



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

B.Sc. Peter Craxton

**Konzeptentwicklung eines Hilfsmittels für
Menschen mit Bewegungseinschränkungen unter
besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten
additiver Fertigungsverfahren und der Modularität**

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

B.Sc. Peter Craxton

**Konzeptentwicklung eines Hilfsmittels
für Menschen mit
Bewegungseinschränkungen
unter besonderer Berücksichtigung der
Möglichkeiten additiver
Fertigungsverfahren und der Modularität**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Produktionstechnik und -management (Master of Science)
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Jens Telgkamp
Zweitprüfer: Prof. Dr. Henner Gärtner

Abgabedatum: 15.07.2021

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Peter Jakob Craxton

Thema der Masterthesis

Konzeptentwicklung eines Hilfsmittels für Menschen mit Bewegungseinschränkungen unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten additiver Fertigungsverfahren und der Modularität

Stichworte

Additive Fertigungsverfahren, 3D-Knotenstruktur, Elektrorollstuhl, Fahrdynamik, Hilfsmittel, ICF-Klassifikation, Individualisierung, Modularisierung, Menschen mit Bewegungseinschränkungen, Reichweite, Soziales und Medizinisches Modell der Behinderung

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst den Stand der Technik, Marktanalyse, Anforderungsaufbereitung, Konzeptentwicklung, Berechnung der Fahrleistung, Gewichtsabschätzung, Modularisierungskonzept und Roadmap für das LIAM-Projekt.

Name of Student

Peter Jakob Craxton

Title of the paper

Conception of an assistive technology for mobility-impaired people with special consideration for opportunities of additive manufacturing and modularity.

Keywords

Additive Manufacturing, 3D-note structure, powerchair, driving behaviour, tools, ICF-classification, individualising, modularising, mobility-impaired people, social and medical model of disability

Abstract

The following thesis includes the current state of technology, market analysis, requirements preparation, concept development, mileage calculation, weight estimation, modularization concept and roadmap for the LIAM-project

Danksagung

Für die Zusammenarbeit, die Unterstützung, ihre Teilung der Erfahrungen und Wissen oder Betreuung meiner Masterarbeit möchte ich mich bei Professor Dr.-Ing. Jens Telgkamp, Professor Dr.-Ing. Henner Gärtner, Professor Dr.-Ing. Wolfgang Fervers, Prof. Dr.-Ing. Tankred Müller, die wissenschaftliche Mitarbeiterin Vanessa Claus und am LIAM-Projekt beteiligten Studierenden herzlich bedanken. Für die Motivation möchte ich mich auch bei meinen Freunden, Bruder, Schwester und Nichte herzlich bedanken.

Aufgabenstellung

Das Projekt LIAM (Light Individual Adult Mover) ist eine Hochschulinitiative, um innovative Konzepte für Rollstühle zu ermöglichen. Es trägt der Tatsache Rechnung, dass es im Bereich der Hilfsmittel für bewegungseingeschränkte Menschen bislang wenige innovative Leichtbau-Konzepte gibt, und dass nur wenige Produkte existieren, die sich dem Benutzer anpassen, was beispielsweise Körpergewicht und -maße, aber auch die individuellen Bedürfnisse betrifft. Das Ziel von LIAM ist die Entwicklung mehrerer Konzepte, welche später an freundschaftlichen Wettbewerben teilnehmen sollen. Das generierte Wissen soll öffentlich zur Verfügung stehen und keiner der als Sponsoren beteiligten Firmen gehören.

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll für LIAM eine Konzeptentwicklung inklusive der folgenden Punkte erarbeitet werden:

- a) Aufbereitung eines in Grundzügen vorhandenen Anforderungskatalogs
- b) Systematische Konzept- und Lösungsfindung und Bewertung von Konzepten
- c) Erarbeitung von Methoden zur Abschätzung von Machbarkeit und erreichbarer Performance (sowohl technischer Eigenschaften wie Leistungsdaten aber auch Leichtbau)
- d) Systematische Ausschöpfung von Konzepten der Modularisierung (z.B. Entkopplung von Anforderungen des Fahrers und des Antriebes, Entwicklung verschiedener angepasster Lösungen bei möglichst weitreichender Bauteilegleichheit)
- e) Konzeptentwicklung für Bauweise und spätere Industrialisierung

Der Schwerpunkt liegt hier auf der Struktur und dem Konzept des Rollstuhls. Damit ist diese Masterarbeit weitgehend komplementär zum Projekt „Shared Guide Dog 4.0“ am Lehrstuhl von Prof. Gärtner, welches schwerpunktmäßig auf Navigation und Steuerung setzt, weniger auf die hier betrachtete Frage nach dem strukturellen Konzept.

Auszug aus den technischen Anforderungen:

- Ausgehend von einem ersten Anforderungskatalog sollen die Anforderungen systematisch definiert und mit externen Randbedingungen (z.B. Sicherheitsvorschriften, Abmessungen in öffentlichen Verkehrsmitteln etc.) abgeglichen und gewichtet werden.
- Erste Anforderungen existieren in den Bereichen
 - Eckdaten (Gewichte, Fahrleistungen, Agilität, Hauptabmessungen, Robustheit, Kosten, ...)
 - Funktionen und Ausstattungen (Sitz, Bedienung, Fahrsicherheit, Navigation/Autonomie, Interfaces, ...)

Erwartetes Arbeitsergebnis für diese Masterarbeit:

1. Konzept für die Struktur des LIAM (besondere Berücksichtigung von Modularisierung und additiven Fertigungsverfahren)
2. Methode zur Abschätzung der Leistung (Fahrleistung, Gewicht) dieser Konzepte und zum Vergleichen mit dem Stand der Technik und mit verfügbaren Produkten.
3. Entwicklung einer weiterführenden Road Map und daraus resultierender weiterführenden Aufgabenstellungen zur zukünftigen Entwicklung des Konzepts.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	IV
Danksagung	V
Aufgabenstellung	V
Inhaltsverzeichnis	VII
I Symbolverzeichnis	IX
II Abkürzungsverzeichnis	XII
III Tabellenverzeichnis	XIII
IV Abbildungsverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Menschen mit Bewegungseinschränkungen	2
1.2 Internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit	6
1.3 Soziales und medizinisches Modell der Behinderung	8
1.4 UN-Behindertenrechtskonvention	10
1.5 LIAM-Rahmenbedingungen	10
2 Stand der Technik	11
2.1 Elektrorollstuhl	11
2.1.1 Terminologie des Elektrorollstuhls	11
2.2 Antriebssystem	12
2.2.1 Grundlagen des Antriebssystems	13
2.2.2 Bürstenloser Gleichstrommotor	14
2.2.3 Planetengetriebe.....	17
2.2.4 Energiespeicher	19
2.2.5 Bremssystem	21
2.3 Elektrorollstuhl-Marktanalyse	23
2.3.1 Genny Urban 2.0	23
2.3.2 Scewo Bro	25
2.3.3 Permobil F5	27
2.3.4 iBot PMD	29
2.3.5 Caterwil GTS 4WD	31
2.3.6 Observer Maximus.....	33
2.3.7 SuperFour.....	35
2.3.8 PiiMo / Whill Model C.....	37
2.3.9 Mattro Rovo DC	39
2.3.10 Vergleich und Marktlücken.....	41
2.4 Additive Fertigungsverfahren	43
2.5 Modularität	46
2.6 Fazit zum Stand der Technik	49
3 Anforderungen	50
3.1 Perspektive von Menschen mit Bewegungseinschränkungen	50
3.2 Anforderungsbeschreibung	52
3.3 Aufbereitung / Validierung der Anforderungen	54
3.4 Fazit zu den Anforderungen	62
4 LIAM-Konzept	63
4.1 Fahrsystem.....	63

4.1.1	Leistungsberechnung der Antriebsmotoren.....	63
4.1.2	Allradantrieb Radnabenmotor	65
4.1.3	Allradantrieb E-Bike-Frontantriebe	66
4.1.4	Konzeptentscheidung	68
4.2	Lenkkonzept.....	69
4.2.1	Radnabenmotor-Lenkung	69
4.2.2	Radnabenmotor-Lenkung Teil 2.....	73
4.2.3	Schnellfahrgang-Lenkung	76
4.2.4	Mittelrad-Konzept.....	77
4.3	Reifen-Konzept	79
4.4	Steuerungstechnik	81
4.5	Bremskonzept.....	82
4.6	Sitzkonzept	83
4.7	Batteriekonzept.....	85
4.8	Gewichtsabschätzung.....	87
4.9	Reichweite-Methode	88
4.10	Spezifikation vom LIAM Konzept und Vergleich	89
4.11	Kostenkalkulation.....	90
5	Modularität.....	91
5.1	Modularisierungskonzept	91
5.1.1	Grundmodul	92
5.1.2	Vorderwagenmodul.....	92
5.1.3	Mittelradmodul	93
5.1.4	Radstandmodul.....	93
5.1.5	Spurweite-Modul	93
5.1.6	Hecküberhangmodul.....	94
5.1.7	Sitzmodul	94
5.1.8	Ablagemodul.....	95
5.1.9	Antriebsmodul.....	95
5.1.10	Bremsmodul	96
5.1.11	Steuerungsmodul.....	96
5.1.12	Batteriemodul.....	97
5.1.13	Applikation-Modul	97
6	Additive Fertigungsverfahren.....	98
7	Roadmap.....	99
7.1	Projektplan.....	99
7.2	Industrialisierung.....	99
8	Fazit und Ausblick.....	100
	Literaturverzeichnis	101
	Anhänge 107	
	Anhang A Fahrleistungsübersicht 1	108
	Anhang B Fahrleistungsübersicht 2	109
	Anhang C Roadmap im Prototypbauphase	110
	Anhang D Roadmap im Vorbereitungsphase	111

I Symbolverzeichnis

Symbol	Formel-Einheit	Bezeichnung
α	rad	Schlupfwinkel / Schrägaufwinkel
α_{ST}	rad	Steigung
η_M	%	Wirkungsgrad
μ_0		Haftbeiwert
κ		Haftreibungsbeiwert
κ_{nass}		Haftreibungsbeiwert auf der nassen Asphalt-Oberfläche
$\kappa_{trocken}$		Haftreibungsbeiwert auf der trockenen Asphalt-Oberfläche:
ϕ	$N/^\circ$	Unendliche Gesamtschlupf
ϕ_x	$N/^\circ$	Unendliche relative Schlupf in Längsrichtung
ϕ_y	$N/^\circ$	Unendliche relative seitlichen Schlupf
$\rho_{transient}$	%	Transiente Anteil
$\rho_{nicht\ transient}$	%	Nicht transiente Anteil
ω	1/s	Drehgeschwindigkeit
ω_{Sonne}	1/s	Winkelgeschwindigkeit des Sonnenrads
ω_{Steg}	1/s	Winkelgeschwindigkeit des Stegs
a_m	m/s^2	Beschleunigung
b_k	mm	Reifenbreite
C_{Akku}	Wh	Akkukapazität
d	mm	Spurweite
D_{Wende}	mm	Wendekreisdurchmesser
E_y		Reifenkraftkennlinie
f_1	1/s	Stromfrequenz
F_{aW}	N	Äußere Lenk- Antriebskraft
F_B	N	Beschleunigungswiderstand
F_{ges}	N	Gesamtfahrwiderstand
F_G	N	Radlast
F_{HR}	N	Haftreibungskraft

Symbol	Formel-Einheit	Bezeichnung
F_{iW}	N	Innere Lenk-Antriebskraft
F_L	N	Luftwiderstand
F_{Max}	N	Maximale Antriebskraft pro Rad-Paar:
F_N	N	Normalkraft
F_{Ped}	N	Pedalkraft
f_R		Rollwiderstandsbeiwert
F_R	N	Rollwiderstand
F_{ST}	N	Steigungswiderstand
F_x	N	Reifenlängskraft
F_y	N	Reifenseitenkraft
f_W		Wendewiderstandsbeiwert
F_W	N	Wendewiderstand
F_{Zf}	N	Zentrifugalkraft
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h_s	mm	Kreissegmenthöhe
i		Getriebeübersetzung von elektrischem Motor und Getriebe
$I_{Ges,max}$	A	Maximale Gesamtstromstärke
I_{Einzel}	A	Stromstärke einzelner Antriebsmotors
$I_{Ges,erforderlich}$	A	Erforderliche Gesamtstromstärke abhängig von elektrischen Leistung nach Steigung und Geschwindigkeit
k_x	N/rad	Reifenlängssteifigkeit
k_y	N/rad	Reifenseitensteifigkeit
M_{AM}	Nm	Antriebsmotor-Gesamtdrehmoment
M_{4WD}	Nm	Drehmoment eines Antriebsmotors im viermotorigen Antrieb
M_G	Nm	Maximales Drehmoment Getriebe
M_W	Nm	Wendewiderstandsmoment
M_{WK}	Nm	Wendewiderstandsmoment für Kettenfahrzeug
l_K	mm	Kurzer Radstand
l_l	mm	Langer Radstand

Symbol	Formel-Einheit	Bezeichnung
l_R	mm	Radstand
L_u, L_v, L_w	1/C	Spule-Wicklung
m_{ges}	kg	Zu bewegende Masse / Gesamtmasse
n_1	1/s	Drehzahl eines Drehstrommotors
n_{Rad}	1/s	Raddrehzahl
p		Polpaarzahl
p_0	Pa	Spezifischer Bodendruck
P_{4WD}	W	Teilleistung eines Antriebsmotors im viermotorigen Antrieb
$P_{M_{Ges}}$	W	Gesamtmotorleistung
Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6		Transistor im BLDC-Motor
R	mm	Minimale Wenderadius
$R_{desired}$	mm	Erwünschte Wenderadius
R_{min}	mm	Minimale Bahnradius
$R_{min,nass}$	mm	Minimale Wenderadius auf der nassen Asphalt - Oberfläche
$R_{min,trocken}$	mm	Minimale Wenderadius auf der trockenen Asphalt - Oberfläche
r_p	mm	Auflageabstand
r_{Rad}	mm	Radius Reifen
R_{Wende}	mm	Wendekreisradius
s	mm	Spurweite
s_{max}	km	Reichweite
s_R	%	Schlupf
s_x		Längsschlupf
s_y		Seitliche Schlupf
t_W	s	Gewünschte Beschleunigungszeit
U_{Bord}	V	Bordspannung
v_\emptyset	km/h	Durchschnittliche Geschwindigkeit
V_0	km/h	Geschwindigkeitskonstante
v_a	km/h	Geschwindigkeit am äußeren Rad

Symbol	Formel-Einheit	Bezeichnung
$V_{desired}$	km/h	Erwünschte Geschwindigkeit
v_F	km/h	Fahrgeschwindigkeit
v_i	km/h	Geschwindigkeit am inneren Rad
v_{max}	km/h	Höchstgeschwindigkeit
V_S	km/h	Relative Slip-Geschwindigkeit
V_x	km/h	Längsgeschwindigkeit
V_y	km/h	Seiten-Geschwindigkeit
$W_{el,transient}$	W	Elektrische Leistung im transienten Fahren
$W_{el,nicht\ transient}$	W	Elektrische Leistung im nicht transienten Fahren
$z_{Hohlrad}$		Anzahl der Zähne des Hohlrads
z_{Rad}		Anzahl der Antriebsräder eines Fahrzeugs
z_{Sonne}		Anzahl der Zähne des Sonnenrads

II Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AF	Additive Fertigungsverfahren
BLDC	Bürstenloser Gleichstrommaschine (Brushless Direct Current)
DIN	Deutsches Institut für Normen
FVZ	Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen im Straßenverkehr
ICD	International Classification of Disability
ICF	International Classification of Functioning, Disability and Health
IP	International Protection
KFZ	Kraftfahrzeugzulassung
LIAM	Light Individual Adult Mover
PWM	Pulsweitenmodulation
TDAF	Studienmodul Topologie und Designregeln für Additive Fertigungsverfahren
StVO	Straßenverkehrsordnung

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Technische Spezifikationen von Genny Urban	24
Tabelle 2 Technische Spezifikationen von Scewo Bro.....	26
Tabelle 3 Technische Spezifikationen von Permobil F5 VS.....	28
Tabelle 4 Technische Daten von iBot PMD	30
Tabelle 5 Technische Daten von Caterwil GTS 4WD	32
Tabelle 6 Technische Daten von Observer Maximus.....	34
Tabelle 7 Technische Daten von SuperFour	36
Tabelle 8 Technische Daten von PiiMo und WHILL Model C	38
Tabelle 9 Technische Daten von Mattro Rovo DC	40
Tabelle 10 Übersicht der auf dem Markt verfügbaren Elektrorollstühle	41
Tabelle 11 Vor- und Nachteile der Modularität	48
Tabelle 12 Zuladung.....	54
Tabelle 13 Leergewicht / Eigengewicht	54
Tabelle 14 Höchstgeschwindigkeit	55
Tabelle 15 Steigfähigkeit/ Nennsteigung	55
Tabelle 16 Wendigkeit, Agilität, Wendekreisdurchmesser	55
Tabelle 17 Abmessung	56
Tabelle 18 Ausdauer / Theoretische Mindestreichweite	56
Tabelle 19 Robustheit	57
Tabelle 20 Treppensteigen	57
Tabelle 21 Liegefunktion	58
Tabelle 22 Schwimmfähigkeit	58
Tabelle 23 Preislimit	59
Tabelle 24 Sitz.....	59
Tabelle 25 Horn/ Warnton	59
Tabelle 26 Terrain	60
Tabelle 27 Struktur / Fahrwerk.....	60
Tabelle 28 Navigation und Autonomie.....	61
Tabelle 29 Interfaces.....	61
Tabelle 30 Gewicht und Preis für Kaufteile für E-Bike-Frontantrieb mit Schätzung	67
Tabelle 31 Antriebskonzept-Vergleich	68
Tabelle 32 Vor- und Nachteile der Position eines Mittelrads	77
Tabelle 33 Übersicht der Batterievergleich [58] [59] [60]	85
Tabelle 34 Liste der Teile nach Gewicht.....	87
Tabelle 35 Vergleich mit den verfügbaren Produkten	89
Tabelle 36 Kostenschätzung eines Prototypbaus	90

IV Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Anzahl der Menschen mit Bewegungseinschränkungen nach Art der Einschränkung in Deutschland	2
Abbildung 1-2 Anzahl der Rollstuhltypen in Deutschland	4
Abbildung 1-3 Entscheidungsdiagramm für eine mögliche Verordnung eines passenden Hilfsmittels zur Fortbewegung.....	5
Abbildung 1-4 Das bio-psycho-soziale Modell der ICF	6
Abbildung 1-5 Anwendungsbeispiel einer ICF-Bewertung	7
Abbildung 1-6 Darstellung der medizinischen und sozialen Modelle.....	8
Abbildung 1-7 Cartoon der medizinischen und sozialen Modelle der Behinderung	9
Abbildung 2-1 Bezeichnung der Komponenten eines Elektrorollstuhls	11
Abbildung 2-2 Übersicht des Antriebssystems von Rollstühlen.....	12
Abbildung 2-3 Farbschematische Vorteile und Nachteile eines Antriebssystems nach einer Art Elektrorollstuhl.....	12
Abbildung 2-4 Grundstruktur eines drehzahlvariablen Antriebssystems	13
Abbildung 2-5 Rotor eines 2kW-Radnabenmotors mit 47 Permanentmagneten 14	
Abbildung 2-6 2kW-Radnabenmotor mit 17x3 Spulen im Stator	14
Abbildung 2-7 Modell einer PSM mit $p = 1$ im statorfesten α/β -Koordinatensystem und im rotorfesten d/q -Koordinatensystem mit $L_q > L_d$	15
Abbildung 2-8 Darstellung eines Planetensatzes.....	17
Abbildung 2-9 Darstellung der Grundgleichung eines Planetensatzes.....	17
Abbildung 2-10 RAGONE-Diagramm verschiedener Akkumulortechnologien:	19
Abbildung 2-11 Akkumulatoren im Vergleich.....	20
Abbildung 2-12 Schematischer Aufbau einer PKW-Bremsanlage	21
Abbildung 2-13 Regelkreis Fahrer–Fahrzeug beim Bremsvorgang.....	21
Abbildung 2-14 (a) Zweirädriges Gleichgewichtsrollstuhl Genny Urban mit Lenkstange (b) Frontansicht mit umgeklappter Rückenlehne und abgenommener Lenkstange [2] ...	23
Abbildung 2-15 Hauptmerkmal von Genny Urban 2.0.....	23
Abbildung 2-16 Scewo Bro im Treppenmodus	25
Abbildung 2-17 Hauptmerkmale von Scewo Bro	25
Abbildung 2-18 Hauptmerkmale von Permobil F5.....	27
Abbildung 2-19 Permobil F5 VS im Stehmodus	27
Abbildung 2-20 Hauptmerkmale von iBot PMD	29
Abbildung 2-21 iBot PMD im Balance-Modus	29
Abbildung 2-22 CATERWIL GTS 4WD.....	31
Abbildung 2-23 Hauptmerkmale von Caterwil GTS 4WD	31
Abbildung 2-24 Hauptmerkmale von Observer Maximus.....	33
Abbildung 2-25 Observer Maximus im Erklimmen der Treppen	33
Abbildung 2-26 Hauptmerkmale von SuperFour	35
Abbildung 2-27 SuperFour in verschiedenen Ansichten	35
Abbildung 2-28 WHILL Model C	37
Abbildung 2-29 PiiMo mit Sensorik-Anlage und Gepäckablage	37
Abbildung 2-30 Hauptmerkmale von PiiMo und WHILL Model C	37
Abbildung 2-31 Mattro Rovo DC.....	39

Abbildung 2-32 Hauptmerkmal von Mattro Rovo DC	39
Abbildung 2-33 Grundsätzlicher Ablauf des additiven Fertigungsverfahrens eines Bauteils.....	43
Abbildung 2-34 Fertigungsverfahren in Abhängigkeit von Losgröße und Bauteil-Komplexität	43
Abbildung 2-35 Prozessablauf eines additiv zu fertigenden Bauteils	44
Abbildung 2-36: Individualisierung und Komplexität.....	44
Abbildung 2-37 Technologie der Generativen Fertigungsverfahren	45
Abbildung 2-38 Schematische Darstellung der Modulaufteilung und beispielhafte Derivateableitung	46
Abbildung 2-39 NextGen Spaceframe Verbindung von 3D additiv gefertigten Knotenpunkten und Stahlprofilen	47
Abbildung 2-40 Vergleich der nicht additiv und additiv gefertigten gleichförmigen Bauteile	48
Abbildung 4-1 Darstellung der Lenkungsarten	69
Abbildung 4-2 Antriebskräfte beim Wendevorgang	65
Abbildung 4-3 Wendevorgang	70
Abbildung 4-4 Länge bei der Wendung mit Rädern statt Kette.....	70
Abbildung 4-5 Angenäherte Druck- verteilung Auflagefläche	72
Abbildung 4-6 Bewegungsrahmen eines Skid Steering Fahrzeug.....	73
Abbildung 4-7 Modell des elektrisches Skid Steering-Fahrzeug.....	73
Abbildung 4-8: Betrachtung eines einzelnen Reifens.....	74
Abbildung 4-9 Hindernisüberwindung-Vorgang.....	78
Abbildung 4-10 Wendevorgang im Fall des Hebens der vorderen Antriebsräder	78
Abbildung 4-11 Ansichten des additiv fertigungsorientierten Designs der Reifen	79
Abbildung 4-12 Schwalbe Super Defense Pick Up	80
Abbildung 4-13 Schwalbe Rocket Ron	80
Abbildung 4-14 Gesamtsystem einer Steuerung eines LIAM-Elektrollstuhls	81
Abbildung 4-15 Stellrichtungen und Fahrtrichtungen in der Joystick-Steuerung	81
Abbildung 4-16 Fahrrad-Scheibenbremsanlage	82
Abbildung 4-17 Rollstuhl- und Körpermaße für Einstellungsempfehlungen	83
Abbildung 4-18 Ansichten eines Permobil-Sitzsystem	84
Abbildung 5-1 Brainstorming-Diagramm für LIAM-Elektrollstuhl	91
Abbildung 5-2 Grundmodul	92
Abbildung 5-3 Vorderwagenmodul	92
Abbildung 5-4 Mittelradmodul	93
Abbildung 5-5 Radstandmodul.....	93
Abbildung 5-6 Spurweite-Modul.....	93
Abbildung 5-7 Hecküberhangmodul	94
Abbildung 5-8 Sitzmodul	94
Abbildung 5-9 Ablagemodul.....	95
Abbildung 5-10 Antriebsmodul	95
Abbildung 5-11 Bremsmodul)	96
Abbildung 5-12 Steuerungsmodul.....	96
Abbildung 5-13 Batteriemodul.....	97
Abbildung 5-14 Applikationsmodul	97

1 Einleitung

Die Projektidee von LIAM ist bei einem Abendessen von vier Personen entstanden, nachdem festgestellt wurde, dass ein Rollstuhl nicht alles kann, weil es zu schwer ist. Es gibt kaum einen leichtbauorientierten Elektrorollstuhl auf dem Markt. Die Annahme ist, dass die Gewichtsreduzierung durch den additiven 3D-Druck erfolgen kann. Das LIAM-Projekt (**L**ight **I**ndividual **A**dult **M**over) wurde in einem freundschaftlichen Wettbewerb zwischen Rosenheim und Hamburg gestartet.

»Die Gesellschaft favorisiert ein Menschenbild, das geprägt ist von Gesundheit, Leistungsstärke, Wirtschaftskraft, Selbstständigkeit. Natürlich ist das alles wünschenswert. Es ist aber für viele Menschen mit schweren Behinderungen nicht lebbar« [1, p. 37]

Dieses Zitat spiegelt die deutsche Gesellschaft im Umgang mit Menschen mit Behinderung oder Bewegungseinschränkung wider. Mit angeborenen oder durch Unfälle oder irreversiblen Erkrankungen erworbenen Bewegungseinschränkungen sind manche Menschen nicht selbstständig bzw. sind angewiesen auf Pflegeassistenzen. Es bedeutet eine völlig andere Lebensqualität für Menschen mit Bewegungseinschränkungen und auch für Menschen mit anderen Behinderungen. Es wird versucht, die unterschiedlichen Einschränkungen durch Hilfsmittel wie z.B. Rollstuhl, Elektrorollstuhl, Beinprothesen, Hörgeräte etc. oder durch eine nicht auditive Sprache z.B. Gebärdensprache, leichte Sprache oder Brailleschrift zu kompensieren. Jedoch werden die Betroffenen häufig mit fehlender Barrierefreiheit durch z.B. fehlende Rampen an Arztpraxen und anderen öffentlichen Gebäuden wie Cafés, Parkanlagen oder Bahnhöfen konfrontiert.

Während Inklusion in unserer Gesellschaft noch immer ein Fremdwort ist, werden schnelle Fortschritte in der Technologie gemacht und es entstehen neue Möglichkeiten im Bereich der Elektromobilität für Menschen, die auf einen Rollstuhl angewiesen sind. Diese können zum Beispiel durch additive Fertigungsverfahren davon profitieren.

Mit dem Ziel, die Lebensqualität der körperlich schwer beeinträchtigten Menschen in unserer nicht-barrierefreien Gesellschaft zu verbessern, wird im LIAM-Projekt versucht, mit Leichtbautechnologie und additiven Fertigungsverfahren einen Rollstuhl herzustellen, der durch mehr Leichtigkeit und Individualität die Bewegungsfreiheit in der heutigen gesellschaftlichen Situation zu verbessern.

1.1 Menschen mit Bewegungseinschränkungen

Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl der Menschen mit Bewegungseinschränkungen im Jahr 2019 in Deutschland. Dabei wird auch die Art der Funktionseinschränkung berücksichtigt. In jedem einzelnen Fall wird von Ärzten, dem medizinischen Dienst, Therapeuten und Pflegekräften nach möglichen Hilfsmitteln gesucht. Bei schwerer Bewegungseinschränkung wird ein passender Rollstuhltyp verschrieben oder verlangt.

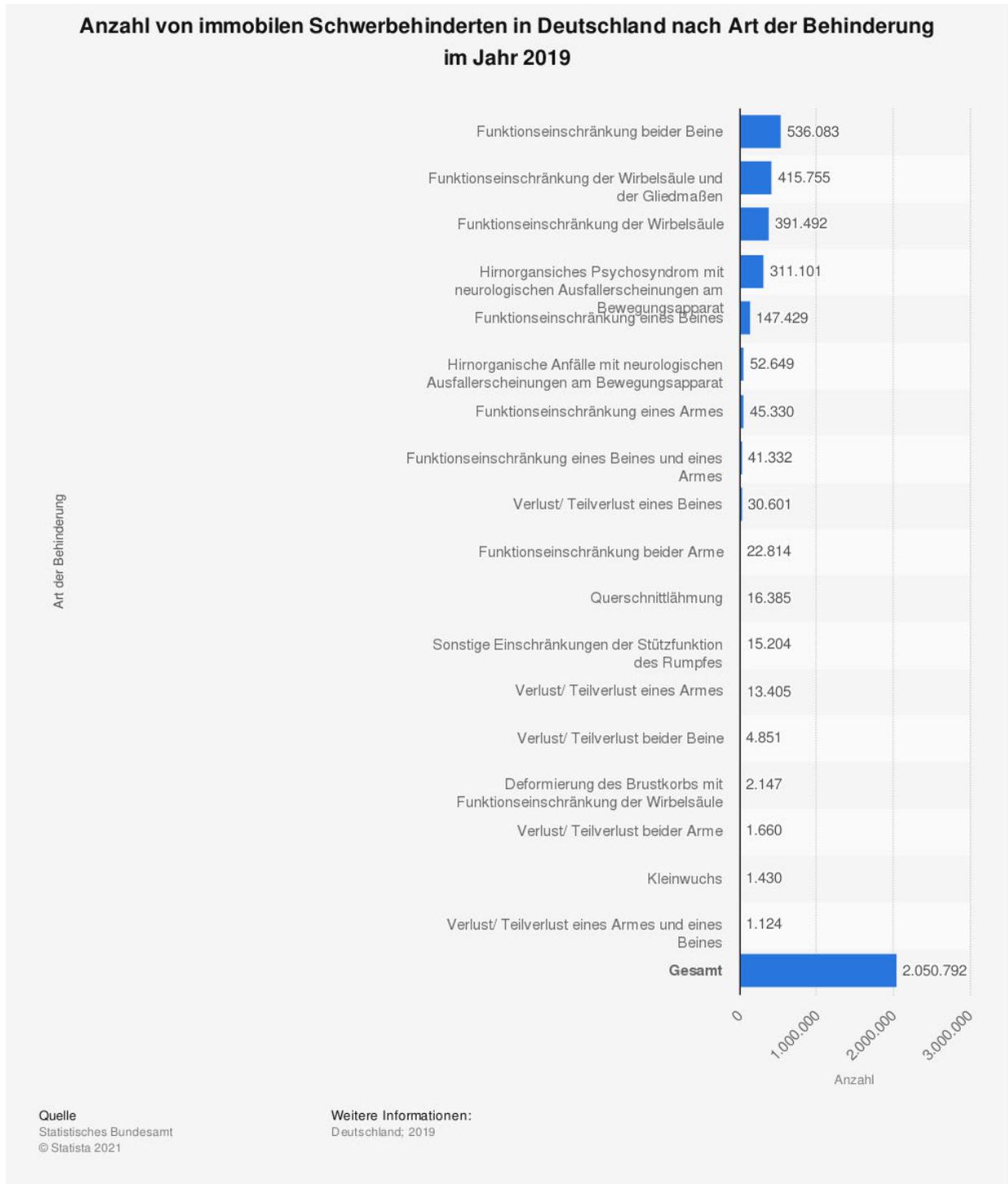


Abbildung 1-1 Anzahl der Menschen mit Bewegungseinschränkungen nach Art der Einschränkung in Deutschland

Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl der Verordnungen der unterschiedlichen Rollstuhltypen in Deutschland im Jahr 2015. Zunächst noch jeweils eine kurze Beschreibung der einzelnen Rollstuhltypen.

Ein Leichtgewichtrollstuhl ist ein Greifrollstuhl mit dem Leergewicht von maximal 18 kg bei einer limitierten Sitzbreite von 43 bis 45 cm [2] Er wird verwendet, wenn der bewegungseingeschränkte Mensch die Greifantriebsräder mit Händen greifen und sich für eine kurze Strecke selbst bewegen kann.

Zubehör meint hier eine Vorrichtung für Rollstuhl oder Elektrorollstuhl z.B. Lenk- und Bediensysteme, Bremsen, Antriebseinheiten, Beleuchtung und Sicherheitssignaleinrichtung, Reifen, Räder, Batterien, Batterieladegeräte, Personenrückhaltesystem, Rückspiegeln etc. [2] Zubehör wird verordnet, wenn dieses defekt oder nicht vorhanden ist.

Ein Adaptivrollstuhl ist dann sinnvoll, wenn die Antriebsreifen, Armlehnen, Beinstützen, Bremsen, Fußstützen, Greifreifen, Lenkräder, Rückenlehne, Sitz oder Lenkradlagerung am Rollstuhlfahrer individuell angepasst werden. Man spricht von Adaptivrollstuhl, welcher aktiv vom Rollstuhl selbst bewegt wird.

Einen Standardrollstuhl, auf dem die nicht gehfähige Menschen geschoben werden, kennt man von Kliniken, Pflegeeinrichtungen, Flughäfen. Er ist passend für die temporäre Nutzung und Grundversorgung für Menschen im Fall der erworbenen Bewegungseinschränkung oder aufgrund vom Defekt / Verlust seines eigenen Roll- oder Elektrorollstuhls. Der Standardrollstuhl hat einheitliche statt individuelle Funktionsmerkmale im Vergleich zum Adaptivrollstuhl und kann gefaltet werden, wenn er nicht genutzt wird. [2]

Einen Toilettenrollstuhl braucht es oft zusätzlich im Innenraum für eine Verwendung über einer Toilette oder als Toilette (mit Toiletteneimer). Er besitzt eine dafür geeignete Sitzeinheit und Rahmenkonstruktion. [2]

Rollstühle mit Rückenlehnenverstellung sind Pflegerollstühle oder Aktivrollstühle mit Rückenlehnenwinkel über 30 ° zur Vertikalen, mit der sich der nicht gehfähige Mensch nach hinten zurücklehnen und nach Bedarf wieder in eine vertikale Position mithilfe einer Hilfsperson oder eines elektrischen Stellmotors lehnen kann.

Ein Elektrorollstuhl mit indirekter Lenkung wird erst verschrieben, wenn Rollstuhlbenutzer, die keine ausreichende Muskelkraft zur Fortbewegung eines manuell angetriebenen Rollstuhls aufbringen können, Motorkraftunterstützung benötigen. [2] Diese sind häufig in der Stadt in der Stadt, auf Gehwegen oder sogar auf der Straße zu sehen.

Ein Rollstuhltyp, der sowohl zu den Leichtgewichtrollstühlen als auch zu den Elektrorollstühlen zählt, ist der Sportrollstuhl. Dieser ist konstruiert mit Stoßfängern, mit denen Menschen Rollstuhlbasketball, Hockey, Fußball oder Rollstuhlmannschaftssport spielen können. Menschen, die keine Behinderung haben, benutzen auch Sportrollstühle und machen Rollstuhlsportarten mit.

Das Thema Aktivrollstuhl wird nicht vertieft, da es sehr fortgeschritten ist und da die Marktlücken angenommen gut gedeckt sind. Die Handbikes können heute mit elektrischem Antrieb genutzt und mit einem Aktivrollstuhl gekoppelt werden, welche die Geschwindigkeit bis zu 30 km/h erhöhen kann. Das Thema Elektrorollstuhl wird im Kapitel 2.1 weiter vertieft.

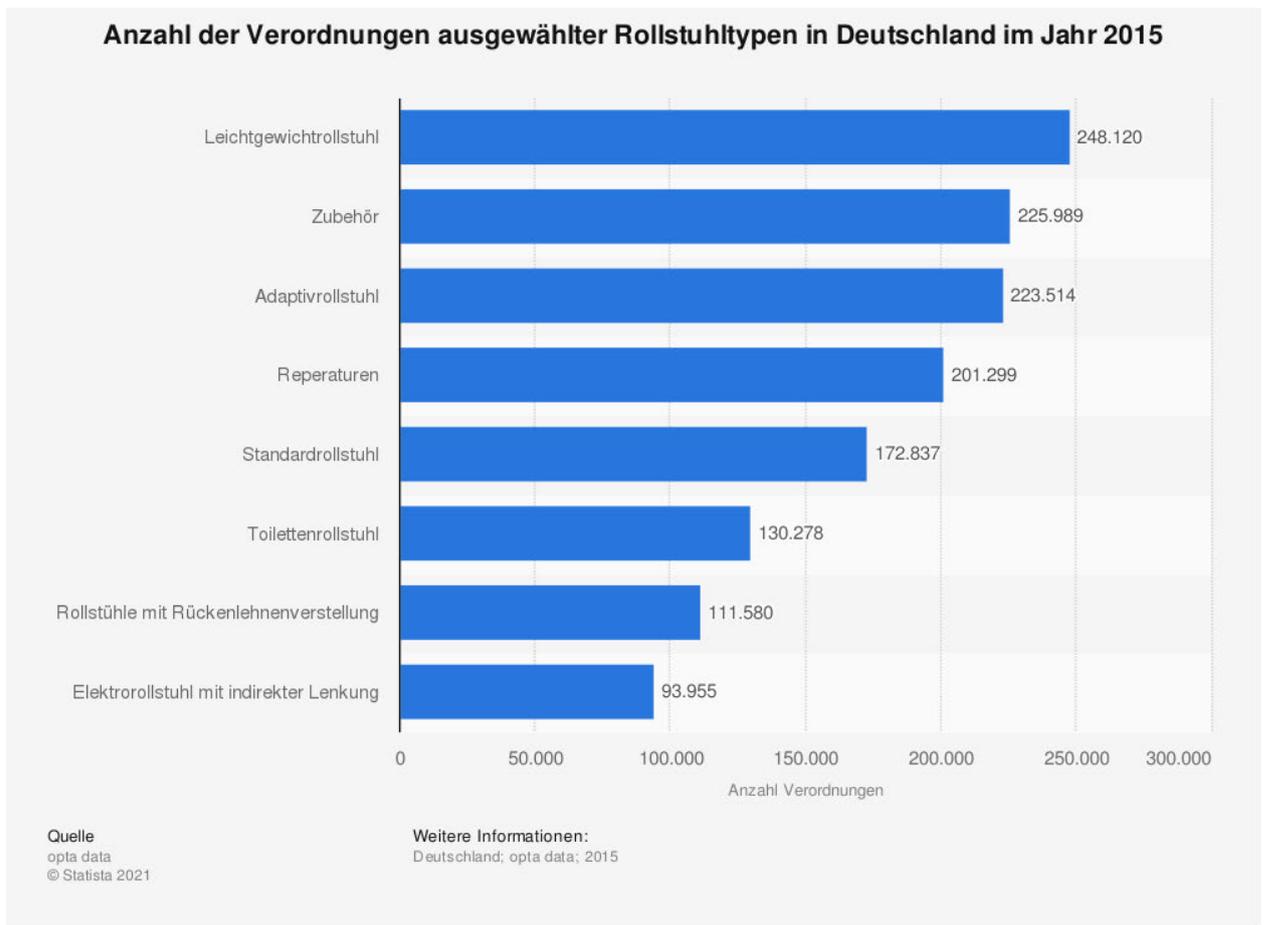


Abbildung 1-2 Anzahl der Rollstuhltypen in Deutschland

Bei der Frage, welcher Rollstuhl passend ist oder ob überhaupt ein Rollstuhl notwendig ist, kann das folgende Entscheidungsdiagramm hilfreich sein. Die Steuerung eines Elektrorollstuhls ist nicht immer möglich und nicht für jeden Menschen das geeignete Hilfsmittel. Ob genügend Fähigkeiten (z.B. Kognition, Greifkraft, Reaktionsfähigkeit) vorhanden sind, um beispielsweise am Straßenverkehr teilzunehmen, sollte unbedingt vorher gewissenhaft untersucht werden.

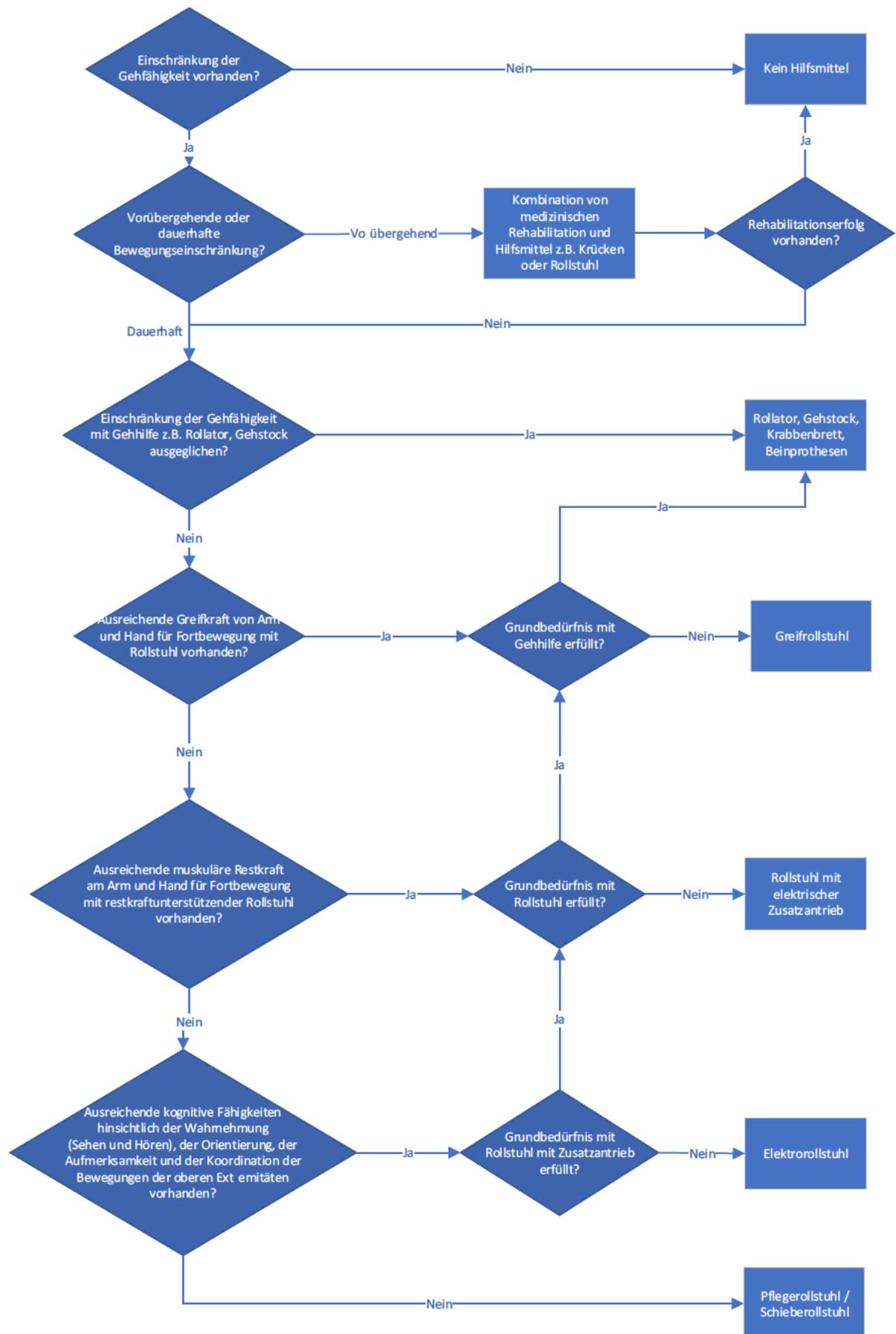


Abbildung 1-3 Entscheidungsdiagramm für eine mögliche Verordnung eines passenden Hilfsmittels zur Fortbewegung (Quelle: Eigene Darstellung)

1.2 Internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit

Leistungen zur Teilhabe können gemäß dem Neunten Buch Sozialgesetzbuch (SGB IX – Rehabilitation und Teilhabe behinderter Menschen) für Personen nur dann erbracht werden, wenn deren Teilhabe an Lebensbereichen (z. B. Erwerbsleben, Selbstversorgung) erheblich gefährdet oder bereits gemindert ist. Dieser Leistungsanspruch ist mit dem Teilhabekonzept der ICF eng verbunden. Danach ist eine alleinige bio-medizinische Krankheitsbetrachtung (Diagnose und Befunde) nicht ausreichend. [3]

Die ICF als internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit, Behinderung und Gesundheit ist von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) festgelegt. Sie unterstützt die Erstellung eines Teilhabekonzepts. Für den Gesundheitsbereich ist die Klassifikation die Grundlage für die Bewertung des Bewegungsstörungsgrades und der Funktionseinschränkung bzw. Behinderung.

Sie beinhaltet fünf Komponenten [4] der ICF-Bewertungskriterien im sozialen oder medizinischen Bereich:

1. Körperfunktionen
2. Körperstrukturen
3. Aktivitäten
4. Teilhabe
5. Umweltfaktoren

Das bio-psycho-soziale Modell der ICF wird in der Abbildung 1-4 dargestellt und angewendet, um einschätzen zu können, welche Komponenten eingeschränkt werden. Die Wechselwirkungen zwischen fünf Komponenten werden in neun Lebensbereichen (ICD-10) untersucht.



Abbildung 1-4 Das bio-psycho-soziale Modell der ICF [3]

Die neun Lebensbereiche [5] von ICD-10 sind:

1. Lernen und Wissensanwendung
2. Allgemeine Aufgaben und Anforderungen
3. Kommunikation
4. Mobilität
5. Selbstversorgung
6. Häusliches Leben
7. Interpersonelle Interaktionen und Beziehungen
8. Bedeutende Lebensbereiche (Erziehung/Bildung, Arbeit/Beschäftigung, Wirtschaftliches Leben)
9. Gemeinschafts-, soziales, staatsbürgerliches Leben (einschließlich Menschenrechte, Religion, politische Partizipation, Freizeit etc.)

Der vierte Lebensbereich von Mobilität wird im LIAM-Projekt als technologischer Fokuspunkt angenommen. Nachfolgend wird ein Anwendungsbeispiel für die Bewertung nach ICF aufgezeigt, wie stark in welche Komponente ein betroffener Mensch beeinträchtigt wird.

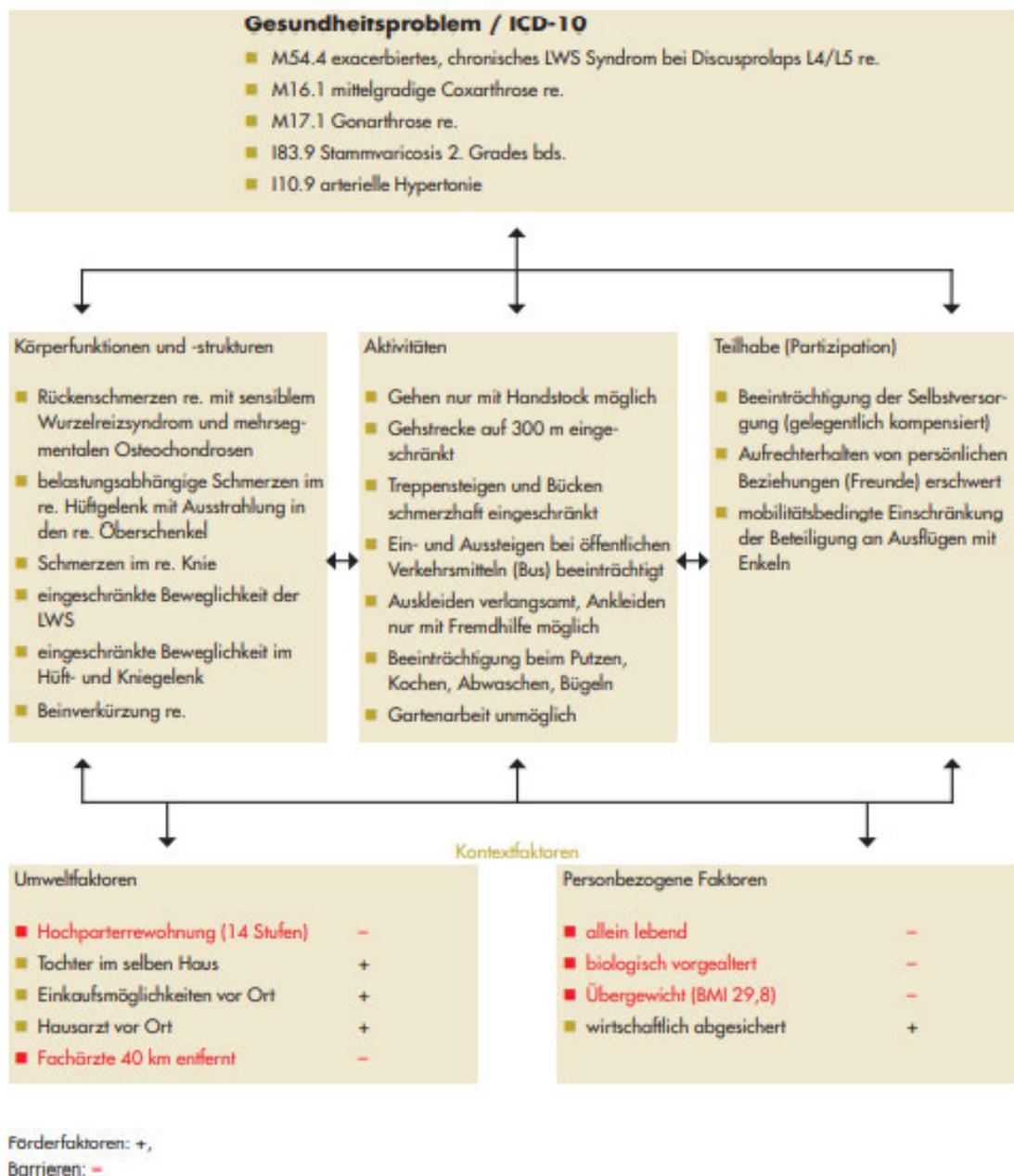


Abbildung 1-5 Anwendungsbeispiel einer ICF-Bewertung [3]

Das Anwendungsbeispiel zeigt, welche Barrieren (rote Minuszeichen) und Förderfaktoren (schwarze Pluszeichen) ein betroffener Mensch hat. Die Förderfaktoren sind Kontextfaktoren, die sich positiv auf die Funktionsfähigkeit auswirken. Barrieren sind Kontextfaktoren, die sich negativ auf die Funktionsfähigkeit auswirken. [3] Anschließend werden die Leistungsansprüche auf Hilfsmittel z.B. Rollstuhl, Elektrorollstuhl oder Hörgeräte in einem ärztlichen Bericht bestätigt/verordnet/vorgemerkt.

Der Kritik an der ICF-Klassifikation oder ICD-10 ist die fehlende Repräsentation der Menschen mit seelischer Behinderung und/oder Suchterkrankung im kognitiv-kommunikativen Bereich und im Bereich Mobilität und Selbstversorgung, wo die Emotionen als wichtigen Faktor am Gelingen gesellschaftlicher Teilhabe in der ICF oder ICD-10 nicht berücksichtigt werden. [5]

1.3 Soziales und medizinisches Modell der Behinderung

Hier wird die andere Perspektive gegenüber der ICF thematisiert. Das soziale Modell der Behinderung [6] wurde selbst von behinderten Menschen in den 70er Jahren als Teil der Menschenrechtsbewegung-Kampagne für Gleichberechtigung und Suche zur Veränderung der Einstellung zur Behinderung entwickelt. Es ist ein Teil der UN-Behindertenrechtskonvention, welches erfasst:

Zu den Menschen mit Behinderungen zählen Menschen mit langfristigen körperlichen, geistigen oder sensorischen Beeinträchtigungen, die in Wechselwirkung mit verschiedenen Hindernissen ihre uneingeschränkte und wirksame Teilhabe an der Gesellschaft auf gleicher Basis wie andere behindern können.

Die Vorstellung der inklusiven Umgebung [6] ist überwiegend auf dem sozialen und zum Teil auf dem medizinischen Modell der Behinderung basiert. Dadurch wird aufgezeigt, wie ein Verständnis dafür verschafft werden soll, dass Menschen von Barrieren in der Gesellschaft behindert werden.

Das medizinische Modell der Behinderung ist als negative Vorgehensweise zur Behinderung angesehen, weil die Menschen als weniger fähig wegen ihrer Behinderung betrachtet werden können. Oft kritisieren diverse Behindertenverbände die einseitige Perspektive einiger Hersteller in der Rehabilitations- und Medizintechnikbranche, die darin überzeugen, dass die Probleme oder Behinderungen mit medizinischen Lösungen aufgelöst werden können. [6]

Das soziale Modell der Behinderung ist ein Weg, die Welt zu verstehen. Dieses besagt, dass die Menschen von Barrieren in der Gesellschaft behindert werden statt von ihrer Differenz oder Behinderung behindert. Wenn die Barrieren abgebaut wären, könnte dieser Mensch noch eine Behinderung haben, aber sie würden nicht behindert sein. Zum Beispiel würde eine Einstellung in den ersten Jahren ohne Rampen, die den Innen- und Außenbereich verbinden, ein Kind, das einen Rollstuhl benutzt, daran hindern, sich frei in der Umgebung zu bewegen.

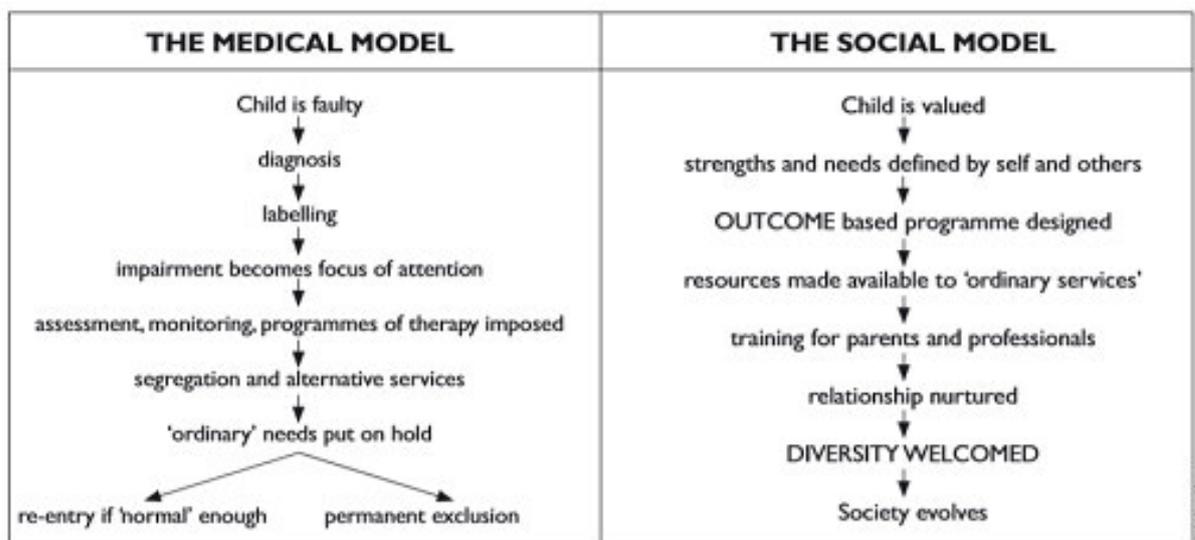


Abbildung 1-6 Darstellung der medizinischen und sozialen Modelle [6]

Die folgende Zeichnung kann das Gegenteil zwischen medizinischem Modell und sozialem Modell verdeutlichen.



Abbildung 1-7 Cartoon der medizinischen und sozialen Modelle der Behinderung in Anlehnung [7]

In der Abbildung 1-7 auf dem Schild steht es „Way In“ (Eingang) mit „Everyone welcome!“ (Jeder ist willkommen), es verdeutlicht, dass der Rollstuhlfahrer unglücklich und traurig ist, weil er mit dem Rollstuhl die Treppe nicht besteigen kann.

Die Kombination vom bio-psycho-sozialen Modell der ICF und dem sozialen Modell der Behinderung soll im LIAM-Projekt im Vordergrund stehen, um eine individuelle Lösung bzw. Mobilitätslösung zu finden. Es ist wichtig, dass die Behinderung nicht als Problem angesehen werden soll. Das entwickelte Konzept orientiert sich nach dieser Kombination.

1.4 UN-Behindertenrechtskonvention

Die deutsche Bundesregierung hat die UN-Behindertenrechtskonvention (Abk. UN-BRK) im Jahr 2009 ratifiziert. Zudem ist um Jahr 2018 das Bundesteilhabegesetz in Kraft getreten. [8] Es beinhaltet 50 verschiedene UN-BRK-Artikel. [9] In Bezug auf die Hilfsmittel für Menschen mit Behinderungen legt der Artikel 20 für Persönliche Mobilität Folgendes fest:

Artikel 20 Persönliche Mobilität

Die Vertragsstaaten treffen wirksame Maßnahmen, um für Menschen mit Behinderungen persönliche Mobilität mit größtmöglicher Unabhängigkeit sicherzustellen, indem sie unter anderem

- a) die persönliche Mobilität von Menschen mit Behinderungen in der Art und Weise und zum Zeitpunkt ihrer Wahl und zu erschwinglichen Kosten erleichtern;*
- b) den Zugang von Menschen mit Behinderungen zu hochwertigen Mobilitätshilfen, Geräten, unterstützenden Technologien und menschlicher und tierischer Hilfe sowie Mittelspersonen erleichtern, auch durch deren Bereitstellung zu erschwinglichen Kosten;*
- c) Menschen mit Behinderungen und Fachkräften, die mit Menschen mit Behinderungen arbeiten, Schulungen in Mobilitätsfertigkeiten anbieten;*
- d) Hersteller von Mobilitätshilfen, Geräten und unterstützenden Technologien ermutigen, alle Aspekte der Mobilität für Menschen mit Behinderungen zu berücksichtigen. [10]*

Der Artikel 20 ist die Motivation für das LIAM-Projekt, in dem der Zugang von Menschen mit Behinderungen zu Mobilitätshilfe erleichtert oder zu erschwinglichen Kosten sichergestellt werden soll.

Der Artikel 9 [11] verpflichtet den Unterzeichnerstaaten, die physischen Hindernisse oder informativen Barrieren in der Öffentlichkeit mit Maßnahmen zu beseitigen. Heute wird die Barrierefreiheit im öffentlichen Nahverkehr oder in staatlichen Behörden ausgebaut. Der Artikel 9 wird ein Einflussfaktor in der Konzeptentwicklung bilden, z.B. der treppensteigende Rollstuhl kann überflüssig werden.

1.5 LIAM-Rahmenbedingungen

Das LIAM-Projektziel ist, für Menschen mit Bewegungseinschränkungen verschiedene leichtbauorientierte Elektrorollstuhlvarianten mit hoher Flexibilität in Abhängigkeit von den individuellen Kundenbedürfnissen in verschiedenen Lebensbereichen nach ICD-10 und ICF zu entwickeln.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden einige ausgewählte Themen zum Stand der Technik erfasst, um die Grundlagen für die Konzeptentwicklung eines LIAM-Elektrollstuhls zu ermöglichen.

2.1 Elektrollstuhl

Die Elektromobilität ist im Rollstuhl bereits seit 70 Jahren Realität. [2]

Ein Elektrollstuhl ist ein mit Rädern ausgestattetes Gerät zur persönlichen Fortbewegung, das aus einem Sitzsystem für einen behinderten Menschen besteht und durch einen oder mehrere Elektromotoren angetrieben wird, die vom Benutzer oder von der Hilfsperson zur Veränderung von Fahrtrichtung und Geschwindigkeit gesteuert werden. Aufbau und Ausstattung von Elektrollstühlen hängen wesentlich davon ab, ob sie im Innenbereich, im Außenbereich oder im Straßenverkehr eingesetzt werden. [2]

Im Kapitel 2.3.1 bis 2.3.9 werden die ausgewählten Elektrollstühle aufgezeigt und ihre Funktionsweise, Vorteile und Nachteile bewertet. Die ausgewählten Elektrollstühle werden miteinander verglichen. Die Vergleichsübersicht kann die LIAM-Projektentscheidung und die Erkenntnis einer Marktlücke unterstützen.

2.1.1 Terminologie des Elektrollstuhls

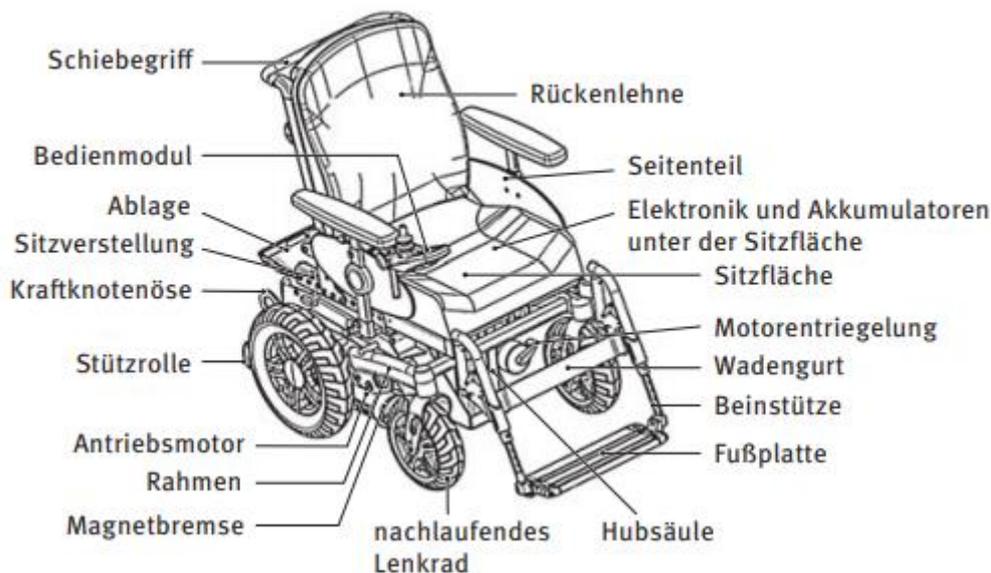


Abbildung 2-1 Bezeichnung der Komponenten eines Elektrollstuhls [2]

In der Abbildung 2-1 sind die Bezeichnungen der Komponenten eines Elektrollstuhls aufgezeigt, die wichtige Kenntnisse für die Gesamtkonzeptentwicklung und die Erstellung eines Road Maps im Rahmen des LIAM-Projekts liefern. Es ist möglich, dass die Terminologie im Laufe des LIAM-Projekts durch die neue Ideen erweitert werden kann.

2.2 Antriebssystem

Das Antriebssystem eines Elektrorollstuhls besteht aus:

- Steuerungs- und Leistungselektronik mit Bedienmodul,
- Energiespeicher (Akkumulator/Akku)
- Einem oder mehreren Energieumwandlern von gespeicherter in mechanische Energie [2]

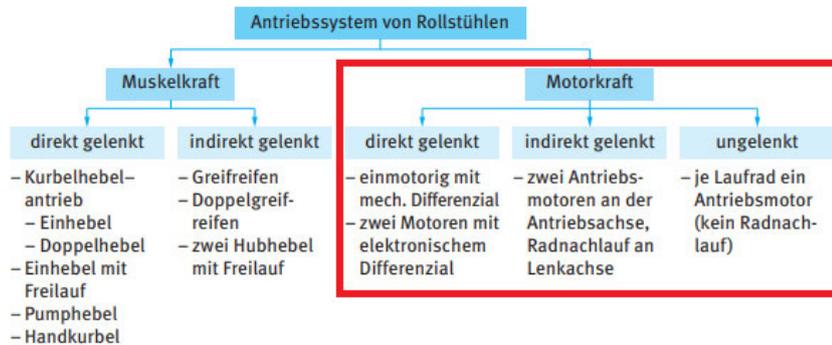


Abbildung 2-2 Übersicht des Antriebssystems von Rollstühlen [2]

Das rot gerahmte Bild (siehe Abbildung 2-2) zeigt, dass das Antriebssystem mit Motorkraft drei verschiedenen Lenkartarten aufweist: direkt gelenkt, indirekt gelenkt und un gelenkt. In der Abbildung werden die Vorteile und Nachteile der Arten indirekt oder direkt gelenkt bei vier verschiedenen klassischen Elektrorollstühlen dargestellt.



Abbildung 2-3 Farbschematische Vorteile und Nachteile eines Antriebssystems nach einer Art Elektrorollstuhl [2]

Es ist anzunehmen, dass die direkt gelenkten und indirekt gelenkten Motorkraftarten ein oder zwei Antriebsmotoren haben. Mit dieser Anzahl an Antriebsmotoren können bestimmte Hindernisse oder Straßenschäden nicht überwunden werden. Je größer die Antriebsachse ist, desto mehr Hindernisse werden überwunden. Mit vier Antriebsmotoren ist es möglich, ein oder zwei von vier Antriebsmotoren kurzzeitig bei einer bestimmten Fahrsituation, wo ein Rad keinen Bodenkontakt hat, zu kompensieren. Daher liegt der Fokus auf die un gelenkte Motorkraftart, wo je Laufrad ein Antriebsmotor bzw. Radnabenmotor im Form des mit elektrischer Energie versorgten Antriebssystems besitzen wird.

2.2.1 Grundlagen des Antriebssystems

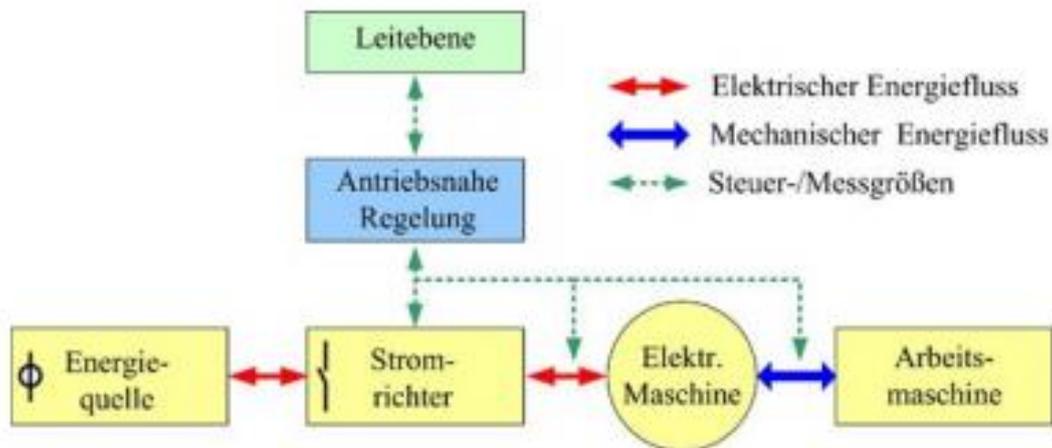


Abbildung 2-4 Grundstruktur eines drehzahlvariablen Antriebssystems [12, p. 1]

In vielen Fällen besitzen die drehzahlvariablen Antriebe diese Grundstruktur (siehe Abbildung 2-4). Eine*e Elektrorollstuhlfahrer*in befindet sich in der Leitebene und steuert den Elektrorollstuhl mit einem Fahrhebel oder einer Art Steuerung. Die Leitebene gibt Signale an die antriebsnahe Regelung bzw. Leistung-/Steuerungselektronik. Die antriebsnahe Regelung erhält die Messgrößen bzw. Ist-Werten durch die Messungen von Stromrichter, elektrischer Maschine und mechanischem Energiefluss. Anschließend gibt diese Regelung die Soll-Werte an den Stromrichter weiter. Die Energiequelle wie der Akkumulator gibt benötigte elektrische Energie ab. Die elektrische Energie wird in der elektrischen Maschine in mechanische Energie umgewandelt. Dann wird der Elektrorollstuhl mit mechanischem Energiefluss bewegt. Die Ist-Werte als Messgröße der Drehzahl der elektrischen Maschine oder Elektrorollstuhlantriebs werden an die antriebsnahe Regelung übermittelt. Die Differenz zwischen Ist-Werten und Soll-Werten wird als Steuergröße ermittelt und es wird an Stromrichter übermittelt, wie viele elektrische Energie benötigt wird. [5 ebd.]

2.2.2 Bürstenloser Gleichstrommotor

Im Bereich E-Bikes wird der BLDC-Motor aufgrund der im Vergleich zu anderen Elektromotorarten längeren Lebensdauer und des großzügigen Wartungsabstands oft angewendet. [13] In elektrisch angetriebenen Leichtfahrzeugen wird der BLDC-Motor als Radnabenmotor eingesetzt. Die lange Lebensdauer und wartungsarme Anwendung der BLDC-Motoren sind die Gründe für die Auswahl dieser Art der elektrischen Maschine im LIAM-Projekt.

Die Bürstenlose Gleichstrommaschine wird im Englischen als **Brushless Direct Current Motor** (BLDC Motor) oder auch als **Brushless Motor** (BLM) übersetzt. Vom Aufbau des BLDC-Motors her, kann man es als die Synchronmaschine oder Permanentmagneterregte Synchronmaschine betrachten und einen relevanten Unterschied im nächsten Zitat beachten.

Der einzige Unterschied zwischen den beiden Motortypen ist, dass die Drehfelderzeugung beim Brushless-DC-Motor nicht mit sinusförmigem Wechselstrom, sondern über getakteten Gleichstrom erfolgt, der mit Hilfe einer Leistungselektronik – in Abhängigkeit von der Rotorposition – den drei Phasen zugeführt wird. Dabei ist immer eine Phase stromlos, eine Phase mit dem Pluspol der Spannungsversorgung und die dritte Phase mit dem Minuspol der Spannungsversorgung verbunden. [14, p. 133]



Abbildung 2-6 2kW-Radnabenmotor mit 17x3 Spulen im Stator [14, p. 132]

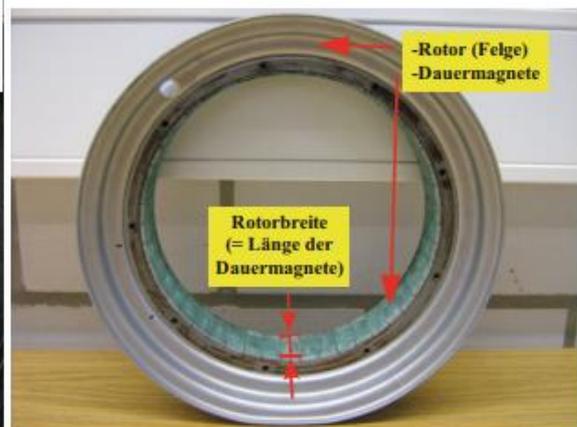


Abbildung 2-5 Rotor eines 2kW-Radnabenmotors mit 47 Permanentmagneten [14, p. 133]

Abbildung 2-5 und Abbildung 2-5 Rotor eines 2kW-Radnabenmotors mit 47 Permanentmagneten

Abbildung 2-6 stellen den Aufbau eines Radnabenmotors bzw. BLDC-Motors dar. Die Stator-Gruppe ist ein feststehender innerer Teil und umfasst Stator, Kupferwicklungen, Statorblechpaket und Hallsensoren. Der Rotor ist die Felge. Man versteht den Aufbau des BLDC-Motors so, dass sich die Felge um die dreiphasigen Statorwicklung drehen wird. Beim E-Bike-Radnabenmotor nimmt man an, dass er kleiner als im beschriebenen Aufbau sein kann und auf dieselbe Art funktioniert.

Man kann bei der Abbildung 2-8 erkennen, dass die Drehzahl proportional zur dreiphasigen Pulsweitenmodulation (PWM) ist, welche vom Mikrocontroller (Drive Controller) befohlen wird. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt auf der rechten Seite ein Modell einer bürstenlos kommutierten Gleichstrommaschine. Man soll beachten, dass sich im

Aufbau des Radnabenmotors (vgl. Abb 2-7) der Läufer (Rotor) außerhalb von Ständer (Stator) befindet. Im dargestellten Modell befindet sich der Läufer innerhalb der Ständerwicklung.

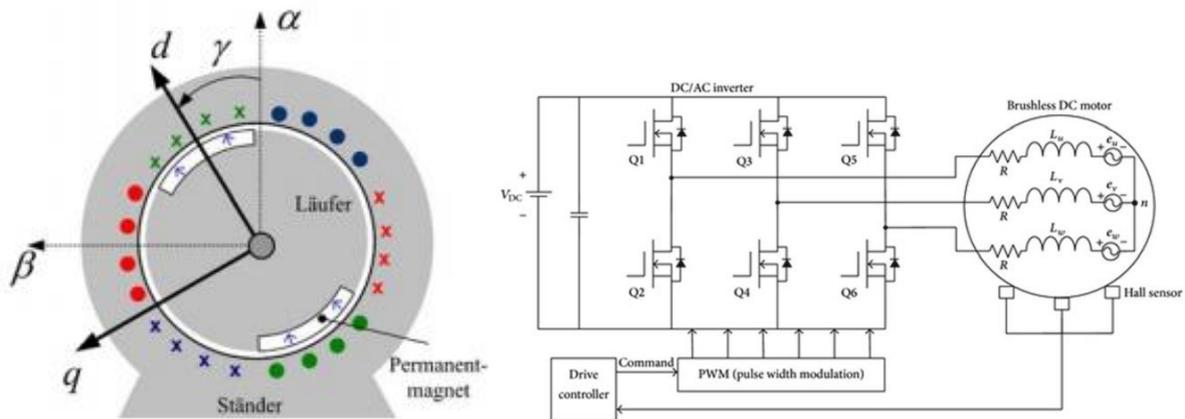


Abbildung 2-7 Modell einer PSM mit $p = 1$ im statorfesten α/β -Koordinatensystem [13, p. 206] und im rotorfesten d/q -Koordinatensystem mit $L_q > L_d$ [12, p. 104]

Hier wird der Vorgang einer Drehbewegung eines Rotors beschrieben.

Im Rotor (Läufer) sind Permanentmagnete eingearbeitet, mit denen ein konstantes Magnetfeld erzeugt wird. Im Stator (Ständer) sind Wicklungen eingebracht, hier dargestellt in rot, grün und blau. Das dargestellte Modell hat eine Polpaarzahl $p = 1$, es sind auch Maschinen mit einer höheren Polpaarzahl möglich, damit eine feinere Drehmomentbildung möglich ist. Die Ansteuerung einer Brushless DC Motor erfolgt über Transistoren (im Grunddiagramm Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6), die die Wicklungen (L_u , L_v , L_w) ein- und ausschalten können. Zusätzlich sind Freilaufdioden vorgesehen. Die Steuerung wird aus einer Gleichspannung gespeist. Um ein Drehmoment zu erzeugen, werden die Wicklungen so ein- und ausgeschaltet, dass ein im Stator wanderndes Magnetfeld entsteht. Ist beispielsweise die grüne Wicklung (z.B. L_u) eingeschaltet und soll sich der Rotor in Richtung von γ drehen, wird als Nächstes die rote Wicklung (z.B. L_w) eingeschaltet. Die grüne Wicklung wird ausgeschaltet und umgepolt. Der Vorgang wird wiederholt, sodass ein wanderndes Magnetfeld entsteht, dem der Rotor folgt. Ein weicherer Drehmomentverlauf ergibt sich durch eine Anpassung der Wicklungsspannungen mittels Pulsweitenmodulation (PWM).

Die Formel [12, p. 107] für die Drehzahl des BLDC-Motors ist:

$$n_1 = \frac{f_1}{p}$$

f_1 ist die Frequenz der Ständerdrehstroms bzw. Statorstroms. p ist Polpaarzahl.

Um einen Elektrorollstuhl ohne klassische Lenkungsachse durch die Differenz von zwei oder vier unterschiedlichen Drehzahlen steuern zu können, wird die Lenkung mit den unterschiedlichen Frequenzen des Ständerdrehstroms an den jeweiligen BLDC-Motoren gesteuert. Die Geradeaus-Fahrt wird durch gleichen Ständerdrehströme erfolgt. Die Polpaarzahl bleibt konstant.

Die Drehzahlsteuerung des Motors basiert auf Anzahl der Zustandsänderungen im Mikrocontroller, Anzahl der Kombination der Hallsensoren und Rotorwinkel von zwei Permanentmagnetbreite / einer Polpaarzahl. Die Formel für Drehzahlsteuerung ist zusammengefasst:

$$n_1 = \frac{f}{p} = \frac{\text{Anzahl der Zustandsänderungen im Mikrocontroller pro Sekunde}}{\text{Anzahl der Hallsensoren} * \frac{360^\circ}{\text{Rotorwinkel der Permanentmagnetbreite von zwei Polen}}} \left[\frac{1}{s} \right]$$

Die Geschwindigkeit ist proportional zur Frequenz f (Anzahl der Zustandsänderung pro Sekunde im Mikrocontroller bzw. Frequenz des Ständerdrehstroms).

Der BLDC-Motor wird im Kapitel 4.1 Fahrsystem berücksichtigt. Das Grunddiagramm kann als Basis für Kapitel 4.4 vorgemerkt werden.

2.2.3 Planetengetriebe

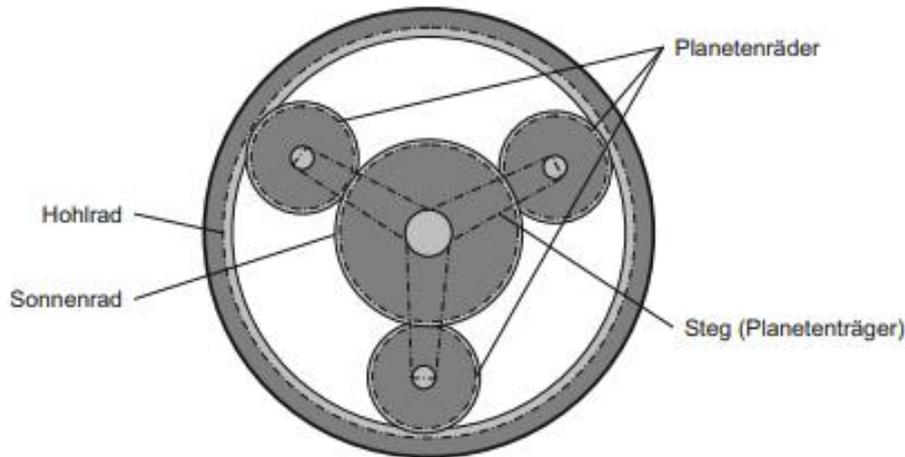


Abbildung 2-8 Darstellung eines Planetensatzes [15]

Die Grundform eines Planetengetriebes besteht aus einem Sonnenrad, einem Steg mit Planetenrädern und dem Hohlräder. Das Sonnenrad steht in der Mitte des Getriebes. Sonne, Steg und Hohlräder sind coaxial angeordnet. Der Steg (oder Planetenträger) trägt Planetenräder, die sich um die Sonne drehen und auf der Sonne abrollen. Üblich sind drei bis fünf Planetenräder. Bei einer höheren Zahl von Planetenrädern verteilt sich die Belastung auf mehrere Räder, so dass drei Planetenräder eher bei leichteren Getrieben anzutreffen sind. Die Planeten werden von einem Hohlräder umgeben, dessen Innenverzahnung mit den Planetenrädern kämmt.

In Abbildung 2-8 ist die einfachste Form eines Planetengetriebes skizziert.

Planetenräder bauen sehr kompakt und können hohe Drehmomente übertragen, da immer mehrere Zahnräder gleichzeitig im Eingriff sind. [15]

Das Zitat zeigt, dass die Planetengetriebe hohe Drehmomente übertragen und somit die Kompaktheit des Antriebssystems in einer Konzeptentwicklung ermöglichen können. Die Kombination von Brushless-DC-Motor und Planetengetriebe wurde bereits in manchen E-Bike-Frontantrieben [16] angewendet, um den hohen Drehmomenten bei einem hohen Gesamtgewicht oder Steigungsfähigkeit mit einem großen Raddurchmesser erzeugen zu können.

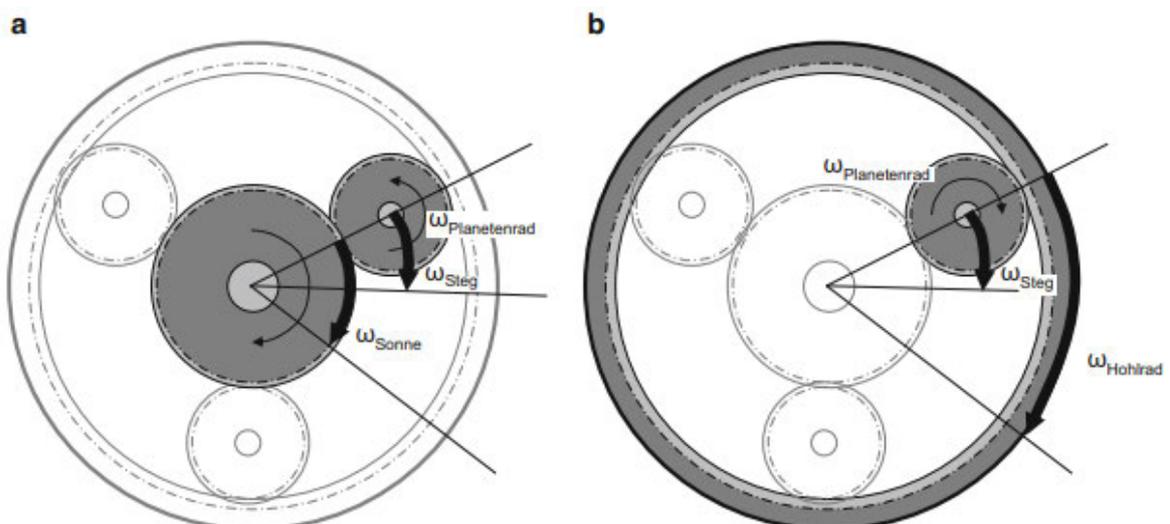


Abbildung 2-9 Darstellung der Grundgleichung eines Planetensatzes [15]

Die Grundgleichung nach Willis-Gleichung wird angewendet, um die Übersetzung zu ermitteln:

Wenn z für die Zähnezahzahl der verschiedenen Zahnräder steht, so lautet die Grundgleichung des einfachen Planetengetriebes (die sogenannte Willis-Gleichung): [15]

$$\omega_{\text{Sonne}} + \frac{z_{\text{Hohlrad}}}{z_{\text{Sonne}}} * \omega_{\text{Hohlrad}} - \left[1 + \frac{z_{\text{Hohlrad}}}{z_{\text{Sonne}}} \right] * \omega_{\text{Steg}} = 0$$

Die Winkelgeschwindigkeit ω_{Sonne} vom Sonnenrad ist direkt proportional zu der Drehzahl des BLDC-Motors n_1 . Die Getriebeübersetzung kann bei einer Suche nach passender Kombination von BLDC-Motor und Planetengetriebe angewendet werden, wo das Hohlrad vom Sonnenrad durch das Zähne-Übersetzungsverhältnis [15] bewegt wird:

$$i = - \frac{z_{\text{Hohlrad}}}{z_{\text{Sonne}}}$$

2.2.4 Energiespeicher

Die Stromversorgung der Elektromotoren erfolgt durch die chemischen oder elektrochemischen Energiespeicher. Die chemische Energiespeicher wird typischerweise als fossiler Brennstoff wie Benzin oder Diesel im Tank verstanden und wird im Notgenerator im Fall eines Stromausfalls angewendet. Heute werden die chemischen Energiespeicher immer mehr durch elektrochemischen Energiespeicher ersetzt. Akkumulatoren wie Blei-Batterie oder Lithium-Ionen-Batterie sind elektrochemische Energiespeicher, die mit Strom einmal oder wieder aufgeladen werden und elektrische Energie abgeben. Da der Elektromotor als ein in Innengebäuden benötigtes Fortbewegungsmittel keine Abgase verursacht, wird nur der Elektromotor hier in der Konzeptentwicklung eines LIAM-Elektrollstuhls berücksichtigt.

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik von Batteriespeichern vertieft.

Die Abbildung 2-10 a zeigt das Vergleichsdiagramm der Batteriehersteller. In der Abbildung 2-10 b stellt ein spezifisches Kapazität-Zellspannung-Diagramm dar.

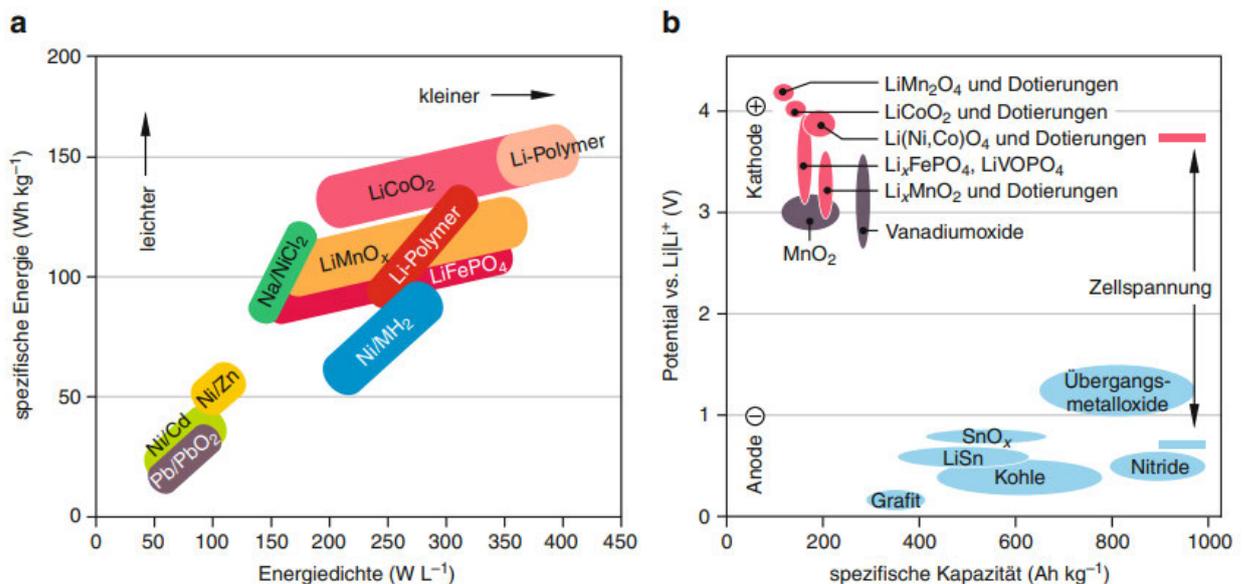


Abbildung 2-10 RAGONE-Diagramm verschiedener Akkumulortechnologien: Blei-Säure, Nickel Cadmium, Nickel-Zink, Natrium-Nickelchlorid (Zebra), Nickel-Metallhydrid, Lithiumion, b Elektrodenpotential und Ladung verschiedener Materialien für Lithiumionen-Akkumulatoren. Zum Vergleich: Lithiummetall 4 000 Ah kg⁻¹ [17]

Abbildung 2-10 b zeigt, dass die 3,6 V-Lithiumionen-Batterien spezifische Energien bzw. Energiedichte von $220 \frac{Wh}{kg}$ ($450 \frac{Wh}{L}$) erreichen. Ein Lithium-Polymer liefert $250 \frac{Wh}{kg}$ ($400 \frac{Wh}{L}$) und Lithium-Dünnschichtbatterien $250 \frac{Wh}{kg}$ ($450 \frac{Wh}{L}$). [17]

Lithiumbatterien sollen (1) kompakt und leicht, ohne schweres Metallgehäuse, (2) frei von giftigen Metallen, (3) verlässlich und inhärent sicher, (4) in verschiedenen Größen und Ausführungen verfügbar, (5) langlebig ($\geq 90\,000$ Zyklen) und energiereich ($300 \frac{Wh}{kg}$, $500 \frac{Wh}{L}$) und (6) preiswert sein, (7) in einem breiten Temperaturbereich funktionieren, (8) sich bei Nichtgebrauch um weniger als 1 % pro Jahr selbst entladen und (8) hohe Leistungsdichte und Entladespannung bieten. [17]

Akku-Typ	Energie- dichte Wh/kg	Leistungs- dichte W/kg	Wirkungs- grad %	Lebens- dauer Zyklen	Lebens- dauer Jahre
Blei	30 - 50	200 - 300	80 - 85	300 - 400	2 - 4
Nickel/ Metallhydrid	46 - 90	500 - 1300	> 70	> 2000	8 - 10
Natrium/ Nickelchlorid	90 - 100	160	85 - 90	1000	5 - 10
Lithium/ Metall Fortu ^R	60 – 250 (1000)		> 80		
Lithium/Ionen	120 - 240	600 - 3000	95	> 1000	8
Lithium/Polymer	110 - 180	~ 300 (- 2800)		< 600	
Lithium/Titanat	70 - 90	4000	90 - 95	> 15000	
Zink/Luft	180 - 220	~ 100			
<i>Kondensatoren</i>	<i>5</i>	<i>1000- 5000</i>	<i>95</i>	<i>> 500000</i>	<i>10</i>

Abbildung 2-11 Akkumulatoren im Vergleich [18]

In den Elektrorollstühlen sind fast ausschließlich Blei-Schwefelsäure-Batterien aus Kostengründen in Nutzung. [2] Die Annahme ist, dass heute immer mehr Nickel-Kadmium-, Nickel-Metall-Hydrid- oder Lithium-Ionen-Akkus in den modernen Elektrorollstühlen genutzt werden.

Moderne, auf dem Markt verfügbare Lithium-Ionen- oder Lithium-Eisen-Batterien werden im Batteriemodul stärker berücksichtigt und im Fall der günstigen Kosten und der hohen Lebensdauer ausgewählt.

2.2.5 Bremssystem

„Die Bremsanlagen eines Kraftfahrzeugs dienen zu folgenden Zwecken:

- Festhaltebremsung, d. h. Verhüten unerwünschter Bewegung des ruhenden Fahrzeugs
- Beharrungsbremsung, d. h. Verhindern unerwünschter Beschleunigung bei Talfahrt
- Verzögerungsbremsung, d. h. Verringern der Geschwindigkeit, ggf. bis zum Stillstand des Fahrzeugs“ [19]

Die meisten Elektrorollstühle haben eine elektromechanische bzw. elektromagnetische Bremse (Magnetbremse) [2], die direkt vom Joystick bzw. von einem Bedienmodul gesteuert ist. Die elektromechanische Bremse ist im Bremsenhandbuch als Brake-by-Wire klassifiziert. [19] Das Brake-by-Wire- Bremssystem wurde im SL Roadster Daimler Chrysler erst im Jahr 2001 auf dem Markt eingeführt. Die Brake-by-Wire erfordert elektrischen Signal bzw. das Befehl für einen Bremsvorgang. Diese neue Technologie ermöglicht die Bremskraftverteilung durch Steuerungselektronik. [19]

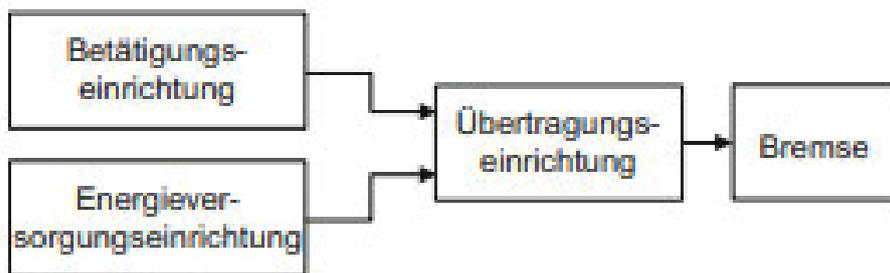


Abbildung 2-12 Schematischer Aufbau einer PKW-Bremsanlage [19]

Es ist zu beachten, dass die Ausfallsicherheit des Bremssystems nicht die absolute Sicherheit wiedergibt. Stattdessen muss die Ausfallwahrscheinlichkeit in Relation auf eine Zeitdauer oder Laufstrecke gering sein. [20] Beim Ausfall der Energieversorgung-, Betätigung- oder Übertragungseinrichtung muss die mechanische Feststellbremse mit geringer Handkraft als Redundanz des Bremssystems greifen, die ein Mensch mit Bewegungseinschränkungen oder eine Begleitperson selbst betätigen kann.

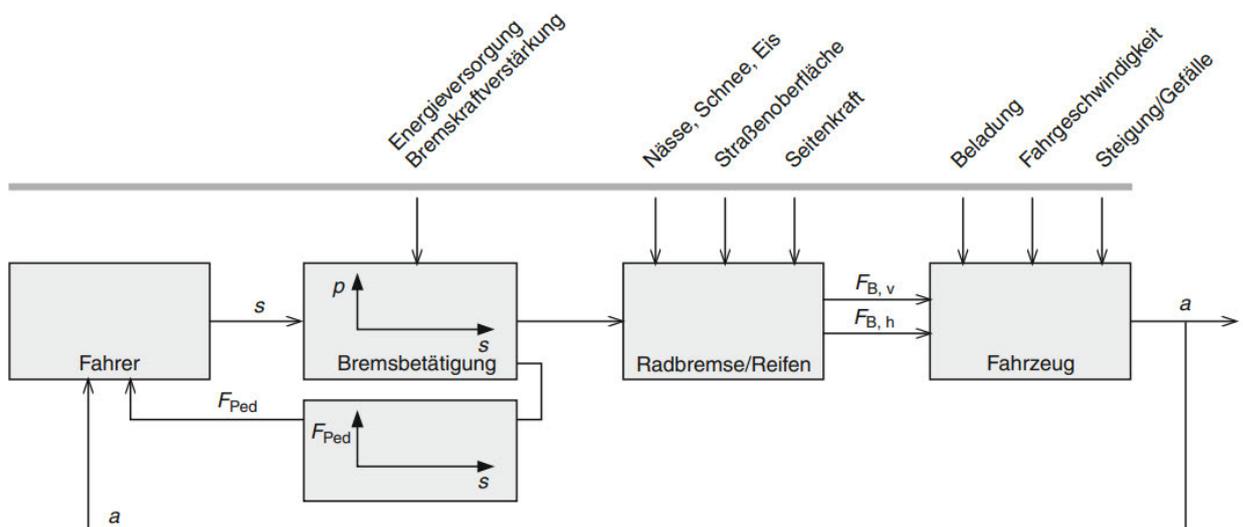


Abbildung 2-13 Regelkreis Fahrer-Fahrzeug beim Bremsvorgang [19]

Abbildung 2-13 stellt das Regelkreis Fahrer-Fahrzeug beim Bremsvorgang. Die Pedalkraft F_{Ped} für den Fahrer soll von der Brake-By-Wire-Technologie übernommen werden. Mit der Brake-By-Wire-Technologie kann der Regelkreis Elektrorollstuhlfahrer*in -Fahrzeug beim Bremsvorgang angewendet werden.

In der Konzeptentwicklung eines Bremssystems im Kapitel 4.5 wird die Brake-By-Wire-Technologie berücksichtigt.

2.3 Elektrorollstuhl-Marktanalyse

Die Marktanalyse wird hier durchgeführt. Die Marktanalyse unterstützt das LIAM-Projekt dabei, eine mögliche Marktlücke mithilfe der Hauptmerkmale jedes ausgewählten Elektrorollstuhls oder nicht ausreichende Verfügbarkeit auf dem Markt in einer Übersicht zu erkennen. Nach der Marktanalyse wird ein Gesamtkonzept entwickelt, um eine individuelle Mobilitätslösung bieten zu können. Dieses wird anschließend im Kapitel 4.10 mit den analysierten Elektrorollstühle verglichen.

2.3.1 Genny Urban 2.0

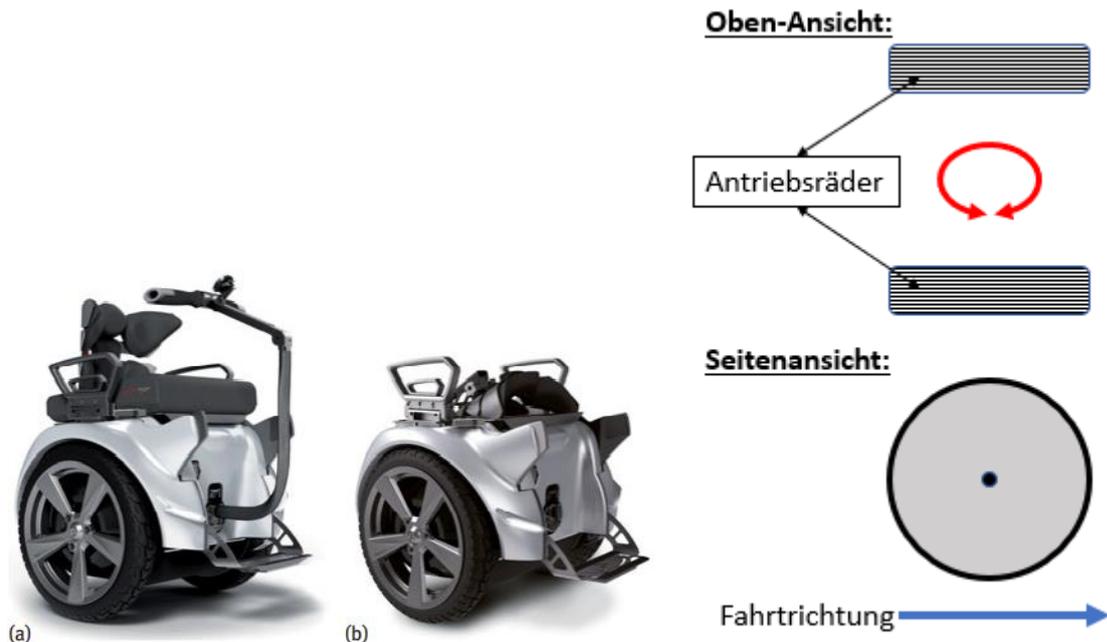


Abbildung 2-14 (a) Zweirädriges Gleichgewichtsrollstuhl Genny Urban mit Lenkstange (b) Frontansicht mit umgeklappter Rückenlehne und abgenommener Lenkstange [2]

Abbildung 2-15 Hauptmerkmal von Genny Urban 2.0 (Quelle: Eigene Darstellung)

Genny Urban 2.0 ist ein einsitziger Gleichgewichtsrollstuhl nach Vorbild des bekannten Stehfahrzeugs Segway. Dieser Gleichgewichtsrollstuhl hat zwei Antriebsräder an einer Achse. In diesem Gleichgewichtsrollstuhl sind Regelalgorithmen unter Nutzung von fünf Gyroskopen (Kreiselstabilisatoren) eingebaut, welche das stabile Fahren unter dynamischen Bedingungen und bei minimalen Wenderadien nutzen. Durch die Gewichtsverlagerung werden durch manche Bewegungen abgelöst, d. h. die Hände werden zum Fahren nicht zwingend gebraucht. Sie können z. B. zum Halten von Gegenständen (u. a. eines Regenschirms) genutzt werden, aber auch einen Handgriff zur Stabilisierung der Körperposition umgreifen. Beim Ein- und Aussteigen zeigt die Abbildung 2-14, dass sich die mittig angeordnete Lenkstange abnehmen lässt. [2]

Tabelle 1 Technische Spezifikationen von Genny Urban

Technische Spezifikationen von Genny Urban [21]	
Antriebsart	Segway-Antrieb
Steuerungsart	Lenkstange
Leergewicht	89,5 kg
Zuladungsgewicht	100 kg
Leistung	2,2 kW (3hp)
Bordspannung	73,6 V
Akkukapazität	2x Lithium Akkus 5,8 Ah (11,6 Ah)
Reichweite	38 km
Höchstgeschwindigkeit	Bis zu 12 km/h oder 20 km/h
Wenderadius	315 mm
Maximale Steigfähigkeit	Bis zu 18 % Steigung oder Neigung
Bodenfreiheit	9 cm
Hindernishöhe	n.a.
Abmessung Länge / Breite / Höhe	83 cm x 63 cm x 70 cm
Antriebsraddurchmesser	48 cm
Preis	16000 Euro
HMV-Nummer	Nicht aufgelistet

Genny Urban 2.0 ist ein mit 2,2 kW Antriebsmotor leistungsstarker Segway-Sitzrollstuhl. Die Voraussetzung für die Nutzung des Gleichgewichtsrollstuhls ist die Funktionsfähigkeit des Rumpfs für die körperliche Gewichtverlagerung. Die Treppenfahrwerk, Aufstehhilfe und Sitzhöhenverstellbarkeit sind nicht vorhanden. Dieses Gleichgewichtsrollstuhl ist geeignet für den Menschen mit Funktionsfähigkeit der beidseitigen Handgriffe und Rumpf, die zwei Händen an der Lenkstange steuern können. Diese moderne Variante ist nicht in der Hilfsmittelverordnung aufgelistet, da die Hilfsmittelverordnung die Variante der Elektrorollstühle mit mindestens drei Rädern zulässt.

2.3.2 Scewo Bro



Abbildung 2-16 Scewo Bro im Treppenmodus

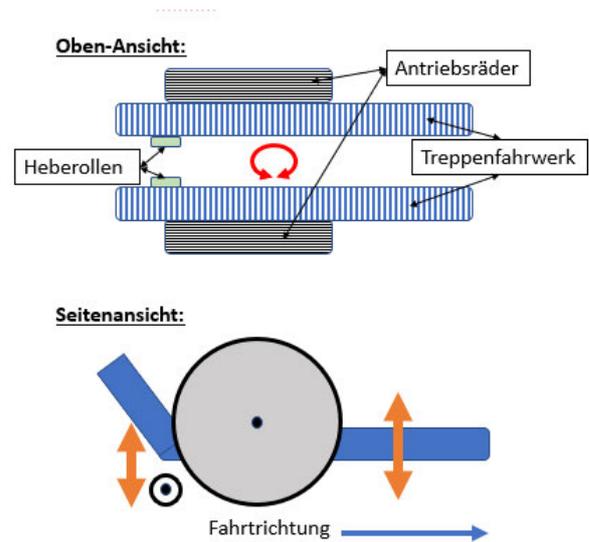


Abbildung 2-17 Hauptmerkmale von Scewo Bro
(Quelle: Eigene Darstellung)

Mit seiner Treppensteigfähigkeit an einer geradlinig flachen Treppe ermöglicht der von Schweizer Unternehmen Scewo AG entwickelte Scewo Bro die Unabhängigkeit von kaputten Aufzügen und fehlenden Rampen. Es ist eine kurzfristige Lösung gegen räumliche Barrieren, weil die räumliche Barrierefreiheit in der privaten Wirtschaft in Deutschland bisher nicht verpflichtend ist und nach der Ratifizierung der UN-Behindertenrechtskonvention Artikel 9 zurzeit in den auf der Ratifizierung aufgelisteten Ländern ausgebaut wird.

Scewo Bro hat drei verschiedenen Fahrwerken, Radfahrwerk und -Kettenfahrwerk und die kombinierte Fahrwerkausführung von Stützrollen- und Kettenfahrwerk. Das Kettenfahrwerk ist für das Treppensteigen oder Sitzhöhenverstellbarkeit eingesetzt. Das Radfahrwerk ist für gewöhnliches Fahren anwendbar.

Tabelle 2 Technische Spezifikationen von Scewo Bro

Technische Spezifikationen des Elektrorollstuhls Scewo Bro [22]	
Antriebsart	Segway, Kettenantrieb und Hebeantrieb
Steuerungsart	Joystick
Leergewicht	160 kg
Zuladungsgewicht	120 kg
Leistung	Nicht angegeben (geschätzt 500 W im Fahrmodus)
Bordspannung	48 V
Akkukapazität	20 Ah / 31 Ah
Reichweite	Min. 25 km Reichweite bei 20 Ah Akku Min. 35 km Reichweite bei 30 Ah Akku
Höchstgeschwindigkeit	10 km/h im Fahrmodus Bis zu 30 Stufen pro Minute beim Treppenmodus
Wendekreisradius	575 mm
Maximale Steigfähigkeit	10,5 % Steigung im Fahrmodus 20° bis 36,5 ° im Treppenmodus
Bodenfreiheit	Nicht angegeben
Hindernishöhe	5 cm im Fahrmodus 20 cm im Treppenmodus
Abmessung Länge / Breite/ Höhe	1000 mm x 685 mm x 670 mm
Raddurchmesser	Nicht angegeben (angenommen 48 cm wie bei Genny Urban 2.0)
Preis [23]	33493,10 Euro inkl. Transport- und Zollkosten

Der Kritikpunkt ist das hohe Eigengewicht von 160 kg, welches sich auf die Akkukapazität und Reichweite auswirkt und mehr Stromverbrauch verursacht. Es ist angenommen, dass das hohe Eigengewicht vom schweren leistungsstarken Antriebsmotoren, dem Treppensteiggerät und der Hydraulik für Sitzlift verschuldet ist. Diese Reduzierung des hohen Eigengewichts kann mehr Reichweite bedeuten und der Vorstellung der Nachhaltigkeit entsprechen.

2.3.3 Permobil F5

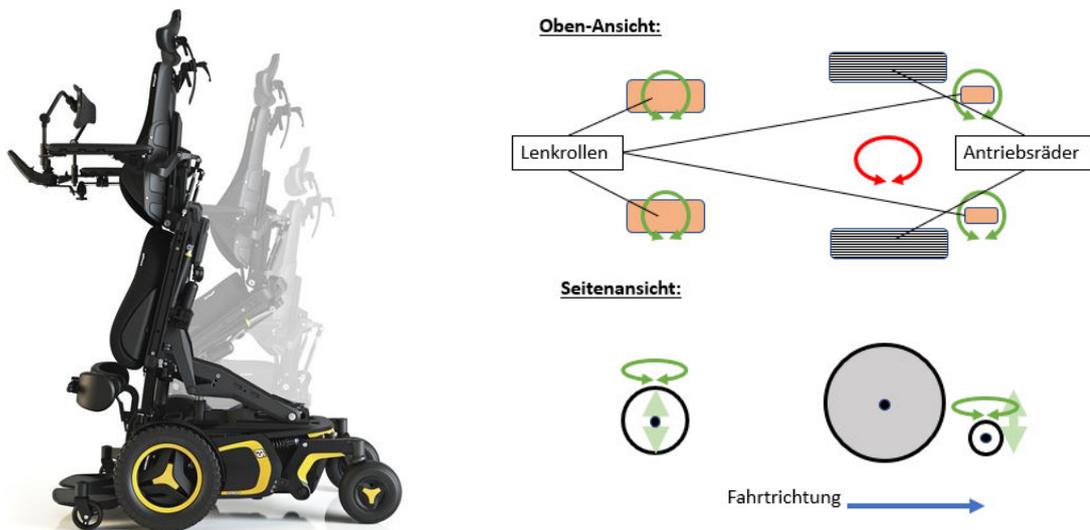


Abbildung 2-19 Permobil F5 VS im Stehmodus [24] Abbildung 2-18 Hauptmerkmale von Permobil F5

Die beliebte Variante unter der Elektrorollstuhl-Community ist Permobil F5 mit vier Lenkrollen und zwei Vorderantriebsrädern. Die Kombination aus guter Wendigkeit, Robustheit, Kursstabilität, Liegefunktion, Sitzhöhenverstellbarkeit, Stehfunktion und Durchfahrbarkeit mit der engen Breite von 655 mm ist der Grund für die Beliebtheit unter der Rollstuhlcommunity, auch wenn die Treppensteigfähigkeit nicht vorhanden ist. Die Permobil F5-Fahrer haben die Möglichkeit, mit dem Permobil den Aufzug zu betreten, auf einer normierten Rampe nach oben oder unten fahren oder die abgesenkten Bordsteine überwinden zu können.

Das Variante vom schwedischen Hersteller Permobil ist mit einem Radfahrwerk angetrieben, in dem zwei Antriebsmotoren, zwei Stützrollen und zwei Lenkrollen zusammengebaut sind. Das schlanke flexible Sitzsystem ist im Jahr 2013 patentiert worden.

Tabelle 3 Technische Spezifikationen von Permobil F5 VS

Technische Spezifikationen des Permobil F5 Corpus / F5 Corpus VS	
Antriebsart	Zweimotoriger Mittelradantrieb
Steuerungsart	Joystick
Leergewicht inkl. Batterien [24]	186 kg (davon 46 kg Batterien) / 196 kg
Zuladungsgewicht [24]	150 kg
Leistung	Nicht angegeben (Annahme 2 x 150 W)
Bordspannung [24]	12 V
Akkukapazität [24]	2x 73 Ah
Reichweite [24]	25 bis 35 km
Höchstgeschwindigkeit [24]	6 km/h bis 12 km/h
Wenderadius [24]	76,25 cm
Maximale Steigfähigkeit [24]	12°
Bodenfreiheit [24]	7,6 cm
Hindernishöhe [24]	7 cm bis 10 cm
Abmessung Länge / Breite/ Höhe [24]	1145 mm / 655 bis 790 mm / 960 bis 1170 mm
Antriebsraddurchmesser vorne	36 cm
Preis [24]	Grundpreis 17.204 Euro / 26.013 € zzgl. MwSt.
HMV-Nummer [24]	18.99.06.1080 / 18.99.06.2021

Die kleinen Nachteile sind die niedrige Überwindbarkeit der Hindernishöhe von bis zu 10 cm und der zweimotorige Antrieb mit schwacher Antriebsleistung. Diese Nachteile sind kompensierbar, wenn sich die Permobil-Nutzer*innen meistens mit Umwegen und einiger Stellen der abgesenkten Bordsteine auskennen und gut über Aufzüge und Rampen per Informationsportal für Barrierefreiheit informiert sind.

2.3.4 iBot PMD

Der erste selbstbalancierte Elektrorollstuhl iBot 3000 als Vorgänger von iBot PMD wurde von Mobius Mobility im November 2003 auf dem Markt eingeführt und aufgrund des nicht ausreichenden Absatzes vom Markt genommen. Nach zehn Jahren Pause wird iBot PMD als neu entwickeltes Produkt wieder seit 2019 produziert.

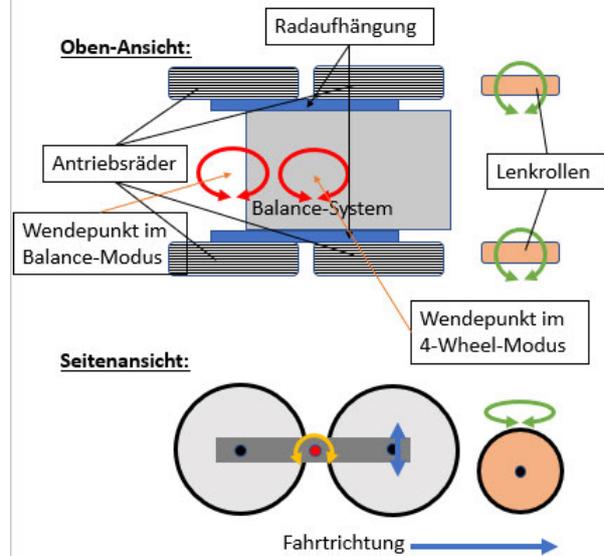


Abbildung 2-21 Hauptmerkmale von iBot PMD
Quelle: Eigene Darstellung)

Abbildung 2-20 iBot PMD im Balance-Modus [77]

Mit iBot PMD im Balancemodus mit zwei Rädern zum Bodenkontakt können die Nutzer sich auf der Augenhöhe mit den Passanten befinden. Durch die Drehung der vier aufgehängten Räder, kann iBot PMD die Hindernisse oder Treppen erklimmen. iBot PMD hat vier Fahrmodi: Standardmodus, 4-Wheel-Modus, Balance-Modus und Treppenmodus.

Tabelle 4 Technische Daten von iBot PMD

Technische Spezifikationen des iBot PMD [25]	
Antriebsart	Viermotorig
Steuerungsart	Joystick
Leergewicht	110 kg / 80,7 kg
Zuladungsgewicht	136 kg
Leistung	Nicht angegeben
Bordspannung	57,6 V oder 76 V
Akkukapazität	6x 5 Ah
Reichweite	28 km bis 35 km
Höchstgeschwindigkeit	10,8 km/h im Standardmodus
Wenderadius	549 mm im Balancemodus
Maximale Steigfähigkeit	12 ° im 4-Wheel-Modus
Bodenfreiheit	72 mm bis 243 mm abhängig vom Modus
Hindernishöhe	130 mm im 4-Wheel-Modus
Abmessung Länge / Breite/ Höhe	813 mm / 639 mm / 475 mm bis 909 mm
Raddurchmesser hinten /vorne	
Preis	30,000 USD ohne Versandkosten und MwSt.
HMV-Nummer	Nicht aufgelistet

iBot PMD bietet keine Liege- und Stehfunktion. iBot PMD ist geeignet für Menschen mit Bewegungseinschränkungen, die Liege- und Stehfunktionen nicht benutzen.

2.3.5 Caterwil GTS 4WD

Der Prototyp von Caterwil erreichte den zweiten Platz im Cybathlon-Wettbewerb im November 2020 in Zürich. [26] Caterwil ist eine Abkürzung für Caterpillar (Rauhen) und Wheel (Rad), die die für die zwei Fahrwerke in jedem Caterwil-Produkt stehen. Eines der Caterwil-Produkte ist zur Analyse ausgewählt worden. Caterwil GTS 4WD ist ein geländegängiger treppensteigender mit 4 Elektromotoren angetriebener Elektrorollstuhl. Es wurde im Jahr 2019 auf dem Markt eingeführt.



Abbildung 2-22 CATERWIL GTS 4WD [27]

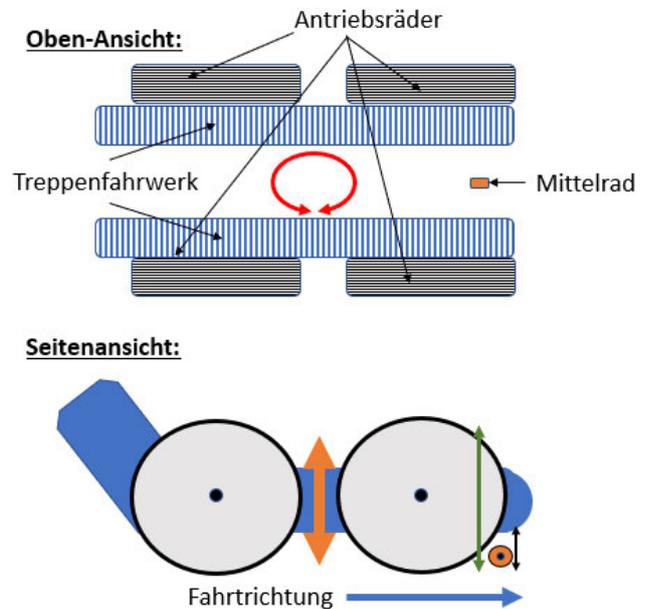


Abbildung 2-23 Hauptmerkmale von Caterwil GTS 4WD (Quelle: Eigene Darstellung)

Der signifikante Unterschied zum treppensteigenden Elektrorollstuhl Scewo Bro ist der eingebaute Räder- statt Segway-Antrieb. Im Treppenmodus wird der vom russischen Hersteller Caterwil produzierten treppensteigender Elektrorollstuhl GTS 4WD genauso wie Scewo Bro rückwärts bewegt. Beim Wenden an einer engen Stelle werden die Vorderräder vom eingeklappten Mittelrad angehoben.

Tabelle 5 Technische Daten von Caterwil GTS 4WD

Technische Spezifikationen von Caterwil GTS 4WD [27]	
Antriebsart	Viermotoriger Allradantrieb
Steuerungsart	Joystick
Leergewicht	98 kg
Zuladungsgewicht	100 kg
Leistung	Nicht angegeben
Bordspannung	24 V
Akkukapazität	42 Ah
Reichweite	25 km
Höchstgeschwindigkeit	7 km/h
Wenderadius	65,8 cm
Maximale Steigfähigkeit	n.a. im Straßenmodus 40° Treppensteigung im Raupenmodus (max. 20 cm Treppenstufenhöhe)
Bodenfreiheit	n.a.
Hindernishöhe	<ul style="list-style-type: none"> • 5 cm im Straßenmodus • 20 cm im Raupen- bzw. Treppenmodus
Abmessung Länge / Breite/ Höhe	1050-1300 mm / 650 mm / 700 mm
Raddurchmesser hinten /vorne	355 mm
Preis	Ca. 14000 €
HMV-Nummer	Nicht aufgelistet

Die technische Spezifikation zeigt, dass der Preis von 14.000 Euro deutlich günstiger als bei Scewo Bro ist, weil die Sitzhöhenverstellbarkeit im Sitzsystem nicht vorhanden ist. Im Treppenmodus wird der Sitz nach hinten in Fahrtrichtung verschoben, damit ein Umkippen an der Treppe vermieden werden kann. Caterwil GTS 4WD ist aber bei einer Geschwindigkeit von bis 7 km/h nicht zufriedenstellend. Dieses Elektrorollstuhl bietet in seinem Antrieb und Tempo noch Ausbaupotential.

2.3.6 Observer Maximus



Abbildung 2-25 Observer Maximus im Erklimmen der Treppen [73]

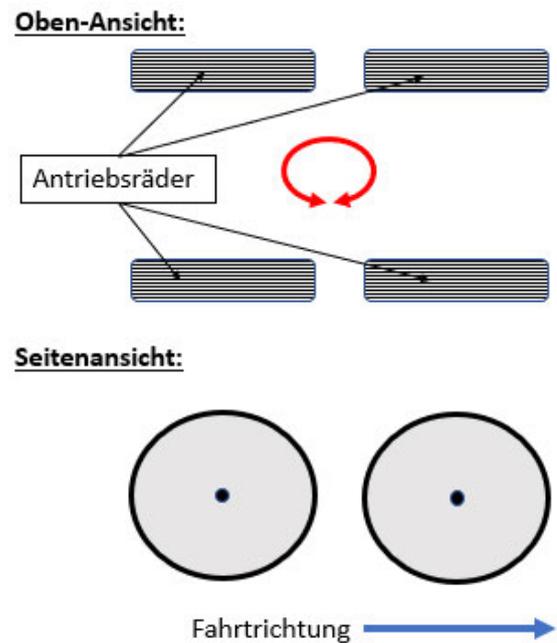


Abbildung 2-24 Hauptmerkmale von Observer Maximus (Quelle: Eigene Darstellung)

Observer Maximus ist ein Beispiel ein nicht treppensteigender viermotoriger Elektrorollstuhl. Er hat zwei starke und zwei schwache Antriebsmotoren und kann Treppen bis zu 12 cm Höhe mithilfe des kurzen Radstands und der guten Stollenreifenprofils ohne Kettenfahrwerk erklimmen. Das Sitzsystem ist mithilfe der Gyroskope automatisch winkelverstellbar und nicht sitzhöhenverstellbar.

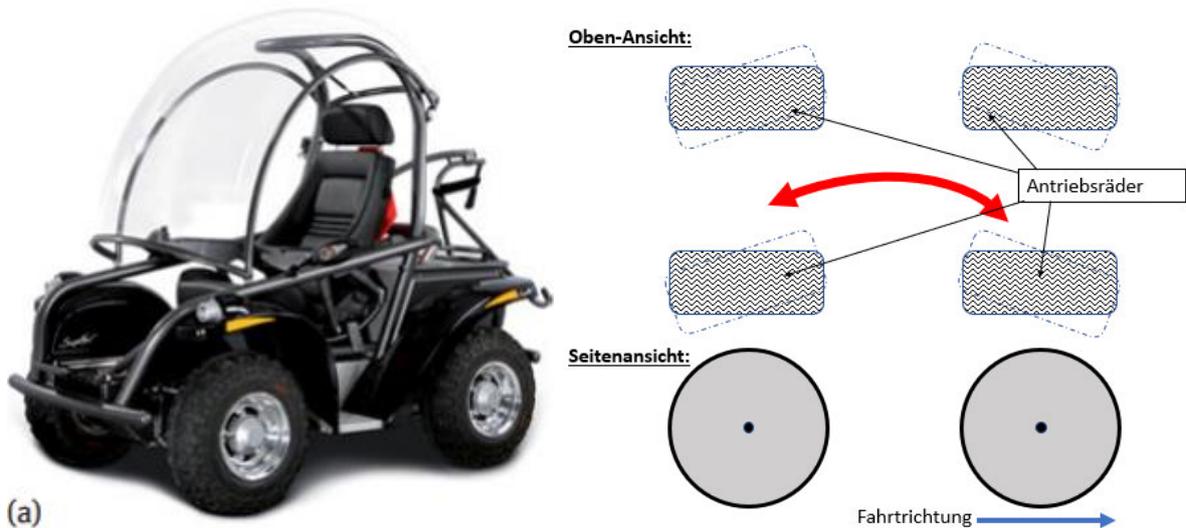
Die Besonderheit der Lenkungsart ist, dass Observer Maximus durch die unterschiedlichen Drehzahlen mit festem Gestell gelenkt wird.

Tabelle 6 Technische Daten von Observer Maximus

Technische Spezifikationen von Observer Maximus [28]	
Antriebsart	Viermotorig (hinten und vorne jeweils zweimotorig)
Steuerungsart	Joystick
Leergewicht	166,5 kg
Zuladungsgewicht	205 kg
Leistung	2x 1200 W und 2x 200 W
Bordspannung	24 V
Akkukapazität	100 Ah
Reichweite	<ul style="list-style-type: none"> • Bis zu 20 km auf unebener Geländegängigkeit • Bis zu 30 km auf der asphaltierender Strecke
Höchstgeschwindigkeit	7,5 km/h
Wenderadius	<i>angenommen 681 mm</i>
Maximale Steigfähigkeit	25 ° (max. Treppenstufenhöhe 12 cm) 45 ° auf der Rampe oder Abhang
Bodenfreiheit	Annahme 8 cm
Hindernishöhe	14 cm
Abmessung Länge / Breite/ Höhe	1150 mm / 730 mm / 1370 mm
Raddurchmesser hinten /vorne	40 cm
Preis	8000 USD ohne Versandkosten und Zoll
HMW-Nummer	Nicht aufgelistet

Die Observer-Maximus-Treppensteigfähigkeit bei der Höhe von 12 cm ist nicht ausreichend für das Erklimmen der Treppen in Deutschland, da die Treppenhöhe im privaten Bereich oft mehr als 12 cm beträgt. Die höhere Treppenhöhe kann durch den größeren Raddurchmesser und den starken Antrieb besser erklommen werden.

2.3.7 SuperFour



(a)
Abbildung 2-27 SuperFour in verschiedenen Ansichten [2]

Abbildung 2-26 Hauptmerkmale von Super-Four (Quelle: Eigene Darstellung)

„Der Outdoor-Rollstuhl SuperFour der Firma Ottobock wurde für Geländefahrten mit höchsten Ansprüchen konzipiert. Durch seine Allradtechnik mit großen Federwegen und Raddurchmessern kann er Steigungen bis zu 40 % und Hindernisse bis zu 20 cm Höhe überwinden. Durch das **Hybridantriebskonzept** (vier Elektromotoren als Radantriebe, ein kleines Dieselaggregat zum Betrieb des Generators für die Energieversorgung) erreicht er Reichweiten bis zu 200 km. Die Allradlenkung erlaubt trotz des großen Radstandes und der indirekten Lenkung relativ kleine Wenderadien. Alle vier Räder werden dabei über ein vollelektronisches Differenzial angesteuert. Um trotz der Bodenunebenheiten im Gelände einen hohen Sitzkomfort zu erhalten, besitzt der Rollstuhl eine automatische Sitzkantelung. Beim Auf- und Abstieg am Hang bewirkt sie, dass der Sitz immer in einer horizontalen Position bleibt (kein Rutschen auf dem Sitz am Hang). Um den Einstieg zu erleichtern, kann der Sitz bis vor die Vorderachse gefahren werden (Sitzlängsverstellung).“ [2]

Tabelle 7 Technische Daten von SuperFour

Technische Spezifikationen von SuperFour der Firma Ottobock [2]	
Antriebsart	4 x Elektromotor als Radantriebe und 1x Dieselaggregat für Energieversorgung für Elektromotor
Steuerungsart	Joystick
Leergewicht	321 bis 348 kg (abhängig von der Ausstattung)
Zuladungsgewicht	120 kg
Leistung	2200 W bei 6300 U / min Hubraum Verbrennungsmotor 100 ccm
Bordspannung	Nicht angegeben
Akkukapazität	Nicht ermittelbar aufgrund des Dieselantrieb
Reichweite	200 km (mit Dieselantrieb mit Kraftstoffverbrauch 2 l pro 100 km)
Höchstgeschwindigkeit	15 km/h
Wenderadius	4,6 m
Maximale Steigfähigkeit	40 %
Bodenfreiheit	n.a.
Hindernishöhe	20 cm
Abmessung Länge / Breite/ Höhe	1980 mm / 1100 mm / 1750 mm
Raddurchmesser hinten /vorne	500 mm
Preis	40000 €
HMW-Nummer	Nicht aufgelistet

SuperFour wird vom Firma Ottobock nicht mehr produziert, d.h. es ist nicht mehr auf dem Markt verfügbar außer im Online-Handel als Gebrauchtware oder Flohmarkt. Der Bedarf an Outdoor-Aktivitäten mit einem mit vier Elektromotoren angetriebenen Fahrzeug kann durch den umgebauten günstigeren Quad-Fahrzeug für ca. 10.000 Euro gedeckt werden, d.h. man kann bis zu 30.000 Euro sparen.

2.3.8 PiiMo / Whill Model C

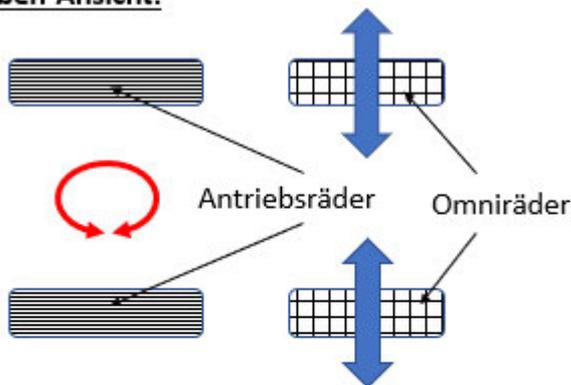
PiiMo wurde im Oktober 2020 als autonom gesteuerte Fahrzeugvariante von Panasonic präsentiert, welche im Flughafen und im Innenbereich eingesetzt werden kann. Die Sensorik des Unfallschutzmechanismus mit einem Durchmesser von 10 Meter sowie die Umfelderkennung mithilfe der künstlichen Intelligenz helfen dabei, eine Kollision mit Personen oder Gegenständen zu vermeiden. [29] Die Nutzer*innen können auf dem PiiMo sitzen und entspannt und ohne eine Begleitperson vom Start bis zum Ziel fahren. Das Fahrwerk ist Räderantrieb.



Abbildung 2-29 PiiMo mit Sensorik-Anlage und Gepäckablage [29]

Abbildung 2-28 WHILL Model C [30]

Oben-Ansicht:



Seitenansicht:

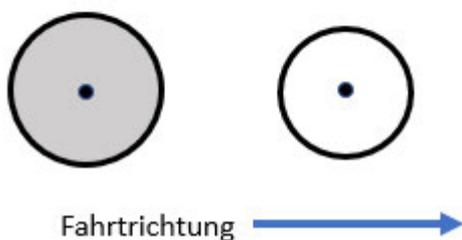


Abbildung 2-30 Hauptmerkmale von PiiMo und WHILL Model C

Abbildung 2-29 zeigt, dass sich das PiiMo vom WHILL Model C unterscheidet, in dem dabei die Gepäckablage und der Schiebegriff hinter dem Sitz und an vorderen Rädern mit blau beleuchteter Sensorik für autonomes Fahrsystem ausgestattet ist. Seitlich sind die Batterie und Armlehnen verbaut. Die Besonderheiten beider Produkte sind die sogenannten Omniräder, die als Vordereräder dienen und speziell für sehr geringe Wendekreisradien konstruiert sind. Der Vorteil ist, dass das WHILL Model C für den Transport im Kofferraum auseinandergebaut werden kann. Die Nachteile von beiden Produkten sind hohe Reifenverschleiß an Omniräder und die unkontrollierte Drehung auf der seitlichen Neigung. Die beiden Produkte sind besonders für großen Innenräume wie Flughäfen, Einkaufsmeilen oder Museen geeignet.

Sie können auch in Außenbereichen mit geringer Unebenheit gefahren werden.

Tabelle 8 Technische Daten von PiiMo und WHILL Model C

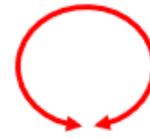
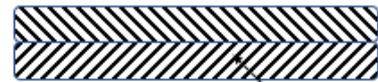
Technische Spezifikationen von PiiMo und Whill Model C		
Fahreigenschaften	PiiMo	Whill Model C
Antriebsart	Zweimotoriger Elektroantrieb	Zweimotoriger Elektroantrieb
Steuerungsart	Autonom	Autonom / Manual
Leergewicht	70 kg	52 kg
Zuladungsgewicht	100 kg	115 kg
Leistung	Annahme 50 W - 100 W	Annahme 50 W – 100 W
Bordspannung	24 V	24 V
Akkukapazität	10 Ah	10 Ah
Reichweite	16 km	18 km
Höchstgeschwindigkeit	4 km/h	6 km/h
Wenderadius	75 cm	75 cm
Maximale Steigfähigkeit	n.a.	10°/ 17 %
Bodenfreiheit	n.a.	6 cm
Hindernishöhe	n.a.	5 cm
Antriebsart	Zweimotoriger hinterer Radantrieb und omnidirektionales Rad	Zweimotoriger hinterer Radantrieb und omnidirektionales Rad
Abmessung Länge / Breite/ Höhe	1046 mm / 592 mm / 870 mm	1000 mm / 600 mm / 870 mm
Raddurchmesser hinten /vorne	27 cm / 25 cm	27 cm / 25 cm
Preis	n.a.	Ab 5995 €
HMW-Nummer		18.51.05.3001

2.3.9 Mattro Rovo DC



Abbildung 2-31 Mattro Rovo DC [31]

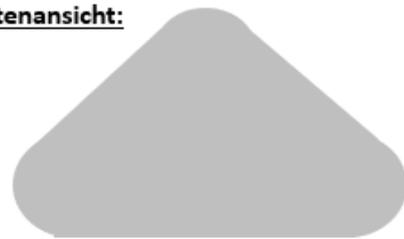
Oben-Ansicht:



Raupenfahrwerk



Seitenansicht:



Fahrrichtung →

Abbildung 2-32 Hauptmerkmal von Mattro Rovo DC (Quelle: Eigene Darstellung)

Mattro Rovo DC ist ein elektrisches einsitziges Raupenfahrzeug und wird ganzjährig als Landmaschine von in der Land- oder Forstwirtschaft berufstätigen Menschen mit Bewegungseinschränkungen genutzt. Manche Elektrorollstühle mit Räderantrieb sind aufgrund ihrer eingeschränkten Geländegängigkeit nicht in der Land- und Forstwirtschaft anwendbar. Die intuitive Drive-by-Wire Joystick-Steuerung ermöglicht eine einfache und angenehme Bedienung. Das Raupenfahrzeug kann auch als umweltfreundliches, barrierefreies Tourengerät im Tourismus oder als sportlicher Rolli-Offroader eingesetzt werden. [32]

Tabelle 9 Technische Daten von Mattro Rovo DC

Technische Spezifikationen von Mattro Rovo DC [31]	
Fahreigenschaften	Mattro Rovo DC (ehemals Ziesel)
Antriebsart	Zweimotoriger elektrischer Raupenantrieb auf Gummilaufwerk
Steuerungsart	Joystick
Leergewicht	375 kg
Zuladungsgewicht	115 kg
Leistung	2x 4,4 kW mit Spitzenleistung bis zu 18 kW
Bordspannung	48 V
Akkukapazität	87,6 Ah bis 175,3 Ah
Reichweite	Angenommen mindestens 28 km
Höchstgeschwindigkeit	30 km/h
Wenderadius	Angenommen 958 mm
Maximale Steigfähigkeit	30% bis 60 %
Bodenfreiheit	n.a.
Hindernishöhe	n.a.
Abmessung Länge / Breite/ Höhe	1470 mm / 1230 mm / 1750 mm
Raddurchmesser hinten /vorne	Nicht angegeben wegen Raupenantrieb
Preis	Ab 23.000 €

Mattro Rovo DC hat dank der kraftvollen Akkus eine starke Motorleistung von 8,8 kW und kann sogar ein Anhänger mitziehen. Als Nachteile lassen sich die zu große Gesamtbreite und der Gummiraupen-Verschleiß durch den hohen Wendewiderstandsmoment erwähnen, welche hohe Wartungskosten verursachen können. Die große Gesamtbreite von 1230 mm kann eine Gefahr für den Gegenverkehr bzw. für schnelle Mountainbike-Fahrer darstellen, wenn die Wanderwege nicht so breit sind. Mattro Rovo DC bzw. Ziesel ist straßenverkehrstauglich zugelassen in Deutschland. [33] Mattro Rovo DC hat keine Hilfsmittelnummer im Hilfsmittelverzeichnis des gesetzlichen Krankenkassen-Spitzenverbands, jedoch ist es möglich, für die Kostenübernahme nach Einzelfallantrag mit Begründungen von zwei ICF-Items d845 (Arbeit erhalten, behalten und beenden) und d8451 (Arbeitsverhältnis behalten). [32]

2.3.10 Vergleich und Marktlücken

In der Marktanalyse wird festgestellt, dass viele individuelle Hilfsmittel im Bereich der Elektrorollstühle auf dem Markt angeboten werden. Die Elektrorollstuhlfahrer*innen können sogar die unterschiedlichen Sitzsysteme abhängig von ihrer Notwendigkeit auswählen. Das autonome Fahren ist bereits im Produkt von PiiMo möglich.

Tabelle 10 Übersicht der auf dem Markt verfügbaren Elektrorollstühle

Produkt	Höchstgeschwindigkeit	Eigengewicht	Zuladung	Gesamtgewicht	Wenderradius	Gesamtleistung	Steigung im Straßenmodus	Bordspannung	Akkukapazität	Wattkapazität	Reichweite
Einheit	[km/h]	[kg]	[kg]	[kg]	[mm]	[kW]	[°]	[V]	[Ah]	[Wh]	[km]
Genny Urban	20	89,5	100	189,5	575*	2,2	10,2	76	11,6	881,6	38
Scowo Bro	10	160	120	280	575	1,0*	6	48	31	1488	35
Permobil	12	186	150	336	762,5	0,5	12	12	146	1752	25-35
iBot	10,8	110	136	246	549	n.a.	12	57,6	30	1728	28-35
Caterwil GTS 4WD	7	98	100	198	658	n.a.	n.a.	24	75	1800	25
Observer Maximus	7,5	166,5	205	371,5	681	2,8	45**	24	100	2400	20 - 30
SuperFour	15	348	120	468	2300	2,2	21,8		2 Liter Diesel		200
Whill Model C	6	52	115	167	750	0,2*	10	24	10	240	15
Mattro Ziesel	30	375	115	490	958	8,8	31	48	87,6	4204,8	28
LIAM	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

*Annahme-Wert
** abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit

Die Übersicht der auf dem Markt verfügbaren Elektrorollstuhl-Produkte zeigt, dass kein Elektrorollstuhl geeignet für einen langen Fahrrad- oder Familienausflug für eine Strecke von mindestens 40 km ist. Darüber hinaus gibt es wenige Elektrorollstühle mit einem hohen Zuladungsgewicht, welche für bewegungseingeschränkte Menschen mit Adipositas geeignet wären.

Die Fragen in der Übersicht werden im Kapitel 4.10 mit Schätzungswerten beantwortet.

Folgende Marktlücken bzw. unzureichende Marktverfügbarkeiten können gedeckt werden:

- Wendeltreppensteigender Elektrorollstuhl
- Nicht treppensteigender Elektrorollstuhl mit hohen Hindernisüberwindungsfähigkeit bei einer Hindernishöhe von bis zu 17 cm
- Kompakter geländegängiger nicht treppensteigender Elektrorollstuhl für den Innenbereich und Außenbereich
- Elektrorollstuhl mit hohem Zuladungsgewicht ab 150 kg
- Interfaces zwischen auf Elektrorollstuhl angewiesenem Elternteil und Kinder

Marktpotential ist an folgenden Stellen vorhanden:

- Autonomes Fahren im motorisierten Pflegerollstuhl, falls die Fahreignung bei Menschen mit Bewegungseinschränkungen nicht vorhanden ist. Zurzeit ist die Fahreignung beim autonomen Fahren [34, p. 560] erforderlich.
- Hoher Anteil an additiv gefertigten Teile und Normteile für schnelle Ersatzteil-Beschaffung

Der bewegungseingeschränkte Mensch kann den Treppenlift an der Wendeltreppe nehmen und einen anderen Rollstuhl nutzen. Es stellt keine Notwendigkeit für die Konzeptentwicklung dar, weil es angenommen wird, dass der Bedarf an wendeltreppensteigender Elektrorollstuhl von barrierefreien Wohnungen [35] ausgeglichen ist.

Der Fokus einer Konzeptentwicklung liegt auf den kompakt geländegängigen nicht treppensteigenden Elektrorollstuhl.

2.4 Additive Fertigungsverfahren

Gemäß der VDI 3405 ist das additive Fertigungsverfahren ein generatives Fertigungsverfahren, bei dem ein Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut wird. Nicht alle Verfahren sind echte 3D-Verfahren. Das additive Fertigungsverfahren ist eigentlich nur 2 ½-D-Verfahren, weil die dritte Dimension nicht als kontinuierliche z-Koordinate, sondern nur durch das Aufeinanderlegen der Schichten erfolgt. [35, p. 2]

Wie ein Bauteil während der Prozesskette additiv gefertigt wird, zeigt die folgende Abbildung.

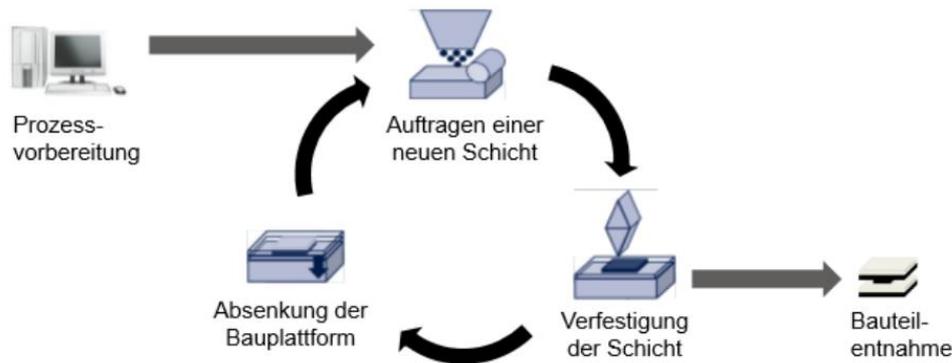


Abbildung 2-33 Grundsätzlicher Ablauf des additiven Fertigungsverfahrens eines Bauteils [35, p. 1]

Die Auswahl des Fertigungsverfahrens hängt von der Anzahl der Losgrößen und Komplexität ab.



Abbildung 2-34 Fertigungsverfahren in Abhängigkeit von Losgröße und Bauteil-Komplexität [35, p. 7]

Wenn die Losgröße gering und die Komplexität hoch ist, kann sich das additive Fertigungsverfahren lohnen.

Folgende weiteren Faktoren gehören auch zu den Kriterien für die Auswahl eines Fertigungsverfahrens:

- Bauteilgröße
- Bauraum
- Baumaterial
- Bauraumvorheizungen
- Vor- und Nachbereitung
- Durchlaufzeit der Herstellung nach Fertigungsverfahren
- Beschaffungskosten (eine 3D-Druckmaschine im Bereich von 500 € bis 800.000 €)

- Ort der Fertigung (mobiler Arbeitsplatz z.B. 3D-Druck-Standardcontainer [36] oder fester Arbeitsplatz)

Der detaillierte Prozessablauf eines additiv gefertigten Bauteils ist hier abgebildet.

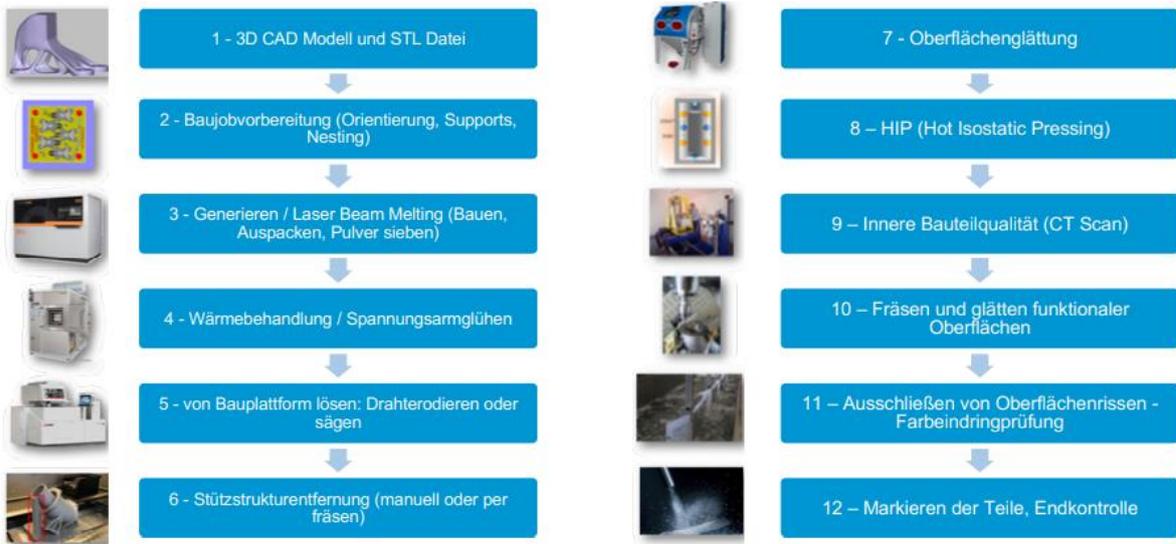


Abbildung 2-35 Prozessablauf eines additiv zu fertigenden Bauteils [35, p. 84]

Hier zeigt die Abbildung einige Beispiele der additiv gefertigter Bauteile nach Individualisierung oder Komplexität.

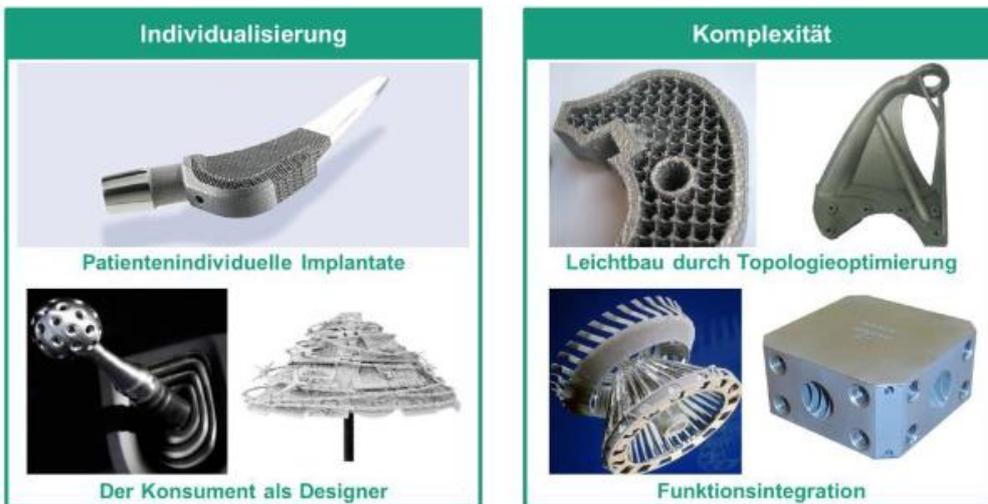


Abbildung 2-36: Individualisierung und Komplexität [37, p. 163]

Die passive Personalisierung findet Anwendung zum Beispiel in Form von patientenindividuellen Implantaten. Hier wird ein Beispiel aufgezeigt, was das konventionelle und generative Fertigungsverfahren bei der Individualisierung können. Heute haben Menschen mit Bewegungseinschränkungen bzw. Tetraplegiker Möglichkeiten, eine individualisierte Sitzschale unter der Anwendung des Fräsverfahrens anfertigen zu lassen. Der Nachteil des Fräsverfahrens für Sonderanfertigung einer Sitzschale ist das Materialabtragen. Das generative Fertigungsverfahren kann das Materialabtragen reduzieren oder ganz vermeiden und kann auch das Gewicht durch die Wabenstruktur reduzieren.

Das Generative bzw. Additive Fertigungsverfahren wird in zwei Gruppen *Prototyping und Manufacturing* untergliedert:

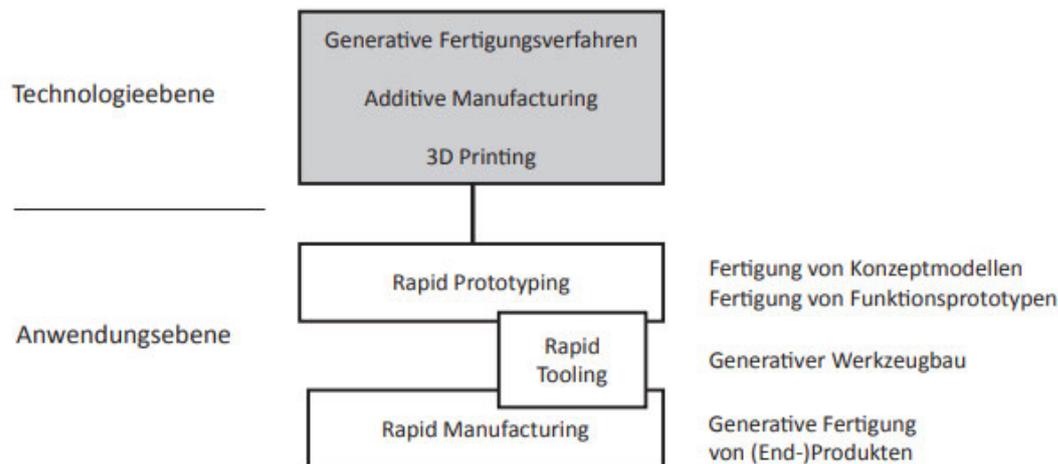


Abbildung 2-37 Technologie der Generativen Fertigungsverfahren / Additive Manufacturing / 3D Printing und ihre Gliederung in die Anwendungen Prototyping, Rapid Manufacturing und Rapid Tooling [38, p. 7]

Im LIAM-Projekt werden Konzeptmodelle und Funktionsprototypen unter Anwendung des Rapid Prototyping gefertigt. Dann können die Funktionsprototypen in einem freundschaftlichen Wettbewerb gegeneinander auftreten. In der Industrialisierung kann dann das Verfahren Rapid Manufacturing angewendet werden.

Das additive Fertigungsverfahren Rapid Manufacturing bzw. Direct Manufacturing bietet großes Potentiale an folgenden Stellen [38, pp. 425-436]:

- Erhöhte Konstruktionsfreiheit
- Erweiterte konstruktive und gestalterische Möglichkeiten
- Funktionsintegration
- Neuartige Konstruktionselemente
- Herstellung traditionell nicht herstellbarer Produkte
- Variation von Massenprodukten
- Personalisierung von Massenprodukten
- Passive Personalisierung – Hersteller Personalisierung
- Aktive Personalisierung – Kunden Personalisierung
- Realisierung neuer Werkstoffe
- Realisierung neuer Fertigungsstrategien
- Entwurf neuer Arbeits- und Lebensformen

Die technischen Kriterien für den wirtschaftlichen Einsatz von additiven Fertigungsverfahren müssen erfüllt werden:

- „Die Bauteile müssen eine komplexe Geometrie und in Zukunft auch einen komplexen Materialmix aufweisen.“
- Eine möglichst kurze Entwicklungszeit muss für die Frage der Marktposition eine große Rolle spielen (die Unterhaltungselektronik entwickelt in Monaten, die Hersteller von Großmotoren in Jahren).
- Eine große Variantenvielfalt ist für die Marktposition des Produktes vorteilhaft.
- Ein volumenorientiertes 3D CAD-System muss routinemäßig angewendet werden.

Schon bei Nicht-Erfüllung eines dieser Kriterien muss davon ausgegangen werden, dass der Einsatz von Generativen Verfahren technisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll ist.“ [38, p. 497]

Die Aspekte der großen Variantenvielfalt und Bauteilkomplexität werden im LIAM-Projekt besonders berücksichtigt.

2.5 Modularität

„Die Hersteller sind zurzeit gefordert, die zunehmende Zahl von Antriebskonzepten und Energiespeichern in Fahrzeugstrukturen zu integrieren. Die Fahrzeugkarosserien von morgen, insbesondere im Hinblick auf alternative Antriebe in Kleinserien mit vielen Varianten, müssen nicht nur leichter, sondern vor allem auch hochflexibel gestaltet werden. Die Folge ist eine zunehmende Zahl von Fahrzeugderivaten, die anpassungsfähige und wirtschaftlich herzustellende Karosseriekonzepte erfordern. In absehbarer Zeit könnte die additive Fertigung neue Lösungsansätze bieten.“ [39]

In diesem Kapitel wird das Thema Modularität als mögliche Lösung für die Industrialisierung befasst. Das nächste Zitat zeigt eine Option für hohe Flexibilität und vielen Varianten:

„Ziel des Modularisierungskonzepts ist es, eine möglichst große Anzahl von Fahrzeugvarianten aus möglichst wenigen Elementen darzustellen.“ [40]

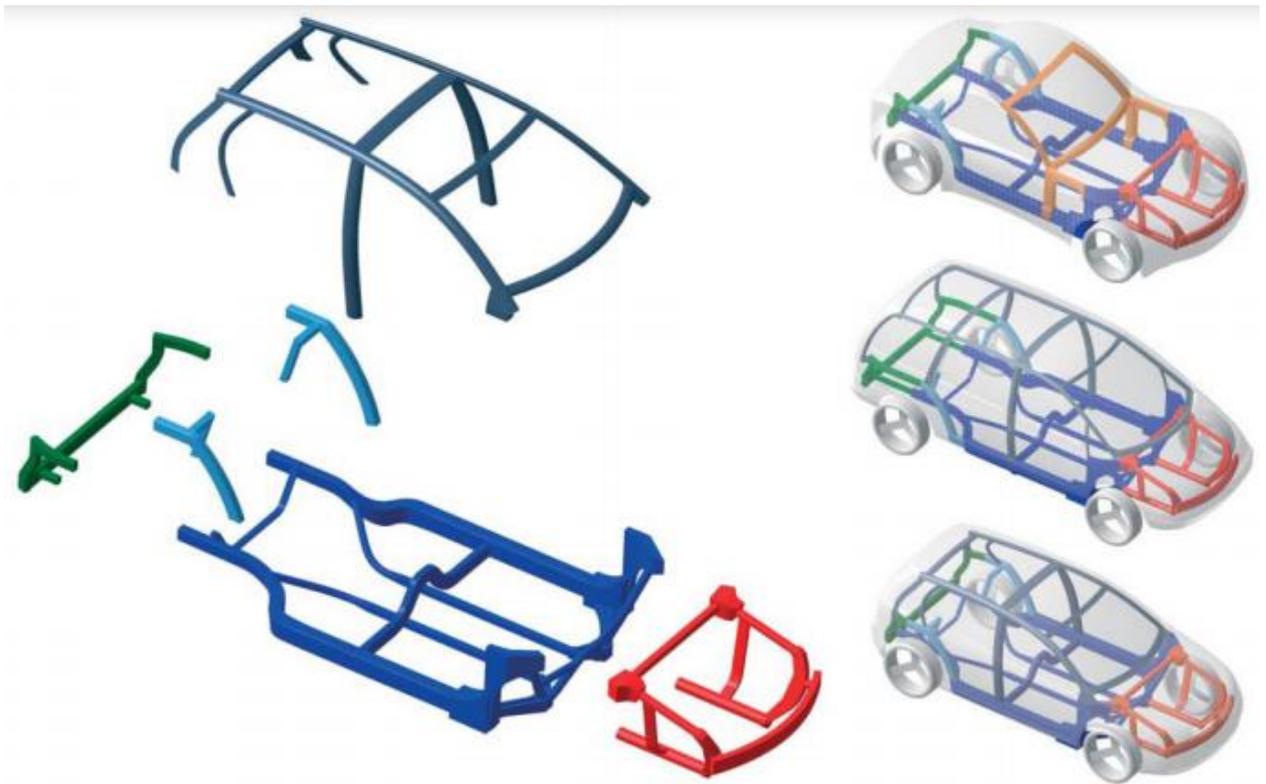


Abbildung 2-38 Schematische Darstellung der Modulaufteilung und beispielhafte Derivateableitung [40]

Abbildung 2-38 zeigt, dass unterschiedliche Fahrzeugvarianten mit den Kombinationsmöglichkeiten von Modulen und Fahrzeugen existieren: Blau gefärbtes Grundmodul, hellblau gefärbtes kurzes oder langes Radstandmodul, grün gefärbtes kurzes oder langes Hecküberhangmodul, eine zweipositionierte B-Säule, eines rot gefärbten Vorderwagenmodul im Werkstoff von Alu oder Stahl) oder eine dunkelgefärbte individuelle Hutstruktur bzw. Roadster oder Cabrioletstruktur nach Bedarf.

Dieses Beispiel kann im LIAM-Projekt nach NextGen-Spaceframe-Vorbild umgesetzt werden, um dabei möglichst verschiedene Rollstuhlvarianten aus möglichst wenigen Elementen bauen zu können.

„Der NextGen-Spaceframe ist eine Kombination aus additiv gefertigten 3D-Knoten und intelligent verarbeiteten Stahlprofilen. Die Knoten können vor Ort für die jeweilige Variante „just in sequence“ (JIS) gefertigt werden, ebenso wie die Profile, die zunächst im 3D-Biegeverfahren und anschließend im 2D- und 3D-Laserschneidverfahren auf die entsprechende Form und Länge zugeschnitten werden.“ [39]

Die 3D additiv gefertigten Knotenstrukturen ermöglichen dadurch eine hohe Flexibilität bzw. Variantenvielfalt in der Einzel- bzw. Kleinserienfertigung. Grundlage dafür ist das Laststufenkonzept mit präzise, mittels CAE konstruierten Karosserievarianten und kundenspezifisch additiv gefertigten Knotenstrukturen, die hochfunktionsintegriert mit Profilen, die individuell nach Länge und Form bestimmt sind. Die Profile können auch in eine Spiralenform mithilfe 3D-Biegeverfahren gebogen werden. Dann werden die individuellen Profile mit Hybrid-Fertigungsverfahren aus 3D-Biegeverfahren und 2D- und 3D-Laserschneidverfahren verarbeitet und mit 3D additiv gefertigten Knotenstrukturen zusammengeschweißt. [39]



Abbildung 2-39 NextGen Spaceframe Verbindung von 3D additiv gefertigten Knotenpunkten und Stahlprofilen [39]

Abbildung 2-39 zeigt die Kombination von Profilen und 3D-additiv gefertigten Knotenstrukturen. Diese Kombination ist eine Strategie der Digital 3D-Manufacturing mit Lasertechnologie. Das Spaceframe-Konzept verbindet die Vorteile des 3D-Drucks wie Flexibilität und Leichtbaupotenzial mit der Effizienz bewährter konventioneller Profildesigns. Bei beiden Technologien spielt der Laser die Schlüsselrolle. Die topologisch optimierten Knoten ermöglichen den derzeit maximal möglichen Leichtbau und eine hohe Funktionsintegration. Sowohl die Knoten als auch die Profile können ohne zusätzlichen Aufwand an neue Geometrien und Lastanforderungen angepasst werden. Damit bieten sie die Möglichkeit, jedes einzelne Teil lastungsgerecht auszulegen und die Komponenten nicht wie bisher nach der größten Motorisierung oder

Belastungsstufe

zu

dimensionieren.

[39]



Abbildung 2-40 Vergleich der nicht additiv und additiv gefertigten gleichförmigen Bauteile [36]

In der Abbildung 2-40 rechts kann man Modularität im rechten Element erkennen: Die Schraubenverbindungen auf der mittleren Seite sind entfernt und die Anzahl der Bauteile und Normteile ist reduziert worden.

Die Vor- und Nachteile der Modularität und des Spaceframe-Konzepts werden in der Tabelle aufgelistet.

Tabelle 11 Vor- und Nachteile der Modularität

Vorteile	Nachteile
Hohe Flexibilität der Fahrzeugvarianten	Geringere Wertschöpfung bei einer größeren Losgröße
Belastungsgerechte Bauteile	Mögliche hohe Wartungskosten eines unzureichend entwickelten 3D-Knotenstrukturs
Reduzierung der Anzahl der Bauteile	Geringe Verfügbarkeit der Dienstleistung der modernen Fertigungsverfahren
Kurze Ersatzteillieferzeit dank der Flexibilität im additiven Fertigungsverfahren	Irreversibilität durch Zusammenschweißen
Kostensparnis	

Im Allgemeinen wird die Modularität aufgrund der Reduzierung der Bauteile und der möglichen Kostenersparnis in der Fertigung befürwortet. Vorerst wird das Hybridverfahren nicht angewendet, weil die Systemprofile wie Alu-Profile im ersten LIAM-Prototypbau aus Kostengründen eingesetzt werden. Das Modularisierungskonzept bzw. die 3D-additiv gefertigte Knotenstruktur wird hier im LIAM-Projekt und im Laufe der Industrialisierung besonders berücksichtigt.

2.6 Fazit zum Stand der Technik

Der beschriebene Stand der Technik ergibt, dass viele Elektrostühle aktuell noch viel zu schwer sind. Das additive Fertigungsverfahren birgt die ein großes Marktpotential und ist für Elektrorollstuhlfahrer*in in Bezug auf die Aspekte Leichtbau, schnelle Ersatzteilbeschaffung und individuelle Bauteillösung vorteilhaft. In der Marktanalyse wird festgestellt, dass das leichteste Eigengewicht 52 kg beim WHILL Model C liegt. Der Nachteil ist geringe Reichweite und die Höchstgeschwindigkeit von 6 km/h. Viele individuelle Mobilitätslösungen sind vorhanden, welche ein bewegungseingeschränkte Mensch benutzen kann.

Jedoch besteht immer die Möglichkeit, ein neues Fahrwerk zu konzipieren und im Bereich Elektrorollstuhl anzuwenden und mit anderen Elektrorollstuhlprodukten oder Prototypen zu konkurrieren. Die verfügbaren Elektrorollstühle haben bislang nicht genug Reichweite für einen Ausflug oder eine zu geringe Hindernisüberwindungsfähigkeit aufgewiesen. Die Reichweite kann durch die Erhöhung der Akkukapazität oder Reduzierung des Eigengewichts erhöht werden.

Die These in der Aufgabenstellung wird somit bestätigt, dass es im Bereich der Hilfsmittel für bewegungseingeschränkte Menschen bislang wenige innovative Leichtbau-Konzepte gibt, und dass nur wenige Produkte existieren, die sich dem Benutzer anpassen, was beispielsweise Körpergewicht und -maße, aber auch die individuellen Bedürfnisse betrifft.

Die Anpassbarkeit der Produkte an die Nutzer*innen kann durch das Modularisierungskonzept ermöglicht werden.

3 Anforderungen

In diesem Kapitel der Arbeit werden nun nachfolgend die Anforderungen aufbereitet, indem dabei die Perspektive von Menschen mit Bewegungseinschränkungen darüber, wie ein Elektrorollstuhl konzipiert werden soll, aufgezeigt wird.

3.1 Perspektive von Menschen mit Bewegungseinschränkungen

Die Anforderungen an Elektrorollstühlen aus Perspektive von Elektrorollstuhlfahrer*innen sind individuell, da jede*r Elektrorollstuhlfahrer*in nicht immer die gleiche Bewegungseinschränkungen durch die durch Unfall oder Krankheit erworbene Gehbehinderung oder angeborene Behinderungen hat.

„Die stufensteigenden Rollstühle aber sind ein echtes Symbol für ungefragte Leckerlis, die ein Problem sogar verschärfen. Denn dies ist die fehlende Zugänglichkeit vieler Orte. Die Vertreter dieser Rollstühle, halt ohne Behinderung, delegieren aber dieses Problem an jene, die es auszubaden haben: nicht der Ort soll sich ändern, sondern ich mich. Ich komm da nicht rein? Selbst schuld, hol dir doch den stufensteigenden Rollstuhl. Dabei wäre die Lösung ganz einfach: Von Zugänglichkeit profitieren alle, wie zum Beispiel Reisende mit Rollkoffer. Eine Rampe gleich mit zu planen oder anzubauen ist stets die einfachste, kostengünstigste und gerechteste Lösung. Dieser Stufensteigkram dagegen ist absurd.“ [41]

Das Zitat zeigt die ablehnende Perspektive an das treppensteigende Elektrorollstuhl-Konzept, welches keine nachhaltige Lösung darstellt. Eine Anpassung an den Umständen und der fehlenden Zugänglichkeit wird von der Person und nicht vom Ort erwartet.

Der vom gehbehinderten Dr. Georg Wessely festgelegte Anforderungskatalog [42] an Elektrorollstuhl enthält folgende Punkte:

- Hohe Geschwindigkeit mit guter Getriebeübersetzung ohne Drehmomentverlust
- Ausfallsicherheit in jeder möglichen Hinsicht
- Kein seitliches Hinausragen jeglicher Teile
- Möglich viel Gewicht auf der Antriebsachse für höhere Energieeffizienz
- Möglich viele additiv gefertigten Teile, um die Ersatzteile-Beschaffungszeit zu verkürzen
- Kostengünstige Wartung
- Selbstprogrammierbarkeit der Lenkung
- Breite von 65 cm aufgrund der Durchfahrbarkeit von Türbreiten
- Länge von 120 cm aufgrund der maximalen Aufzug-Abmessung
- Möglich geringe Sitzhöhe für das optimale Sitzen unter dem Tisch und bessere Schwerpunktlage

Dieser Anforderungskatalog von Dr. Georg Wessely ist nicht ausdrücklich zur Nachahmung vorgesehen. Zu den weiteren Anforderungspunkte gehören die Ladeinfrastruktur und Ladetechnik, um die Batterie an unterschiedlichen Orten aufladen zu können und die sogenannte „Reichweiten-Angst“ zu verringern.

Weil die Elektrorollstühle oder neue Lösungen für Hilfsmittel den Menschen mit Bewegungseinschränkungen meistens ungefragt angeboten wurden, wurden die Grundfragen [43] von Rollstuhl-Aktivistin Jessica Thom erstellt. Die übersetzten Grundfragen sollen beantwortet werden, bevor die Anforderungsanalyse und Konzeptfindung erfolgen. Die Grundfragen können

dem LIAM-Projekt dabei helfen zu reflektieren, ob ein verfügbares Produkt oder eigenes Konzept gut nutzbar für die Zielgruppe oder nur ein sogenanntes „Disabled Dongle“, also ein unbrauchbares Produkt ist.

1. Wird das Produkt von einem Designteam erstellt, welches Personen mit Lebenserfahrungen mit Barrieren umfasst?
2. Wie viele Menschen mit Lebenserfahrung haben das Bedürfnis für dieses Produkt erkannt?
3. Wurden die behinderten Menschen, die einen Beitrag zu diesem Produkt geleistet haben, für ihren Einsatz bezahlt oder haben dafür Anerkennung bekommen?
4. Haben die Menschen, die dieses Produkt anwenden können, gesagt, dass es nicht hilfreich ist?
5. Könnte dieses Produkt benutzt werden, um die systematischen Barrieren zu rechtfertigen?
6. Sind Sie sicher, dass das Produkt, in der realen Welt funktionieren wird?
7. Könnte das Produkt unerschwinglich sein?
8. Sind die Anwender im Mittelpunkt der mit dem Produkt verbundenen Botschaft?

3.2 Anforderungsbeschreibung

In diesem Kapitel werden die Bezeichnungen aus dem Anforderungskatalog in der Tabelle beschrieben, welche für die Konzeptentwicklung eines LIAM-Elektrollstuhls berücksichtigt werden.

Bezeichnung	Anforderungsbeschreibung
Zuladung	Der LIAM-Elektrollstuhl soll möglichst viel Zuladungsgewicht standhalten.
Leergewicht/ Eigengewicht	Der LIAM-Elektrollstuhl soll sehr wenig wiegen, um ins Auto zu passen oder leichter transportiert werden zu können.
Höchstgeschwindigkeit	Der LIAM-Elektrollstuhl soll die Elektrollstuhlnutzer*innen sicher und so schnell wie möglich zu einem Ort transportieren und eine möglichst hohe Selbstbestimmung gewährleisten.
Steigfähigkeit	Die Steigfähigkeit sollte ausreichend sein, um die Behindertenrampe erklimmen zu können. Wünschenswert ist, dass die Elektrollstuhlfahrer*innen so möglichst viele Orte, z.B. sogar welche in den Alpen erkundigen können.
Wendigkeit/Agilität	Der LIAM-Elektrollstuhl soll im engen Innenbereich wendig sein oder unterschiedliche Stellen zickzack umfahren können.
Ausdauer	Der LIAM-Elektrollstuhl soll den ganzen Tag eine Berganfahrt oder eine lange Fahrstrecke so lange ununterbrochen fahren können, ohne dass die Antriebe überhitzt werden.
Robustheit	Der LIAM-Elektrollstuhl soll gegen Schmutz, Sand, Matsch, Feuchtigkeit und Inkonsistenz nach Schutzklasse IP64 geschützt werden.
Treppensteigbarkeit	Die Treppensteigfähigkeit bedeutet, dass ein*e Elektrollstuhlnutzer*in Treppen mit einem Elektrollstuhl durch eine bestimmte Technikbauart z.B. mit Gummiketten im Raupenmodus steigen kann. Es ist individuell erwünscht und nicht unabdingbar.
Liegefunktion	Elektrollstuhlnutzer*in kann auf einem LIAM-Rollstuhl in einer horizontalen Lage mithilfe der elektrisch oder manuell gesteuerten Winkelverstellbarkeit der Rückenlehne, Sitzposition und Beinstütze liegen.
Schwimmfähigkeit	Ein*e Elektrollstuhlnutzer*in soll mit dem LIAM-Elektrollstuhl auf dem Gewässer mithilfe von Technik, Hilfsmitteln und Wasserdichtigkeit fahren können.
Preislimit	Der LIAM-Elektrollstuhl soll bezahlbar bzw. erschwinglich sein.
Sitz	Der Sitz soll höhen-, und winkelverstellbar an Rücken und Beine, sowie beheizbar sein, was hohes Komfort bieten kann. Wünschenswert ist, dass der Elektrollstuhlfahrer*in die Regalhöhe im Supermarkt erreichen kann, um die Waren zu erreichen.

Terrain	Geländegängigkeit, Optionale aktive Dämpfung für Geländefahrten; wartungsfreie Reifen/Räder eventuell nach dem Michelin Prinzip.
Horn/Warnton	Optional ersetzt durch smartes Fahrverhalten, automatische Warnung, autonome Reaktion.
Struktur/Fahrwerk	Die Teile vom LIAM-Elektrollstuhl sollen überwiegend aus hohen Anteilen an Normteilen (z.B. Schrauben, Mutter etc.) und additiv gefertigten Bauteilen bestehen, damit die Beschaffungszeit eines Teils im Fall einer Wartung bzw. Reparatur verkürzt werden kann.
Navigation	Die Elektrollstuhlnutzer*innen sollen einen barrierefrei zugänglichen Ort wie Bahnhof, Cafeteria, Restaurants, Parks, Museum, Messe oder Kino mithilfe des Navigationssystems bzw. des Informationssystems schnell finden und den LIAM-Elektrollstuhl auch auf einer möglichst barrierearmen kürzesten Route dahin steuern können.
Autonomie	Die Elektrollstuhlnutzer*innen sollen selbstständig und willensfrei entscheiden, wohin sie wollen und welche Art der Steuerung sie nutzen. Sie dürfen einer der unterschiedlichen Routen wählen oder einfach von der Route z.B. auf einen alternativen Weg abweichen wollen.
Interfaces	Interfaces sind Schnittstellen zwischen dem LIAM-Elektrollstuhl und mindestens einem anderen Element. Darunter versteht man die Interfaces als Verstärkung der Inklusion bzw. Teilhabe durch die Einbeziehung eines medizinischen Geräts z.B. ein Beatmungsgerät oder durch Überwachung eines gesundheitlichen Parameters. Ein weiteres Beispiel für Interfaces sind klappbare, am hinteren Teil des Elektrollstuhls montierten Trittbrett, Buddy Board, Kiddy Board, Soziussitz oder Anhänger, um Gegenstände oder Personen transportieren zu können.

3.3 Aufbereitung / Validierung der Anforderungen

Hier werden die Anforderungen mit aktuellen Randbedingungen und Normen abgeglichen, um die Hindernisse im Konzeptentwicklungsprozess zu erkennen und möglichst damit umzugehen. Die Mechanismen der deutschen gesetzlichen Krankenkassen und der sogenannte „Medizinische Dienst der Krankenkassen“ sind nicht zu berücksichtigen. Das Ziel der Aufbereitung der Anforderungen ist, die Grundlagen für ein Konzept für die LIAM-Struktur zu schaffen und den Menschen mit Bewegungseinschränkungen die Kostenübernahme für standardisierten neuartigen Hilfsmittel durch die deutschen gesetzlichen Krankenkassen erleichtern zu können.

DIN EN 12184 [20] Der Elektrorollstuhl ist eine wichtige Grundlage für die Validierung des Anforderungskatalogs. Wir verwenden drei Anwendungsklasse: von A bis C.

Tabelle 12 Zuladung

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Zuladung	Klasse A	Zuladungsgewicht = zulässiges Gesamtge- wicht abzüglich Fahr- zeuggewichts	Das Rollstuhl soll eine Zuladung je nach Bedarf aushalten können. In- direkt muss der Rollstuhl mit Zula- dung das Prüfungsverfahren nach DIN EN 12184 und ISO 7176 beste- hen.
	Klasse B		
	Klasse C		
<u>Kommentar / Bemerkung:</u> Die zulässige Gesamtmasse von 500 kg darf laut FVZ Straßenverkehrsrecht nicht überschritten werden. Im öffentlichen Nahverkehr ist ein Gesamtgewicht von Elektrorollstuhl und Person von max. 300 kg erlaubt. Bei der Mitnahme eines Elektrorollstuhls im Fernverkehr beträgt das zulässige Gesamtgewicht max. 250 kg oder 350 kg, da es von der maximalen Belastung der Hebehilfe abhängig ist. Um eine höchstmögliche Mobilitätsfreiheit zu gewährleisten, ist dieses zulässige Gesamtgewicht von 250 kg empfohlen. Es bedeutet, dass im LIAM-Projekt das höchstmögliche Gewichtsersparnis erforderlich ist.			

Tabelle 13 Leergewicht / Eigengewicht

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Leergewicht/ Eigengewicht	Klasse A	Minus 35 % im Vergleich zu konventionellem Akkurollstühlen	Jedes Einzelteil darf bis zu maxi- mal 10 kg schwer sein. Das Ge- wicht der Batterien ist ausgenom- men.
	Klasse B		
	Klasse C		
<u>Kommentar / Bemerkung:</u> Laut Straßenverkehrsrecht darf die Leermasse einschließlich Akkus nicht mehr als 300 kg wiegen. Das Ziel ist, mit Ausnahme der Batterien das Basisgewicht des konventionellen Akkurollstuhls um 35 % bei der neuen Konzeptentwicklung zu senken.			

Tabelle 14 Höchstgeschwindigkeit

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Höchst- geschwindigkeit	Klasse A	15 km/h	15 km/h
	Klasse B		20 km/h
	Klasse C		20 km/h
<u>Kommentar / Bemerkung:</u> Für die Höchstgeschwindigkeit rückwärts: 70 % der Höchstgeschwindigkeit des Rollstuhls vorwärts oder 5 km/h (es gilt der kleinere Wert). Laut FVZ Straßenverkehrsrecht darf die bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit nicht mehr als 15 km/h betragen. [2]			

Tabelle 15 Steigfähigkeit/ Nennsteigung

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Steigfähig- keit/Nennstei- gung	Klasse A	20°	3°
	Klasse B		6°
	Klasse C		10°
<u>Kommentar / Bemerkung:</u> Die Realisierbarkeit der angeforderten Steigfähigkeit von 20 ° ist aufgrund der Grenzen der Physik durch die Haftbeiwert und Rollbeiwert zu prüfen. Die Angabe des Massenträgheitsmoments bzw. des Drehmassenzuschlagfaktors ist zurzeit nicht festgelegt. Jedoch muss die Einhaltung der hohen Nenn-Steigung ohne Kippen im Prüfverfahren nachgewiesen werden. Die Voraussetzungen an Bremsbetätigung beim Anhalten an der steilen Steigung müssen auch berücksichtigt werden.			

Tabelle 16 Wendigkeit, Agilität, Wendekreisdurchmesser

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Wendigkeit, Agilität Wendekreis- durchmesser	Klasse A	2000 mm	2000 mm
	Klasse B		2800 mm
	Klasse C		Keine Empfehlung
<u>Kommentar / Bemerkung:</u> Im Innenbereich ist die hohe Wendigkeit nötig, um eine räumliche Barriere durch die engen Türen oder Möbel überwinden zu können. Die maximale Gesamtbreite von 1100 mm soll nicht überschritten werden. Siehe Anhang Tabelle A.1 [20]			

Tabelle 17 Abmessung

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog [max. Länge x max. Breite]	DIN EN 12184 max. Länge x max. Breite
Abmessung	Klasse A	1200 mm x 700 mm nach Fernzugverkehr in der Deutsche Bahn [44]	1200 mm x 700 mm
	Klasse B		1400 mm x 700 mm
	Klasse C	Größer als 1200 mm x 700 mm in öffentlichen Nahverkehr möglich [44]	∞ mm x 800 mm

Kommentar / Bemerkung:

Die angegebene LIAM-Anforderung an die Abmessungen hängt vom Leitfaden für Mitnahme orthopädischer Hilfsmittel im Zug der Deutschen Bahn ab. Die Höchstwerte der Länge von 1200 mm und der Breite von 700 mm sind festgelegt.

Tabelle 18 Ausdauer / Theoretische Mindestreichweite

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Ausdauer/ Theoretische Mindestreich- weite	Klasse A	Individuell zu definieren	15 km
	Klasse B		25 km
	Klasse C		35 km

Kommentar / Bemerkung:

Die Zielgruppe hat Möglichkeiten, die öffentliche Nahverkehrsmittel oder Transportmittel wie Rollstuhltaxi zu nutzen und Akkukapazität zu sparen und flexibel zu sein. Jedoch bei einem Tagesausflug mit dem Fahrrad kann es schon eine 50 bis 80 km lange Fahrt sein. Man kann die Akkukapazität für den individuellen Bedarf in der Tagesplanung berechnen, wie viel Batterie benötigt wird.

Tabelle 19 Robustheit

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Robustheit	Klasse A	IP64 Schutzklasse	Indirekte Anforderung siehe Kommentar
	Klasse B		
	Klasse C		

Kommentar / Bemerkung:

Die Beständigkeit gegen Verschmutzung und Verfahren zur Reinigung und zur Beseitigung von Verschmutzungen sollten bei der Wahl von Werkstoffen berücksichtigt werden, die mit Urin in Berührung kommen können (z. B. gepolsterte Teile), um unhygienische Zustände, Geruchsbildung und Zersetzung der Materialien zu vermeiden.

Tabelle 20 Treppensteigen

Eckdaten	Anwen- dungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Treppensteigen	Klasse A	Nicht berücksichtigt	Nicht vorhanden
	Klasse B		
	Klasse C		

Kommentar / Bemerkung:

Die Option Treppensteigen wird im Allgemeinen als Privileg der Zielgruppe empfunden, welche die räumlichen Hindernisse wie Stufen oder Treppen überwinden muss. Jedoch ist es eine Frage der Zeit, bis wann die räumliche Barrierefreiheit, z.B. die funktionierenden Aufzüge, Rampen und Lift, in öffentlichen Gebäuden gewährleistet und komplett ausgebaut werden können.

Tabelle 21 Liegefunktion

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Liegefunktion	Klasse A	Berücksichtigt	Nicht vorhanden
	Klasse B		
	Klasse C		

Kommentar / Bemerkung:

Die Liegefunktion wird in der Sitzkonzeptentwicklung berücksichtigt. Die Liegefunktion ist ein Liegesitz, bei dem sich die Beinstütze, Sitzplatte und Rückenlehne sich in einer waagerechten Position bringen lassen. Falls die Liegefunktion ausgeschaltet wird, dann werden die Beinstütze und Rückenlehne zum Sitzzustand in eine vertikale Position gebracht. Manche Elektrorollstuhlfahrer*in benötigen Liege- oder/und Stehhilfe, um den Kreislauf nach stundenlangem Sitzen in Schwung zu bringen und die Gefahr von Dekubitus (Druckgeschwür) zu minimieren.

Tabelle 22 Schwimmfähigkeit

Eckdaten	Anwen- dungs-klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Schwimmfähigkeit	Klasse A	Nicht berücksichtigt.	Nicht vorhanden
	Klasse B		
	Klasse C		

Kommentar / Bemerkung:

Um die Schwimmfähigkeit zu entwickeln, muss die höchste Schutzart IP69 beim elektrischen Gerät beachtet werden. Auf dem Markt ist der ohne Gewässergrundkontakt schwimmfähige Elektrorollstuhl nicht verfügbar.

Tabelle 23 Preislimit

Eckdaten	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Preislimit	Klasse A	TBD	Nicht vorhanden
	Klasse B		
	Klasse C		
<u>Kommentar / Bemerkung:</u>			
<p>In der Preisanalyse auf dem Markt im Bereich Elektrorollstuhl ergibt sich, dass die Preise für elektrische Rollstühle mit hoher Wendigkeit, Sitzhöherverstellbarkeit, Steh- und Liegefunktion von 5.995 Euro bis 22.000 Euro nach Hersteller variieren. So zum Beispiel kostet der Outdoor-Rollstuhl namens Mattro Ziesel zwischen 20.000 und 24.000 Euro. Der treppensteigende Elektrorollstuhl namens Scewo Bro kostet ca. 35.000 Euro. Der Preis wird nicht festgelegt, da zunächst eine Konzeptentwicklung erfolgt.</p>			

Tabelle 24 Sitz

Funktionen	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Sitz	Klasse A	Höhenverstellbarkeit	Nicht vorhanden
	Klasse B	Anpassbarkeit an Größe	
	Klasse C	Beheizbarkeit, Komfort	
<u>Kommentar / Bemerkung:</u>			
<p>Manche Elektrorollstuhlfahrer*innen würden gerne die Regalhöhe (durchschnittlich 1,80 m hoch) mithilfe des Sitzlifts erreichen, um die Waren im Supermarkt aus der oberen Regalen zu holen. Mit der Sitzhöhenverstellbarkeit, Beheizbarkeit und Anpassbarkeit wäre dies technisch möglich.</p>			

Tabelle 25 Horn/ Warnton

Funktionen	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Horn/ Warnton	Klasse A	<ul style="list-style-type: none"> • Optional ersetzt durch smartes Fahrverhalten • automatische Warnung • Autonome Reaktion 	Akustische Warnvorrichtungen erforderlich
	Klasse B		
	Klasse C		
<u>Kommentar / Bemerkung:</u>			
<p>Die Anforderung an die akustische Warnvorrichtung ist heute nicht mehr zeitgemäß, da viele Fußgänger Kopfhörer und Smartphones benutzen und immer weniger auf die akustischen Warnvorrichtung reagieren. Außerdem sind auch gehörlose Menschen unterwegs, weshalb zusätzliche visuelle Signale zu empfehlen sind.</p>			

Tabelle 26 Terrain

Funktionen Terrain	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Überwinden von Hindernissen Höhe des Hin- dernisses	Klasse A	<ul style="list-style-type: none"> • Geländegängigkeit Sand/Geröll/Feldweg • Aktive Dämpfung • Wartungsfreie Reifen/Räder 	15 mm
	Klasse B		50 mm
	Klasse C		100 mm
Unebenheit des Bodens	Klasse A		10 mm
	Klasse B		30 mm
	Klasse C		50 mm

Kommentar / Bemerkung:

Im DIN EN 12184 werden die Unebenheit des Bodens und das Überwinden von Hindernissen zum LIAM-Anforderungsbereich im Aspekt Terrain zugeordnet. Im Prüfverfahren müssen die Elektrorollstühle nach Anwendungsklasse die Mindesthöhe oder Mindestdurchschnitt an Rauheit überwinden. Jedoch berücksichtigt diese DIN-Norm keine Geländeformen wie Sand, Geröll, Asphalt, Eisschicht. Man muss die Anforderungen der Bremswege nach Geschwindigkeit berücksichtigen. Das Terrain ist als Geländegängigkeit definiert.

Tabelle 27 Struktur / Fahrwerk

Funktionen	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Struktur/ Fahrwerk	Klasse A	Hoher Anteil an Normteilen und hoch speziellen (additiv-gefertigten) Bauteilen	Laut der allgemeinen Empfehlung B.2 <ul style="list-style-type: none"> • Anti-Kipp-Vorrichtung • Masse eines abnehmbaren Einzelteils von maximal 10 kg • Alle Schrauben, Befestigungselementen und ähnliches Zubehör nach ISO 68-1:1998
	Klasse B		
	Klasse C		

Kommentar / Bemerkung:

Die allgemeine Empfehlung besagt, dass ein additiv gefertigtes Einzelteil bis 10 kg wiegen und statisch stabil soll. Dabei sollen normgerechte Schrauben bzw. Befestigungselemente einmontiert werden.

Tabelle 28 Navigation und Autonomie

Funktionen	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Navigation und Autonomie	Klasse A	Integrierte Navigation ge- fordert	Nicht vorhanden
	Klasse B		
	Klasse C	Grad der Autonomie (TBD) Auto Home Funktion	
<u>Kommentar / Bemerkung:</u>			
<p>Die Integration mit Google Maps im externen Navigationsprogramm ist nicht möglich. Die Sensorik zur Unfallvermeidung wird bereits auf dem Markt vom Firma Luci vertrieben. Manche Rollstuhlfahrer*innen wünschen sich, selbstbestimmt zu sein und auch selbstbestimmt den Elektrorollstuhl zu steuern. (Quelle: Zusammenfassung von Chat mit Raul Krauthausen)</p> <p>Es wird empfohlen, ein Smartphone- bzw. Tablet-Halterung und eine Applikation für halbautonomes Fahren zu entwickeln und am Elektrorollstuhl einzubauen. Die Auto Home Funktion /autonomes Fahren ohne Aufmerksamkeit ist nicht möglich, da Aufmerksamkeitspflicht für Fahrer eines autonom gesteuerten Fahrzeugs im rechtlichen Rahmen vorhanden ist [34].</p> <p>Die Auto-Home Funktion hat eine andere Bedeutung, wie ein Fahrzeug ohne Fahrer zu einer Stelle automatisch einfährt oder zu einem wartenden Fahrer nach Bedarf hinfährt.</p>			

Tabelle 29 Interfaces

Funktionen	Anwendungs- klasse	Anforderungskatalog	DIN EN 12184
Interfaces	Klasse A	Transport im KFZ, automatisches/standardisiertes Auf- und Aufladen.	Nicht vorhanden
	Klasse B		
	Klasse C	Kiddy-Board Interfaces mit Medizintechnik, z.B. Überwachung von Gesund- heitsparametern	
<u>Kommentar / Bemerkung:</u>			
<p>Trittbrett bzw. Kiddy Board soll auch zugänglich für eine erwachsene Assistenz sein. Der Sozialsitz ist aus rechtlichen Gründen ausgenommen. Beim Transport im KFZ werden die Kraftknotenösen an der Struktur des Elektrorollstuhls befestigt. Die Rückenlehne und die Kopfstütze werden nach unten geklappt, um die Höhe zu reduzieren. Beim Abladen werden die Rückenlehne und die Kopfstütze wieder nach oben aufgerichtet. Das automatische Auf- und Abladen ist eine gute Idee und eine Möglichkeit für eine Entlastung der Pflegeassistenz.</p>			

3.4 Fazit zu den Anforderungen

Alle möglichen Anforderungen wurden überprüft und mit unterschiedlichen Dokumenten abgeglichen. Anschließend werden einige Anforderungen in der Konzeptentwicklung im Kapitel 4 validiert. Manche Punkte, z.B. Schwimmfähigkeit, sind nicht umsetzbar, weil z.B. die höhere IP-Schutzklasse mehr Kosten und mehr Kontrollaufwand bedeuten kann. Die Treppensteigfähigkeit wird bewusst nicht berücksichtigt aus folgenden Gründen:

- Angenommen 10 kg - 20 kg Gewicht bei Treppenfahrwerk
- Hoher Verschleiß bei Raupengummi
- Aufzüge und Rampen sind verfügbar
- Marktverfügbarkeit des treppensteigenden Elektrorollstuhls

Durch den Verzicht auf Treppensteigfähigkeit können das Gewicht und Wartungskosten reduziert werden, d.h. es ist nachhaltiger als treppensteigender Elektrorollstuhl.

Unter besonderer Berücksichtigung der additiven Fertigungsverfahren ist zu beachten, dass ein additiv gefertigtes Einzelteil bis zu 10 kg wiegen darf und statisch stabil sein soll.

4 LIAM-Konzept

Hier wird ein LIAM-Elektrollstuhl gesamtheitlich wie möglich konzipiert. Es ist wichtig, dass der Gesamtkonzept viele der Anforderungen erfüllen kann. Die Grundlagen und Formeln werden kurz aufgezeigt.

Vor der Konzeptentwicklung im Bereich Fahrsystem wird man überlegen, welche Antrieb, Lenkung, Bremse und Energieversorgungseinrichtung vom Stand der Technik optimal für die Elektrollstuhlnutzer*innen ausgelegt oder geeignet sind. Die Strukturkonzeptentwicklung wird aus zeitlichen Gründen von einem/einer LIAM-Projektmitarbeiter*in übernommen und bearbeitet.

4.1 Fahrsystem

Das Fahrsystem wird für die Bewegung des LIAM-Elektrollstuhls konzipiert. Es besteht aus Energiespeicher, Reifen, Federung, Getriebe, Bremsen und Chassis-Struktur. Um die Spezifikationen zu ermitteln und ggf. umzusetzen, werden die benötigten Werte in einigen Unterkapiteln berechnet.

Die Anforderung ergibt, dass sich ein LIAM-Elektrollstuhl mit bis zu 15 km/h bewegen und bis zu 250 kg wiegen darf und die hohe Steigfähigkeit von 20 ° bewältigen soll. Ein LIAM-Elektrollstuhl soll sich geländegängig bewegen können.

4.1.1 Leistungsberechnung der Antriebsmotoren

Wie viel Drehmoment und wie hoch die elektrische Motorleistung von vier Antriebsmotoren in einer Fahrsituation bei der Steigung von 20 ° sein sollen, um die Anforderungen erfüllen zu können, wird die Berechnung der Fahreigenschaften aufgezeigt.

Hier werden die benötigten Berechnungsschritte für die erforderliche Motorleistung zur Rampefähigkeit in der Beschleunigungsphase bzw. Losfahren-Phase aufgezeigt:

Fahrgeschwindigkeit: $v_F = 6 \text{ km/h}$

Zu bewegende Masse: $m_{ges} = 250 \text{ kg}$

Maximale Steigung: $\alpha_{ST} = 20^\circ / 36,4\%$

Gewünschte Beschleunigungszeit: $t_W = 5 \text{ s}$

Beschleunigung: $a_m = \frac{v_F}{t_W} = \frac{\frac{6 \text{ m}}{3,6 \text{ s}}}{5 \text{ s}} = 0,3333 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Der höchste Rollwiderstandsbeiwert von 0,015 auf einer asphaltierenden Oberfläche ist angenommen.

Rollwiderstandsbeiwert [45, p. 35]: $f_R = 0,015$

Rollwiderstand [46]: $F_R = m_{ges} * g * f_R * \cos(\alpha_{ST}) = 34,57 \text{ N} \quad (4.1)$

Luftwiderstand [46]: $F_L = 0 \text{ N}$

Beschleunigungswiderstand [46]: $F_B = m_{ges} * a_m = 83,33 \text{ N} \quad (4.2)$

Steigungswiderstand [46]: $F_{ST} = m_{ges} * g * \sin(\alpha_{ST}) = 838,80 \text{ N} \quad (4.3)$

Gesamtfahrwiderstand: $F_{ges} = F_R + F_L + F_B + F_{ST} = 3409,21N$ (4.4)

Radius Reifen: $r_{Rad} = 254\text{ mm}$

Angenommener Wirkungsgrad: $\eta_M = 0,8$

Antriebsmotor-Drehmoment: $M_{AM} = F_{Ges} * \frac{r_{Rad}}{\eta_M} = 303,75\text{ Nm}$ (4.5)

Für die Raddrehzahl wird ein Schlupf von 20% angenommen [55].

Schlupf: $s_R = 20\%$

Raddrehzahl: $n_{Rad} = \frac{v_F}{2 * \pi * r_{Rad}} * (1 + s_R) = 75,19\text{ min}^{-1}$ (4.6)

Gesamt-Motorleistung: $P_{M_{Ges}} = 2 * \pi * M_{AM} * n_{Rad} = 2391,77\text{ W}$ (4.7)

Um die Höchstgeschwindigkeit von 15 km/h bzw. 4,17 m/s zu erreichen, soll die Drehzahl betragen:

Erforderliche Drehzahl: $n_{Rad} = \frac{4,17\frac{m}{s}}{2 * \pi * r_{Rad}} * (1 + s_R) = 187,98\text{ min}^{-1}$ (4.6)

Ein Antriebssystem mit einer Spitzenleistung von mindestens 2391,77 W, einem Drehmoment von 303,75 Nm und einer Drehzahl von mindestens 187,98 min⁻¹ wird gesucht.. Für ein Antriebssystem ist außerdem wichtig, dass die Bordspannung 48 V betragen soll, damit der Stromfluss den elektrischen Widerstand nicht überlastet. Im Anhang A und B sind die schematischen theoretischen Werte nach Oberflächenverhalten, Steigung, Drehzahl und Geschwindigkeit zu finden, der die benötigten Werte entnommen werden können.

4.1.2 Allradantrieb Radnabenmotor

Die Leistungsberechnung der Antriebsmotoren im Zweck der hohen Ansprüche an die LIAM-Elektrollstühlen hat sich ergeben, dass vier Elektroantriebsmotoren das hohe Drehmoment von 303,75 Nm zusammen ergeben sollen, um den LIAM-Elektrollstuhl auf der Steigung von 20 ° mit einer Gesamtmasse von 250 kg zu bewegen. Um diese Anforderung zu erfüllen, wird ein Drehmoment von mehr als 303,75 Nm benötigt. Außerdem benötigt der LIAM-Elektrollstuhl vier gleichartige Radnabenmotoren für Skid Steering bzw. Allradlenkung.

Das Motordrehmoment wird auf vier Radnabenmotoren verteilt.

Anzahl Räder: $z_{Rad} = 4$

Motorleistung Vorauslegung: $P_{4WD} = \frac{P_{MGes}}{z_{Rad}} = \frac{2391,77 \text{ W}}{4} = 597,94 \text{ W} \quad (4.8)$

Drehmoment pro Rad Vorauslegung: $M_{4WD} = \frac{M_{AM}}{z_{Rad}} = \frac{303,75}{4} = 75,94 \text{ Nm} \quad (4.9)$

Erforderliche Drehzahl: $n_{Rad} = \frac{4,17 \frac{m}{s}}{2 * \pi * r_{Rad}} * (1 + s_R) = 187,98 \text{ min}^{-1}$

Für die Übertragung des hohen Abtriebsdrehmoments reichen vier BLDC-Motoren ohne Getriebe allein nicht aus. Die Kombination aus BLDC-Motor, Planetengetriebe und elektromagnetischer Bremse wird ausgelegt:

Hersteller	Nennleistung	Nenn-drehzahl	Nenn-drehmoment	Max. Abtriebs-drehmoment	Gesamt-länge	Gewicht	Stückpreis
	[W]	[1/min]	[Nm]	[Nm]	[mm]	[kg]	
Nanotec [47]	660 W	188	120	192	281,55	6,78	895€
Dunkermotoren	1127 W	230	37,83	258	477,35	11,7	2568 €

Die Dunkermotoren-Produkte werden aufgrund der hohen Gewicht, Länge und Preis weiter nicht berücksichtigt.

Die Nanotec-Produktkombination erfüllt die Anforderungen, jedoch entspricht sie einem der technischen Kriterien nicht, nämlich Variantenvielfalt, da ein Antriebspaar an einer Antriebsachse mindestens 563 mm Breite benötigt und dadurch Variantenvielfalt stark einschränkt. Es bedeutet, dass die Reifenbreite pro Rad maximal 68 mm betragen dürfte. Beim Aufbau eines Nanotec-Antriebssystems würde es dann insgesamt 27,12 kg wiegen.

Die Kombination von Schneckengetriebe, BLDC-Motor und Bremse kann die Gesamtbreite eines LIAM-Elektrollstuhls reduzieren und die Variantenvielfalt ermöglichen. Die Nachteile der Schneckengetriebe sind hohes Gewicht, hohe Leistungsverluste und geringer Wirkungsgrad aufgrund der Reibung. [48]

4.1.3 Allradantrieb E-Bike-Frontantriebe

Die E-Bike-Frontantriebe oder Radantriebe sind eine mögliche Lösung für die Kompaktheit, bei der sich die elektrische Maschine im Rad statt neben dem Rad befindet. Es ist zu beachten, dass die Achslast dabei mindestens 125 kg aufweisen soll, damit sich der 250 kg schwere Elektrorollstuhl mit mindestens zwei Rädern auf den Bodenkontakt kurzzeitig bewegen kann.

Das Motordrehmoment wird auf vier Radnabenmotoren verteilt.

Anzahl Räder: $z_{Rad} = 4$

Motorleistung Vorauslegung: $P_{4WD} = \frac{P_{MGes}}{z_{Rad}} = \frac{2391,77 \text{ W}}{4} = 597,94 \text{ W} \quad (4.8)$

Drehmoment pro Rad Vorauslegung: $M_{4WD} = \frac{M_{AM}}{z_{Rad}} = \frac{303,75}{4} = 75,94 \text{ Nm} \quad (4.9)$

Tab. 17: Motoren für den Allradantrieb E-Bike Frontantriebe

Bezeichnung	Leistung [W]	Spitzenleistung	Drehzahl	Achslast	Wirkungsgrad	Nenn-drehmoment	Max. Drehmoment	Gewicht	Preis
	[W]	[W]	[1/min]	[kg]	[%]	[Nm]	[Nm]	[kg]	[€]
RN 111 [49]	600	1350	200	150	≥ 85	31	113	5,1	468
H610 [50]	350	350	205	n.a.	≥ 80	n.a.	45	3,3	200
GDF15 [51]	500	500	250	n.a.	≥ 78	n.a.	60	3,7	128

Der Frontantrieb bzw. Fahrradtrieb RN 111 von Heinzmann wurde hier ausgewählt, da der Spitzenmoment von 113 Nm und die Spitzenleistung von 1350 W die Leistungseigenschaften des Frontantriebs von BAFANG und MXUS übertreffen. Außerdem sind die Daten für den Heinzmann-Frontantrieb vollständig. Dieser Frontantrieb erfüllt die Anforderungen bei der Höchstgeschwindigkeit von 15 km/h und auch bei der Steigfähigkeit von 20 Grad mithilfe des kumulierten Drehmoments von 452 Nm durch vier angewendeten Antriebsmotoren. Beim Nennmoment von 31 Nm kann eine Steigung bis zu 8,9° bzw. 15,6 % bewältigt werden, ohne überschritten zu werden. Bei der Überschreitung von Nennmoment und Motorleistung kann der Frontmotor für kurze Zeiten benutzt werden.

Zur Ergänzung von Heinzmann CargoPower RN 111:

CargoPower RN 111 wurde für Schwerlastanwendungen entwickelt. Es kann auch für einen anderen Zweck auch angewendet werden. Es ist ein kompakter Radnabenmotor bzw. Radantrieb. Ein hohes Drehmoment und eine gleichermaßen hohe Leistungsdichte werden durch ein Hochleistungsplanetenge triebe aus gehärtetem Stahl und innovativer Ölschmierung und -kühlung erreicht. Es kann rückwärts fahren und rekuperieren. [49]

Basierend auf den Wirkungsgraden wird die Leistung und das Drehmoment in Kapitel 4.1.1. nachberechnet.

Wirkungsgrad:	$\eta_M = 0,85$
Antriebsmotor-Drehmoment:	$M_{AM} = F_{Ges} * \frac{r_{Rad}}{\eta_M} = 285,22 \text{ Nm} \quad (4.10)$
Raddrehzahl:	$n_{Rad} = \frac{v_F}{2 * \pi * r_{Rad}} * (1 + s_R) = 75,19 \text{ min}^{-1} \quad (4.11)$
Gesamt-Motorleistung:	$P_{MGes} = 2 * \pi * M_{AM} * n_{Rad} = 2245,79 \text{ W} \quad (4.12)$
Motorleistung:	$P_{4WD} = \frac{P_{MGes}}{z_{Rad}} = \frac{2245,79 \text{ W}}{4} = 561,45 \text{ W} \quad (4.13)$
Drehmoment pro Rad:	$M_{4WD} = \frac{M_{AM}}{z_{Rad}} = \frac{285,22}{4} = 71,30 \text{ Nm} \quad (4.14)$

Das übertragbare Nenndrehmoment des Frontantriebs von 31 Nm wird überschritten, kann aber toleriert werden, da das Getriebe ein maximales Abtriebs-Drehmoment von 113 Nm hat. Für den Fall, dass nur drei Räder die Beschleunigungskraft übertragen, können drei Frontantriebe also kurzfristig mehr Drehmoment übertragen.

Tabelle 30 Gewicht und Preis für Kaufteile für E-Bike-Frontantrieb mit Schätzung

Bezeichnung	Gewicht [kg]	Stückpreis	Mengeneinheit	Preis [€]
Frontantrieb	5,1	468	4	1872
Controller	0,3	285	4	1140
Rekuperation		29,5	4	118
Felge 30 mm breit und 406 mm Innendurchmesser		40*	4	160*
Speichen 36 Stücke	0,02	20*	144	20*
Reifen Rocket Ron [52]	0,93	59,90	4	239,60
Schlauch	0,1	8*	4	32*
Schlauchdichtmittel	0,02	5	4	20
Felgenband	0,05	5	4	20*
Kabeln				100*
Stundensatz für Montage		120	8	960
Gesamtsumme				4681,60€

4.1.4 Konzeptentscheidung

Im nachfolgenden Antriebskonzept wird entschieden, welches Antriebssystem genommen wird.

Tabelle 31 Antriebskonzept-Vergleich

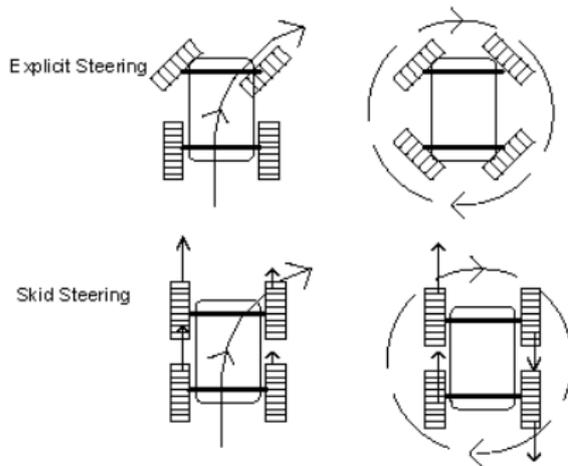
Hersteller	Elektrische Maschine	Maximale Abtriebs-Drehmoment	Breite	Radaufhängung	Gewicht	Preis
Nanotec	PG&BLDC-Motor&Bremsen	192 Nm	281,55 mm	Einseitig	27,2 kg	4260,20 €
Heinzmann	Frontantriebe	113 Nm	101,1 mm	Beidseitig	26 kg*	4030 €* (4681,60€)

*Schätzwert mit Bremsanlage, Controller ohne Berücksichtigung auf Radkomponenten und Arbeitsaufwand

Beim Einsetzen des BLDC-Motors mit Planetengetriebe und Bremsen entsteht der Spielraum für einen Radaufbau von 68 mm pro Rad. Das Heinzmann-Produkt Cargo Power RN111 wird unter der Berücksichtigung der erforderlichen Variantenvielfalt bzw. des additiven Fertigungsverfahrens empfohlen, bei dem ein Spielraum von 497,8 mm in der Konzeptentwicklung entstanden ist. Die Herausforderung an der Erstellung eines Konzepts mit CargoPower RN111 ist der Bremsenanlageaufbau nach Brake-By-Wire-Technologie und der Steuerungsaufbau.

4.2 Lenkungskonzept

Ein kompaktes Lenkungskonzept, um den Elektrorollstuhl mit einer hohen Kursstabilität lenken zu können, wird gesucht, welche den DIN 12184 - Mindestanforderungen an den Wendekreisdurchmesser von weniger als 2000 mm [20] erfüllt und bestens geeignet für die Durchfahrbarkeit der engen Stelle. Die Berechnung des Wendekreisdurchmessers wird vorgelegt und unterstützt die Validierung der LIAM-Anforderungen.



In der oberen linken Abbildung zeigt das Bild eine direkte Einachs-Lenkung. Das obere rechte Bild zeigt vier gelenkte Räder mit einzelnen Lenkungsmotoren, welche die Drehung an einer Stelle ermöglicht.

Da die Lenkungsstange und mehrere Teile für die Hinter- oder Vorderradachse-Lenkung für jegliche Lenkungsart innerhalb des Strukturrahmens erforderlich sind und der Kompaktheit und Einfachheit nicht entsprechen, wird die direkte Lenkungsart nicht angewendet, d.h. es erfolgt keine Berechnung für die direkte Lenkung.

Die unten rechts abgebildete Radnabenmotor-Lenkung wird im Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 vertieft.

Abbildung 4-1 Darstellung der Lenkungsarten
[53, p. 1]

4.2.1 Radnabenmotor-Lenkung

Die Formel wird ohne Seitenkraft-Betrachtung auf der Basis von Fahrmechanik von Kettenfahrzeug und dem Lenkungsbandbuch hergeleitet. Alle Räder sind fest mit dem Gestell verbunden. *Um lenken zu können, muss nicht nur die Drehzahl an den kurvenäußeren Rädern erhöht sein, sondern auch das Drehmoment. Bei Kurven mit einem Radius kleiner als die halbe Spurweite drehen sich die kurveninneren Räder rückwärts. Zur Berechnung des benötigten Drehmoments wird nach der Auslegung für Kettenfahrzeuge vorgegangen. Der Unterschied hierbei ist, dass mit zwei Rädern je Seite gerechnet wird, anstatt mit einer Kette. Die folgenden Abbildungen beziehen sich auf ein Kettenfahrzeug. [54]*

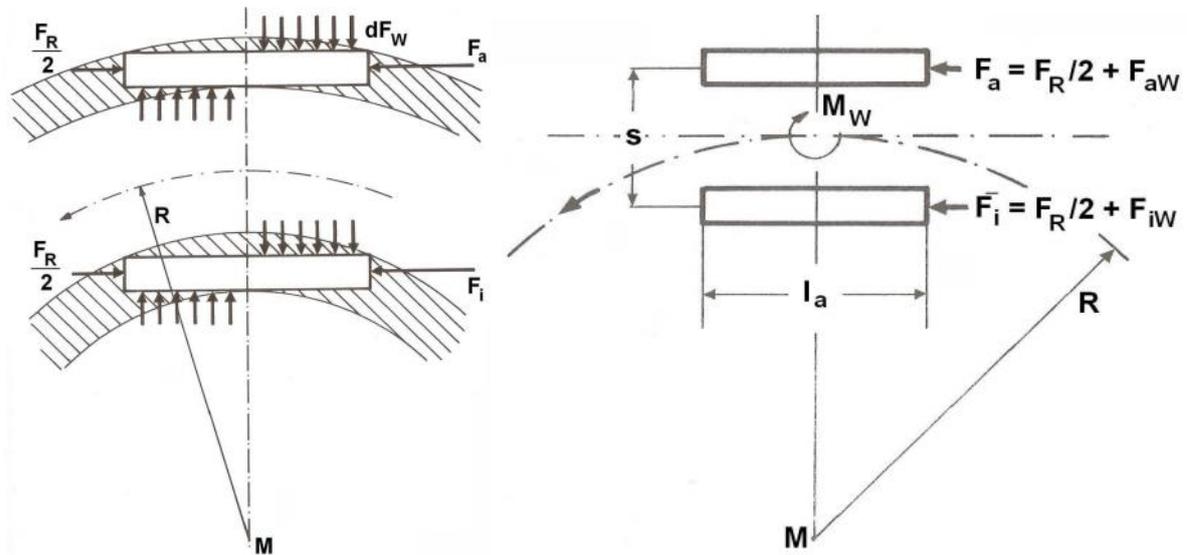


Abbildung 4-2 Antriebskräfte beim Wendevorgang [18, p. 61] Abbildung 4-3 Wendevorgang [18, p. 62]

Äußere Lenk-Antriebskraft [18, Formel 2/75]: $F_{aW} = \frac{M_W}{s}$ (4.15)

Innere Lenk-Antriebskraft [18, Formel 2/76]: $F_{iW} = -\frac{M_W}{s}$ (4.16)

Wendemoment fürs Kettenfahrzeug [18, Formel 2/77]: $M_{WK} = 4 * \int_0^{l_a/2} l dF_W$ (4.17)

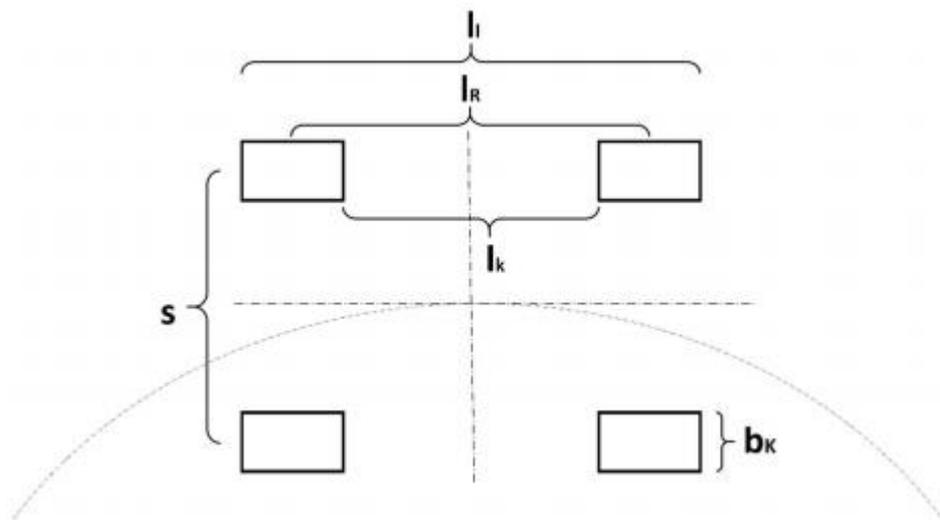


Abbildung 4-4 Länge bei der Wendung mit Rädern statt Kette [54, p. 72]

Wendemoment für vierrädrige Fahrzeuge: $M_{WK} = 4 * \int_{l_K/2}^{l/2} l dF_W$ (4.18)

Kraftanteile [7, Formel 2/78]: $dF_W = dF_N * f_W$ (4.19)

Normalkraft [7, Formel 2/79]: $dF_N = p_0 * b_K * dl$ (4.20)

Spezifischer Bodendruck: $p_0 = \frac{F_G}{2 * b_K * (l_l - l_K)}$ (4.21)

Einsetzen aus 4.19 bis 4.21 in 4.18: $M_W = 4 * f_W * \frac{F_G}{2 * (l_l - l_K)} * \int_{l_K/2}^{l/2} l dl$ (4.22)

Integration von 4.22: $M_W = f_W * \frac{F_G}{4 * (l_l - l_K)} * (l_l^2 - l_K^2)$ (4.23)

Daraus folgt für die Lenk-Antriebskräfte aus (4.15), (4.16):

$$\text{Äußere Lenk-Antriebskraft:} \quad F_{aW} = f_W * \frac{F_G}{s*4*(l_l-l_K)} * (l_l^2 - l_K^2) \quad (4.24)$$

$$\text{Innere Lenk-Antriebskraft:} \quad F_{iW} = -f_W * \frac{F_G}{s*4*(l_l-l_K)} * (l_l^2 - l_K^2) \quad (4.25)$$

Die Gesamte Antriebskraft an den jeweiligen Rädern ergibt sich aus der Lenk-Antriebskraft und der benötigten Antriebskraft aus dem Rollwiderstand. Zu beachten ist, dass sich die Formeln im Folgenden auf die beiden kurvenäußeren bzw. -inneren Räder beziehen.

$$\text{Äußere Lenk-Antriebskraft:} \quad F_a = F_{aW} + \frac{F_R}{2} \quad (4.26)$$

$$\text{Innere Lenk-Antriebskraft:} \quad F_i = F_{iW} + \frac{F_R}{2} \quad (4.27)$$

Der Rollwiderstandsanteil berechnet sich aus dem Rollwiderstandsbeiwert und der Gewichtskraft auf dem Reifen.

Der Wert wurde bereits in Formel (4.1) berechnet. *Bei Kurven kleiner als der halben Spurbreite, drehen sich die Räder rückwärts und die innere Antriebskraft ist der negative Betrag der äußeren Antriebskraft. Diese beiden Fälle stellen den höchstbelasteten Fall dar. Für größere Radien verringert sich der Wendewiderstandsbeiwert f_W [18, p. 73]. Der Beiwert berücksichtigt der Untergrund, das Einsinken des Fahrzeugs und den Untergrund, den die Reifen vor sich herschieben. [54]*

$$\text{Wendewiderstandsbeiwert [18, Formel 2/99]:} \quad f_W = \frac{f_{W0}}{(1+\frac{R}{s})^n} + (1 - \frac{R}{R_K}) \quad (4.28)$$

Der Exponent n bezieht sich auf die Vorspannung der Kette und damit auf die Gleichmäßigkeit der Bodendruckverteilung. Da es sich im vorliegenden Fall um Räder mit einer im Vergleich zur Kette geringen Aufstandslänge handelt, kann von einer gleichmäßigen Verteilung ausgegangen werden. Der Exponent n ist dann 0,5 [18, p. 74]. Der Radius R_K bezieht sich auf die Biegebarkeit der Kette in Fahrtrichtung, die leicht der Kurve folgt. Diese Biegung reduziert die Antriebskraft. Diese Verringerung tritt bei Reifen nicht auf, R_K wird also sehr groß, wodurch der hintere Multiplikator zu 1 wird. Der Beiwert f_{W0} bezieht sich auf das Wenden um die Hochachse, bei einem Radius von 0m ist f_{W0} gleich f_W . f_{W0} ist für mittelschweres Gelände 1,2 [18, p. 75] Durch die Kurve wird Erdbreich neben der Kette oder dem Rad aufgeschoben. Die Auflagelänge der Kette ist länger als die bei einem Rad, es kann also davon ausgegangen werden, dass sich höhere Erdberge in der Mitte der Kette aufschieben. Bei einem Rad schiebt sich die Erde durch die geringe Auflagelänge eher am Rad vorbei als bei einer Kette. Es ist also davon auszugehen, dass sich der Wendewiderstandsbeiwert für Räder reduziert. [54]

Der Heinzmann CargoPower RN111 kann bis maximal 113 Nm übertragen. Im Folgenden soll der minimal mögliche Wenderadius berechnet werden, der bei einem maximalen Drehmoment am Getriebe möglich ist.

$$\text{Maximales Drehmoment Getriebe:} \quad M_G = 113 \text{ Nm}$$

$$\text{Maximale Antriebskraft pro Rad-Paar:} \quad F_{Max} = 2 * \frac{M_G}{r_{Rad}} = 889,76 \text{ N}$$

Äußere Lenk-Antriebskraft aus 4.24 in 4.28:

$$F_{aW} = \frac{f_{W0}}{\left(1 + \frac{R}{s}\right)^n} + \left(1 - \frac{R}{R_K}\right) * \frac{F_G}{s * 4 * (l_l - l_K)} * (l_l^2 - l_K^2) + \frac{F_R}{2} \quad (4.29)$$

Normalkraft: $F_N = m * g = 2452,5 \text{ N}$ (4.30)

Radlast: $F_G = \frac{F_N}{z_{Rad}} = 613,125 \text{ N}$ (4.31)

Reifenradius: $r_{Rad} = 508 \text{ mm}$

Die Kreissegmenthöhe ist, aus eigener Erfahrung angenommen, wenn alle Luftreifen nicht regelmäßig aufgepumpt werden.

Kreissegmenthöhe: $h_s = 20 \text{ mm}$

Auflageabstand nach

$$r_p = \sqrt{\frac{r_{Rad} * 8 * h_s - 4 * h_s^2}{2}} = 98,79 \text{ mm}$$

Spurweite: $s = 577 \text{ mm}$

Radstand: $l_R = 558 \text{ mm}$

Langer Radstand: $l_l = l_R + 2 * r_p = 755,59 \text{ mm}$ (4.33)

Kurzer Radstand: $l_K = l_R - 2 * r_p = 360,41 \text{ mm}$ (4.34)

Minimaler Wenderadius [54] aus 4.29: $R = \left(\sqrt{\frac{f_{W0} * \frac{F_G}{s * 4 * (l_l - l_K)} * (l_l^2 - l_K^2)}{F_{Max} - \frac{F_R}{2}}} \right) * \frac{s}{2} = 53,47 \text{ mm}$ (4.35)

Mit einem minimalen Wenderadius von 53,47 mm erfüllt das Lenkkonzept die Anforderung ohne Seitenkraft-Betrachtung. Der minimale Wenderadius kann auch null betragen, wenn die Luftreifen gut aufgepumpt sind.

Um Missverständnisse beim Wenderadius zu vermeiden, hat LIAM eine aktuelle Länge von 1066 mm und Breite von 700 mm und wird den Platzbedarf im Wendedurchmesser am Mittelpunkt des Wendekreises erfordern.

Wendekreisdurchmesser:

$$D_{Wende} = \sqrt{L^2 + B^2} = \sqrt{(1066 \text{ mm})^2 + (700 \text{ mm})^2} = 1275,28 \text{ mm} \quad (4.36)$$

Wendekreisradius: $R_{Wende} = \frac{D_{Wende}}{2} = \frac{1275,3}{2} = 637,64 \text{ mm}$ (4.37)

Der Wendekreisradius (4.37) wird als Spezifikation zum Vergleich mit marktverfügbaren Produkten angenommen und erfüllt damit die DIN 12184-Anforderung von einem Wendekreisradius von weniger als 2000 mm.

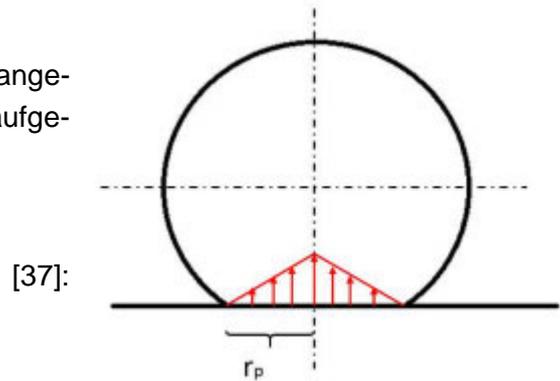


Abbildung 4-5 Angenäherte Druckverteilung Auflagefläche [54, p. 71]

4.2.2 Radnabenmotor-Lenkung Teil 2

Im Gegensatz zu Radnabenmotor-Lenkung Teil 1 werden hier die Seitenkräfte betrachtet. Die Reifen müssen einen geeigneten Schlupf mit mittlerer Reifenseitensteifigkeit und geringen Haftbeiwert aufweisen, damit das Fahrzeug sich um die Gierachse CG (siehe Abbildung 4-6) Bewegungsrahmen eines Skid Steering Fahrzeug Abbildung 4-6) drehen kann.

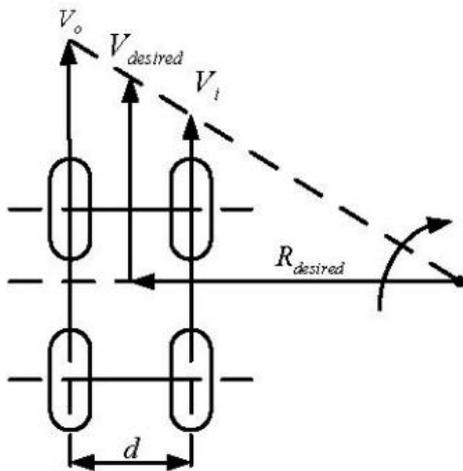


Abbildung 4-7 Modell des elektrisches Skid Steering-Fahrzeug [53, p. 2]

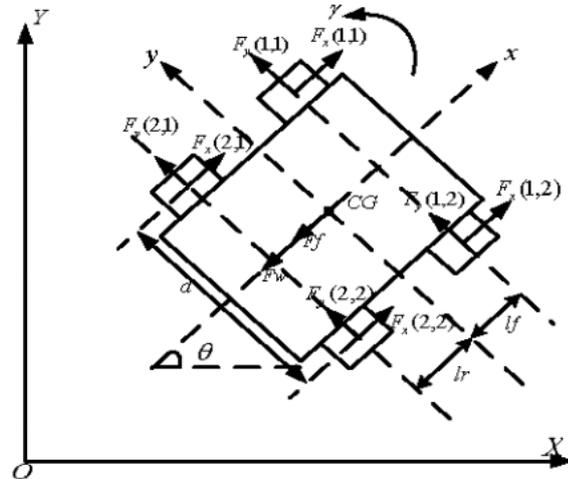


Abbildung 4-6 Bewegungsrahmen eines Skid Steering Fahrzeug [53, p. 4]

Die Formeln für die Berechnung aus der Präsentation der TDAF-Studierenden werden hier zitiert:

Spurweite:

$$d = 577 \text{ mm}$$

Radstand:

$$l_R = 558 \text{ mm}$$

Geschwindigkeit am äußeren Rad:

$$v_a = 4 \text{ km/h}$$

Geschwindigkeit am inneren Rad:

$$v_i = 3 \text{ km/h}$$

Erwünschter Wenderadius [53]:

$$R_{desired} = \frac{v_a + v_i}{v_a - v_i} * \frac{d}{2} = 2,02 \text{ m} \quad (4.38)$$

Erwünschte Geschwindigkeit [53] :

$$V_{desired} = \frac{v_a + v_i}{2} = 0,972 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.39)$$

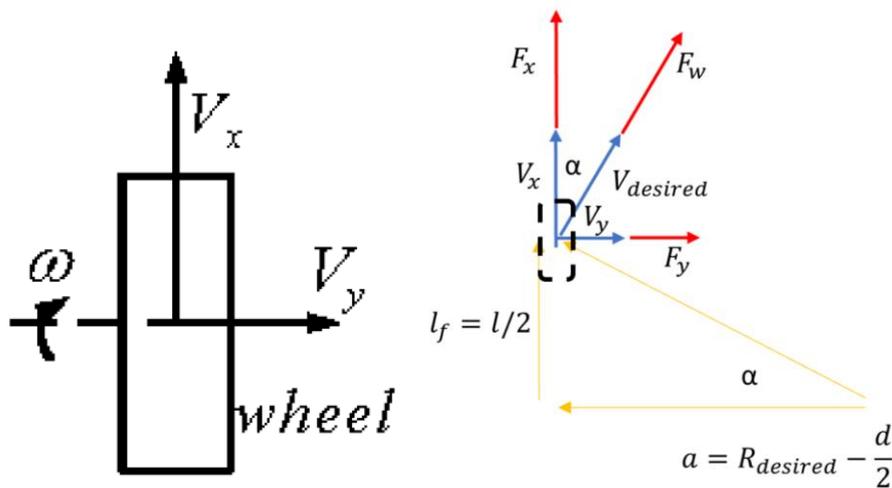


Abbildung 4-8: Betrachtung eines einzelnen Reifens [53] & [55]

Schlupfwinkel/Schräglaufwinkel [55]: $\alpha = \arctan\left(\frac{\frac{l_R}{2}}{R_{desired} - \frac{d}{2}}\right) = 9,16^\circ$ (4.40)

Längsgeschwindigkeit [55]: $V_x = V_{desired} * \cos(\alpha) = 0,823 \frac{m}{s}$ (4.41)

Seitengeschwindigkeit [55]: $V_y = V_{desired} * \sin(\alpha) = 0,133 \frac{m}{s}$ (4.42)

Drehgeschwindigkeit [53]: $\omega = \frac{V_{desired}}{R} = 3,281 \frac{1}{s}$ (4.43)

Reifenradius: $R = 0,254m$

Relative Slip-Geschwindigkeit [53]: $V_s = \sqrt{(V_x - \omega * R)^2 + V_y^2} = \frac{m}{s}$ (4.44)

Geschwindigkeitskonstante [55]: $V_0 = 50 \frac{m}{s}$ (4.45)

Haftbeiwert [55]: $\mu_0 = 0,8$ (4.46)

Einsetzen von 4.41, 4.42, 4.43, Reifenradius, 4.45 und 4.46 in 4.47:

Relative Haftbeiwert [53]:

$$\mu = \mu_0 * e^{-\frac{(V_x - \omega * R)^2 + V_y^2}{V_0^2}} = 0,800283$$
 (4.47)

Einsetzen von 4.41, 4.43 und Reifenradius in 4.48:

Längsschlupf [53]:

$$s_x = \frac{V_x - \omega * R}{\omega * R} = -0,0127$$
 (4.48)

Einsetzen von 4.42, 4.43 und Reifenradius in 4.49

Seitlicher Schlupf [53]: $s_y = \frac{V_y}{\omega * R} = 0,159$ (4.49)

Angenommene Reifenlängssteifigkeit [55]: $k_x = 20000 N/^\circ$ (4.50)

Unendlicher relativer Schlupf in Längsrichtung [53]: $\phi_x = \frac{k_x * s_x}{\mu} = -318,42 N/^\circ$ (4.51)

Angenommene Reifenseitensteifigkeit [55]: $k_y = 300 N/^\circ$ (4.52)

$$\text{Unendlicher relativer seitlicher Schlupf [53]: } \phi_y = \frac{k_y * s_y}{\mu} = 59,651 \text{ N/}^\circ \quad (4.53)$$

$$\text{Unendlicher Gesamtschlupf [53]: } \phi = \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} = 323,96 \text{ N/}^\circ \quad (4.54)$$

$$\text{Normalkraft pro Rad von 4.30: } F_Z = m * g = \frac{2452,5 \text{ N}}{4} = 613,13 \text{ N}$$

$$\text{Angenommene Reifenkraftkennlinie [55]: } E_y = 100 \quad (4.55)$$

$$\text{Reifenlängskraft [53]: } F_x = -\frac{\phi_x}{\phi} * F_Z * \mu * \left(1 - e^{-\phi - E_y * \phi^2 - (E_y^2 + \frac{1}{12}) * \phi^3}\right) = 482,28 \text{ N} \quad (4.56)$$

$$\text{Reifenseitenkraft [53]: } F_y = -\frac{\phi_y}{\phi} * F_Z * \mu * \left(1 - e^{-\phi - E_y * \phi^2 - (E_y^2 + \frac{1}{12}) * \phi^3}\right) = -90,35 \text{ N} \quad (4.57)$$

Der Berechnungsskript für Berechnung der Seitenkräfte ist aufgebaut worden und kann weiterentwickelt werden, bis die Reifenseitensteifigkeit und Reifenkraftkennlinie bekannt sind und in der Testfahrt validiert werden. Je mehr der Schlupf und die Geschwindigkeit steigen, desto mehr steigen die Reifenseiten- und Reifenlängskraft. [55] Die axiale Kraftbelastung kann in der Konzeptentwicklung eines Strukturrahmens oder einer Gabelung der Räder angewendet werden. Es ist zu beachten, dass die maximale axiale Kraftbelastung der Motorwelle im Fall einer anderen Antriebskonzeptentwicklung nicht überschritten werden darf.

4.2.3 Schnellfahrang-Lenkung

Hier werden die Grenzwerte des minimalen Wenderadius und der inneren Geschwindigkeit für das Fahrverhalten im Schnellgang bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 15 km/h ermittelt. Bei der Kurvenfahrt ist das Verhältnis zwischen Zentrifugalkraft und Haftbeiwert abhängig von der Geschwindigkeit. Hier wird der minimale Wenderadius im Schnellfahrang auf der nassen und trockenen Oberfläche ohne Betrachtung des Massenschwerpunkts und der Seitenkraft ermittelt. Wenn der minimale Wenderadius durch die zu niedrige Geschwindigkeit am inneren Rad unterschritten wird, wird die Kurvenfahrt instabil sein.

Zulässige Höchstgeschwindigkeit: $v_{max} = 15 \frac{km}{h} = 4,17 \frac{m}{s}$

Zentrifugalkraft: $F_{Zf} = m_{ges} * \frac{v_{max}^2}{R_{min}}$ (4.58)

Haftreibungsbeiwert auf der nassen Asphalt-Oberfläche: $\kappa_{nass} = 0,5$

Haftreibungsbeiwert auf der trockenen Asphalt-Oberfläche: $\kappa_{trocken} = 0,8$

Haftreibungskraft: $F_{HR} = \kappa * F_G = \kappa * m_{ges} * g$ (4.59)

Gleichsetzen von 4.58 und 4.59 in 4.60:

$$\kappa * m_{ges} * g = m_{ges} * \frac{v_{max}^2}{R_{min}} \quad (4.60)$$

Minimaler Wenderadius auf der nassen Asphalt - Oberfläche:

$$R_{min,nass} = \frac{v_{max}^2}{\kappa * g} = \frac{(4,17 \frac{m}{s})^2}{0,5 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 3,539 \text{ m} \quad (4.61)$$

Minimaler Wenderadius auf der trockenen Asphalt - Oberfläche:

$$R_{min,trocken} = \frac{v_{max}^2}{\kappa * g} = \frac{(4,17 \frac{m}{s})^2}{0,8 * 9,81 \frac{m}{s^2}} = 2,212 \text{ m} \quad (4.62)$$

Wenn der minimale Wenderadius unterschritten wird, wird das Fahrzeug instabil sein.

Geschwindigkeit am äußeren Rad: $v_{max} = 15 \frac{km}{h} = 4,17 \frac{m}{s}$

Spurweite: $d = 577 \text{ mm}$

Ermittelte Wenderadius: $R_{min} = \frac{v_a + v_i}{v_a - v_i} * \frac{d}{2}$ (4.63)

Maximale Geschwindigkeit am inneren Rad: $v_i = v_{max} * \frac{R_{min} * \frac{2}{d} - 1}{1 + R_{min} * \frac{2}{d}}$ (4.64)

Max. Geschwindigkeit am inneren Rad auf der nassen Asphalt-Strecke:

$$v_{i,nass} = v_{max} * \frac{R_{min,nass} * \frac{2}{d} - 1}{1 + R_{min,nass} * \frac{2}{d}} = 3,5385 \frac{m}{s} = 12,74 \frac{km}{h} \quad (4.65)$$

Max. Geschwindigkeit am inneren Rad auf der trockenen Asphalt-Strecke:

$$v_{i,trocken} = v_{max} * \frac{R_{min,trocken} * \frac{2}{d} - 1}{1 + R_{min,trocken} * \frac{2}{d}} = 3,2052 \frac{m}{s} = 11,54 \frac{km}{h} \quad (4.66)$$

Die Grenzwert-Berechnung ergibt sich, dass die inneren Räder nicht langsamer als 11,54 km/h auf der trockenen Oberfläche und 12,74 km/h drehen sollen, um die Kurvenstabilität nach Witterungsverhältnis zu erhalten.

4.2.4 Mittelrad-Konzept

Der Mittelrad wird bei langsamer bzw. Kurvenfahrt in engen Stellen angewendet. Es soll das Antriebsradachse-Paar von vorne oder hinten entlasten. Im Fall einer Entwicklung des Mittelrad-Konzepts an der Vorderachse wäre es eine mögliche Lösung für bessere Hindernisüberwindung. Das Mittelrad befindet sich in der Mitte der Spurweite zwischen großen Rädern. Nun wird überlegt, ob ein Mittelrad hinten oder vorne liegen soll.

Tabelle 32 Vor- und Nachteile der Position eines Mittelrads

Mittelrad vorne	Mittelrad hinten
<p><u>Vorteile:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Gutes Lenkungsverhalten durch Dreipunkt-Lenkung mit Vorderrädern • Überwindung von höheren Hindernissen wie Bordsteine oder Stufen 	<p><u>Vorteile:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Präzises Lenkungsverhalten durch Dreipunkt-Lenkung mit Vorderrädern • Geringe Energieleistung für den Stellmotor in der Übereinstimmung mit Hebelgesetz erforderlich
<p><u>Nachteile:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Um die Hebelkraft bzw. den Energieverbrauch für den Stellmotor zu senken, soll das hohe Gewicht nach hinten verlagert werden. Die Batterie wird auch nach hinten verlagert und kann dann nicht mehr selbstständig ausgetauscht werden. • Stützrollen für Anti-Kipp-Vorrichtung werden hinter die Hinterräder benötigt 	<p><u>Nachteile:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Elektrorollstuhlfahrer*in wird nach vorne im Fall der Nichtnutzung von Sicherheitsgurt rutschen. Die Rutsch nach vorne kann Unwohlsein verursachen. • Stützrollen an den Vorderrädern werden benötigt

Das Heben der Vorderachse birgt mehr Potentiale als das Heben der Hinterradachse, wenn sich das Gewicht überwiegend auf der hinteren Fahrzeughälfte befindet, wenn die Anti-Kipp-Vorrichtung eingebaut hinter den Hinterrädern wird.

Die Dreipunkt-Lenkung besteht aus zweimotorigen, nach Differenzgeschwindigkeit gesteuerten Vorderrädern und einer freigelegten Lenkrolle nach Vorbild von Einkaufswagenrollen bzw. Container-Lenkrollen. Die Lenkrolle und Hebevorrichtung dienen zum Zweck der Entlastung der hinteren oder vorderen Antriebsräder von Reifenseitenkraft. Die Zentrifugalkraft und Kippstabilität sind aufgrund der starken Reduzierung der Radaufstandsfläche zu beachten. Die Lenkrolle wird bei der Langsamfahrt vor der scharfen Kurvenfahrt bzw. vor dem Wendevorgang eingeklappt. Die Vorder- oder Hinterräder sowie jegliche Teile hinter der Lenkrolle werden mithilfe der elektrisch angetriebenen Hydraulikzylinder gehoben. Nach dem Wendevorgang wird die Lenkrolle durch die Verkürzung der Hydraulikzylinder ausgeklappt.

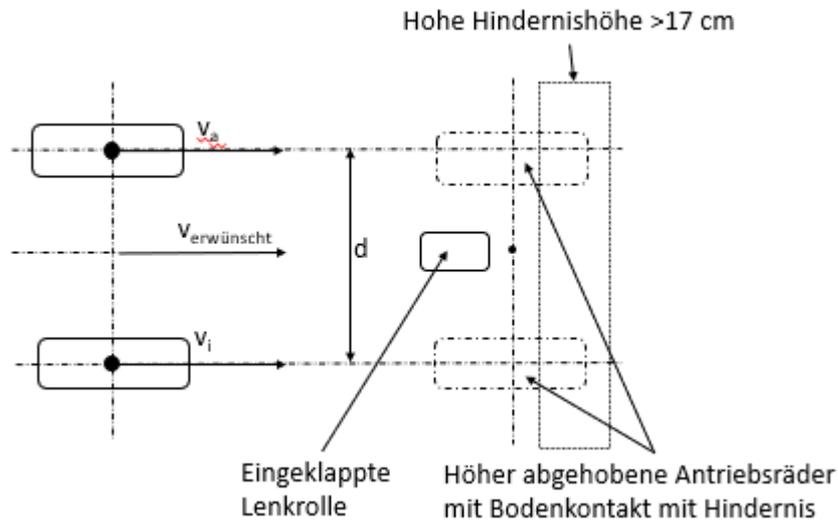


Abbildung 4-9 Hindernisüberwindung-Vorgang (Quelle: Eigene Darstellung)

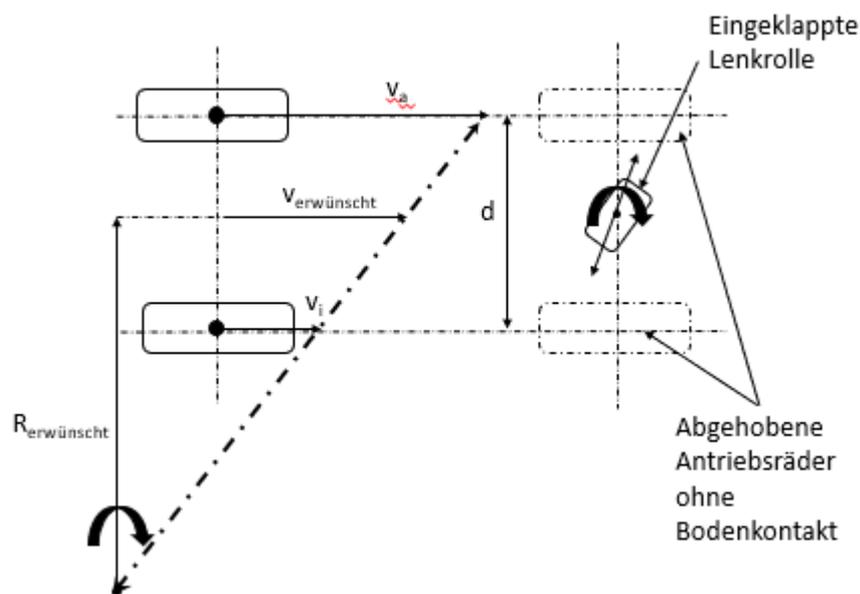


Abbildung 4-10 Wendevorgang im Fall des Hebens der vorderen Antriebsräder (Quelle: Eigene Darstellung)

Geschwindigkeit am äußeren Rad: $v_a = 4 \text{ km/h}$

Geschwindigkeit am inneren Rad: $v_i = 2 \text{ km/h}$

Spurweite: $d = 577 \text{ mm}$

Erwünschter Wenderadius: $R_{Desired} = \frac{v_a + v_i}{v_a - v_i} * \frac{d}{2} = 865,5 \text{ mm}$

Der Wenderadius kann beliebig klein oder groß sein. Der Nullpunkt des Wenderadius kann erfolgen, wenn die innere Geschwindigkeit den negativen gleichen Betrag wie die äußere Geschwindigkeit im positiven Betrag hat.

4.3 Reifen-Konzept

Der Anforderungskatalog gibt vor, dass die Reifen wartungsfrei und aktiv gedämpft sein sollen. Auch sollen die Reifen für nassen Oberflächen, Geländegängigkeit, Geröll und Sand geeignet sein. Die Reifen dürfen bei hoher Steigung nicht nach unten gleiten. Eine weitere Anforderung vom Skid Steering-Konzept an die Reifen ist die geringe Seitenlaufsteifigkeit und die Standhaltung der Belastung durch die hohen Seitenkräfte an der 360°-Wendung an einer Stelle. Diese Anforderungen können durch die additiv-fertigungsorientierte Konstruktion der Reifen und durch die Struktur erfüllt werden. Die von den TDAF-Studierenden additiv zu fertigenden Reifen werden in der Abbildung 4-11 dargestellt:

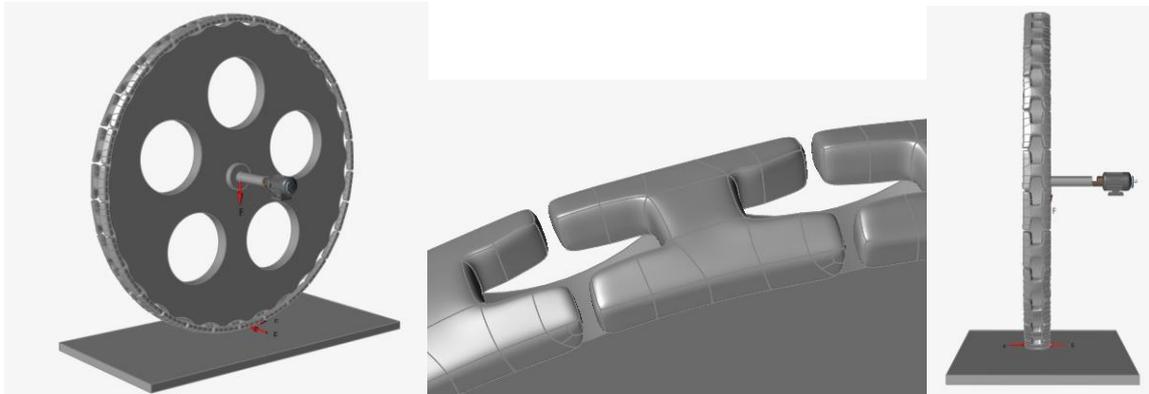


Abbildung 4-11 Ansichten des additiv fertigungsorientierten Designs der Reifen [55]

Der Nachteil ist die relativ schlechte Hitzebeständigkeit vom Materialstoff Thermoplastisches Polyurethan im längeren Zeitraum. Um den Nachteil auszugleichen, ist Gummi als Lauffläche erforderlich. Weil der mathematische Ansatz für die Seitenkräfte aufgrund der unbekanntenen Steifigkeit noch ausbaufähig ist, werden die weitere Erforschung und die Weiterentwicklung iterativ erfolgen. [55] Nun werden auch die konventionellen Fahrradreifen berücksichtigt.

Das Gesamtgewicht des Elektrorollstuhls kann inklusive elektrischer Systeme und Personengewicht bis zu 250 kg betragen. Jedes Rad muss eine Tragfähigkeit von mindestens 62,5 kg auf der flachen Ebene aufweisen. Durch die Änderung der Steigung wird sich die Gewichtsverteilung auf den Achsen ändern, daher sollte jedes Rad nach Steigung oder Gefälle eine Tragfähigkeit bzw. Achslast von mindestens 125 kg aufweisen.

Da der Reifendurchmesser nach grober Formel einem Drittel der Bordsteinhöhe (ca. 12 cm) oder einer Stufe (17 cm) entsprechen soll, muss er zwischen 36 cm und 51 cm sein. Da die Hindernisse in einigen Innenbereichen in Deutschland an manchen Stellen erstmal bleiben, sollte ein Raddurchmesser von mindestens 51 cm angepeilt werden. Die weiteren Gründe für die Anpeilung eines Raddurchmessers von 51 cm bzw. 20 Zoll ist die aktuelle Marktverfügbarkeit von Radnabenantrieben mit einer maximalen Gesamtlänge von 1200 mm. Je größer der Raddurchmesser ist, desto instabiler wird der Elektrorollstuhl sein. Grund dafür sind die Seitenneigung und Massenschwerpunkt- bzw. Sitzhöhenverlagerung wegen der Einhaltung der maximaler zulässigen Gesamtbreite von 700 mm für die Teilhabe am öffentlichen Nah- und Fernverkehr

Die Reifenbreite soll möglichst schmal sein, um ausreichend Platz für die Bein- und Fußstütze eines Erwachsenen bieten zu können. Die wichtigen Entscheidungspunkte sind die ausreichende Traglast, die Reifenbreite und der angemessene Preis. Die Übersicht der ausgewählten Reifen wird hier aufgezeigt.

Bezeichnung	Felge	Reifen- breite	Traglast	Gewicht	Preis
Schwalbe Rocket Ron [52]	30x406	57	115 kg	435	59,95
Schwalbe Super Defense Pick Up [56]	60x406	60	125 kg	910	39,90



Abbildung 4-12 Schwalbe Rocket Ron [52] Abbildung 4-13 Schwalbe Super Defense Pick Up [56]

Zurzeit gibt es nicht viele 20 Zoll-Reifen, die die Anforderung einer Traglast von mindestens 125 kg erfüllen können. Der Reifen Rocket Ron erfüllt die Anforderung der Traglast nicht, aber er ist aber mit seinem Reifenprofil ist er für die Geländegängigkeit besonders geeignet. Vielleicht findet man eine bessere wartungsfreie Reifenlösung mit hoher Traglast, niedriger Kreis-segmenthöhe in der Kompatibilität mit Heinzmann CargoPower RN111 in einem Arbeitspaket.

4.4 Steuerungstechnik

Hier werden einige Ausblicke für die Steuerungstechnik aufgezeigt, um Impulse in einem Arbeitspaket in der Roadmap zu geben. Der viermotorige Allradantrieb mit der Lenkungsart von Skid Steering wird dafür ausgewählt. Ein E-Bike hat einen Controller für eine einfache Steuerungstechnik. Die Herausforderung für das LIAM-Projekt ist der Aufbau einer übergeordneten Steuerung für vier Antriebsmotoren bzw. für einen BLDC-Motor, wo das Drehmoment und die Drehzahl in jedem Moment unterschiedlich sein sollen.

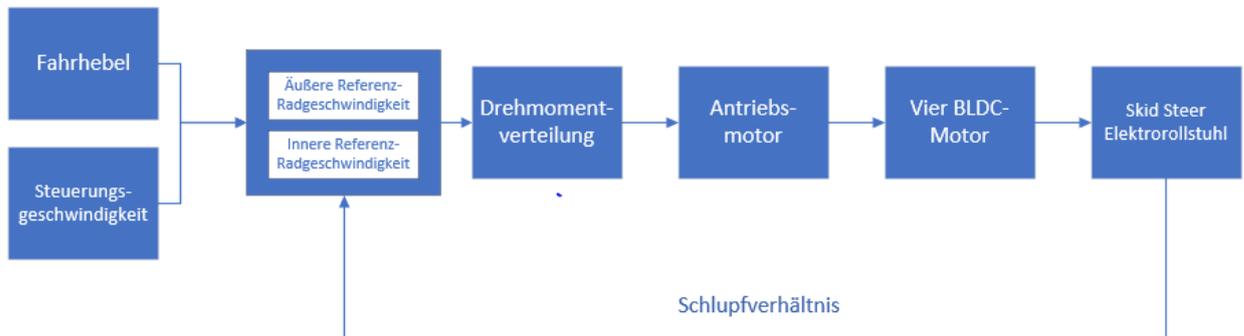


Abbildung 4-14 Gesamtsystem einer Steuerung eines LIAM-Elektrollstuhls in Anlehnung nach [53]

Die Abbildung stellt ein Gesamtsystem dar. Der Aufbau einer Anwendung eines BLDC-Motors erfolgt nach Grunddiagramm von Patel (siehe Abbildung 2-8)

Die Fahrtrichtung wird mithilfe der mit der Hand betätigten Joystick vorgegeben, der in die entsprechende Stellrichtung ausgerichtet wird.

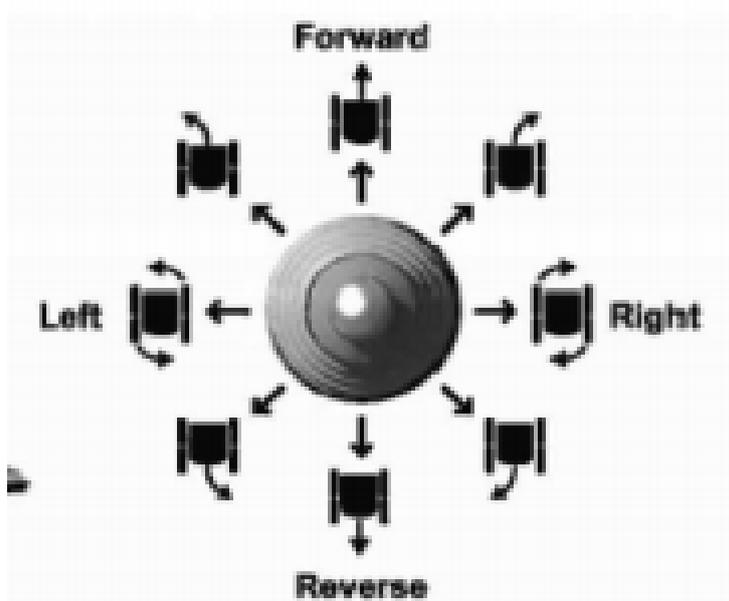


Abbildung 4-15 Stellrichtungen und Fahrtrichtungen in der Joystick-Steuerung [57, p. 72]

Die Entwicklung eines Steuerungssystems wird in einem neuen Arbeitspaket vergeben.

4.5 Bremskonzept

Die E-Bike-Frontantriebe haben keine elektromagnetischen Bremsen oder eine Art Betriebsbremse, daher werden die externen Bremsanlagen eingesetzt. Im E-Bike ist die hydraulische Scheibenbremse sehr verbreitet, bei der die Teil- oder Vollbremsung vom Handgriff der E-Bike-Fahrer*in ausgeführt wird.

Je nach Fahrsituation sind folgende Bremsarten [19] erforderlich für das Bremssystem im LIAM-Elektrollstuhl:

- -Feststell- bzw. Handbremse (elektronisches Luftfederkraftfahrwerk gegen Abrollen auf Steigung oder Gefälle)
- -Betriebsbremse für Beharrungs- und Verzögerungsbremung (Kombination aus direkter Drehmomentsteuerung und elektronischem Luftfederkraftfahrwerk)
- Indirekte Bremsung durch Rollwiderstand und Abhangkraft
- Notbremse (Batterieausfall, Steuerungsausfall, Gefahrensituation)

Das Bremssystem soll möglichst in der Joystick-Steuerung ohne klassischen Handgriff integriert werden. In modernen Elektrollstühlen sind die Magnetbremsen eingesetzt, welche der Brake-By-Wire-Technologie zugeordnet ist. Für die Not- bzw. Feststellbremse ist der Aktuator montiert.



Die Abbildung stellt die Fahrrad-Scheibenbremsanlage dar. Die Scheibenbremsanlage ist die einzige Option zur kompakten Bremsanlage.

Auf dem Markt ist die elektrische Bremstätigung für Fahrrad-Scheibenbremsen nicht verfügbar, da die meisten hydraulischen Bremsen für Menschen ohne Bewegungseinschränkungen konzipiert sind, die mit Handgriff die Bremse betätigen können. Inoffiziell entdeckt auf Youtube oder einen Blog, ist die Brake-by-Wire-Technologie für die Bremsen mit Scheibenbremse vorhanden und zurzeit nicht marktreif. Die Integration des handkraftfreien Bremssystems ist mit Brake-by-Wire-Technologie theoretisch möglich. Die Sicherheitsvorschriften für Brake-by-Wire-Technologie sind zu beachten.

Abbildung 4-16 Fahrrad-Scheibenbremsanlage [75]

Das Bremskonzept kann in einem neuem Arbeitspaket entwickelt werden, wenn die Kombination aus den folgenden aufgelisteten Punkten möglich ist:

- Elektrisch federkraftbetätigte Bremsanlage
- Eigenkonstruktion nach Leimklemme-Vorbild (Leimklemme kann die Scheibenbremse erklimmen und das Fahrzeug zum Stillstand bringen, wenn die elektrische Anlage ausfällt oder keine Griffkraft vorhanden ist)
- 4-löchige Aufnahme für Scheibenbremse am Frontantrieb

Falls die Nanotec-Produkte doch genommen werden, ist nur ein Konzept für Feststellbremse nötig.

4.6 Sitzkonzept

Der Sitzkonzept soll ein*e Rollstuhlnutzer*in individuell anpassen können und wird hier aufgezeigt.

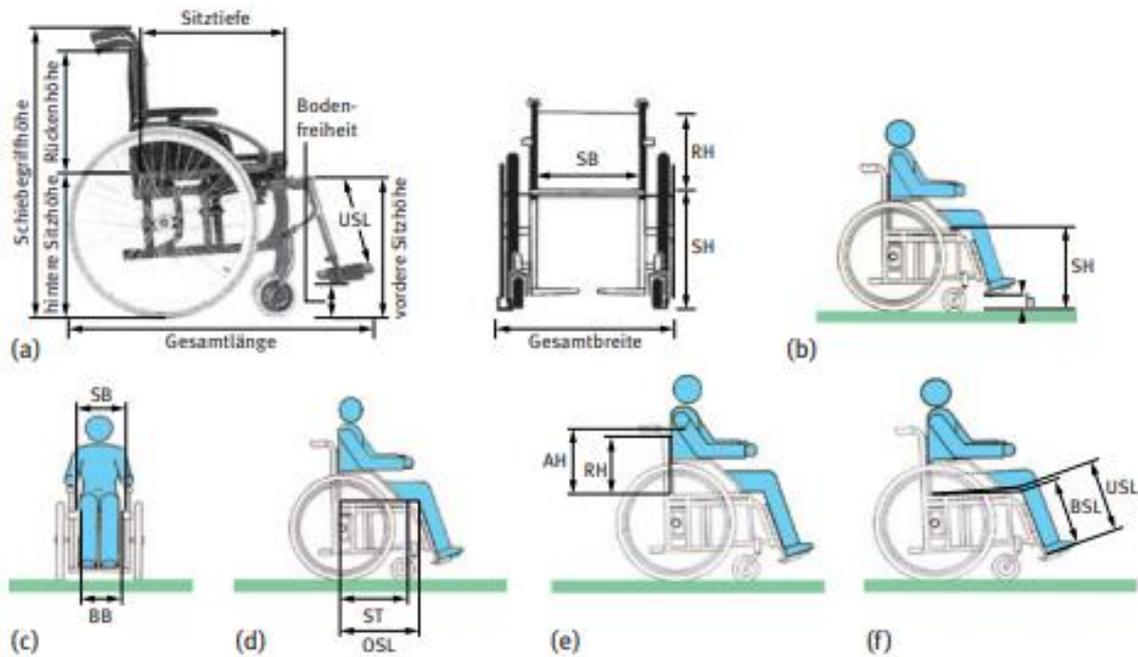


Abbildung 4-17 Rollstuhl- und Körpermaße für Einstellungsempfehlungen (Abkürzungen siehe Text): (a) Gesamtmaße, (b) Sitzhöhe, (c) Sitzbreite, (d) Sitztiefe, (e) Rückenlehnenhöhe, (f) Beinstützenlänge

- Sitzbreite (SB) = Beckenbreite (BB) + 2 cm,
- Sitztiefe (ST) = Oberschenkelhöhe (OSL) – 7,5 cm,
- Rückenlehnenhöhe (RH) = Achselhöhe (AH) – 10 cm,
- Beinstützenlänge (BSL) = Unterschenkelhöhe (USL) – 1,5 cm,
- Bodenfreiheit (h_{min}) = 4 cm (bei Adaptivrollstühlen auch etwas geringer möglich, Tischunterfahrbarkeit muss gewährleistet sein),
- Sitzgefälle nach hinten (max. 10 Grad),
- Sitzhöhe eines Standardrollstuhls (SH) = 52 cm
- Sitzhöhe zum Trippeln auf dem Boden: \approx 42 cm, von den Körpermaßen abhängig: Hüft-/Knie-/Fußgelenkwinkel sollten bei Bodenkontakt jeweils 90 Grad betragen. [2]

Die Einstellungsempfehlungen beim Rollstuhl gelten auch beim Elektrorollstuhl.

Um die Anforderungen am Sitz mit Steh- und Liegefunktion zu erfüllen, ist das vom Hersteller Permobil patentierte Sitzkonzept mit Sitzhöhenverstellbarkeit, Steh- und Liegefunktion sehr geeignet für die leichtbauorientierte Sitzkonzeptentwicklung. Das Permobil Sitzkonzept wird in der folgenden Abbildung gezeigt:

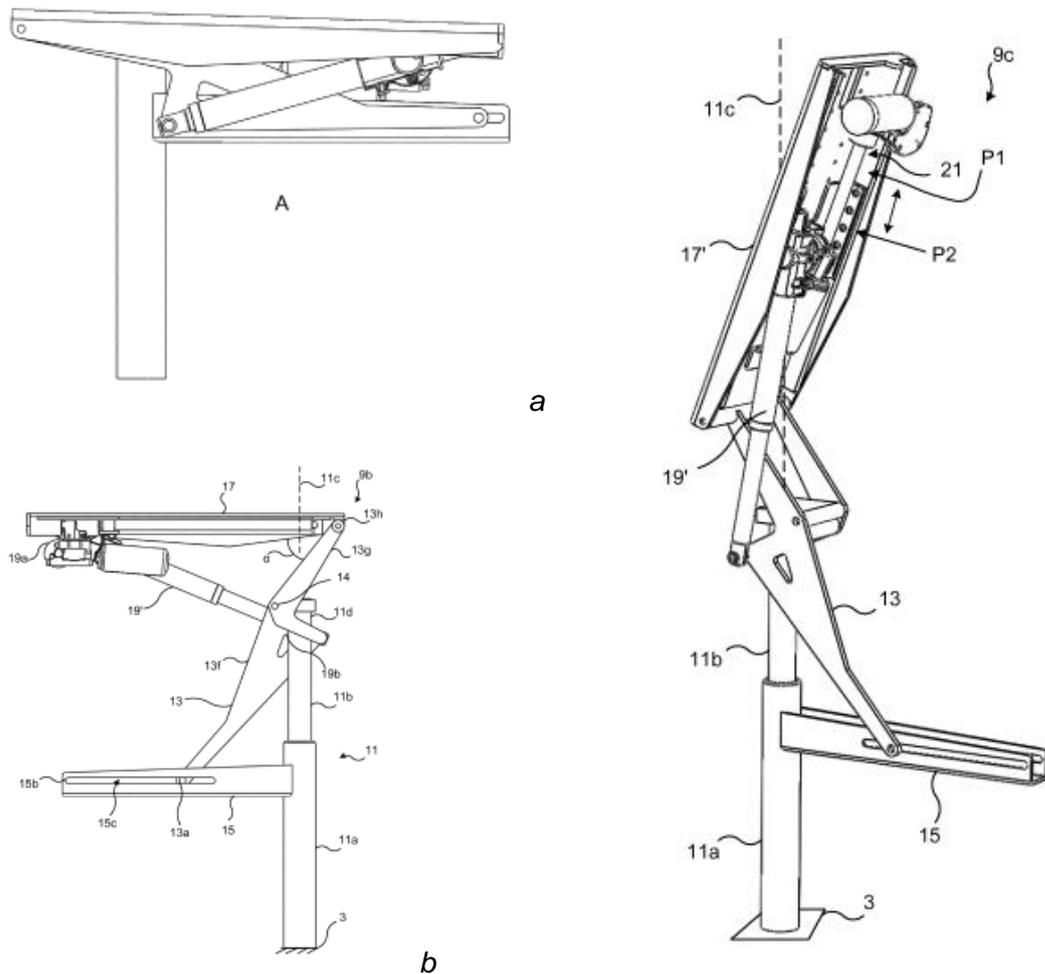


Abbildung 4-18 Ansichten eines Permobil-Sitzsystem a) Normalzustand [68] b) Erhöhte Sitzhöhe mithilfe der Hubsäule [68] c) Kombination der erhöhten Sitzhöhe und winkelverstellbaren Sitzplatte [68]

Die Permobil-Sitzsystem -Teile können optimiert und additiv gefertigt werden. Die Potentiale für die additive Fertigung und Modularisierung sind vorhanden. Es ist fraglich, ob die großen Teile aufgrund des Bauraums eines Metalldruckers modularisiert und additiv gefertigt werden können.

Die automatische Sitzwinkelhankelung bzw. Sitzwinkelausgleich im Fall der Steigung ist mit diesem flexiblen Sitzsystem möglich, wenn die Steuerungstechnik es inkludiert. Die Sitzhöhenverstellbarkeit muss die Kollision zwischen den Füße und dem geneigten Boden beim Sitzwinkelausgleich durch Messsensorik vermeiden.

Eine individualisierte, funktionsintegrierte Sitzschale mit Wabenstruktur soll als Potential für die Gewichtseinsparung vorgemerkt werden. In der Masterarbeit wird das Sitzkonzept aus zeitlichen Gründen nicht umgesetzt. Das Sitzkonzept wird im LIAM-Projekt als neues Arbeitspaket vorgeschlagen.

4.7 Batteriekonzept

Um die Antriebsmotoren mit 48 V Spannung und anderen Stellmotoren, Steuerungselektronik und Bremsanlage mit Spannung im Spannungsbereich von 12 V bis 36 V mit elektrischer Energie zu versorgen, wird die Energieversorgungseinrichtung bzw. Energiequelle mit Fokus auf Lithium-Ionen konzipiert. Andere Energiequellen werden nicht berücksichtigt. Die 12V-Batterien werden hier nicht ausgewählt, weil der Strombedarf der Steuerungselektronik und der Stellmotoren zu klären ist.

Die Hauptanforderungen, die sich an das Batteriekonzept ergeben, sind folgende:

- zuverlässige Energieversorgung trotz Batterieausfall
- Energieversorgung mit mindestens 12V für externe elektrische Motoren und/oder 48 V Ausgangsspannungen für Antriebsmotoren
- IP 65 Schutzklasse (Grund Lithium ergibt sich aus Salz)
- Überwachung der Akkukapazität mithilfe des Batterie-Management-Systems (BMS)
- Möglichst geringes Batterie-Gewicht
- Frei von Giftstoffen
- Flexibilität der Akkukapazität nach Anzahl der Akku-Einheiten

Elektrorollstuhlfahrer*innen bevorzugen die Redundanz der Stromversorgung statt der zentralen Stromversorgung, weil der Ausfall der Energieversorgung nicht kalkulierbar ist. Außerdem ist in der Marktanalyse auffällig, dass einige Elektrorollstühle doppelte Akkus haben. Es wird angenommen, dass eine Panne der zentralen Stromversorgung am Elektrorollstuhl erheblichen Stress im Arbeitsalltag eines/einer berufstätigen Elektrorollstuhlfahrer*in bedeuten kann.

Die Akkukapazität soll durch die Reduzierung oder Erhöhung der Anzahl der Lithium-Ionen-Batterieblöcke mithilfe der Parallelschaltung flexibel sein. Die Elektrorollstuhlfahrer*innen können den Tagesablauf planen und die Streckenlänge bestimmen und die bestimmte Anzahl an Batterien, in die Batteriehalterung legen und mit einer anderen Batterie per Kabel in die Parallelschaltung anschließen. Die Reduzierung der Akkukapazität kann Energie sparen, wenn sich das Zuladungsgewicht nicht erhöht und wenn sich das Gesamtgewicht sinkt.

Tabelle 33 Übersicht der Batterievergleich [58] [59] [60]

48V-Batteriehersteller	Abmessung LxBxH	Gewicht	BMS	PS	Schutz-Masse	Bordspannung	Entladestrom	Ladezyklen	Akkukapazität	Preis	Preis pro Ah	Akkukapazität pro kg
Einheit	[mm x mm x mm]	[kg]			IP	[V]	[A]		[Ah]	[€]	[€]	[Ah/kg]
Liontron LiFePO4 LX48-50	515x485x140	36,5	Ja	Ja	n.a.	51,2	50	6000	50	921	18,42	1,370
China Selection Offgridtec	n.a.	40	Ja	Nein	n.a.	47,6	50	>2000	100	2443	24,43	2,500
AES	416x157x83	5,9	Ja	Ja	65	48	30	3000	15	595	39,67	2,542
Mattro Battery EP 44	435x307x182	32	Ja	Ja	65	50,4	220	1500	87,6	5148	58,77	2,738
Mattro Battery EP 88	702x307x182	56,5	Ja	Ja	65	46,8	220	1500	175,3	7316	41,73	3,103
Akkupack	300x250x140	15,3	Ja	Nein	n.a.	48	60	800-1000	60	979	16,32	3,922

Akkupack hat eine hohe Energiedichte von 3,922 Ah/kg, beinhaltet jedoch giftiges Kobalt im Akku.

Nun muss man dem Entladestrom entnehmen, wie viele Akkus mindestens als zentrale Energiequelle oder einzeln gebraucht werden, damit die Leistungselektronik bei der Spitzenleistung von 5400 W nicht überhitzt wird.

$$I_{Ges,max} = \frac{P_{ges}}{U_{Bord}} = \frac{4 * 1350 W}{48 V} = 112,5 A$$

Die Spitzenstromstärken von 112,5 A werden auf die Anzahl der Motoren im Fall der Parallelschaltung verteilt. Die Gesamtspannung ist konstant:

$$I_{Einzel} = \frac{I_{ges}}{4} = 28,125 A$$

Da die Vollaussnutzung der Spitzenleistung von bis zu 5400 W nicht erfolgt, wird neu berechnet, wie viel Strom der LIAM-Elektrorollstuhl für ca. 4074 W elektrische Leistung für die Fahrt an der 36% steilen Dünenlandschaft mit Rollreibungsbeiwert von 0,2 und mit Geschwindigkeit von 7 km/h benötigt.

$$I_{Ges,erforderlich} = \frac{P_{ges}}{U_{Bord}} = \frac{4074 W}{48 V} = 84,875 A$$

Die Stromversorgung von 84,875 A soll mit der Anzahl der ausgewählten preiswerten Akkus gedeckt werden, damit der Entladestrom nicht überschritten wird.

Der Akku von AES wird worden mit folgender Begründung empfohlen:

- Hohe Energiedichte mit 2,542 Ah pro kg
- Geringes Gewicht von 5,9 kg pro Akku
- Optimale Abmessung von 416 mm x 157 mm x 83 mm pro Stück
- Ladezyklen von 3000 entspricht 8 Jahren täglicher Nutzung.
- Kurze Ladezeit

Der Dauerentladestrom von 30 A reicht nicht für die zentrale Stromversorgung im Fall der Spitzenleistung aus. Der Strombedarf von 28,124 A für Einzelstromversorgung eines Antriebsmotors kann von AES Akku mit Dauerentladestrom von 30 A gedeckt werden. Vier Einzelversorgungen ermöglichen die Vollaussnutzung der Spitzenleistung von 5340 W. Die Kosten dabei lägen bei insgesamt 2380 Euro für die Beschaffung von vier AES-Akkus.

Die direkte Erhöhung der Akkukapazität wird nicht angewendet, da die Möglichkeit bestehen, externer Akku mitnehmen und den leeren Akku gegen einen neuen Akku überall mithilfe einer Begleitperson, Freunden oder auch selbstständig einfach zu tauschen.

4.8 Gewichtsabschätzung

Tabelle 34 Liste der Teile nach Gewicht

Bezeichnung der Teile	Stückgewicht	Mengeein	Gewicht
Antriebsmodul			31,84
Antriebsmotor RN111	5,1	4	20,4
Reifen	0,93	4	3,72
Reifenschlauch	0,63	4	2,52
Felgenband	0,05	4	0,2
Fahrradfelgen	0,53	4	2,12
Speichen inkl. Nickel	0,02	144	2,88
Bremsmodul			2,4
Bremssattel	0,3	4	1,2
Feststellbremse	0,2	2	0,4
Federzug	0,2	4	0,8
Batteriemodul			21,7
Batterie	4,8	4	19,2
Kabel	0,5	1	0,5
Batteriehalterung	2	1	2
Mittelrad-Modul			7
Lenkrolle	1,4	1	1,4
Befestigungsplatte	0,5	1	0,5
Linearantrieb	2,7	1	2,7
Gelenkstange	0,8	2	1,6
Schraubenverbindung	0,02	20	0,4
Rollenlager	0,05	8	0,4
Grundmodul			10,6
Stellmotoren für Winkelausgleich	1	4	4
Federung	0,4	4	1,6
Struktur / Systemprofile			5
Sitzmodul			20
Stellmotor für Liegefunktion	0,7	1	0,7
Stellmotor für Beinstütze	0,7	1	0,7
Hubmotor	2,5		
Rückenlehne			
Sitzplatte			
Beinstütze			
Seitenteile			
Hecküberhangmodul			10
Quadrat-Systemprofil			
Doppelkant-Systemprofil			
Anhängerkupplung			
Schiene für Soziussitz			
Steuerungsmodul			3
Gesamtsumme			106,54

Die vorläufige Gewichtsabschätzung ergibt, dass der LIAM-Prototyp bis 107 kg schwer sein kann. Die abschließende Gewichtsabschätzung wird nach der Struktur- und Sitzkonzeptentwicklung validiert. Die Chance besteht, das Gewicht unter besonderer Berücksichtigung der Topologie-Optimierung und des Additiven Fertigungsverfahrens zu senken. Es ist wenig realistisch, die Anforderung von mindestens 30 % Gewichtsreduzierung im Vergleich zum ausgewählten Elektrorollstuhl Caterwil GTS 4WD 98 kg Eigengewicht. Mindestens 30 % Gewichtsreduzierung kann im Vergleich zu Permobil F5 mit 186 kg Eigengewicht erreicht werden.

4.9 Reichweite-Methode

Hier wird eine vereinfachte Methode für Reichweite erarbeitet. Die Rekuperation, Wartezeit, Stand-By-Modus und Energieverbrauch für die Steuerungselektronik werden nicht berücksichtigt.

Beim Fahren gibt es manchmal eine Beschleunigungsphase je nach Fahrsituation z.B. Ampeln, Hindernisüberwindung, Teil- oder Vollbremsen, Fußgängerstreifen, Ein- und Ausfahren beim Aufzug, Schrittgeschwindigkeit in der Fußgängerzone, scharfe Kurvenfahrt. Man nimmt an, dass die Batteriekapazität für die Beschleunigungsphase 40 % der Strecke und 60 % für den transienten Phase genutzt wird. Die Werte sind aus dem eigenen Excel-Berechnungsskript für die Gesamtmotorleistung in Abhängigkeit von Steigung und Geschwindigkeit im transienten Fahren und nicht transienten Fahren ermittelt. Der Wert für die Akkukapazität wird dem ausgewählten Akkumulator AES Akku vom Firma AES Akku Energie Systeme GmbH im Kapitel 4.7 entnommen. Der transiente Anteil von 60 % wird angenommen, wenn der Elektrorollstuhl in der Stadt unterwegs ist.

Nominelle Bordspannung: $U_{Bord} = 48 V$

Akkukapazität: $C_{Akku} = 48 V * 15 Ah = 720 Wh$

Durchschnittliche Steigung: 2 % Steigung: $\alpha_{St} = \arctan(0,02) = 1,146^\circ$

Durchschnittliche Geschwindigkeit: $v_{\emptyset} = 8 \frac{km}{h} = 2,22 \frac{m}{s}$

Durchschnittliche elektrische Leistung im transienten Fahren:

$$W_{el,transient} = 656,9 W$$

Durchschnittliche elektrische Leistung im nicht stationären Fahren:

$$W_{el,nicht\ transient} = 286,53 W$$

Transienter Anteil: $\rho_{transient} = 60 \% = 0,6$

Nicht transienter Anteil: $\rho_{nicht\ transient} = 40 \% = 0,4$

Theoretische Reichweite:

$$s_{max} = v_{\emptyset} * \left(\frac{C_{Akku}}{W_{el,transient}} * \rho_{transient} + \frac{C_{Akku}}{W_{el,nicht\ transient}} * \rho_{nicht,transient} \right) = 15,57 km$$

Mit einer Batterie namens AES 2.0 mit 15 Ah kann der LIAM-Prototypbau die Reichweite bis zu 15,57 km bei einer durchschnittlichen Steigung von 2 % und einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 8 km/h bei der Stadtfahrt erreichen. Je höher die Anzahl der mitgeführten Akkus mitgenommen wird, desto kann sich die Reichweite mit 15,57 km pro AES-Akku erhöhen. Bei vier Stück AES Akkus bzw. einer Reichweite von 62,28 km kann der LIAM-Prototypbau schon weiter als viele auf dem Markt verfügbaren Elektrorollstühle fahren. Der Anteil des transienten Fahrens kann erhöht werden, wenn die Fahrsituation fließend ist.

In Übereinstimmung mit ISO 7176-4:2008 ist die Reichweite noch zu validieren.

4.10 Spezifikation vom LIAM Konzept und Vergleich

Die Spezifikationen für den LIAM-Prototypbau sind vorläufig festgelegt und im Laufe des LIAM-Projekts in einer Testfahrt zu validieren und verifizieren.

Tabelle 35 Vergleich mit den verfügbaren Produkten

Produkteigenschaften	LIAM	Elektrorollstuhl
Wenderadius	637,64 mm	549 mm (iBOT PMD)
Leergewicht	107 kg	110 kg (iBot PMD)
Zuladung	143 kg	205 kg (Observer Maximus) 150 kg (Permobil F5)
Abmessung	ca. 1100 mm x 700 mm x Höhe (tbd)	
Höchstgeschwindigkeit	16,27 km/h	30 km/h Mattro Ziesel 20 km/h Genny Urban
Akkukapazität	15 Ah pro Akku-Einheit 60 Ah für 4 Akkus	87,6 Ah (Mattro Ziesel)
Reichweite	15,57 km pro Akku-Einheit Bis zu 62,28 km mit 4 Akkus	200 km (Ottobock) 35-38 km (viele Elektroroll- stühle)
Nennleistung	1000 W – 2400 W	8,8 kW (Mattro Ziesel)
Spitzenleistung	Bis zu 5340 W	8,8 kW (Mattro Ziesel)
Nennsteigung	8,9 °	45° (Observer Maximus)
Maximale theoretische Steigfähigkeit	20 °	100 % (Observer Maximus)
Bremsanlage	Siehe Bremskonzept	Magnetbremse

Im Bereich der Energiequelle kann die Akkukapazität nach Bedarf erhöht werden. Das Zuladungsgewicht soll in der Konzeptentwicklung einer Struktur validiert werden.

4.11 Kostenkalkulation

Die Kostenschätzung in der folgenden Tabelle zeigt auf, wie viel Euro ein Prototypbau kosten kann. Es ist zu bedenken, dass die Kostenschätzung den drei- oder mehrfachen Preis eines industrialisierten Konzepts entsprechen kann.

Tabelle 36 Kostenschätzung eines Prototypbaus

Bezeichnung	Teilkosten
Antriebskonzept	4030 €
Mittelradkonzept	500 €
Reifenkonzept	400 €
Steuerungskonzept	1500 €
Bremskonzept	1000 €
Sitzkonzept	3000 €
Batteriekonzept	3000 €
Strukturkonzept	2000 €
Zwischenkostensumme	15430 €
Arbeitskostenzuschlag 20 %	3086 €
Gesamtkostensumme	18516 €

In der Endmontagelinie in Deutschland und mit einem guten Verhandlungsgeschick kann ein industrialisierter LIAM-Elektrorollstuhl für zwischen 9.000 Euro und 12.000 Euro verkauft werden.

Beim Antriebs- und Batteriekonzept ist es zu empfehlen, halbjährlich eine Preisanalyse und Marktanalyse aus zwei Gründen durchzuführen:

- günstigerer Lithium-Ionen-Marktpreis
- Weiterentwicklung der Leistungsdichte im Bereich E-Mobilität z.B. Axialflussmaschine

5 Modularität

Das ausgewählte Konzept ist der LIAM 4WD Elektrorollstuhl mit Mittelrad hinter oder vor dem Massenschwerpunkt unter besonderer Berücksichtigung von Modularisierung und additivem Fertigungsverfahren. Hier werden die Konzepte mithilfe der Brainstorming-Methode systematisch ausgeschöpft, um eine Variantenvielfalt erreichen zu können.

5.1 Modularisierungskonzept

Ziel des LIAM-Modularisierungskonzepts ist es, möglichst verschiedene Varianten bei gleicher Bauteilegleichheit nach einer 3D-Knotenstruktur zu entwickeln und anschließend schnell im Prototypbau kostengünstig anzupassen. Hier werden möglichst alle Module für einen LIAM-Elektrollstuhl ausgeschöpft.

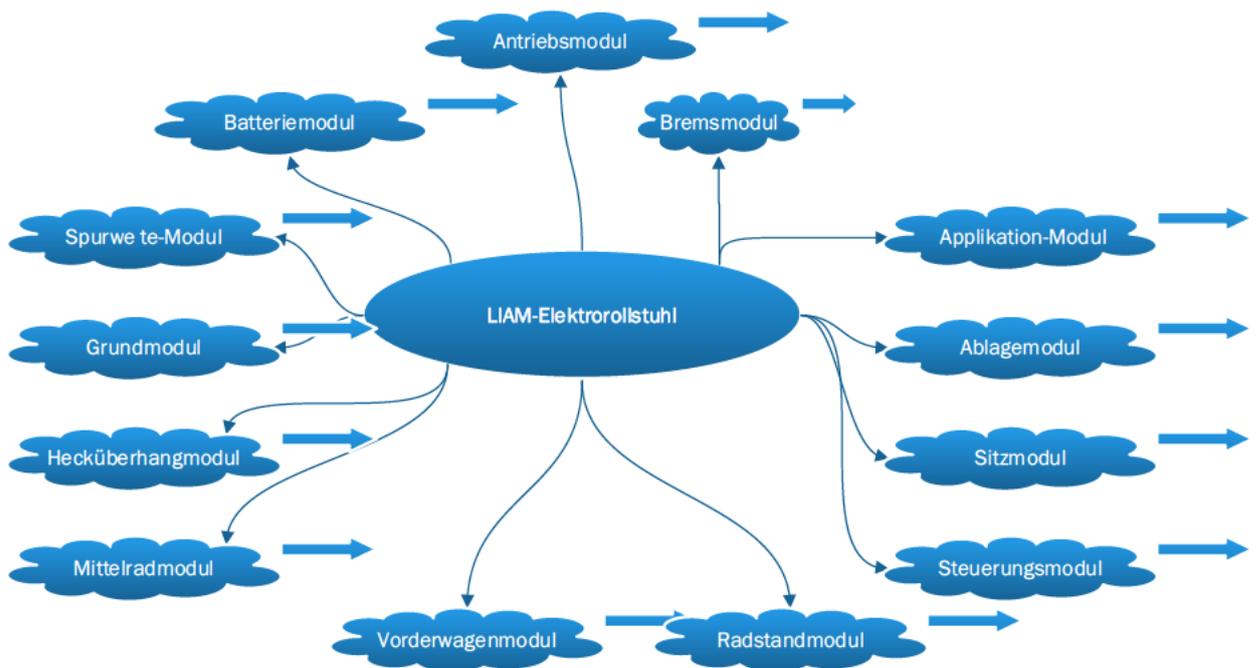


Abbildung 5-1 Brainstorming-Diagramm für LIAM-Elektrollstuhl (Quelle: Eigene Darstellung)

5.1.1 Grundmodul

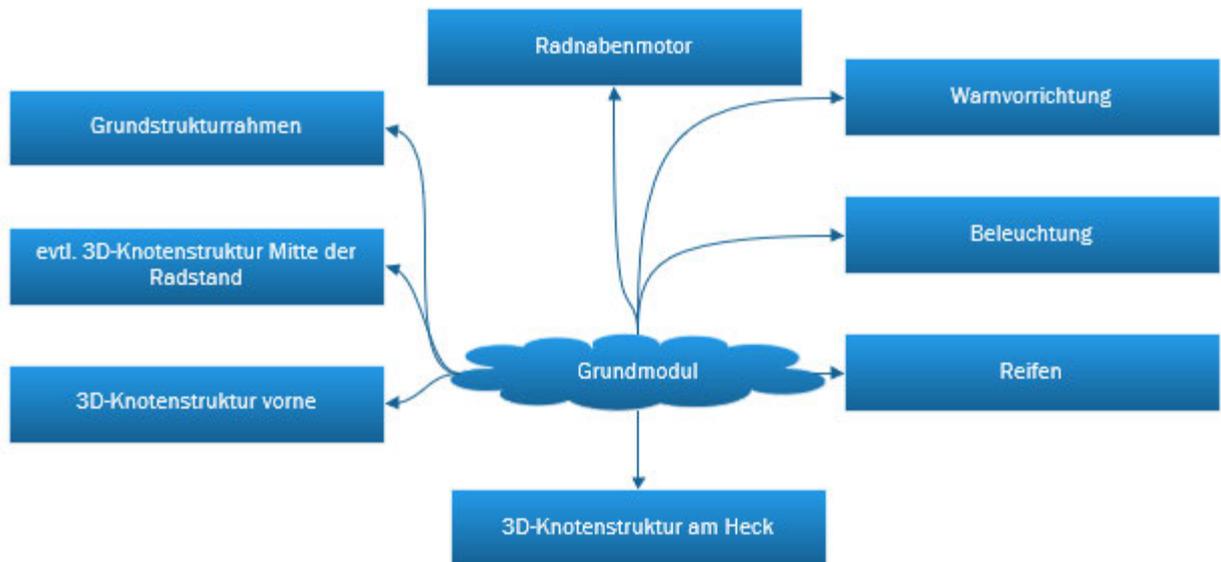


Abbildung 5-2 Grundmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Grundmodul kann Grundkomponente wie Knotenstruktur, Reifen, Radnabenmotor und Grundstrukturrahmen haben. Die Idee für den Grundstrukturrahmen ist, dass der Grundstrukturrahmen die Batteriehalterung, die Hubsäule für Sitzhöhenverstellbarkeit und die Sitzwinkelkantelung umfassen kann.

5.1.2 Vorderwagenmodul



Das Vorderwagenmodul befindet sich am Elektrorollstuhl vorne in Fahrtrichtung. Der Elektrorollstuhl benötigt Beleuchtung, Anti-Kipp-Vorrichtung und Kraftknotenöse im vorderen Bereich. Der Elektrorollstuhl kann zu einem Sportrollstuhl durch das Einmontieren eines Stoßfänger an einer 3D-Knotenstruktur für Elektrorollstuhl-Fußball und Hockey nach Bedarf umgebaut werden.

Abbildung 5-3 Vorderwagenmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

5.1.3 Mittelradmodul

Das Mittelradmodul umfasst den Linearantrieb für die Hebevorrichtung, die Lenkrollen und die Verbinder-Befestigungsplatte. Die Länge der zwei Gelenkstangen ist vom Spurweite-Modul und Radstandmodul abhängig. Die Hublänge kann optional gewählt werden, um mehr oder weniger Bodenfreiheit zu nutzen. Die lange Hublänge ist für die hohe Geländegängigkeit geeignet und kann auch im Innenbereich genutzt werden. Die kurze Hublänge kann für geringe Geländegängigkeit im Außenbereich genutzt werden.

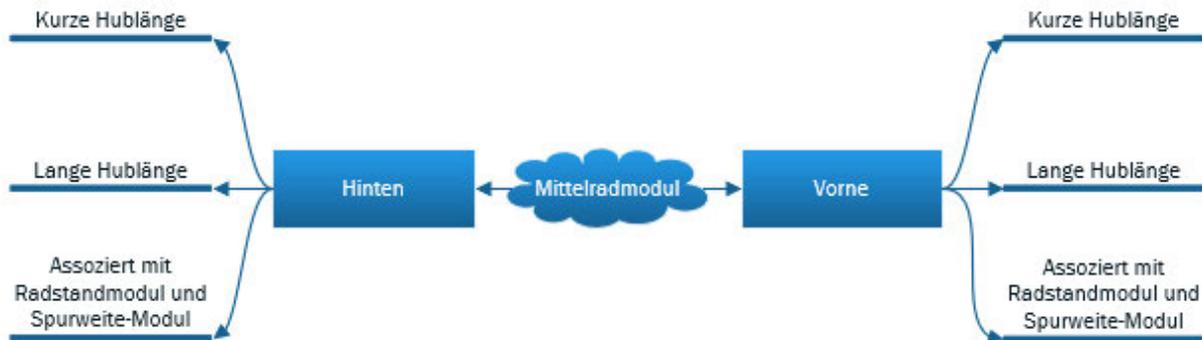


Abbildung 5-4 Mittelradmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

5.1.4 Radstandmodul

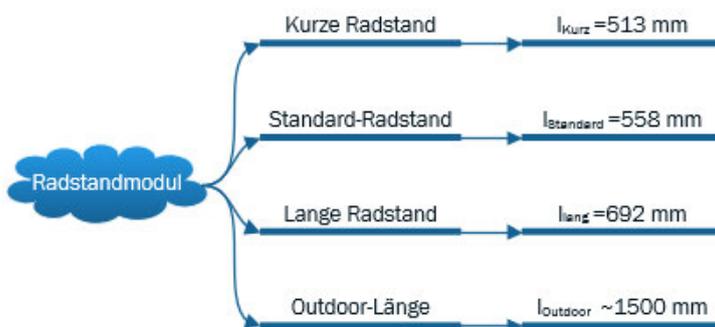


Abbildung 5-5 Radstandmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

Im Radstandmodul besteht zum Teil Variantenvielfalt und kann auch eine individuelle Länge bieten. Die Mindestlänge des Radstands beträgt 513 mm. Die Radstandlänge kann durch die Verstellung des Rad-durchmessers kleiner und größer werden. Der aktuelle Radstand beträgt 558 mm. Die DIN 12184 zulässige maximale Radstands-länge beträgt 692 mm.

5.1.5 Spurweite-Modul

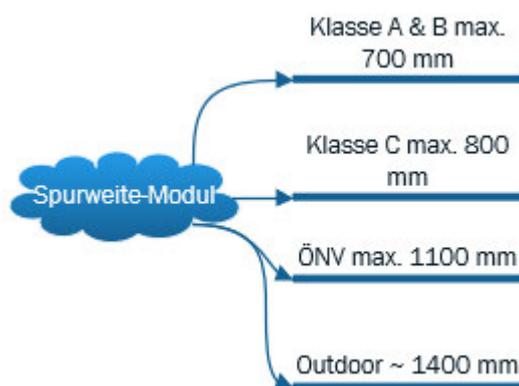
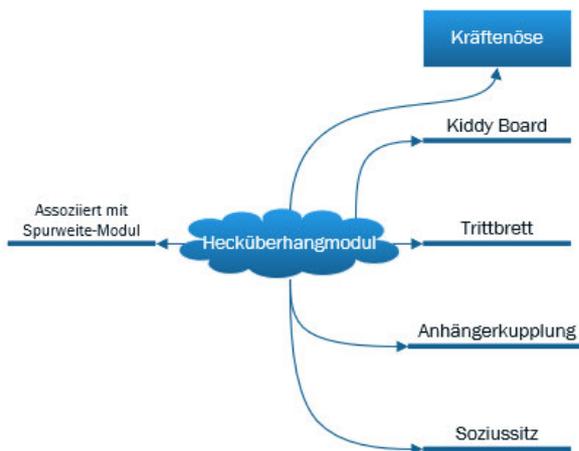


Abbildung 5-6 Spurweite-Modul (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Systemprofil- oder Profillänge wird nach Länge zugeschnitten. Die zugeschnittene Systemprofile werden mit 3D-Knotenstrukturen montiert.

Die Profil-Länge bzw. Breite kann individuell angepasst werden, um enge Türen oder Stellen passieren zu können.

5.1.6 Hecküberhangmodul



Das Hecküberhangmodul besteht aus einem festen Bestandteil (Kraftknotenöse) und optionalen Teile wie Kiddy Board, Trittbrett oder Anhängerkupplung. Es hängt direkt von Spurweite-Modul direkt ab und ist mit der 3D-Knotenstruktur kompatibel.

Abbildung 5-7 Hecküberhangmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

5.1.7 Sitzmodul

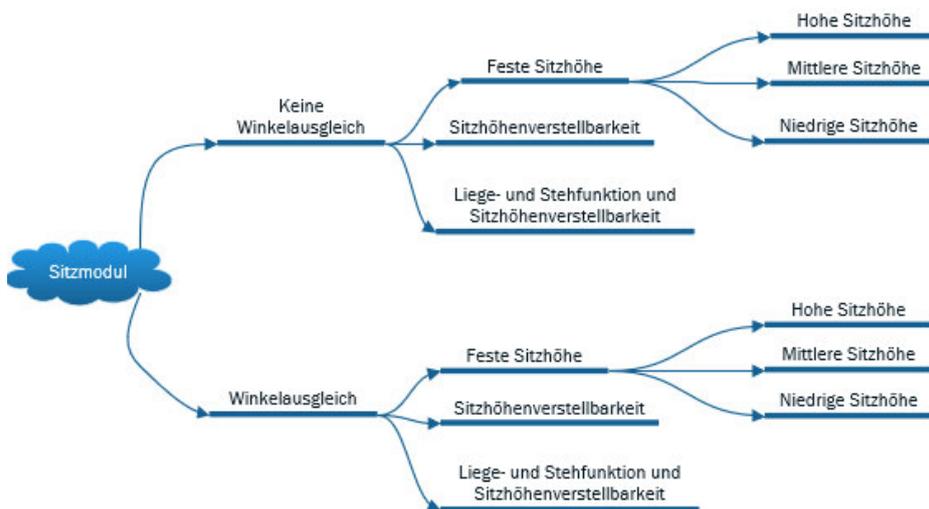
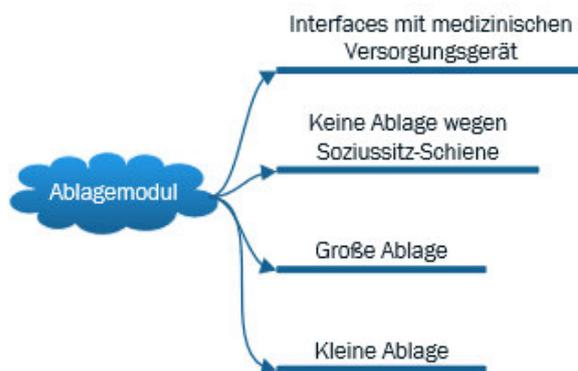


Abbildung 5-8 Sitzmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Winkelausgleich stellt die Sitzwinkelkantelung dar und kann die Kippgefahr durch eine Massenschwerpunkt-Verlagerung vermindern. Das Sitzmodul kann Sitzplatte, Rückenlehne, Beinstütze und Fußstütze in der Übereinstimmung der Anforderung von Sitzhöhenverstellbarkeit, Liegefunktion und Aufstehhilfe ergänzen.

5.1.8 Ablagemodul



Das Ablagemodul kann unterschiedlichen Optionen für die Ablage von Gegenständen oder medizinischen Geräten bieten. Eine große Ablage bedeutet ein großes Volumen. Es ist auch möglich, auf die Ablage zu verzichten, weil ein Rucksack mitgenommen und an den Hacken aufgehängt wird.

Abbildung 5-9 Ablagemodul (Quelle: Eigene Darstellung)

5.1.9 Antriebsmodul

Beim Antriebsmodul kann die Leistung nach Steigfähigkeit variieren. Im besten Fall soll die Rekuperation Bestandteil eines Antriebsmodul sein.

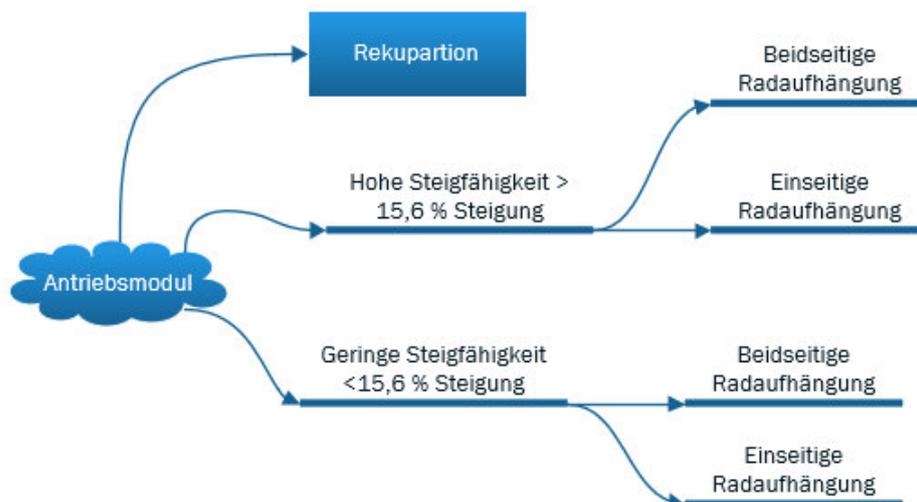


Abbildung 5-10 Antriebsmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Antriebsräder können ein- oder beidseitig aufgehängt werden. Wie beim Fahrzeugkauf können sich die Kunden entscheiden, wie leistungsstark ein Elektrorollstuhl sein soll. Es ist auch zu beachten, dass der Mehrbedarf zu Mehrkosten führen kann.

5.1.10 Bremsmodul

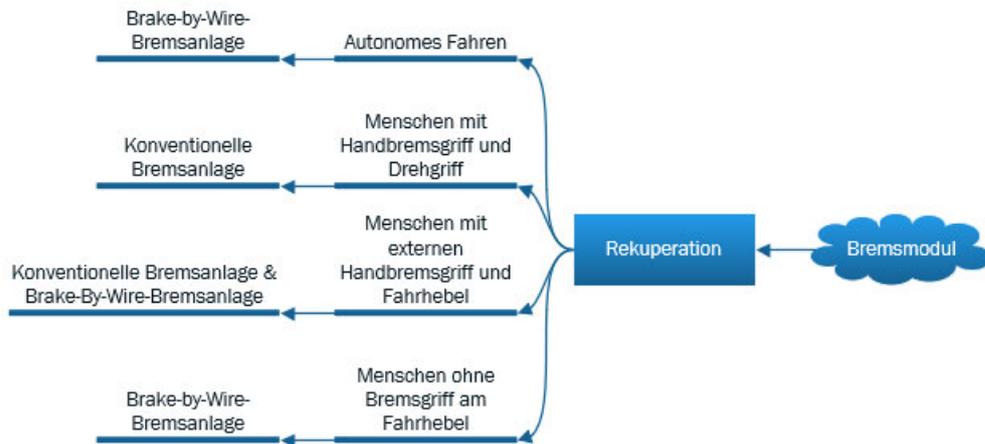


Abbildung 5-11 Bremsmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Bremsmodul hat zwei Möglichkeiten in der Betätigungsvorrichtung. Die konventionelle Bremsanlage und/oder Brake-By-Wire-Bremsanlage können eingesetzt werden. Die Betätigungsvorrichtung hängt von der ausreichenden Handgreifkraft des/der Elektrorollstuhlfahrer*in ab. Falls nicht ausreichend Handgreifkraft vorhanden ist, wird die Brake-By-Wire-Technologie eingesetzt. Sie umfasst die elektrischen Betätigungsvorrichtung, Übertragungsvorrichtung, mechanischen Betriebsbremse direkt an der Radachse und Feststellbremse in der Nähe von den Reifen. Das Bremsmodul wird mit dem Batteriemodul als Energieversorgungseinrichtung und Steuerungsmodul verbunden.

5.1.11 Steuerungsmodul

Der Fahrhebel bzw. Joystick soll Steuerungstechnik für Differentiallenkung, den Schnell- und Langsamfahrgang, das Bremssystem, das Steigungs- und Neigungswinkelausgleichssystem und die Sitzhöhenverstellbarkeit umfassen. Das Steuerungsmodul soll mit dem Batteriemodul angekoppelt werden. Das Steuerungsmodul beinhaltet verschiedene Optionen für eine Steuerung als Anpassung einer Elektrorollstuhlfahrer*in.

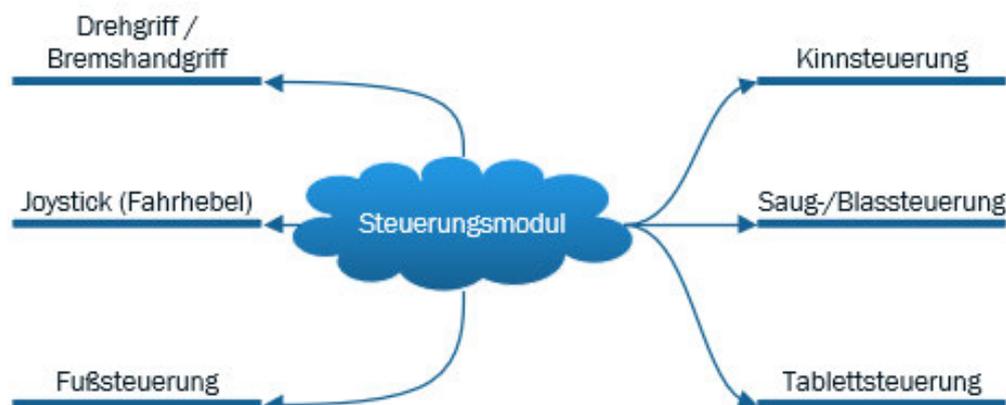


Abbildung 5-12 Steuerungsmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

5.1.12 Batteriemodul

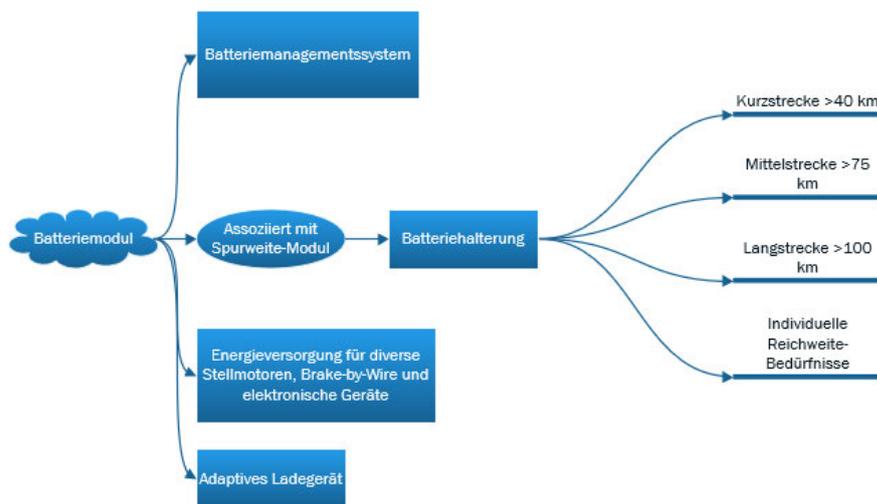


Abbildung 5-13 Batteriemodul (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Batteriemodul umfasst das Batteriemanagementsystem (BMS), Energieversorgung für externe Anlagen und Antriebsmotoren, das adaptive Ladegerät (USB-Ladebuchse) und die Batteriehalterung. Am Ende entscheidet man, wie viel Akku es für die Reichweite braucht.

5.1.13 Applikation-Modul

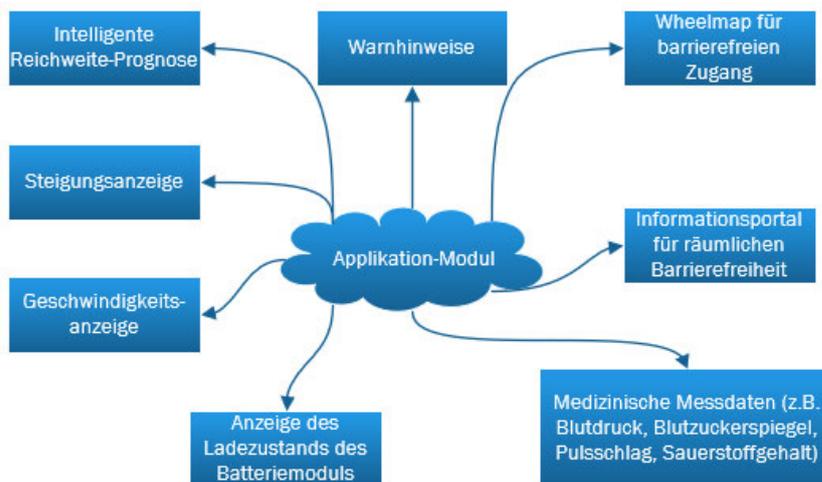


Abbildung 5-14 Applikationsmodul (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Applikationsmodul kann im Bildschirm oder als Smartphone-App implementiert werden. Der Informationsportal für räumliche Barrierefreiheit über kaputten Aufzügen oder fehlenden Rampen in öffentlichen Gebäuden ist unerlässlich für die Rollstuhlfahrer*innen und Elektrorollstuhlfahrer*innen, die gesellschaftlich teilhaben möchten.

6 Additive Fertigungsverfahren

Im Rahmen des Moduls Topologie und Designregeln für Additive Fertigungsverfahren wurden die aufgelisteten Teile von Studierenden nach der Orientierung des Additiven Fertigungsverfahrens bereits konstruiert oder werden zurzeit bearbeitet:

- Trittbrett
- Soziussitz hinter der Rückenlehne
- Beatmungsgeräthalter an der Kopfstütze
- Anhängerkupplung
- Reifen mit Integration der Federung

Im Ausblick des LIAM-Projekts in Zusammenhang mit dem TDAF-Modul wird die Konstruktion der AF-orientierten Teile vorgeschlagen:

- 3D-Knotenstruktur vorne
- 3D-Knotenstruktur hinten
- Mittelrad-Befestigungsplatte
- Klappstange für Mittelrad
- Rückenlehne
- Armlehne
- Sitzschale
- Kopfstütze
- Beinstütze
- Fußstütze
- Sitzhöheverstellbarkeit-Anlage
- Aufstehvorrichtung
- Hochkomplexer Bremsbelag
- Sauerstoffflasche-Halterung
- Batteriehalterung für vier Akkus

Die Auswahl eines additiven Fertigungsverfahrens z.B. SLM, BEAM, FDM wird hier nicht aufgezeigt, da ein additives Fertigungsverfahren bereits von einem für einen Teil zuständigen Studierenden in der TDAF-Präsentationsunterlagen vorgeschlagen wurde.

Die Hochschule für Angewandte Wissenschaften besitzt bereits einige Druckermaschine in Kunststoff oder Metall im 3D-Space an, die Teile anfertigen. Falls die Auswahl der Fertigungsverfahren oder des Baumaterials nicht der 3D-Druckermaschine entspricht, ist dies mittels Fremdfertigung bei einer externen Firma möglich.

7 Roadmap

Der Projektplan für die Prototypentwicklung eines Fahrzeugs zum freundschaftlichen Wettbewerb ist erstellt. Eine Roadmap für die Industrialisierung wird nicht erstellt. Stattdessen werden die Voraussetzungen an der Industrialisierung aufgelistet.

7.1 Projektplan

Im Anhang C Roadmap im Prototypbauphase und im Anhang D Roadmap im Vorbereitungsphase sind die Roadmaps für ein LIAM-Gesamtprojekt bis zum freundschaftlichen Wettbewerb einzusehen.

Voraussichtlich im Sommer 2022 wird das freundschaftliche Wettbewerb stattfinden. Das ausgewählte Konzept wird mit unterschiedlichen Fertigungstechnik und Beschaffung der Teile umgesetzt. Der Projektplan erfolgt auf Grundlage der Summen von Sponsoren auf dem aktuellen Stand. Das Budget für LIAM-Projekt beträgt 50.000 Euro. Falls mehr Sponsoren einspringen oder mehr Interessenten z.B. Bacheloranden, Projektarbeiten oder Masteranden ihren zeitlichen Aufwand beitragen wollen würden, können mehr Möglichkeit zum Prototypbau oder Interfaces geprüft werden.

7.2 Industrialisierung

Die spätere Industrialisierung mit dem Einsatz des Rapid Manufacturing kann erfolgen, wenn die Bedingungen und die technischen Kriterien erfüllt sind:

- hohe Bauteilkomplexität
- breite Variantenvielfalt
- Umsetzung der 3D-Knotenstruktur
- hohe Flexibilität der Produktvarianten in der Produktion in Übereinstimmung mit dem Konzept der Modularisierung und des SpaceFrame-Konzepts mithilfe des 3D-Biegeverfahrens für Strukturteileniedrige Kosten von 6.000 Euro im Vergleich zu Rollstühlen mit elektrischem Zusatzantrieb
- unkomplizierte Wartung und kurze Ersatzteilbeschaffung
- Auswahl eines Produktionsstandorts nach Nutzwertanalyse
- Erfüllung der Marktzulassungsvoraussetzungen nach Medizinprodukte-Richtlinie ISO 13485, Verordnung EU 2017/ 746 (in der leichten Sprache gemeint TÜV-Gesetz) und DIN EN 12184
- erfolgreiche Testfahrt eines Prototypbaus und hohe Wettbewerbsfähigkeit
- Individualisierung der Hilfsmittel für Menschen mit Bewegungseinschränkungen
- hohe Zufriedenheit der Menschen mit Bewegungseinschränkungen
- Festanstellungen und Ausbildungsstellen überwiegend für Menschen mit Bewegungseinschränkungen und Behinderung aufgrund ihrer Lebenserfahrungen mit Barrieren

8 Fazit und Ausblick

Einige Aufgabenstellungen in der vorliegenden Masterarbeit wurden von den ursprünglich besprochenen abgeändert. Grund dafür sind der Stand der Technik, die Marktanalyse, die Antriebssystem-Entwicklung und die Festlegung der Randbedingungen, die sich aufgrund der eigenen diversen Herausforderungen im Bereich Kommunikation und Recherche als besonders aufwendig erwiesen haben. Das Ziel dieser Masterarbeit war, Kenntnisse über Elektrorollstühle zu gewinnen und Grundlagen für die Prototypenentwicklung und die Industrialisierung eines LIAM-Elektrollstuhls unter besonderer Berücksichtigung der additiven Fertigungsverfahren und der Modularität zu bereiten und weitergeben zu können.

Trotz der diversen Herausforderungen ist ein großes Potential für die starke Wettbewerbsfähigkeit mithilfe der Mittelrad-Technik (siehe 4.2.4) und der Antriebsmotoren von Heinzmann CargoPower RN111 entstanden. Um das Potential nutzen zu können, ist Projektplan bzw. Fahrplan bereits erstellt worden.

Das Strukturkonzept wird zurzeit in einer Masterprojektarbeit modelliert. Die nächsten wichtigen Schritte im LIAM-Projekt sollen die Ermittlung des Reifenverhaltens und der Aufbau der Skid-Steering-Steuerungstechnik sein, weil die Kostenbeeinflussung im späteren Projektverlauf weniger sein kann. Anschließend können die weiteren Schritte mit anderen ausgewählten Modulen vom Kapitel 5 erfolgen. Es ist im Grunde zuversichtlich, dass der LIAM-Prototyp erfolgreich im freundschaftlichen Wettbewerb bei der Hindernisüberwindung und Geländegängigkeit sein kann.

Es ist zu beachten, dass die Konzeptentwicklung fast ohne Einbindung von Menschen mit Bewegungseinschränkungen ausgelegt wurde, da die Mitbestimmung von Menschen mit Bewegungseinschränkungen aus verschiedenen Gründen in der Masterarbeit nicht möglich ist. Es ist zu empfehlen, dass die Studierenden, wissenschaftliche Mitarbeiter*innen und Projektmitwirkende mit den Menschen mit Bewegungseinschränkungen in verschiedenen Aufgaben gemeinsam entscheiden oder zusammenarbeiten.

Die Hauptvoraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz des additiven Fertigungsverfahrens ist die Variantenvielfalt der LIAM-Konzepte. Falls die Variantenvielfalt vorhanden und die Bedingungen (siehe Kapitel 7.2) erfüllt sind, kann die Industrialisierung erfolgen.

Literaturverzeichnis

- [1] J. L. Köpcke und A. Schöning, Menschen mit Querschnittlähmung, Stuttgart: Kohlhammer, 2018.
- [2] M. Kraft, Rehabilitationstechnik, Berlin: De Gruyter, 2015.
- [3] Bundesarbeitsgemeinschaft für Rehabilitation, „ICF-Praxisleitfaden 1 Zugang zur Rehabilitation,“ Bundesarbeitsgemeinschaft für Rehabilitation (BAR) e.V., Frankfurt, 2015.
- [4] M. Seidel, „Die Internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit, Behinderung und Gesundheit,“ Heidelberg, 2005.
- [5] D. Engels, „diskussion Forum Rehabilitations- und Teilhaberecht www.reha-recht.de,“ 21 Mai 2019. [Online]. Available: <https://www.reha-recht.de/fachbeitraege/beitrag/artikel/beitrag-c2-2019/>. [Zugriff am 1 Juli 2021].
- [6] „OpenLearn create,“ The Open University, 2020. [Online]. Available: <https://www.open.edu/openlearncreate/mod/oucontent/view.php?id=148890§ion=2.4>. [Zugriff am 1 Juli 2021].
- [7] „Disability Studies 101,“ [Online]. Available: <https://disstudies101.com/perceptions/models-of-disability/>. [Zugriff am 1 Juli 2021].
- [8] „Umsetzungsbegleitung Bundesteilhabegesetz,“ Deutscher Verein für öffentliche und private Fürsorge e. V., [Online]. Available: <https://umsetzungsbegleitung-bthg.de/gesetz/hintergrund/>. [Zugriff am 1 Juli 2021].
- [9] UN-Behindertenrechtskonvention, „UN-Behindertenrechtskonvention,“ Praetor Verlagsgesellschaft GmbH, [Online]. Available: <https://www.behindertenrechtskonvention.info/uebereinkommen-ueber-die-rechte-von-menschen-mit-behinderungen-3101/>. [Zugriff am 2 Juli 2021].
- [10] UN-Behindertenrechtskonvention, „UN-Behindertenrechtskonvention,“ Praetor Verlagsgesellschaft mbH, [Online]. Available: <https://www.behindertenrechtskonvention.info/zugaenglichkeit-3790/>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [11] UN-Behindertenrechtskonvention, „UN-Behindertenrechtskonvention,“ Praetor Verlagsgesellschaft mbH., [Online]. Available: <https://www.behindertenrechtskonvention.info/persoенliche-mobilitaet-3870/>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [12] J. Teigelkötter, Energieeffiziente elektrische Antriebe, Aschaffenburg: Springer Vieweg, 2013.
- [13] N. Patel, Electric Vehicles, Singapore: Springer Singapore, 2021.

- [14] G. Babel, Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [15] M. Hilgers, Getriebe und Antriebsauslegung, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [16] „Elektrofahrrad Einfach.de,“ Colag E-Mobility GmbH, 2021. [Online]. Available: <https://www.elektrofahrrad-einfach.de/Einzelkomponenten/Motoren>. [Zugriff am 2 Juli 2021].
- [17] P. Kurzweil, Elektrochemische Speicher, Amberg-Weiden: Springer Vieweg, 2018.
- [18] W. M. & Hackbarth, Fahrmechanik der Kettenfahrzeuge, München, 2015.
- [19] B. Breuer, Bremsenhandbuch, Darmstadt: Springer Vieweg, 2017.
- [20] DIN-Normenausschuss Rettungsdienst und Krankenhaus (NARK), „DIN EN 12184,“ DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2020.
- [21] Urban Mobility, „Urban Mobility,“ Urban Mobility, [Online]. Available: <https://urbanmobility24.de/genny-mobility/>. [Zugriff am 3 März 2021].
- [22] Scewo, „Scewo,“ 8 Juli 2020. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/1illzTtVwBoGygF8ACQI-KAfC5wLy3lAu/view>. [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [23] „REHADAT Hilfsmittel,“ Institut für deutsche Wirtschaft e.V., 22 Januar 2020. [Online]. Available: <https://www.rehadat-hilfsmittel.de/de/suche/index.html?reloaded&q=Scewo&sort=score+desc&page=1&mode=detail>. [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [24] „REHADAT Hilfsmittel,“ Institut für deutsche Wirtschaft e.V., 20 August 2020. [Online]. Available: <https://www.rehadat-hilfsmittel.de/de/suche/index.html?reloaded&q=Permobil&sort=score+desc&page=6&mode=detail>. [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [25] Mobius Mobility, „ibot Tech Specs,“ Mobius Mobility LLC, 2021. [Online]. Available: <https://mobiusmobility.com/tech-specs/>. [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [26] „Cyathlon ETH Zürich,“ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, November 2020. [Online]. Available: <https://cyathlon.ethz.ch/en/teams/caterwil>. [Zugriff am 1 Juli 2021].
- [27] CATERWIL, „CATERWIL,“ CATERWIL LLC , 2021. [Online]. Available: <https://caterwil.com/product/stair-climbing-all-terrain-wheelchair-caterwil-gts-4wd/>. [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [28] Observer, „Observer,“ Internet shop Ltd. "Observer" - Development, 2021. [Online]. Available: <https://o-mp.ru/en/catalog/1840/1789/1915.html>. [Zugriff am 13 Juni 2021].

- [29] Panasonic , „Panasonic,“ Panasonic, 27 Oktober 2020. [Online]. Available: <https://news.panasonic.com/jp/press/data/2020/10/jn201027-1/jn201027-1.html>. [Zugriff am 13 Juni 2021].
- [30] WHILL, „WHILL,“ WHILL, [Online]. Available: <https://whill.inc/de/model-c>. [Zugriff am 13 Juni 2021].
- [31] Mattro any electric way, „Mattro any electric way,“ Mattro GmbH, [Online]. Available: <https://www.mattro.com/en/battery>. [Zugriff am 27 Juni 2021].
- [32] REHADAT HILFSMITTEL, „REHADAT Hilfsmittel,“ Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V., 12 Juni 2018. [Online]. Available: <https://www.rehadat-hilfsmittel.de/de/suche/index.html?reloaded&q=Mattro+Production+GmbH&sort=score+desc&page=2&mode=detail>. [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [33] R. Levenshtein, „E&E Entwicklung und Elektronik,“ publish-industry Verlag GmbH , 20 Juli 2017. [Online]. Available: <https://www.industr.com/de/elektro-traktor-darf-in-den-strassenverkehr-2298500>. [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [34] T. M. Gasser, „Grundlegende und spezielle Rechtsfragen für autonome Fahrzeuge,“ in *Autonomes Fahren : technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte* , Berlin Heidelberg, Springer Vieweg, 2015, p. 560.
- [35] J. Telgkamp, „TOPOLOGIEOPTIMIERUNG UND DESIGNREGELN Kapitel 1: Technologien der Additiven Fertigung,“ HAW Hamburg, Hamburg, 2020.
- [36] S. Asche, „VDI Nachrichten,“ VDI Verlag GmbH, 24 Juni 2019. [Online]. Available: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/schnelle-wege-in-den-3-d-druck/>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [37] F. Klocke, *Fertigungsverfahren 5*, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2015.
- [38] A. Gebhardt, *Generative Fertigungsverfahren*, München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [39] Concept Laser, „AMazing Additive Manufacturing,“ AMazing additivemanufacturing.com, 11 April 2016. [Online]. Available: <http://additivemanufacturing.com/2016/04/12/concept-laser-nextgen-spaceframe-combines-light%C2%ACweight-construction-and-flexibility/>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [40] C. Brüggemann, „Modularisierung von Karosseriestrukturen,“ ATZ Vieweg Verlag, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/BF03221827>. [Zugriff am 13 Juni 2021].
- [41] R. Krauthausen, „Raul Krauthausen Der Aktivist für Inklusion und Barrierefreiheit,“ SOZIALHELDEN e.V., 4 September 2019. [Online]. Available: <https://raul.de/leben-mit-behinderung/wenn-technik-nicht-hilft/>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [42] G. Wessely, „behindertearbeit.at,“ behindertearbeit.at, 20 September 2015. [Online]. Available: <https://www.behindertearbeit.at/44719/koennte-besser-sein-gedanken-zu-innovationen-bei-motorisierten-rollstuehlen/>. [Zugriff am 14 Juni 2021].

- [43] J. Thom, „touretteshero,“ Touretteshero CIC Company, 1 November 2020. [Online]. Available: <https://www.touretteshero.com/safe/2020/11/01/dongle-or-no-dongle/>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [44] DB Vertrieb GmbH, „Leitfaden für Mitnahme orthopädischer Hilfsmittel,“ Dezember 2020. [Online]. Available: https://www.bahn.de/p/view/mdb/bahnintern/services/mobilitaet_service/barrierefrei_-_neu/mdb_323147_leitfaden_mitnahme_orthopdischer_hilfsmittel_stand_dezember_2020.pdf. [Zugriff am 4 Juli 2021].
- [45] H.-H. Braess, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeuge, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [46] M. Mitschke und H. Wallentowitz, Dynamik der Kraftfahrzeuge, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [47] Nanotec Electronic GmbH&Co. KG, „Nanotec Plug and Drive,“ Nanotec Electronic GmbH&Co. KG, 2021. [Online]. Available: https://de.nanotec.com/produkte/produktkonfigurator/651::114_651:2214;115_651:1163;116_1163:242/. [Zugriff am 1 Juli 2021].
- [48] Grob GmbH, Grundlagen linearer Antriebstechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [49] Heinzmann Electric Motors, „Heinzmann,“ Heinzmann GmbH & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.heinzmann-electric-motors.com/produkte/fahrrad-radnabenmotoren/cargopower>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [50] BAFANG, „BAFANG,“ Bafang Electric (Suzhou) Co., Ltd, [Online]. Available: <https://bafang-e.com/en/oem-area/components/component/motor/fm-g020250350v/>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [51] Changzhou Huayuxinfeng Motor Co.,Ltd, „MXUS E-Bike Kit,“ Changzhou, 2021.
- [52] Schwalbe, „Schwalbe,“ Ralf Bohle GmbH, [Online]. Available: <https://www.schwalbe.com/Rocket-Ron-11654016.01>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [53] G. Shuang, „Skid Steering in 4-Wheel-Drive Electric Vehicle,“ Bangkok, 2007.
- [54] J. L. Koch, „Fahrsystem Farmroboter im Rahmen des Masterthesis,“ Hamburg, 2021.
- [55] L. Kempa, S. Richter und X. Qian, „Topologieoptimierung eines LIAM-Rads,“ HAW Hamburg, HAW Hamburg, 2021.
- [56] Schwalbe, „Schwalbe,“ Ralf Bohle GmbH, [Online]. Available: <https://www.schwalbe.com/Schwalbe-Pick-Up-11159259>. [Zugriff am 14 Juni 2021].
- [57] DEKA RESEARCH AND DEVELOPMENT CORP, „iBot USER Manual,“ DEKA RESEARCH AND DEVELOPMENT CORP, Manchester, 2017.

- [58] LIONTRON, „LIONTRON,“ Liontron GmbH & Co. KG , [Online]. Available: <https://liontron.com/product-overview/>. [Zugriff am 27 Juni 2021].
- [59] „akkushop24,“ Schmal E-Commerce GmbH, [Online]. Available: <https://www.akkushop-24.de/Lithium-Ionen-Akku-48V-60Ah-2880Wh-Akkupack-incl-60A-BMS-Ladegeraet-fuer-E-Bike-Scooter-Pedelec>. [Zugriff am 27 Juni 2021].
- [60] AES Akku Energie Systeme GmbH, „Datenblatt AES eBike Akku 2.0 48 V,“ AES Akku Energie Systeme GmbH, Glinde, 2021.
- [61] M. Schrödl, „Der elektrische Planetenmotor - Eine unkonventionelle Kombination von Elektromotor und Planetengetriebe,“ Wien, 2017.
- [62] A. Binder, Elektrische Maschinen und Antriebe, Darmstadt: Springer Vieweg, 2017.
- [63] C. Stan, Alternative Antriebe für Automobile, Zwickau: Springer Vieweg, 2015.
- [64] TopChair, „TopChair S Treppensteigender Rollstuhl Benutzerhandbuch,“ [Online]. Available: <https://docplayer.org/116338166-Topchair-s-treppensteigender-rollstuhl-benutzerhandbuch-distributed-by.html>. [Zugriff am 13 Juni 2021].
- [65] H. Bergeest, Körperbehindertenpädagogik, Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt, 2015.
- [66] A. Karle, Elektromobilität, München: Carl Hanser, 2017.
- [67] P. Pfeffer, Lenkungshandbuch, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- [68] A. Permobil, „Wheelchair with tilt capability“. Schweden Patent EP 2 823 796 A1, 12 Juli 2013.
- [69] C. Snowbeck, „TwinCities Pioneer Press,“ MediaNews Group , 11 September 2008. [Online]. Available: <https://www.twincities.com/2008/09/11/all-terrain-wheelchair-offers-mobility-in-rugged-settings/>. [Zugriff am 13 Juni 2021].
- [70] REHADET-Hilfsmittel, „REHADET-Hilfsmittel,“ Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V., [Online]. Available: https://www.rehadat-hilfsmittel.de/de/produkte/?infobox=/infobox1.html&serviceCounter=1&wsdb=TEC&connectdb=hilfsmittel_detail&referenznr=Hil133484&from=1&anzahl=31&detailCounter=6&suche=index.html?suchbegriffe=%22Sitz%2C+gepolstert%22&intlink=true. [Zugriff am 13 Juni 2021].
- [71] T. Konrad, „DerQuerschnitt.de Das Informationsportal der Manfred-Sauer-Stiftung,“ Manfred-Sauer-Stiftung, 29 April 2021. [Online]. Available: <https://www.der-querschnitt.de/archive/19150>. [Zugriff am 13 Juni 2021].
- [72] S. Wong, „IPPINKA,“ 23 Oktober 2017. [Online]. Available: <https://www.ippinka.com/blog/stair-climbing-wheelchair/>. [Zugriff am 13 Juni 2021].

- [73] Observer Unlimited Wheelchair, „Unlimited Wheelchair Observer,“ Observer Technology Co.,Ltd., 2021. [Online]. Available: <http://www.observer-mobilityproduct.com/>. [Zugriff am 15 Juni 2021].
- [74] „Frühwald,“ DI Frühwald & Söhne GmbH & Co KG, [Online]. Available: <https://www.fruehwald.net/PRODUKT/67872/permobilR-f5-corpus-vs.> [Zugriff am 27 Juni 2021].
- [75] M. Sinner, „Velo Nerd,“ velonerd.cc, 13 August 2018. [Online]. Available: <https://www.velonerd.cc/scheibenbremsen/>. [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [76] TopChair SAS, „Rehab Mart,“ [Online]. Available: http://rehabmart.com.sg/images/stories/Mobility__Ambulation/TopChair_Brochure.pdf . [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [77] Mobius Mobility, „iBOT,“ Mobius Mobility LLC, 2021. [Online]. Available: <https://mobiusmobility.com/history/>. [Zugriff am 28 Juni 2021].
- [78] Heinzmann Electric Motor, „Heinzmann GmbH & Co. KG,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.heinzmann-electric-motors.com/produkte/fahrrad-radnabenmotoren/cargopower.> [Zugriff am 03 07 2021].

Anhänge

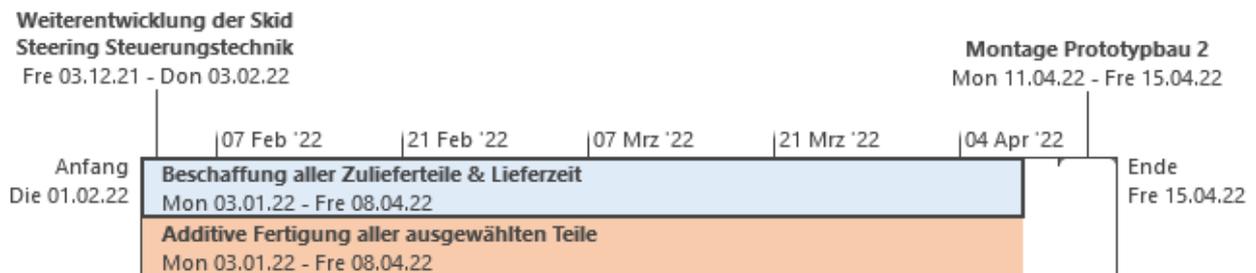
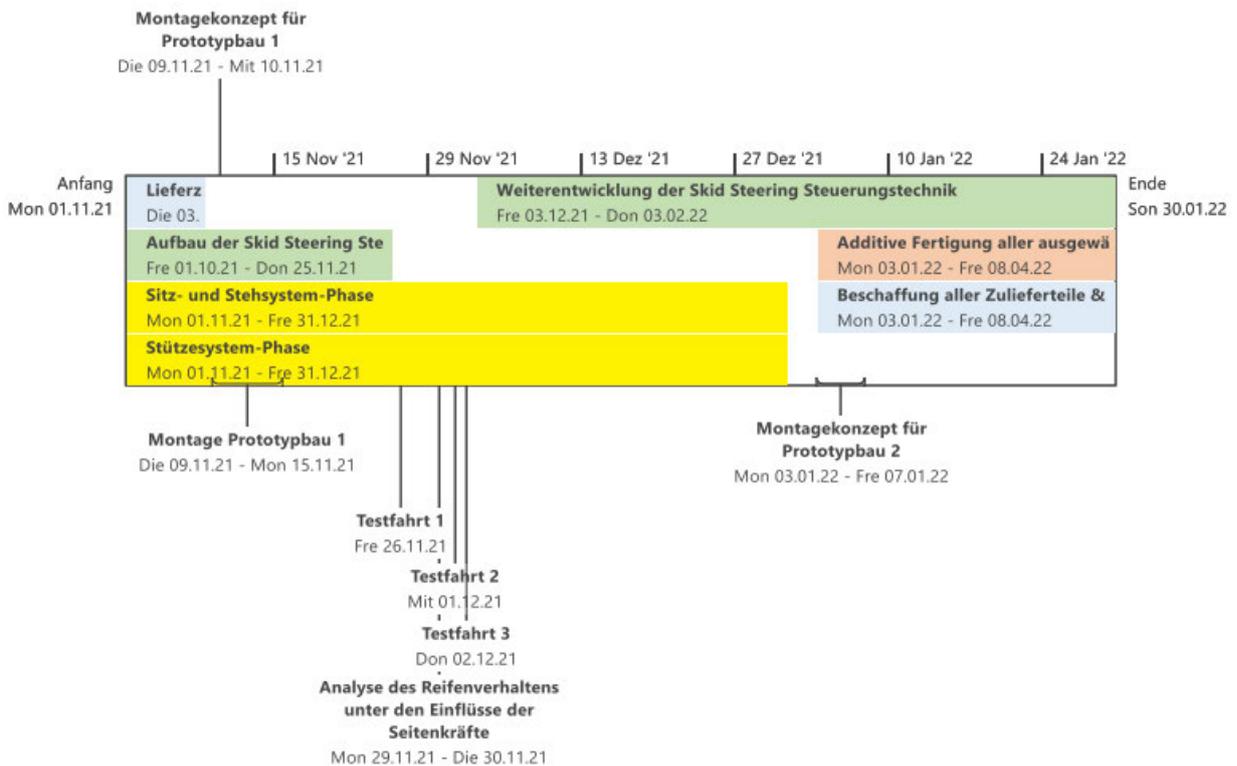
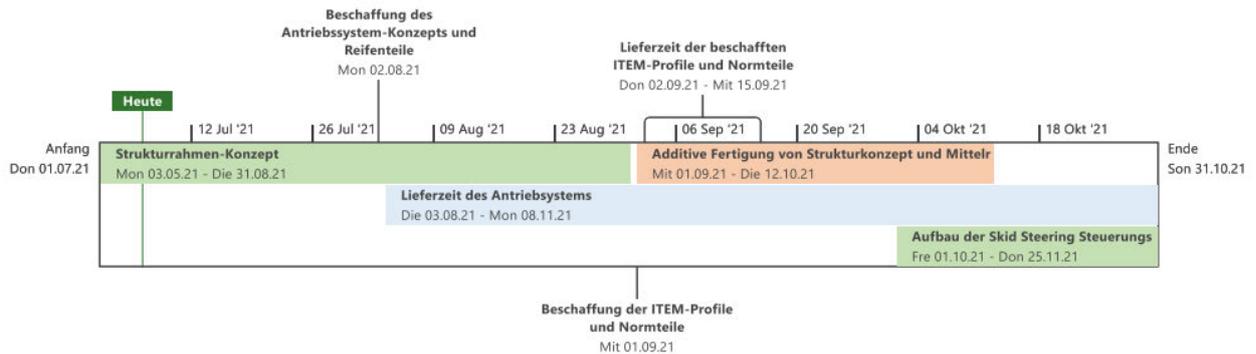
Anhang A Fahrleistungsübersicht 1	107
Anhang B Fahrleistungsübersicht 2	108
Anhang C Roadmap im Prototypbauphase	109
Anhang D Roadmap im Vorbereitungsphase.....	110

Anhang A Fahrleistungsübersicht 1

Use Case Räderantrieb auf der asphaltierenden Oberfläche

	Bezeichnung		Formel-		einheit		einheit		Formel	
Gesamtmasse	m	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Geschwindigkeit	v	15,00	15,00	15,00	11,19	8,73	7,11	4,39	3,21	
	v	4,17	4,17	3,11	2,43	1,98	1,58	1,22	0,89	
Beschleunigungszeit	t	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	
	D	508	508	508	508	508	508	400	400	
Rollwiderstandsbeiwert Asphalt	c _r	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	
	α	0	5	10	15	20	20	30	45	
Steigung	α	0,00	8,75	17,63	26,79	36,40	36,40	57,74	100,00	
	F _N	2452,50	2452,50	2452,50	2452,50	2452,50	2452,50	2452,50	2452,50	$F_N = m \cdot g \cdot BI$
Reibungskraft	F _R	36,79	36,65	36,23	35,53	34,57	31,86	31,86	26,01	$F_R = c_r \cdot \cos \alpha \cdot m \cdot g \cdot BI$
	F _{HA}	0,00	213,75	425,87	634,75	838,80	1226,25	1734,18	31,53	$F_{HA} = \sin \alpha \cdot m \cdot g \cdot BI$
Hangabtriebskraft	F _B	208,33	0,00	155,42	10,00	0,00	98,75	52,80	0,00	$F_B = \cos \alpha \cdot m \cdot g \cdot \left(\frac{v}{l}\right)$
	F _B	62,26	9,34	117,37	201,05	170,25	246,92	262,18	251,62	$M = \frac{D}{2} \cdot (F_B + F_{HA} + F_B)$
Mechanische Drehmoment	M _{mech,1}	62,26	9,34	117,37	201,05	170,25	246,92	262,18	251,62	
	M _{mech,2}	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
Schlupf	s	3,13	3,13	2,34	1,82	1,49	1,16	1,16	0,85	
	n	187,98	187,98	140,23	109,40	89,10	69,87	69,87	51,09	$n = \frac{v}{\pi \cdot d} \cdot (1 + s)$
Drehzahl	n	1225,60	183,94	2293,65	1723,64	2303,37	1950,54	2303,93	1917,14	
	P _{mech,1}	1,23	0,18	2,29	1,72	2,30	2,07	1,92	1,84	
Mechanische Leistung	P _{mech,2}	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	
	P _{el}	1532,01	229,92	2867,06	2154,54	2879,22	2438,17	2587,37	2397,88	$P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta}$
Wirkungsgrad	η	1,53	0,23	2,87	2,15	2,88	2,44	2,59	2,40	$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}}$
	M _{el,1}	77,83	11,68	145,65	146,72	251,31	212,82	308,65	327,73	$M_{el,1} = \frac{M_{mech}}{\eta}$
Elektrische Leistung	M _{el,2}	38,91	5,84	72,82	73,36	125,66	106,41	154,32	138,65	$M_{el,2} = \frac{M_{el,1}}{2}$
	M _{el,3}	25,94	3,89	48,55	48,91	83,77	70,94	102,88	92,43	$M_{el,3} = \frac{M_{el,1}}{3}$
El. Nenndrehmoment 4 Rädern	M _{el,4}	19,46	2,92	36,41	36,68	62,83	53,20	77,16	69,32	$M_{el,4} = \frac{M_{el,1}}{4}$
	M _{el,4}	19,46	2,92	36,41	36,68	62,83	53,20	77,16	69,32	

Anhang C Roadmap im Prototypbauphase



Anhang D Roadmap im Vorbereitungsphase

