahrräder Typen, Trends, Perspektiven*. Wegweiser. <https://www.stiftung-adac-nordrhein.de/wp-content/uploads/sites/7577/2022/08/Wegweiser-Broschuere-Das-Lastenfahrrad.pdf>
- Vetter, A. (2023). *Konviviale Technik* [Dissertation]. Humboldt-Universität zu Berlin. <https://doi.org/10.14361/9783839453544>
- Vogt, M. (2023) [*Bereitstellung von Bildern der Lastenfahrrad-Projekte an der TH OWL zur Nutzung in der vorliegenden Bachelorthesis*].
- Wagenführ, R. & Wagenführ, A. (2022). *Holzatlas* (7., überarbeitete und ergänzte Auflage). Hanser Verlag. <https://www.hanser-elibrary.com/doi/epdf/10.3139/9783446468399>
- Wagner, H. & Beschler, T. (2024). Mobilität im Wandel der Zeit. In M. Knoppe (Hrsg.), *Unternehmerische Wertschöpfung neu aufstellen* (S. 169–200). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-42270-7_7
- Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages. (2019). *Sachstand DIN-Normen und Rechtssetzung*. <https://www.bundestag.de/resource/blob/677848/f35cfe3e47845c4c9ae2b6839a9e6a2c/WD-7-198-19-pdf-data.pdf>