

Thomas Vietor (Hrsg.)



Prozess- und Werkzeugtechnologien für funktionsintegrierte hybride Bauweisen

Ergebnisse aus dem BMBF-geförderten
Verbundprojekt TechnoHyb

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FORSCHUNGS
CAMPUS

öffentlich-private Partnerschaft
für Innovationen

OHLF OPEN HYBRID
LABFACTORY

Thomas Vietor
Herausgeber

Prozess- und Werkzeugtechnologien für funktionsintegrierte hybride Bauweisen

Ergebnisse aus dem BMBF-geförderten
Verbundprojekt TechnoHyb

Vorwort

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse des BMBF-geförderten und am Forschungscampus Open Hybrid LabFactory (OHLF) durchgeführten Verbundprojekt *TechnoHyb* dar. Mit der Förderinitiative „Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen“, welche in drei Förderphasen je fünf Jahre unterteilt ist, unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit 2012 den Forschungscampus OHLF in dessen anspruchsvollen sowie langfristigen Ansätze der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft unter einem Dach. Mit einem Forschungsfokus auf Themen zum nachhaltigen Leichtbau und Circular Economy zielt der Forschungscampus OHLF auf einen zukunftsorientierten und nachhaltigen Automobilbau. In interdisziplinären Forschungsprojekten entstehen Lösungen für die industrielle Kreislaufwirtschaft, die es ermöglichen den CO₂-Footprint zu verbessern und strategisch wichtige Rohstoffe sortenrein zurückzugewinnen.

Der Forschungscampus OHLF ist in Wolfsburg angesiedelt, einer der zukunftsstärksten Regionen Deutschlands und ebenfalls in der Nähe eines der weltweit führenden Automobilkonzerne. Das Campusgebäude umfasst 200 Arbeitsplätze, hochmoderne Labore und ein Technikum mit Forschungsanlagen im Industriemaßstab. Ein durchgängiger Innovationsprozess „Von der Idee bis zum fertigen Bauteil“ kann hier bis zum TRL 6 abgebildet werden.

Das Verbundprojekt *TechnoHyb* ist eines von drei im Rahmen der zweiten Förderphase (von 2020 bis 2024) geförderten Forschungsprojekte. Ziel ist dabei die Entwicklung neuer Ansätze und Methoden zur Umsetzung von Funktionsintegration in der Hybridbauweise, um Produkte technisch besser, wirtschaftlicher und nachhaltiger zu gestalten und Ressourcen besser zu nutzen. Dies wird innerhalb des Projekts anhand der Anwendungsfälle *Fahrzeugheckklappe*, *Flugwindkraftanlage* und *flexible Ladesäule* untersucht. Die Entwicklung einer funktionsintegrierten Heckklappe fokussiert dabei vor allem technische und wirtschaftliche Aspekte. Die Arbeiten an der Flugwindkraftanlage und flexiblen Ladesäule betrachtet hingegen vor allem die Zirkularität der Produkte. Zudem wird durch die mögliche Verbindung von Flugwindkraftanlage und flexibler Ladesäule zu einer unabhängigen und mobilen Ladeinfrastruktur eine Möglichkeit zum flächendeckenden Einsatz einer flexibleren und umweltfreundlicheren Mobilität vorangetrieben. Das Projekt *TechnoHyb* leistet somit einen wichtigen Beitrag auf dem Weg zu einer zirkulären Gesellschaft in den Bereichen der erneuerbaren Energieerzeugung und der automobilen Ladeinfrastruktur. Im Zuge der gemeinsamen Projektarbeit der beteiligten Partner entstanden zahlreiche neue Lösungsansätze. So wird die Industrie befähigt, die Herausforderungen auf dem Weg zu einer zirkulären Gesellschaft zu meistern. Darüber hinaus werden die Ergebnisse neben öffentlich zugänglichen Publikationen auch direkt innerhalb der öffentlich-privaten Partnerschaft des Forschungscampus, mit 42 Partnern, auf andere Produkte und Branchen übertragen und der Mehrwert somit vervielfacht.

Das gesamte Konsortium möchte sich an dieser Stelle ganz ausdrücklich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Unterstützung bedanken, ohne die dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre. Ein weiterer Dank geht an den Projektträger Karlsruhe (PTKA) für die Betreuung des Projekts.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02P18Q720 bis 02P18Q727 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Mit der Förderinitiative „Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen“ unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit 2012 den Forschungscampus Open Hybrid LabFactory in dessen anspruchsvollen sowie langfristigen Ansätze der Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft.

Konsortium:

Förderkennz.	Institution
02P18Q720	Technische Universität Braunschweig – Institut für Konstruktionstechnik
02P18Q721	Minore GmbH
02P18Q722	INVENT GmbH
02P18Q723	Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft (bis 2022)
02P18Q724	Volkswagen AG (bis 2022)
02P18Q725	Fraunhofer-Gesellschaft - Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)
02P18Q726	EnerKite GmbH
02P18Q727	FIT-Umwelttechnik GmbH
-	Volkswagen Group Charging GmbH (assoziiert)

Projektlaufzeit: 15.11.2020 - 31.12.2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FORSCHUNGS
CAMPUS

öffentlich-private Partnerschaft
für Innovationen

OHLF OPEN HYBRID
LABFACTORY

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	iii
HERAUSGEBER UND AUTOREN	viii
1 EINLEITUNG	1
TIM FRÖHLICH, DANIEL NEBEL, FRANK SCHLEGEL	
1.1 ZIELE UND VORGEHEN.....	2
1.2 GRUNDLAGEN NACHHALTIGER FUNKTIONSITEGRATION.....	4
1.2.1 <i>Leichtbau und Funktionsintegration durch hybride Bauweisen</i>	4
1.2.2 <i>Nachhaltigkeit und Zirkularität</i>	8
1.2.3 <i>Recyclingrouten für Materialien</i>	12
1.2.4 <i>Design for Circular Economy</i>	19
1.2.5 <i>Kleinserien- und Prototypenfertigung</i>	20
1.3 ANWENDUNGSFÄLLE	23
1.3.1 <i>Fahrzeugheckklappe</i>	23
1.3.2 <i>Flugwindkraft</i>	25
1.3.3 <i>Flexible und mobile Ladesäulen</i>	26
LITERATUR.....	29
ANHANG	35
2 FAHRZEUGHECKKLAPPE.....	37
TIM FRÖHLICH, OLIVER HUXDORF, DANIEL NEBEL	
2.1 REFERENZANALYSE	38
2.2 UNTERSUCHUNG VON GRUNDVARIANTEN.....	39
2.3 STRUKTUR-, FUNKTIONS- UND FERTIGUNGSKONZEPTE	40
2.4 DEFINITION DER DEMONSTRATORHECKKLAPPE.....	44
2.5 VORVERSUCHE UND FUNKTIONSMUSTER	47
2.6 SCHLUSSBETRACHTUNG.....	53
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	55
3 FLUGWINDKRAFTANLAGE	57
ASHWIN CANDADE, TIM FRÖHLICH, OLIVER HUXDORF, JULIAN REDEKER, FRANK SCHLEGEL, TJARK SONNEMANN	
3.1 SYSTEMDARSTELLUNG.....	58
3.2 SENSORNETZWERK	60
3.2.1 <i>Belastungssituation</i>	60
3.2.2 <i>Segmentauswahl</i>	62
3.2.3 <i>Sensornetzwerk zur Eisdetektion</i>	62
3.2.4 <i>Sensornetzwerk Lastermittlung</i>	72
3.2.5 <i>Auswirkungen Eissensors auf die Umweltwirkungen und Recyclingfähigkeit</i>	75
3.3 AUSTAUSCHBARE VERSCHLEIßTEILE.....	76
3.3.1 <i>Systemanalyse Vorflügel und Vorflügelanbindung</i>	77
3.3.2 <i>Anforderungen und Randbedingungen</i>	77
3.3.3 <i>Alternative Materialkonzepte</i>	80
3.3.4 <i>Berechnung</i>	82
3.3.5 <i>Basiskonzepte</i>	84
3.3.6 <i>Schnellwechselsystem zur Anbindung des SLAT an den Flügel</i>	86
3.4 SEILANBINDUNG UND -KRAFTMESSUNG	90
3.4.1 <i>Belastungssituation</i>	92
3.4.2 <i>Einsatz von FKV-Metall-Verbunden</i>	94

3.4.3	<i>Schräge Seilanbindung</i>	95
3.4.4	<i>Konzept einer Seilkraftmessung</i>	97
	LITERATUR	99
	ANHANG	101
4	FLEXIBLE LADESÄULE	103
	FRANK SCHLEGEL, TIM FRÖHLICH, LARS HEMME, KAI KRASKE, DIETER MÜLLER, JOACHIM SCHMIDT	
4.1	SYSTEMDARSTELLUNG	105
4.2	STATUS QUO.....	107
4.2.1	<i>Demontage und Zerlegung mit Ergebnissen</i>	107
4.2.2	<i>Zerlegeanalyse</i>	111
4.2.3	<i>Werkstoffverteilung</i>	113
4.2.4	<i>Quotenberechnung</i>	116
4.2.5	<i>Recyclingkonzept</i>	117
4.2.6	<i>Life Cycle Assessment</i>	121
4.2.7	<i>Schlussfolgerungen</i>	127
4.3	MAßNAHMEN AKTUELLES PRODUKT.....	127
4.3.1	<i>Vereinheitlichung</i>	127
4.3.2	<i>Re-Use von Bauteilen</i>	132
4.3.3	<i>Modulare Seitenwand</i>	137
4.3.4	<i>HV-Board</i>	148
4.3.5	<i>Auswirkungen der Maßnahmen</i>	152
4.4	MATERIALKONZEPTE	152
4.4.1	<i>Substitution von Stahl durch Kunststoff</i>	152
4.4.2	<i>Alternative Außenwand</i>	160
4.4.3	<i>Dämmstoffe</i>	163
4.4.4	<i>Reduzierung des Materialeinsatzes</i>	168
4.4.5	<i>Ergebnisdiskussion Materialkonzepte</i>	170
4.5	DESIGN FOR CIRCULAR ECONOMY	170
4.5.1	<i>2nd Use als lokaler Energiespeicher</i>	170
4.5.2	<i>Modulares Konzept Ladesäule</i>	177
4.6	SCHLUSSBETRACHTUNG	184
	LITERATUR	187
	ANHANG	189
5	AUTARKE MOBILE LADEINFRASTRUKTUR	195
	NICOLE ALLGAIER, STEFAN SKUTNIK	
5.1	FLUGWINDKRAFT AUS UMWELTPERSPEKTIVE	196
5.2	ANFORDERUNGS- UND SZENARIENENTWICKLUNG	199
5.3	TECHNISCHE UND PLANERISCHE AUSLEGUNG	203
6	ADDITIV GEFERTIGTES WERKZEUG	205
	KAI KRASKE, DENNIS BACKOFEN, OLIVER HUXDORF, DANIEL NEBEL	
6.1	WERKSTOFFWAHL	206
6.1.1	<i>Identifikation geeigneter Werkstoffe</i>	206
6.1.2	<i>Variation der Verarbeitungsparameter</i>	218
6.2	EINFLUSSFAKTOREN MECHANISCHER SCHWANKUNGEN	224
6.2.1	<i>Betrachtung der Einflussfaktoren</i>	224
6.2.2	<i>Modellbildung</i>	228
6.3	WERKZEUGHERSTELLUNG	235
6.3.1	<i>Vorversuch</i>	235
6.3.2	<i>Testwerkzeuge</i>	237
6.3.3	<i>Prüfung der Temperierung</i>	246

6.3.4	<i>Auszugsprüfungen Gewindeeinsätze</i>	248
6.3.5	<i>Werkzeug Tragflächenschale</i>	251
6.4	RECYCELBARKEIT	253
	LITERATUR	259
	ANHANG	263
7	SYSTEMATISCHE FUNKTIONSITEGRATION	269
	TIM FRÖHLICH	
7.1	ENTWICKLUNGSEBENEN	270
7.2	MULTIFUNKTIONALE MATERIALSTRUKTUREN	271
7.2.1	<i>Integrationsprinzipien</i>	271
7.2.2	<i>Generische Materialstrukturen</i>	272
7.2.3	<i>Multi-Level-Strukturen</i>	274
7.2.4	<i>Anwendungsszenarien</i>	274
7.3	KATALOGE	276
7.3.1	<i>Lösungskataloge für multifunktionale Lösungen</i>	277
7.3.2	<i>Lösungskataloge für Materialkombinationen</i>	278
7.4	INTEGRATION EINER VORFLÜGELENTEISUNG	279
7.4.1	<i>Systemdarstellung</i>	279
7.4.2	<i>Konzepte</i>	280
7.4.3	<i>Suche nach und Übertragung von Lösungen</i>	281
	LITERATUR	283

Herausgeber und Autoren

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor: Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Deutschland, ORCID: [0000-0003-4687-681X](https://orcid.org/0000-0003-4687-681X)

Autoren

Nicole Allgaier: EnerKíte GmbH, Eberswalde, Deutschland

Dennis Backofen: Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Fraunhofer-Gesellschaft, Wolfsburg, Deutschland, ORCID: [0009-0002-2886-4380](https://orcid.org/0009-0002-2886-4380)

Ashwin Candade: EnerKíte GmbH, Eberswalde, Deutschland, ORCID: [0000-0001-9228-1310](https://orcid.org/0000-0001-9228-1310)

Tim Fröhlich: Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Deutschland, ORCID: [0000-0001-8540-0414](https://orcid.org/0000-0001-8540-0414)

Lars Hemme: Minore GmbH, Hannover, Deutschland

Oliver Huxdorf: INVENT GmbH, Braunschweig, Deutschland, ORCID: [0000-0002-4247-8278](https://orcid.org/0000-0002-4247-8278)

Kai Kraske: Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Fraunhofer-Gesellschaft, Wolfsburg, Deutschland, ORCID: [0009-0004-9229-7119](https://orcid.org/0009-0004-9229-7119)

Dieter Müller: Volkswagen AG, Wolfsburg, Deutschland

Daniel Nebel: Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Fraunhofer-Gesellschaft, Wolfsburg, Deutschland, ORCID: [0000-0002-9753-5161](https://orcid.org/0000-0002-9753-5161)

Julian Redeker: Institut für Konstruktionstechnik, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Deutschland, ORCID: [0009-0004-5414-3952](https://orcid.org/0009-0004-5414-3952)

Frank Schlegel: FIT-Umwelttechnik GmbH, Wolfsburg, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Joachim Schmidt: FIT-Umwelttechnik GmbH, Wolfsburg, Deutschland

Stefan Skutnik: EnerKíte GmbH, Eberswalde, Deutschland

Tjark Sonnemann: INVENT GmbH, Braunschweig, Deutschland

1 Einleitung

Tim Fröhlich ✉, Oliver Huxdorf, Daniel Nebel, Frank Schlegel

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202507110644-0>

In diesem Kapitel erfolgt zunächst die Darstellung der Projektziele und des Vorgehens zur Erreichung dieser (vgl. Abschnitt 1.1). Im Rahmen der Arbeitspunkte werden unterschiedliche Umsetzungsmöglichkeiten für das Spannungsfeld aus Leichtbau, Funktionsintegration sowie Nachhaltigkeit und Zirkularität untersucht. Hierfür erfolgt eine kurze Darstellung der relevanten Grundlagen (Abschnitt 1.2). Um dieses Spannungsfeld möglichst breit betrachten zu können, wurden innerhalb des Projekts die drei sehr heterogenen Anwendungsfälle *Fahrzeugheckklappe*, *Flugwindkraftanlage* sowie *flexible Ladesäule* untersucht (vgl. Abschnitt 1.2.3).



1.1 Ziele und Vorgehen

Durch die Möglichkeit zur Applikation unterschiedlicher Werkstoffe innerhalb eines Bauteils bietet die Hybridbauweise großes Potenzial hinsichtlich einer Integration zusätzlicher Funktionen in Strukturbauteile. Neben der Steigerung der Bauteilperformance (bspw. Steifigkeit, Festigkeit oder Energieaufnahme) bei gleichzeitiger Reduzierung der Bauteilmasse und somit der Emissionen während der Nutzungsphase durch die Hybridbauweise, bietet die Funktionsintegration weitere technische und wirtschaftliche Potenziale. Diese liegen insbesondere in einer integralen Gestaltung von Bauteilen durch die nicht mehr notwendige Montage und einer damit verbundenen Steigerung der Bauteilperformance. Diesen Potenzialen steht jedoch eine Vielzahl an Herausforderungen gegenüber. Eine der zentralen Herausforderungen stellt die Trennbarkeit der zum Teil intensiven Materialmische dar. Diese gewinnt aus ökologischen, aber auch durch immer strenger werdende gesetzliche Rahmenbedingungen ökonomischen Gesichtspunkten fortschreitend an Bedeutung.

Im Rahmen der Circular Economy (CE) wird eine maximale Kreislauffähigkeit der Produkte bzw. der eingesetzten Materialien angestrebt. Neben der Recyclingfähigkeit kommt der Verlängerung des Produktlebenszyklus eine zentrale Bedeutung zu, etwa durch die Reparaturfähigkeit oder die Wiederverwendung des Gesamtprodukts bzw. einzelner Komponenten. Die Ansätze müssen dabei allen technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Anforderungen genügen. Dies führt zu einem Spannungsfeld, insbesondere zwischen den Themen *Funktionsintegration* und *Circular Economy*. Die Planung bzw. Berücksichtigung unterschiedlicher Strategien ist deshalb essenziell für die nachhaltige Planung von Funktionsintegration. So sollten Ansätze der Funktionsintegration reparaturfähig oder robust sein, um die Lebenszeit des Produkts nicht zu verkürzen. Sollte dies nicht möglich sein, sind die Funktionen in austauschbare Module zu integrieren. Neben der Obsoleszenz durch einen Defekt können auch veraltete Komponenten, z.B. bezogen auf eine gewisse Funktion, zu einem vorzeitigen Lebensende führen. Dieser Umstand kann auch hinderlich bei der Wiederverwendung bestimmter Module sein. So sollten bestimmte Funktionen nicht in langlebige/wiederverwendbare Module integriert werden.

Für eine solche Planung bedarf es grundlegender Kenntnisse über die Auswirkungen der Funktionsintegration auf das Bauteil bzw. auf die Funktion. Diese Eigenschaftsfrüherkennung bezieht sich sowohl auf allgemeine Aspekte (Wirtschaftlichkeit, Gewicht, Reparaturfähigkeit etc.) als auch auf spezifische Aspekte der jeweiligen Funktionsintegration (Korrosion, Wärmeentwicklung, EMV etc.). Da sich die Entwicklung eines funktionsintegrierten Bauteils häufig über unterschiedliche Domänen erstreckt (z.B. mechanisch, elektronisch/elektronisch, thermisch), bedarf es einer methodischen Unterstützung, um die Auswirkungen der Integration domänenübergreifend beurteilen zu können. Die Funktionsintegration kann dabei auf unterschiedlichen Graden stattfinden. So kann bei Betrachtung eines elektrischen Leiters die Haltefunktion (angespritzter Halter oder Leiter in Kunststoffspritzguss), die Isolierfunktion (Leiter ist komplett von Kunststoff umschlossen) oder die Leitungsfunktion integriert werden (Leitung über das Grundmaterial des Bauteils). Je nach Grad der Integration ergeben sich unterschiedliche Chancen und Herausforderungen. So sinkt bei zunehmendem Integrationsgrad in der Regel das Gewicht und die Kosten für Serienfertigungen. Gleichzeitig treten jedoch neue Aspekte, wie z.B. die Reparatur- und Recyclingfähigkeit sowie die Variantenbildung in den Vordergrund.

Im Hinblick auf die Grundlagen der Funktionsintegration ist das Ziel dieses Projekts, eine Analyse unterschiedlicher Arten bzw. Ebenen von Funktionsintegration sowie deren Kategorisierung

durchzuführen. Ergebnisse sind unter anderem verschiedene grundsätzliche Prinzipien zur nachhaltigen Umsetzung funktionsintegrierter Konzepte (z.B. lösbare Verbindungen zwischen funktionaler Komponente und Struktur). Aus den unterschiedlichen Prinzipien ergeben sich sowohl Potenziale als auch Herausforderungen. Vor der Auswahl geeigneter Lösungsansätze müssen diese wiederum individuell hinsichtlich vorausgewählter Zielkriterien (z.B. technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Art) bewertet werden. Hierbei ergeben sich für unterschiedliche Anwendungsfälle bzw. Zielstellungen sehr unterschiedliche Ergebnisse. Abbildung 1.1 zeigt eine Übersicht der innerhalb des Projekts betrachteten Themenschwerpunkte. Zur Erreichung der Ziele werden mit einer Fahrzeugheckklappe (vgl. Kapitel 2), einer Flugwindkraftanlage (vgl. Kapitel 3) sowie einer flexiblen Ladesäule (vgl. Kapitel 4) drei heterogene Anwendungsfälle unter Anwendung unterschiedlicher Zielstellungen untersucht. So soll eine allgemeingültige Anwendbarkeit der Ergebnisse erreicht werden. Zusätzlich wird mit der Kombination von flexibler Ladesäule und Flugwindkraftanlage zu einer autarken mobilen Ladeinfrastruktur (AML) ein wichtiger Beitrag für eine flächendeckende Verbreitung der Elektromobilität geleistet (vgl. Kapitel 5). Darüber hinaus wird mit der Untersuchung der Umsetzbarkeit eines additiv gefertigten und recyclingfähigen Kunststoffwerkzeugs das Potenzial dieser Technologie untersucht und das Thema *Zirkularität* auch für die Fertigung betrachtet (vgl. Kapitel 6). Darüber hinaus werden die gesammelten Erkenntnisse für die Entwicklung einer Methodik für eine systematische Funktionsintegration genutzt (vgl. Kapitel 7).



Abbildung 1.1: Themenschwerpunkte des Verbundprojekts

1.2 Grundlagen nachhaltiger Funktionsintegration

Nachfolgend werden die relevanten Grundlagen zu den innerhalb des Projekts behandelten Themenbereichen dargelegt.

1.2.1 Leichtbau und Funktionsintegration durch hybride Bauweisen

Hybride Bauweisen bieten großes Potenzial zur Umsetzung von Leichtbaumaßnahmen und Funktionsintegration. Zur Darstellung dieser Thematik findet nachfolgend eine Einordnung des Begriffs *Bauweise*, ein Vergleich unterschiedlicher Bauweisen und Methoden zur Entwicklung struktureller bzw. werkstofflicher Bauweisenkonzepte sowie eine Beschreibung von Funktionsintegration sowie eine methodische Entwicklung für diese statt.

a) Erläuterung des Begriffs „Bauweise“

Der Begriff Bauweise beschreibt in der Konstruktionswissenschaft hervorzuhebende Eigenschaften eines technischen Produkts. Die Folge ist, dass sich im Laufe der Zeit unterschiedlichste „Bauweisenbezeichnungen“ etabliert haben [1]. Ein Produkt, das bspw. vornehmlich aus gegossenen Einzelteilen aufgebaut ist, wie Gehäuse mechanischer Aggregate, zeichnet sich durch seine „Gussbauweise“ aus. Wird eine Baugruppe aus Schalen-Elementen zusammengefügt (bspw. Fahrzeugkarosserien oder Flugzeugrümpfe), dann wird von der Schalenbauweise gesprochen. Eine gewichtsreduzierte Komponente wird als Lösung in Leichtbauweise bezeichnet. Eine Baugruppe, die aus separat gefertigten und anschließend gefügten Einzelteilen besteht, wird als Differenzialbauweise bezeichnet. Werden die Teile hingegen nicht separat gefertigt, sondern im Verbund als ein Bauteil hergestellt, wird dies als Integralbauweise bezeichnet [2]. Je nach Branche oder Produkt existieren unterschiedliche Bezeichnungen für spezifische Ausführungen von Bauteilen. Im Kontext des Karosseriebaus von Fahrzeugen als ein Vertreter für strukturelle Bauteile bzw. Baugruppen lassen sich klare Trennungen unterschiedlichster Bauweisen vornehmen, die nachfolgend exemplarisch vorgestellt werden.

Im Allgemeinen kann bei Fahrzeugkarosserien zwischen strukturellen und werkstofflichen Bauweisen unterschieden werden [3]. Zu den strukturellen Bauweisen zählen bspw. die klassische Rahmenbauweise (z.B. Leiterraum, Space Frame), die Schalenbauweise, der Monocoque oder die strukturelle Mischbauweise. Letztere zeichnet sich dadurch aus, dass verschiedene Aufbauprinzipien gleichzeitig zum Einsatz kommen. Alle genannten strukturellen Bauweisen stehen für die Aufbauprinzipien der Gesamtkarosserie. Im Detail unterscheiden sie sich einerseits durch die Art und Weise, wie sie Lasten aufnehmen (z.B. Lastaufnahme beim Leiterraum lediglich durch Leiterraum; Lastaufnahme bei Schalenbauweise durch den gesamten Karosserieaufbau) und andererseits durch die Geometrie-Ausprägungen der Karosserie-Elemente auf Bauteil-Ebene.

Bei der werkstofflichen Bauweise wird zwischen der Stahl-, Aluminium-, Magnesium- oder FVK-Bauweise unterschieden. Die Betrachtung der werkstofflichen Bauweise in Kombination mit der strukturellen Bauweise auf Bauteil-Ebene führt oft zu Bezeichnungen, wie bspw. Stahl-Schalenbauweise, Aluminium-Profilbauweise oder Magnesium-Druckgussbauweise. Erfolgt eine übergeordnete Betrachtung der werkstofflichen Bauweisen, wird oftmals auch von der „stofflichen Mischbauweise“ gesprochen. Hierbei wird insbesondere zwischen der Multi-Material- und der Hybridbauweise unterschieden. Die Differenzierung der genannten Bauweisen soll im Folgenden anhand zentraler Kriterien näher beleuchtet werden.

b) Vergleich unterschiedlicher Bauweisen

Aufbauend auf der Definition des Begriffs Bauweise werden mit der Hybridbauweise, der Multi-Material-Bauweise, der Einstoffbauweise (Mono-Material-Bauweise) und der monolithischen Bauweise nachfolgend vier grundlegende Ausprägungen von Bauweisen beschrieben und abschließend miteinander verglichen. Den dargelegten Bauweisen können trotz der im Detail sehr unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten grundlegende Potenziale und Herausforderungen zugewiesen werden. Abbildung 1.2 zeigt eine Kategorisierung der Bauweisen zusammen mit ihren Potenzialen und Herausforderungen. Es ist dabei ersichtlich, dass die vier gezeigten Bauweisen lediglich exemplarische Vertreter einer großen Zahl unterschiedlicher Bauweisen bzw. Mischformen dieser darstellen.

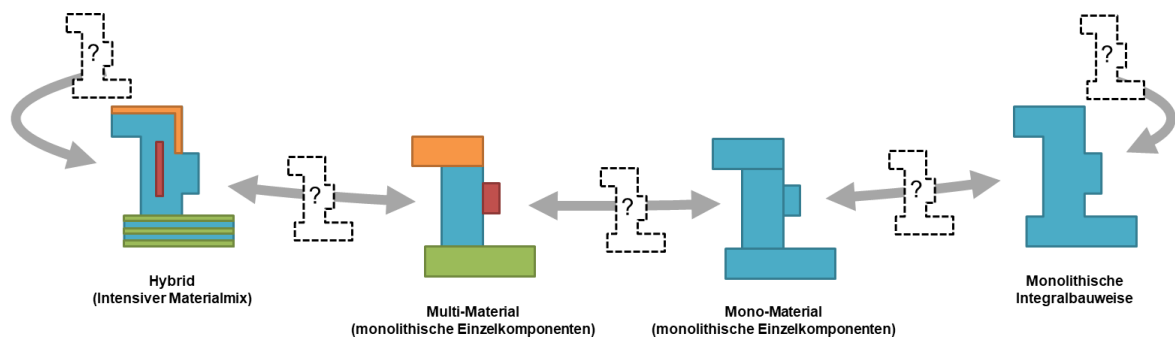


Abbildung 1.2: Einordnung unterschiedlicher Bauweisen in Bezug auf Anzahl unterschiedliche Bauteile bzw. Bauelemente und eingesetzten Materialien

Gemäß der Begriffsbeschreibung der Bauweise deuten die Bezeichnungen „Multi-Material-Bauweise“ und „Hybridbauweise“ auf die Kombination verschiedener Materialien innerhalb eines betrachteten Systems hin. Wie in Abbildung 1.3 ersichtlich wird, lässt sich erstere nach [4] in drei Ebenen unterteilen. Die dritte Ebene beschreibt dabei die Kombination verschiedener Materialien derselben Werkstoffart (z.B. Kombination unterschiedlicher Stahllegierungen innerhalb eines betrachteten Systems). Die zweite Ebene umfasst die Kombination von Materialien aus verschiedenen Werkstoffgruppen (z.B. Kombination von Stahl mit Aluminium). In der ersten Ebene werden verschiedene Materialien aus verschiedenen Werkstoffhauptgruppen miteinander kombiniert (z.B. Kombination von Metallen mit Polymeren und Faserverbundwerkstoffen). Der Aufwand, um ein Bauteil aus mehreren Materialien zu erzeugen, sinkt dabei mit zunehmender Gleichartigkeit der Werkstoffe [5].

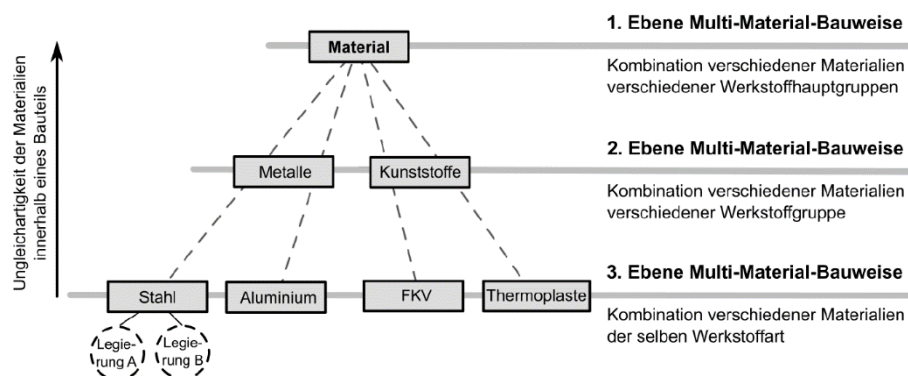


Abbildung 1.3: Ebenenmodell Multimaterialbauweise [5]

Einen Sonderfall der Multi-Material-Bauweise bildet die Hybridbauweise. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass vornehmlich metallische Werkstoffe mit Kunststoffen und/oder faserverstärkten Kunststoffen durch die Anwendung spezieller Fertigungsverfahren zu einem einzigen Bauteil gefügt werden [6]

Multi-Material- und Hybridbauteile zeichnen sich durch das große Potenzial der Gewichtsreduzierung aus [7]. Durch die einfache Materialsubstitution oder durch eine gezielte und anforderungsgerechte Kombination von Werkstoffen mit niedrigerer Dichte im Vergleich zur Referenz, kann das Gewicht einzelner Bauteile oder ganzer Baugruppen bei gleichzeitiger Beibehaltung oder sogar Steigerung der Performance, stark reduziert werden [7, 8]. In der Automobilforschung der vergangenen Jahre konnte außerdem demonstriert werden, dass die Vorzüge der Material-Mischbauweise nicht nur im großen Potenzial der Gewichtsreduzierung liegen, sondern auch weitere Vorteile bieten [5]. Als konkrete Beispiele seien exemplarisch genannt:

- höhere Gestaltungsfreiheiten zur Realisierung komplexer Bauteilgeometrien (bei Einsatz urformender Verfahren wie Spritzgießen, Fließpressen, Druckgießen, usw.) [9]
- verbesserte Ressourceneffizienz bspw. durch einen gezielteren Materialeinsatz oder eine Reduktion der benötigten Werkzeuge [10],
- Bauteilintegration und damit Reduktion der Fügestellen sowie, was wiederum zu besseren mechanischen Eigenschaften des Bauteils und zur Vereinfachung von Montageprozessen führt [7],
- Integration von Funktionen und damit zur Reduktion der Teilezahl und Gewicht [11],
- Verbessertes Design und damit höhere Vermarktungschancen [12].

Diesen Vorteilen stehen jedoch auch Nachteile gegenüber. Beispiele hierfür sind ein hoher Anlageninvest, häufig höhere Kosten der Bauteile und ein erhöhter Entwicklungsaufwand. Die zentrale Herausforderung bleibt jedoch die Trennbarkeit der Materialmixe am Lebensende, die durch die zunehmende Bedeutung von Nachhaltigkeit und Recyclingfähigkeit stärker in den Bewertungsfokus rückt. Insbesondere bei dem Einsatz der Hybridbauweise ist die Trennbarkeit aufgrund der intensiven Materialmixe kritisch zu prüfen.

Dem Einsatz der oben genannten Mischbauweisen stehen Bauweisen mit dem Einsatz eines einzelnen Materials gegenüber. Hierbei können komplexere Baugruppen entweder differenzial aus mehreren Einzelteilen durch nachträgliches Fügen entstehen (Einstoffbauweise) oder als ein integrales Teil ausgeführt werden (Monolithische Bauweise). Die differenziale Einstoffbauweise kann dabei aus unterschiedlichen spezifischen Werkstoffen einer Werkstoffgruppe bestehen, wie unterschiedliche Stähle. Dieser Umstand ermöglicht eine partielle Anpassbarkeit an individuelle Anforderungen bei moderat erhöhtem Fügeaufwand. Durch die Gleichartigkeit der Werkstoffe ist eine sortenreine Trennung der Materialien am Lebensende gut möglich. Dies gilt umso mehr bei monolithischen Bauteilen, da nur ein einziger spezifischer Werkstoff und keine Fügeverbindungen vorliegen. Jedoch muss durch die Wahl einer Werkstoffart immer ein Kompromiss bezüglich der zum Teil widersprüchlichen Anforderungen eingegangen werden. Dies erhöht im Vergleich zu Multi-Material- oder Hybridbauweisen in der Regel das Gewicht bzw. die mechanische Performance.

Je nach gewählter Bauweise entstehen somit sehr unterschiedliche Vor- und Nachteile, die es bei Erreichung der spezifischen Entwicklungsziele zu berücksichtigen gilt. Zusammengefasst gibt es viele unterschiedliche Umsetzungsmöglichkeiten auf Bauteilebene, die sowohl in werkstofflich

monolithischer, als auch in Multi-Material- und Hybridbauweise ausgeführt sein können. Je nach gewähltem Design können die verschiedenen Potenziale der Bauweisen in unterschiedlicher Ausprägung vorliegen.

c) Methoden zur Entwicklung struktureller und werkstofflicher Bauweisenkonzepte

Die Multi-Material-Bauweise erweitert den Lösungsraum bei der Bauteilgestaltung aufgrund der Kombinationsmöglichkeit unterschiedlicher Werkstoffe und der Erschließung neuer Lösungsprinzipien. Ferner ergeben sich zu klassischen Restriktionen, wie bspw. Bauraumlimitierungen, weitere Randbedingungen aufgrund der integrativen Bauweise. Ferner wird die a-priori-Abschätzung der Bauteileigenschaften, z.B. der mechanischen Eigenschaften und Kosten, sowie deren Zielkonflikte erschwert. Um der einhergehenden Komplexitätssteigerung entgegenzuwirken und den Lösungsraum systematisch einzugrenzen, muss bereits in der frühen Entwicklungsphase auf eine konstruktionsmethodische Unterstützung zurückgegriffen werden.

Es existiert eine Vielzahl an Ansätzen, die den Konstrukteur bei der Werkstoffauswahl, bspw. durch Gütekennzahlen [8], Material-Indizes oder Ashby-Diagramme [13, 14], unterstützen. Eine Übersicht zu weiteren Ansätzen für die Materialelektierung unter der Berücksichtigung verschiedener Anwendungsszenarien ist durch JAHAN et al. [15] und BABANLI et al. [16] gegeben. Eine Methode für die Materialauswahl speziell zur Unterstützung bei der Entwicklung von Multi-Material-Bauteilen besteht in der Arbeit von GIACCOBI et al [17]. Dabei erfolgt eine individuelle Materialelektion auf Basis der Bauteilfunktionen. Es bestehen weitere Ansätze die neben einer Berücksichtigung von Faktoren zur Gewichtseinsparung oder einer Kostenreduktion zusätzliche Eigenschaften wie bspw. die Rezyklierbarkeit bei der Wahl der Materialkombinationen einfließen lassen [6]. Eine frühe Abschätzung der Relationen und Zielkonflikte zwischen definierten Bauteilmerkmalen, bspw. Materialauswahl und Dimensionen, sowie den daraus resultierenden Bauteileigenschaften (Masse, Steifigkeit, etc.) ist durch den „Property Driven Development (CPM/PDD)“ Ansatz gegeben [18]. Diese Methode ermöglicht eine systematische Strukturierung der Merkmals-Relationen und liefert ein hohes Potenzial zur Eigenschaftsfrüherkennung von Multi-Material-Bauteilen. KÖHLER et al. [19] erweitern diesen Ansatz um eine matrixbasierte Repräsentation (Extended Mapping Matrices), um die Merkmale zu den Eigenschaften sowie deren qualitativen Abhängigkeiten abzubilden. Diese Ansätze werden in einem methodischen Ansatz für die Betrachtung der Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen Merkmalen und Eigenschaften speziell für die Multi-Material-Bauweise modifiziert [20]. FRÖHLICH et al. [21, 22] liefern eine methodische Unterstützung, um der steigenden Komplexität bei der Entwicklung von Multi-Material-Bauteilen entgegenzuwirken. Durch die Verwendung einer abstrakten Darstellung des Bauteils wird mittels eines Softwaretools die schnelle und effiziente Analyse verschiedener Bauteilkonzepte, in einem frühen Entwicklungsstadium, ermöglicht. Der Fokus liegt auf einer Abschätzung von Eigenschaften wie Bauteilgewicht, -steifigkeit oder der Umwelteinwirkung des erarbeiteten Konzepts.

Die vorgestellten Ansätze und Methoden berücksichtigen derzeit nicht die gesamte Bandbreite der Hybridbauweisen mit Bezug zu Karoseriesystemen. Daher sollte es Ziel sein, die existierenden Ansätze zu modifizieren und die entwickelten Ansätze in diese zu integrieren bzw. die existierenden Ansätze weiterzuentwickeln.

Altach plant und bewertet die Generierung von Hybridkonzepten anhand der Kombination generischer Geometrie- und Materialkonzepte Altach [23]. Bader [24] bewertet detaillierte Konzepte für Hybridbauteile mittels eines Bewertungstools unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien.

d) Allgemeine Methoden zur Funktionsintegration

Funktionsintegration wird nach ROTH [25] als „Erhöhung der Eigenschaften eines Einzelteils mit dem Ziel, mehrere Funktionen mit ihm erfüllen zu können“ allgemeingültig definiert.

Eine systematische Erfassung und Aufbereitung des Stands der Technik zu konstruktionsmethodischen Ansätzen zum Thema Funktionsintegration erfolgte durch ZIEBART [26]. Als Ergebnis wird dem Produktentwickler ein Konstruktionskatalog mit Methoden zur Funktionsintegration zur Verfügung gestellt, wodurch ein schneller und präziser Zugriff auf vorhandene Methoden erfolgen kann.

Im Kontext der Hybridbauweise wurden bereits mögliche konstruktionsmethodische Strategien der Funktionsintegration in [27] aufgezeigt, wobei der Schwerpunkt darauf liegt, vorhanden Bauteillösungen zu klassifizieren, eine geeignete Strategie (bspw. Bauteilintegration oder Funktionsadaption) zur Funktionsintegration zu identifizieren und auf dieser Basis neuartige Konzepte zu generieren. Ein Framework auf Basis der Design Structure Matrix (DSM) zur integrierten Funktionsmodellierung wird durch EISENBART et al. [28] entwickelt. Dieser zielt speziell darauf ab, eine Beziehung zwischen den unterschiedlichen Perspektiven bei der Funktionsmodellierung herzustellen, die in den verschiedenen Disziplinen der Bauteilentwicklung im Vordergrund stehen. Weiter erfordert die Realisierung unterschiedlicher Funktionen in einem Bauteil unterschiedliche oder teils gegensätzliche Bauteileigenschaften, die sich gegebenenfalls nachteilig beeinflussen. Folglich können sie oft nicht durch den gleichen Funktionsträger umgesetzt werden. Ein Ansatz der die multifunktionelle Bauteilentwicklung unterstützt, basiert auf der Unterteilung von Bauteilstrukturen und somit die Generierung verschiedener Funktionsträger, welche die Realisierung unterschiedlicher Funktionen ermöglichen [29]. Die Integration von Funktionen in die Struktur wird dabei durch eine Trennung der Funktionsträger innerhalb der Struktur realisiert. Klaiber [30] stellt eine Methode zur Planung und Bewertung von Funktionsintegration in strukturelle Bauteile mittels unterschiedlicher Fertigungsprozesse vor.

Neben spezifischen Methoden und Hilfsmitteln lassen sich im Rahmen der Funktionsintegration auch Methoden und Hilfsmittel aus anderen Themenfeldern anwenden. Beispiele hierfür sind durch die Innovationsmatrix [31] oder durch eine Anwendung der Theorie der Wirkflächen und -räume [32, 25] gegeben. Durch Potenzialmodelle kann eine Eigenschaftsfrüherkennung von Bauteilkandidaten hinsichtlich einer Funktionsintegration bei einer Überführung in eine hybride Bauweise erfolgen [5].

Der Begriff Funktionsintegration kann auf vielfältige Weise interpretiert bzw. Funktionsintegration auf unterschiedlichste Weise umgesetzt werden. Klaiber et al. haben zur Kategorisierung dieser Möglichkeiten unterschiedliche Strategien für Funktionsintegration definiert. Die einzelnen Strategien besitzen dabei spezifische Potenziale, für die sich mit zunehmender Integrationstiefe ein Zusammenhang erkennen lässt. [27]

1.2.2 Nachhaltigkeit und Zirkularität

e) Circular Economy und Design for ReX

Circular Economy beschreibt ein Rahmenwerk für Systemlösungen, welche sich globalen Herausforderungen wie dem Klimawandel, Verlust von Biodiversität, Abfall und Verschmutzung annimmt. Grundgedanke hierbei ist ein Perspektivenwechsel, weg von einer linearen, hin zu einer zirkulären Betrachtungsweise von Produkten. Der Begriff ist des Weiteren interdisziplinär und

multidimensional zu verstehen und umfasst Themengebiete wie Nachhaltigkeit, Umwelt, Wirtschaft und Ingenieurswesen. Üblicherweise wird Circular Economy dabei in drei Stufen unterteilt: [33]

1. **Makro-Level:** Innerhalb dieser Stufe wird Circular Economy im globalen Kontext verstanden. Akteure sind in diesem Fall also politische Entscheidungsträger auf nationaler und internationaler Ebene, mit dem Ziel, die Einführung und Durchsetzung der Konzepte der CE über Gesetze, Verordnungen oder wirtschaftliche Anreize zu fördern.
2. **Meso-Level:** Behandelt CE-bezogene Probleme, welche vornehmlich auf unternehmerischer und lokaler Ebene auftreten und gelöst werden. Beispiele hierfür sind eine nachhaltige Entwicklung oder die umweltfreundliche Entsorgung und im besten Fall Wiederverwendung von Abfällen. Ziel ist dabei die Umsetzung des sogenannten Cradle-to-Cradle-Prinzips [34].
3. **Mikro-Level:** Ebene auf welcher die klassischen CE-Prinzipien, wie bspw. Reuse, Recycle, Reduce, Repurpose, Remanufacturing und Refurbish, in Produktions- und Entwicklungsprozesse implementiert werden.

Im speziellen Kontext des Maschinenbaus ist die Circular Economy eng mit den Disziplinen des Design for ReX verwandt, oft auch als 3R [35], 4R [36], 6R [37] oder sogar 9R [38, 39] bekannt. Damit sind Maßnahmen, Methoden und Gestaltungsrichtlinien zur Entwicklung von Produkten unter Berücksichtigung von Zirkularität zwischen unterschiedlichen Lebenszyklusphasen gemeint. Im Folgenden werden einige der ReX-Prinzipien näher erläutert

Reduce

Unter dem Prinzip der Reduktion werden zumeist Maßnahmen verstanden, welche greifen, noch bevor ein Material oder Produkt das Ende ihrer Nutzungsphase erreicht hat, aber auch Maßnahmen welche dafür sorgen, dass gewisse Produkte, Stoffe oder Mengen gar nicht erst benötigt und daher nicht produziert werden. Hierunter fällt eine ganze Reihe von Methoden und Werkzeugen. Ein Beispiel hierfür ist die Reduzierung benötigten Materials mittels Leichtbau oder die Einsparung von Energie durch eine effizientere Produktion. Auch die Verlängerung von Produktlebenszyklen führt insgesamt zu einer Reduzierung des Stoffeinsatzes.

Reuse

Im Gegensatz dazu greift die Wiederverwendung von Produkten oder Teilen des Produkts am Ende der Nutzungsphase. Oft findet dabei eine weitere Unterteilung in Wiederverkauf (**Resale**), Umnutzung (**Repurposing**), Reparatur (**Repair**), Wiederaufbereitung (**Refurbish**), Wiederherstellung (**Remanufacturing**) und Resynthesierung (**Resynthesis**) statt. All diese Maßnahmen zielen auf die weitere Verwendung ganzer Systeme oder Komponenten ab. [37]

Recycle

Kann ein Produkt nicht mehr im Sinne des Reuse-Gedankens einer erweiterten Nutzung zugeführt werden, wird es zerlegt bzw. demontiert. Von Recycling wird demnach gesprochen, wenn einzelne Stoffe oder Materialien eines Produkts wiederum in die Fertigung eines neuen Produkts einfließen. Zwischenschritte dieser Maßnahmen sind also vor allem die Demontage, Trennung und Sortierung von Produkten. Auch die Frage nach der Qualität eines mittels recycelten Materialien hergestellten Produkts ist von hoher Relevanz, besonders im Kontext des Leichtbaus und der damit einhergehenden Hybridbauweisen. So muss etwa für Verbundwerkstoffe untersucht werden, wie recyclingfähig

einzelne Grundstoffe des Verbunds sind um die Umsetzbarkeit potentieller Reuse/Recycling-Schritte abschätzen zu können [40]. Auch die sortenreine Trennung stellt hierbei eine besonders große Herausforderung dar und muss daher schon während der Entwicklung von Produkten berücksichtigt werden.

Demontage

Die Demontage bzw. die Demontagefähigkeit von Produkten beeinflusst nahezu alle Bereiche des Design for ReX und hat damit maßgeblichen Einfluss auf die Zirkularitätseigenschaften von Produkten. Für eine Reparaturfähigkeit ist bspw. die Austauschbarkeit defekter Komponenten notwendig. Dabei sollte so wenig unnötiger Austausch wie möglich vonnöten sein. Dies kann durch eine geeignete Modularisierung realisiert werden, was ebenfalls für die Wiederverwendung einzelner Komponenten gilt. Hierfür ist hinsichtlich einer geeigneten Modularisierung ebenfalls zu berücksichtigen, dass ähnliche Lebenszyklen der einzelnen Bauteile bzw. funktionalen Umsetzungen vorliegen. Beinhaltet ein Modul bspw. eine Komponente mit signifikant kürzerem Lebenszyklus, kann dies die direkte Wiederverwendung des Moduls verhindern bzw. zu einem verfrühten Lebensende des gesamten Produkts führen. Neben Verschleiß oder Defekten kann dies auch durch technologische Weiterentwicklung begründet sein. Für die Funktionsintegration entsteht somit der Bedarf für eine genaue Planung der daraus resultierenden Lebenszyklen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Herausforderungen durch eine zwingend notwendige Reduzierung des CO₂-Ausstoßes unter anderem mittels Methoden der Circular Economy und des Designs for ReX erreicht werden kann. Des Weiteren eröffnet die Forderung nach einem gesteigerten Funktionsumfang von Produkten und der damit einhergehenden Funktionsintegration ein relevantes Forschungsfeld mit signifikanten und zu lösenden Zielkonflikten.

f) Umweltanalysen (Life Cycle Assessment)

Die Ökobilanzierung bzw. Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment, LCA), ist die methodische Grundlage zur Ermittlung und Bewertung von Umweltkenngößen über den gesamten Produktlebensweg. In der LCA werden somit Lebensphasen von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung und Materialherstellung bis hin zur Anwendung, Abfallbehandlung und endgültigen Beseitigung berücksichtigt. Durch diesen übergreifenden Ansatz kann die Verlagerung einer potenziellen Umweltbelastung zwischen den Lebensabschnitten oder einzelnen Prozessen identifiziert und idealerweise gänzlich vermieden werden. Die LCA ist in den internationalen Normen ISO 14040 [41] und ISO 14044 [42] beschrieben und kann somit in den Grundzügen nach einem standardisierten Vorgehen durchgeführt werden. Erstere Norm beschreibt die Grundsätze und Rahmenbedingungen der Ökobilanz. Letztere legt die Anforderungen an die Bilanz fest und liefert Anleitungen für deren Erstellung. Die *klassische Ökobilanz* hat eine umweltbezogene Ausrichtung und legt somit den Fokus auf die Umweltaspekte und -auswirkungen eines Produktsystems. Ökonomische und soziale Aspekte und Wirkungen liegen außerhalb dieser Betrachtung.

Die Erstellung von Ökobilanz-Studien nach ISO 14040 und ISO 14044 besteht aus den vier Phasen

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz,
- Wirkungsabschätzung und

- Auswertung.

Die Phasen werden sequenziell durchlaufen (siehe Abbildung 1.4). Da eine LCA den Charakter eines Analyseinstruments hat, erfolgt eine kontinuierliche Detaillierung des betrachteten Produktsystems. Die neugewonnenen Informationen über das System können so weitreichend sein, dass sie eine Anpassung vorheriger Schritte bis zur Überarbeitung der initialen Fragestellung erfordert. Dies führt zu einer iterativen Vorgehensweise bei der Durchführung. [43]

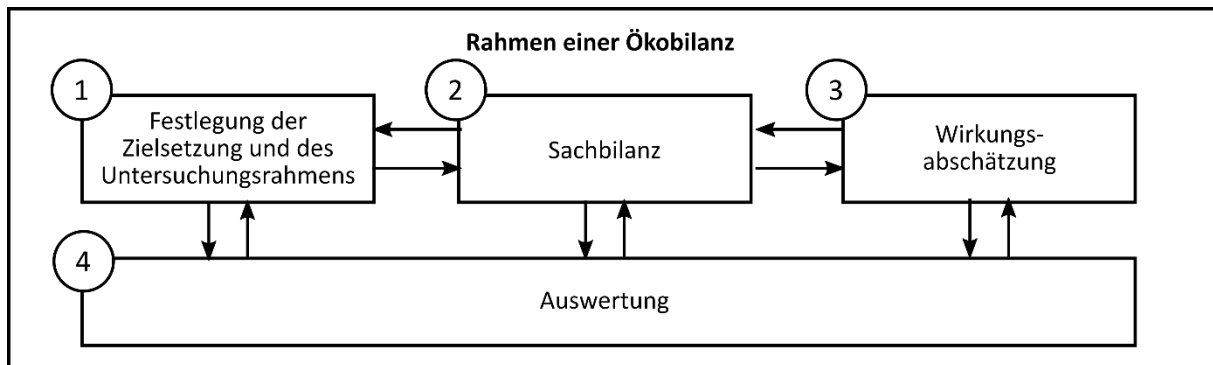


Abbildung 1.4: Phasen der Ökobilanz nach [41]

Nach der DIN EN ISO 14040 werden in der initialen Phase der LCA neben der Definition der Zielsetzung und der Abstimmung des Untersuchungsrahmens auf die beabsichtigte Anwendung verschiedene Festlegungen zu Form und Inhalt der weiteren Arbeiten getroffen. Bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens müssen beispielsweise Punkte wie das zu untersuchende Produktsystem, dessen Funktionen, die Systemgrenzen aber auch Methoden für die Wirkungsabschätzung, Wirkungskategorien und Methoden zur Auswertung beschrieben werden. Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt die Definition der möglichen Datenquellen und -typen und die Anforderungen an die Qualität der Daten im Kontext der Zielsetzung dar. Aufgrund der iterativen Eigenschaft einer LCA ist der Untersuchungsrahmen unter Umständen während der Durchführung weiter zu konkretisieren. Aufbauend auf der festgelegten Zielsetzung und des konkretisierten Untersuchungsrahmens erfolgt in der zweiten Phase die Durchführung einer Sachbilanz. Diese umfasst die Schritte der Datenerhebung und Anwendung der Berechnungsverfahren zur Quantifizierung der relevanten Eingangs- und Ausgangsflüsse eines Produktsystems. Auch hier kommt der iterative Charakter einer LCA zu tragen, da beispielsweise während der Datenerhebung und Konkretisierung des Systems neue Datenanforderungen oder Einschränkungen erkannt werden, auf die reagiert werden muss, um die Zielsetzung der Studie weiterhin erfüllen zu können. In der dritten Phase, der Wirkungsabschätzung, werden auf Basis der in der Sachbilanzierung ermittelten Stoffflüsse mit spezifischen Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft und die Umweltwirkung quantifiziert. Die Ergebnisse aus der Wirkungsabschätzungsphase und der Sachbilanz liefern die Grundlage für die finale Phase der Auswertung der Ökobilanz. Diese Phase liefert Ergebnisse, die mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen übereinstimmen und zur Ableitung von Schlussfolgerungen, Erläuterung von Einschränkungen und zum Aussprechen von Empfehlungen an die Zielgruppe. Direkte Anwendungen der LCA sind bspw. in der Entwicklung und Verbesserung von Produkten, der strategischen Planung, im Marketing oder für politische Entscheidungsprozesse zu finden.

Ökobilanzen lassen sich in vergleichende und nicht-vergleichende Untersuchungen unterteilen. Bei den vergleichenden Untersuchungen bezieht sich die Fragestellung auf die Identifizierung der Prozesse mit maximalen Umwelteinwirkungen innerhalb der analysierten Prozesskette eines Produktsystems.

Im zweiten Fall steht der Vergleich verschiedener Produkte untereinander im Vordergrund. Weiterhin können Ökobilanzen dahingehend unterschieden werden, ob sie vergangenheitsbezogen oder zukunftsbezogen sind. Die erste Variante, auch bezeichnet als *attributional LCA*, untersucht existierende Produkte unter gegenwärtigen Marktbedingungen. Die zweite Variante (*consequential LCA*) bezieht sich auf eine Untersuchung von Umweltauswirkungen von zukünftigen Änderungen zwischen alternativen Produktsystemen und kann eine weitreichende Einbeziehung von Hintergrundsystemen erfordern. Hier kann bspw. das Berücksichtigen zukünftiger Energiesysteme genannt werden. Die zukunftsbezogene Anwendung wird derzeit nicht in bestehenden Normen weiter detailliert. [43]

Neben der klassischen LCA wurden weitere Methoden entwickelt, die einen vergleichbaren methodischen Ansatz verfolgen, aber neben der Umweltauswirkung von Prozessen, weitere Nachhaltigkeitsaspekte, wie ökonomische und soziale Faktoren, berücksichtigen [43]. Hier kann exemplarisch die Ökoeffizienz-Analyse angeführt werden, die die Wirtschaftlichkeit eines Produktes in das Verhältnis zu den Auswirkungen auf die Umwelt setzt. Die Aggregation der klassischen LCA mit der ökonomischen Betrachtung ist in Form der internationalen Norm ISO 14045 [44] beschrieben. Die Erweiterung der Ökoeffizienz-Analyse um eine weitere Dimension der Nachhaltigkeit in Form sozialer Aspekte besteht in der Sozio-Ökoeffizienz-Analyse [45]. Weitere Methoden, die auf der ISO 14040 und 14044 aufbauen, bzw. als eine Sonderform der Ökobilanz gesehen werden können, sind u.a. der Carbon Footprint [46] oder der kumulierte fossile Energieaufwand KEA [47].

In den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts hat sich die umweltorientierte Produktentwicklung zu einem Schwerpunkt der Umweltpolitik entwickelt. Damit entstand auch der Bedarf an Hilfsmitteln für die Unterstützung und Entscheidungsfindung im Entwicklungsprozess. Neben einfachen Kennzahlen für Werkstoffe, Produkte und Produktionsverfahren wurden auch lebenszyklusbezogene Kennzahlen entwickelt.

1.2.3 Recyclingrouten für Materialien

Die metallischen und nichtmetallischen Materialien aus der Aufbereitung haben üblicherweise noch Verunreinigungen durch Oberflächenanhaftungen (z.B. Lacke, Öle, Schmutz) oder im Fall der Metalle unerwünschte Legierungsbestandteile. Darum erfolgt nach der Aufbereitung eine Veredelung der Sekundärrohstoffe durch Homogenisierungs- und Reinigungsverfahren (Raffinationsverfahren). In der Abbildung 1.5 ist die gesamte Prozesskette von der Logistik bis zum Vorliegen vermarktungsfähiger Sekundärrohstoffe dargestellt.

Die Prozesse zum Homogenisieren und Reinigen (Raffinieren) sollen am Beispiel der wichtigsten Metalle und der thermoplastischen Werkstoffe genauer dargestellt werden. Um einen umfassenden Überblick über den Markt und die Aufbereitung von Werkstoffen zu erhalten, wurde im Rahmen des Projektes eine Recycling-Datenbank erarbeitet.

a) Stahl und Eisenwerkstoffe

Für das Recycling von Stahlschrotten gibt es drei wichtige Routen, nämlich

- Einsatz von Stahlschrott (ca. 20 %) beim Sauerstoffblasverfahren (Blaskonverter),
- Einsatz von Stahlschrott (100 %) beim Elektrostahlverfahren (Elektrostahlkonverter),
- Einsatz von Stahlschrott bei der Gusseisenherstellung (Kupolofen).

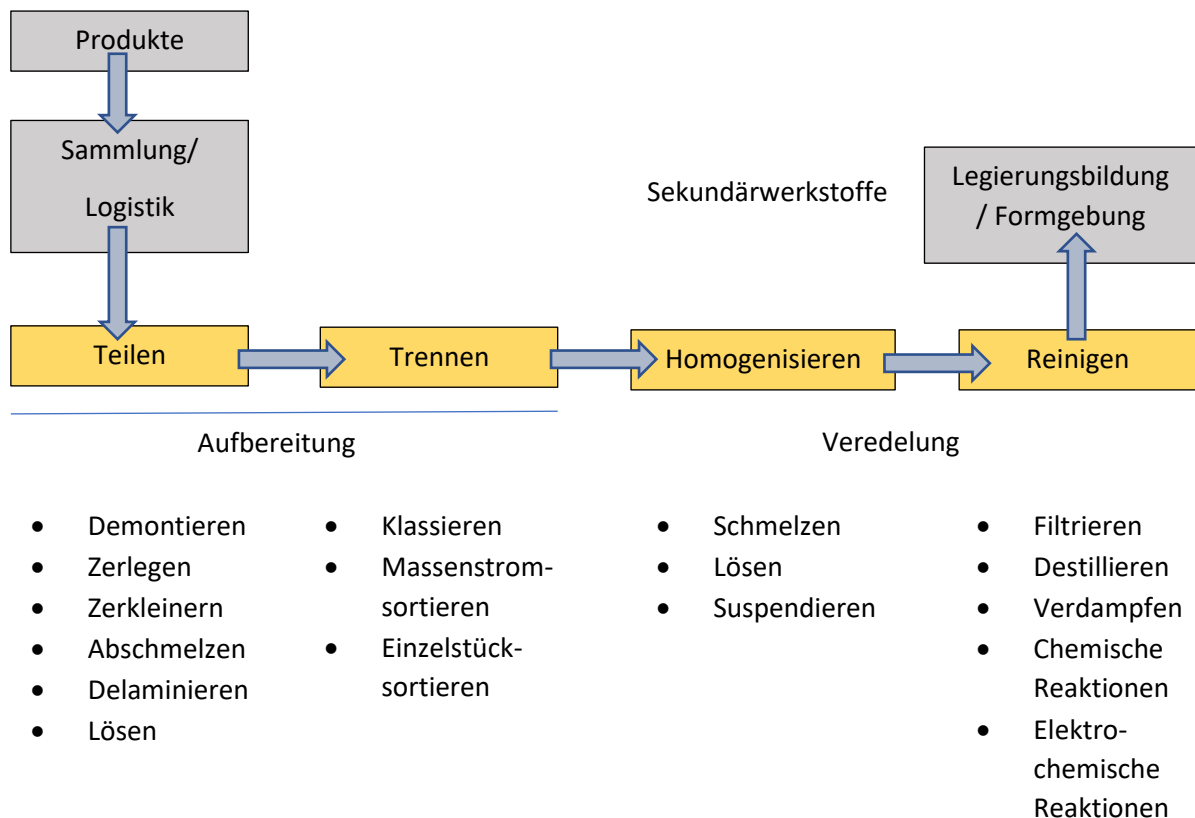


Abbildung 1.5: Prozesskette für die Aufbereitung und Veredelung von Sekundärrohstoffen

In der Bundesrepublik Deutschland werden pro Jahr etwa 40 Mio. t Stahl hergestellt, davon entstammen ca. 2/3 aus dem Sauerstoffblaskonverter und 1/3 aus dem Elektrolichtbogenofen.

Das Sauerstoffblasverfahren ist ein Prozessschritt bei der Herstellung von Oxygenstahl in einem integrierten Hüttenwerk (vgl. Abbildung 1.6). Dazu werden Eisenerze aufbereitet und unter Zugabe von Koks und Zuschlagstoffen in einem Hochofen zu Roheisen erschmolzen. Dem Roheisen müssen anschließend durch partielle Oxidation Eisenbegleiter wie Phosphor, Silizium und Schwefel entzogen werden. Dazu wird das Roheisen in einen Blaskonverter überführt und während des „Frischeprozesses“ eine Sauerstofflanze auf das flüssige Roheisen gehalten. Dabei gehen die unerwünschten Eisenbegleiter als Oxide in die Schlacke oder in den Gasraum oberhalb der Schlacke über, die anschließend abgeschöpft wird. Zur Kühlung der Stahlschmelze wird dem Prozess etwa 20 %

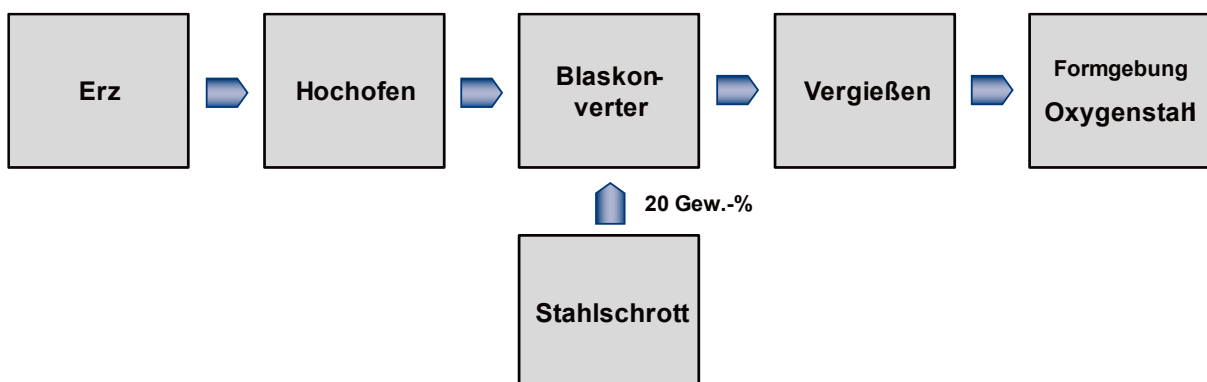


Abbildung 1.6: Prozessschritte zur Herstellung von Oxygenstahl

Kühlschrott (Shredderschrott der Sorte 4) dazugegeben. Der so gewonnene Stahl wird anschließend mit Legierungselementen veredelt (Pfannenmetallurgie) und für die nachfolgende Formgebung im Strangussverfahren zu Brammen vergossen.

Beim Elektrostahlverfahren wird zu 100 % Stahlschrott in einem Lichtbogenofen eingesetzt (vgl. Abbildung 1.7). Zum Schmelzen des Stahls wird zwischen Kohlelektroden und dem Schrott ein Lichtbogen gezündet. Die Zusammensetzung der Schmelze wird während des Prozesses analysiert und durch Zugabe von Legierungselementen die gewünschte Eigenschaft eingestellt. Als Koppelprodukt zum Stahl wird das Zink aus verzinkten Blechen über die Ofenabgase zurückgewonnen. Nachfolgende Abbildung zeigt die wesentlichen Prozessschritte für die Herstellung von Elektrostahl. Standorte für integrierte Hüttenwerke (Oxygenstahlerzeugung) und Sekundärhütten (Elektrostahl) in Deutschland sind in Abbildung A. im Anhang dargestellt.

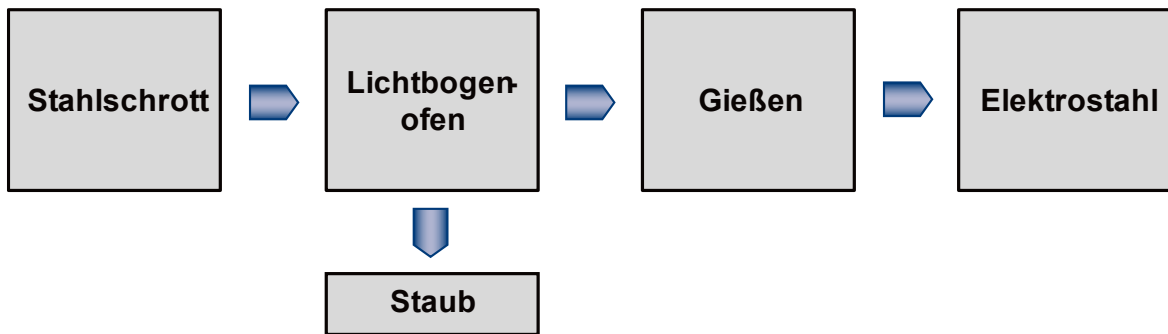


Abbildung 1.7: Prozessschritte zur Herstellung von Elektrostahl

Eine dritte Möglichkeit für den Einsatz von Stahlschrott ist die Herstellung von Gusseisen (vgl. Abbildung 1.8). Dabei wird graues Roheisen, Gussbruch und Stahlschrott in einem Kupolofen eingeschmolzen (Vorschmelzofen) und anschließend je nach gewünschter Gussorte in einem Induktionstiegelofen mit Legierungselementen veredelt. Das nachfolgende Vergießen im Sand- oder Kokillenguss-Verfahren liefert Gussstücke mit Kugelgraphit, Lamellengraphit oder Vermiculargraphit.

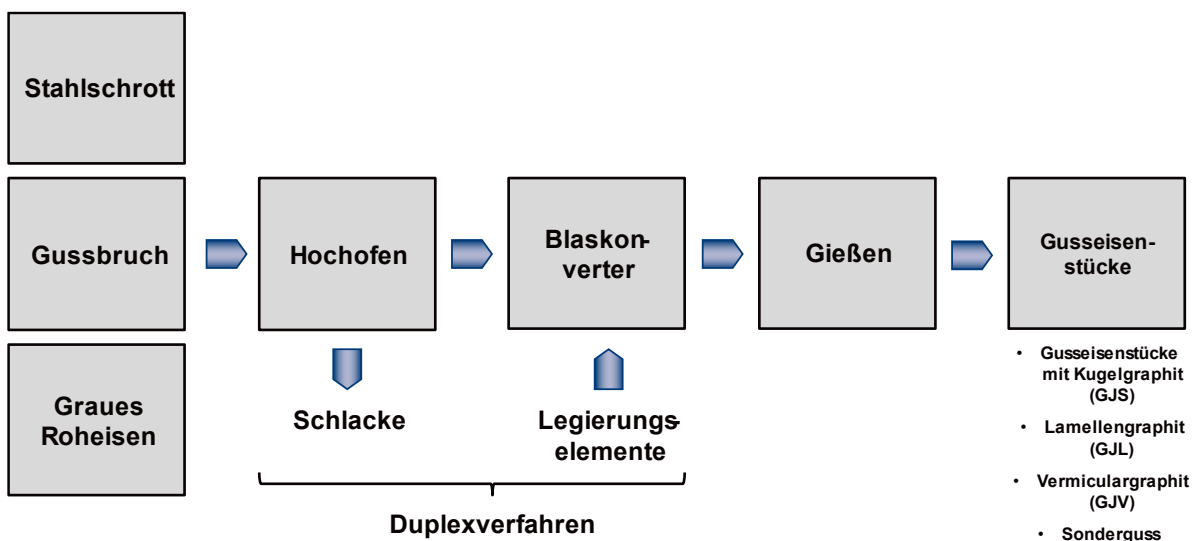


Abbildung 1.8: Herstellung von Gusseisen unter Zugabe von Stahlschrott

b) Aluminium (Guss- und Knetlegierungen)

Im Recyclingprozess werden üblicherweise Aluminiumknetlegierungen und minderwertigere Gusslegierungen gemeinsam behandelt. Im Endergebnis liegen Gusslegierungen vor und darum wird häufig von einem Downcyclingprozess gesprochen. Je nach Art und Qualität der Schrotte kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Genannt seien:

- Einsatz im Trommelofen unter Schmelzsatzbehandlung,
- Einsatz im Zweikammerofen für leicht verschmutzte Schrotte,
- Spezielle Behandlungsverfahren und Öfen (z. B. Wannenöfen).

In Abbildung 1.9 sind die Prozessschritte für die Herstellung von Sekundäraluminium vereinfacht dargestellt. Für das Homogenisieren wird ein Kurztrommelofen eingesetzt und die Raffination der Schmelze erfolgt über eine Spülung mit Inertgas (Argon). Beim Einschmelzen des leicht oxidierbaren Aluminiums wird die Schmelzoberfläche mit einer Salzschiicht (Gemisch aus NaCl und KCl) abgedeckt. Sowohl das nach dem Schmelzprozess verunreinigte Salz als auch das an der Oberfläche oxidierte Aluminium können in speziellen Anlagen einem Recyclingprozess zugeführt werden.

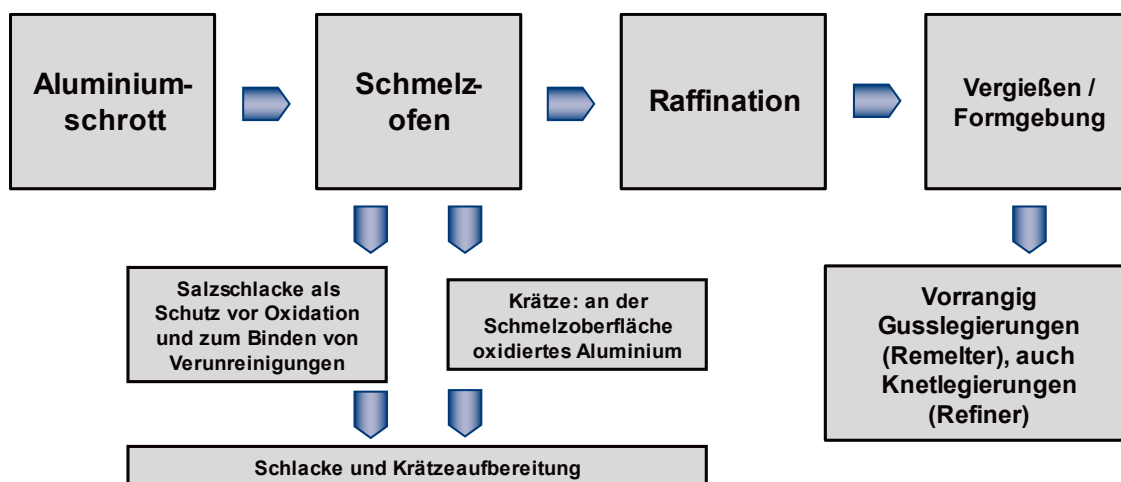


Abbildung 1.9: Prozessschritte zur Herstellung von Sekundäraluminium

Der herausragende Vorteil beim Aluminiumrecycling ist, dass gegenüber der Primärproduktion über den Bayerprozess und die Schmelzflusselektrolyse nur 5 % der dort benötigten Energie bei der Sekundärproduktion eingesetzt werden müssen.

c) Kupfer- und Kupferlegierungen / optional Platinenschrott

Beim Recycling von Kupfer und Kupferlegierungen werden je nach Qualität der Schrotte unterschiedliche Verfahren in Primär- und Sekundärhütten eingesetzt.

Hochwertiges Elektrolytkupfer aus elektrischen Kabeln wird durch mechanische Trennverfahren (Vorzerkleinerung mit einer Rotorschere, Nachzerkleinerung mit einem Granulator und Trennung Isolierung/Kupfer mit einem Wirbelstromabscheider) von der Isolierung und anderen Störstoffen befreit (Millberry-Kupfer) und in einem Anodenofen geschmolzen (vgl. Abbildung 1.10). Minderwertigere Schrotte wie Motorschrott und die Kupferlegierungen Bronze und Messing durchlaufen vor dem Anodenofen einen Schachtofen/Elektroofen und zur Vorraffination (Blei, Zink, Zinn) einen Konverter. Das Kupfer aus dem Anodenofen wird schließlich in einer wässrigen Elektrolyse mithilfe von Kupfersulfat zu Kupfer der Reinheit von 99,99 % raffiniert. Als Koppelprodukt findet man

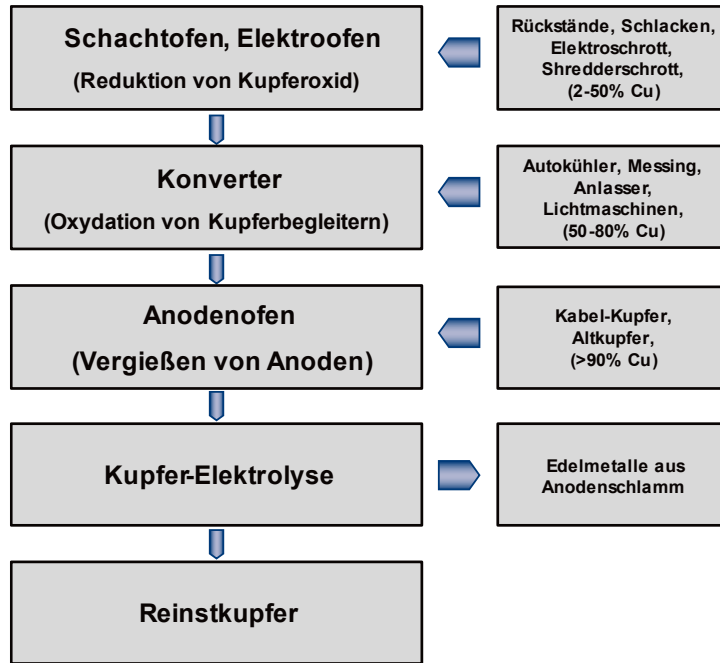


Abbildung 1.10: Prozessschritte zur Herstellung von Sekundärkupfer

im Elektrolyseschlamm die Platingruppenmetalle (Edelmetalle) wieder, die durch weitere pyrometallurgische und hydrometallurgische Prozesse nachbehandelt werden. Häufig wird den schmelzmetallurgischen Prozessen definiert Platinenschrott dazugegeben und die Edelmetalle über den elektrolytischen Prozess ausgeschleust.

d) Blei- und Bleilegierungen aus Batterie

Beim Recycling von Blei-Säure-Batterien werden die Batterien zunächst geschreddert. Die Schwefelsäure kann mithilfe von Natronlauge zu Natriumsulfat neutralisiert werden, welches ein wichtiger Rohstoff z. B. für die chemische Industrie ist. Das Polypropylen der Batteriegehäuse kann über eine Schwimm-Sink-Trennung separiert und zu hochwertigen Rezyklat verarbeitet werden. Das verbleibende Blei wird zunächst in einem Trommelofen erschmolzen und anschließend raffiniert. Alternativ kann das Gehäusematerial als Energieträger in einem Schachtofen eingesetzt werden (VARTA-Schachtofenverfahren). In Abbildung 1.11 sind die Prozessschritte für die Herstellung von

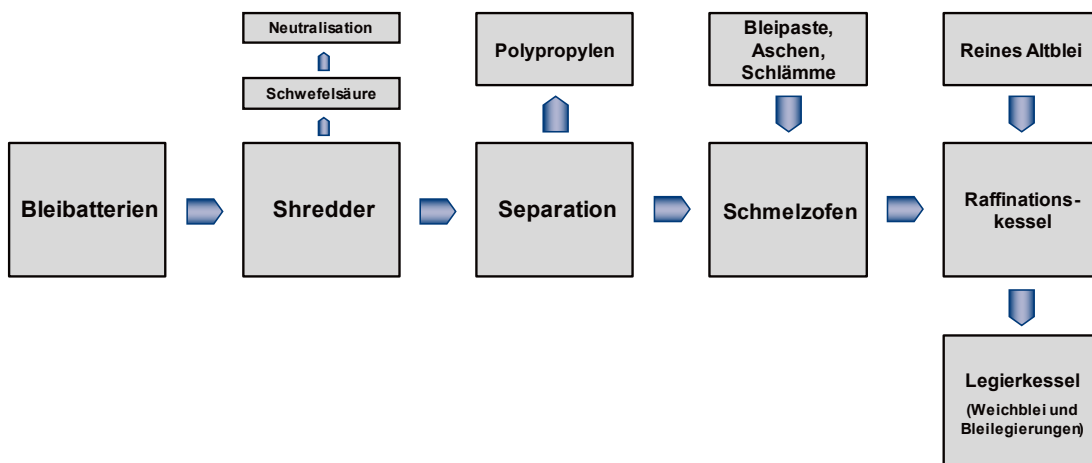


Abbildung 1.11: Prozessschritte zur Herstellung von Sekundärblei

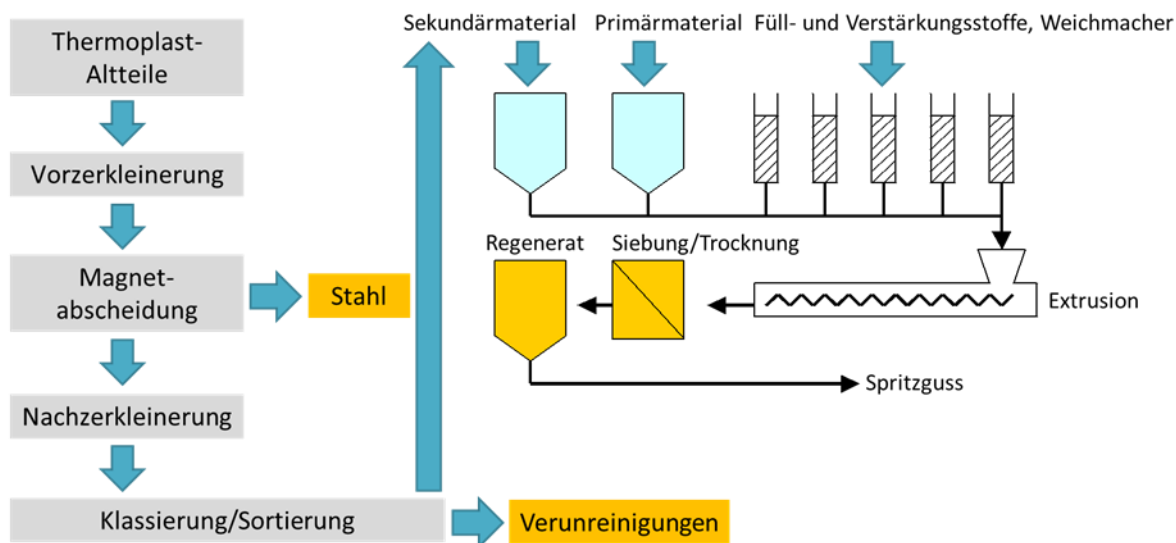


Abbildung 1.12: Herstellung von Kunststoffregenerat (Rezyklat)

Sekundärblei vereinfacht dargestellt. Je nach Legierungsbestandteile liegen am Ende des Prozesses verschiedene Weichblei- und Hartbleilegierungen vor.

e) Thermoplastische Werkstoffe

Thermoplastische Werkstoffe werden in einem Extruder homogenisiert (plastifiziert) (vgl. Abbildung 1.12). Die Thermoplast-Altteile werden zunächst in mehreren Vorbehandlungsschritten von Verunreinigungen befreit und zu Mahlgut verarbeitet. Dieses Mahlgut wird anschließend mit Primärmaterial und gegebenenfalls mit Füll- und Verstärkungsstoffen sowie Weichmachern veredelt und in einem Extruder unter Temperatureinwirkung plastifiziert. Das abgekühlte Material wird anschließend granuliert und als Regenerat in den Handel gebracht. Die dargestellten Prozessschritte können auch für glasfaserverstärkte und naturfaserverstärkte Thermoplaste durchgeführt werden. Die Verkürzung der Fasern infolge der mechanischen Behandlung muss gegebenenfalls durch Primärmaterial ausgeglichen werden, damit der Werkstoff definierte mechanische Eigenschaften (Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit etc.) erhält.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Datenbankrecherche zum Markt für Sekundärkunststoffe durchgeführt. Danach gibt es mehr als 100 Verarbeiter und Anbieter für Kunststoffrezyklate. Bei einigen Anbietern wird der Thermoplast aus Altteilen direkt zu neuen Formteilen umgeschmolzen.

f) Glasfaserverstärkte Duroplaste

In glasfaserverstärkten Duroplasten sind durch eine Harz-Härter-Reaktion die Polymerketten irreversibel vernetzt und der Werkstoff kann nicht wieder plastifiziert werden. Bereits in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde bei der Firma ERCOM die Rückgewinnung von Glasfasern verschiedener Länge aus duroplastischen Bauteilen erprobt (Partikelrecycling). Aus wirtschaftlichen Gründen wurden die Aktivitäten wenige Jahre später eingestellt. Gegenwärtig gibt es kein wirtschaftliches und technisch ausgereiftes Verfahren zur Rückgewinnung von Glasfasern aus Duroplasten. Ob die im Labormaßstab betriebene „Elektrodynamische Fragmentierung“ (auch als Hydropulstechnik bekannt) eine großtechnische Lösung wird, bleibt abzuwarten. In Abbildung 1.13 ist das Grundprinzip des „Partikelrecycling“ für glasfaserverstärkte Duroplaste dargestellt.

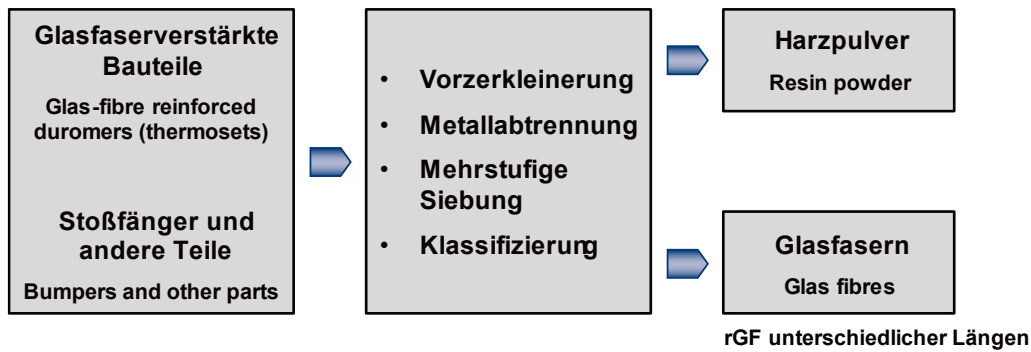


Abbildung 1.13: Rückgewinnung von Glasfasern (rGF) aus duroplastischen Bauteilen

g) Kohlefaserverstärkte Duroplaste

In kohlefaserverstärkten Duroplasten liegen die Kohlefasern üblicherweise als Gewebematten vor. Für eine sinnvolle Sekundäranwendung müssen also einerseits die Kohlefasern aus der duroplastischen Matrix herausgelöst und anschließend zu Fasern vereinzelt werden. Eine Möglichkeit zum Herauslösen der Fasern ist die Pyrolyse. Dabei erfolgt eine Depolymerisation des Matrixmaterials unter Sauerstoffausschluss in einem Schutzgas bei höheren Temperaturen. Das Aufheizen des Materials erfolgt über Heizer oder Mikrowellenstrahler. Die induktive Erwärmung des Materials befindet sich zurzeit in der Erprobung. Als Endprodukt liegt Fasermaterial in einer guten Qualität sowie Pyrolysekoks bzw. flüssige Kohlenwasserstoffe vor. Die Pyrolyse ist zurzeit das einzige industrielle Verfahren zur Verarbeitung von carbonfaserverstärkten Duroplasten (zurzeit begrenzte Anlagenkapazität für Produktionsabfälle). Die gegenwärtige gängige Praxis ist das Shreddern der Kohlefasern und Zumischung zu Beton.

Die Recyclingrouten für sonstige nichtmetallische Werkstoffe sollen hier stichwortartig wiedergegeben werden:

Glas

- Rückführung von Glasbruch zu Schmelzhütten gängige Praxis
- Einsatz bei der Floatglas- oder Hohlglasproduktion sowie Herstellung minderwertiger Produkte (Glaswolle etc.)

Keramik

- Partikelrecycling (Rückgewinnung von Keramikpulver) als Füllstoff technisch möglich, aber nicht wirtschaftlich
- Einsatz im Straßenbau

Papier

- Rückführung von Papier und Pappe zu Papierfabriken ist gängige Praxis
- Spezialisierung auf hochwertige Papiere und Verpackungsmaterialien (Karton)

Kältemittel

- Rückgewinnung des Kältemittels für Sekundäreinsatz über Absaugung und Trocknung gängige Praxis
- Verbrennung unbekannter/verbotener Kältemittel in Sonderabfallverbrennungsanlagen

1.2.4 Design for Circular Economy

Bei der Recyclingfähigkeit von Produkten spielt deren Entwicklung eine zentrale Rolle, da an dieser Stelle bereits zahlreiche Vorfestlegungen hinsichtlich einer späteren Recyclingfähigkeit getroffen werden. Die explizite Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit bzw. Zirkularität von Produkten bei deren Entwicklung wird auch als Design for Circular Economy bezeichnet. Zunächst sollen die Grundregeln für ein demontage- und recyclinggerechtes Produkt dargestellt werden. Diese Grundregeln sind dann mit den realen konstruktiven Merkmalen der Ladesäule zu vergleichen und Verbesserungspotenziale herauszuarbeiten.

Bei der demontagegerechten Gestaltung von Produkten sind als wesentliche Kriterien die Baustruktur, die Verbindungstechnik und die Anordnung der Verbindungen (Fügestellen) zu nennen. In Tabelle 1.1 sind die Kriterien für ein demontagegerechtes Produkt in Form einer Checkliste dargestellt. Bei Bedarf kann eine Checkliste mit Erfüllungsgraden („Noten“) und Gewichtungsfaktoren versehen werden. Man spricht dann von einer Nutzwertanalyse.

Es gibt eine Vielzahl von Baustrukturen, wobei die Integralbauweise (Einstoffbauweise) und die Differenzialbauweise als übergeordnet zu betrachten sind. Die Differenzialbauweise kann mithilfe eines Teileverbindungsgraphen veranschaulicht werden. Dabei werden die Bauteile als Kreise und die Verbindungen als Linien dargestellt. Wenn alle Bauteile nacheinander wie auf einer Perlenkette aufgereiht sind, spricht man von einer streng hierarchischen Struktur. Wenn zusätzlich die Verbindungen nicht lösbar sind, wird das Bauteil als Schichtverbundwerkstoff bezeichnet.

Die Hierarchie der Baustruktur kann über den „Knotengrad“ (Zahl der Verbindungen/Zahl der Bauteile) definiert werden. Demnach hat eine streng hierarchische Baustruktur den Knotengrad < 1 , eine nicht hierarchische Bauweise kann einen Knotengrad oberhalb von 3 haben. In Tabelle 1.1 wird bei der Art der Verbindungen zwischen lösbaren und nicht lösbaren Verbindungen unterschieden. Generell lassen sich die Verbindungen in Formschluss, Kraftschluss (Reibschluss), plastischer Formschluss (Verbindungselement wird deformiert) und Stoffschluss unterscheiden. In Abbildung 1.14 sind die vier Verbindungsklassen mit Beispielen sowie einer Einordnung der Demontagegerechtheit dargestellt.

Tabelle 1.1: Kriterien für ein demontagegerechtes Produkt

Kriterium	Ideale Lösung	Akzeptable Lösung	Lösung ändern
Baustruktur	Hierarchisch	Teilhierarchisch	Nicht hierarchisch
Auffindbarkeit der Verbindungen	Sichtbar	Verdeckt	Versteckt
Art der Verbindungen	Lösbarer Formschluss / Kraftschluss	Nicht lösbarer plastischer Formschluss	Nicht lösbarer Stoffschluss
Zugänglichkeit zu den Verbindungen	Axial in Hauptdemontage-richtung	Axial in Nebendemontage-richtung	Radial/indirekt
Anzahl der Verbindungselemente	Niedrig	Mittel	Hoch
Vielfalt der Verbindungselemente	Einheitliche Verbindungen	Standardisiert innerhalb der Verbindungsarten	Nicht oder wenig standardisiert
Automatisierbarkeit / Mechanisierbarkeit	Automatisierbar	Mechanisierbar	Manuell, Handarbeit erforderlich

Demontagegerechtigkeit

- ↑ **Formschluss:** Auflegen, Einlegen, Einschieben, Bajonettverschluss, Druck-Dreh-, Druck-Druck-Verschluss, Schlauchverbindung, Welle-Nabe-Verbindung, Exzenterverbindung
- Kraftschluss:** Schraubenverbindung, Klettverschluss, Klemmverschluss, Magnetverschluss, Schnappverbindung Wulst, Schnappverbindung Haken, Schnappverbindung Feder, Federverschluss
- Plastischer Formschluss:** Nietverbindung, Blindnietverbindung, Stanznietverbindung, Bördeln, Clipsen, Clinchen,
- Stoffschluss:** Schweißen, Löten, Kleben, Umschäumen, Einschäumen.

Abbildung 1.14: Demontagegerechtigkeit von Verbindungen mit Beispielen

Sortenreine Demontierbarkeit	Zerstörungsfrei	Zerstörend	Nicht demontierbar / zerlegbar
Anzahl der Einzelteile	Niedrig	Mittel	Hoch
Art der benötigten Werkzeuge	Lösbar ohne Werkzeuge	Lösbar mit Universalwerkzeugen	Lösbar mit Spezialwerkzeugen

Wenn ein Produkt oder Teile eines Produktes einer stofflichen Verwertung zugeführt werden sollen, steht das aufbereitungsgerechte Konstruieren im Vordergrund. Dabei geht es darum, die Prozessschritte Vorbehandlung, Zerkleinerung, Separierung der Werkstoffe und Verhüttung/Veredelung der Werkstoffe zu begünstigen. Als grundsätzliche Regeln für eine aufbereitungsgerechte Konstruktion sind zu nennen:

- Realisierung einer zerlegegerechten Baustruktur (Zerlegung von nicht gemeinsam verwertbaren bzw. verfahrenstechnisch nur schwer trennbaren und verwertbaren Baugruppen und Bauteilen vorsehen),
- Wahl kreislauffähiger Werkstoffe (Metalle vor Thermoplasten vor Duroplasten/Elastomeren),
- Minimierung der Werkstoffvielfalt (Reduzierung von Trennprozessen),
- Kombination untereinander verträglicher Werkstoffe realisieren (z. B. Kombination von Al-Guss- und Knetlegierungen, Kombination von Thermoplasten),
- Möglichst vollständige Entnahme von Schad- und Störstoffen realisieren (z. B. Trockenlegung des Klima-/ Heizgerätes ermöglichen),
- Kennzeichnung von Werkstoffen und Schadstoffen (z. B. Kennzeichnung von Kunststoffen nach DIN ISO 1043)
- Trenn- und Separierbarkeit der Werkstoffe verfahrenstechnisch ermöglichen (z. B. Kombination magnetisch-nichtmagnetisch, elektrisch leitfähig-nicht leitfähig, hohe Dichte-niedrige Dichte, weich-hart),
- Verwendung biologisch abbaubarer Werkstoffe,
- Konstruktion von Bauteilen aus nachwachsenden Rohstoffen.

1.2.5 Kleinserien- und Prototypenfertigung

Bei der additiven Fertigung (engl. additive manufacturing, AM) handelt es sich um ein Fertigungsverfahren, bei dem Bauteile Schicht für Schicht aufgebaut werden [48]. Je nach AM-Verfahren und Material unterscheiden sich die Methoden des Aufbaus einzelner Schichten, der

grundlegende Verfahrensablauf ist jedoch verfahrensunabhängig und setzt sich aus mehreren aufeinander aufbauenden Schritten zusammen. Zu Beginn werden dreidimensionale Geometriedaten aus der CAD-Software benötigt. Das Volumenmodell wird im darauffolgenden Schritt in Einzelschichten zerlegt, was auch als Slicing bezeichnet wird. Die Abstände der Schnitte entsprechen hierbei der Schichtdicke im späteren Herstellungsprozess. Anschließend werden die Daten auf die Maschine übertragen. Unabhängig von Material und Verfahren wird während des Bauprozesses jeweils eine Einzelschicht erzeugt und die Bauplattform bzw. die bereits erzeugte Struktur um die Höhe einer Schicht verfahren, bevor eine weitere Schicht aufgetragen wird. Nach Abschluss des Bauprozesses kann das Bauteil aus der Anlage entnommen werden. Anschließend folgt in der Regel ein Nachbehandlungsschritt, der sich je nach Material und Verfahren unterscheidet [49, 50]. Aktuell werden die meisten Bauteile in 2,5D Verfahren, also mit einem horizontalen Slicing, aufgebaut. Deutlich vorteilhafter ist aber zum Beispiel ein Slicing bzw. 3D-Drucken unter einem 45° Winkel. Hierbei bleiben die notwendigen Schichtumlaufzeiten über das komplette Bauteil nahezu konstant und der Prozess kann viel einfacher für großvolumige Bauteile kontrolliert und eingestellt werden. Das Bauteil wächst beim 45°- sozusagen mehr in die Länge und beim 2,5-D-Druck in die Höhe.

Aus konstruktiver Sicht liegen die Vorteile der Additiven Fertigung vor allem in der prozesstypischen Möglichkeit zur freien Formgebung. Dadurch wird es möglich, Bauteile komplexer Geometrien herzustellen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht oder nur mit großem Aufwand realisiert werden können. Gleichzeitig bietet die additive Fertigung neue Möglichkeiten zur Herstellung von Integralbauweisen, sodass mehrere konventionell gefertigte Einzelkomponenten durch eine additiv gefertigte Komponente substituiert werden können [49, 51]. So erlaubt AM, Formen hohl zu bauen und damit deutlich Material und Kosten einzusparen. Die wirtschaftlichen Vorteile des Verfahrens liegen in der schnelleren Produktion durch Verkürzung der Prozesskette durch Digitalisierung, dem minimalen Materialeinsatz sowie der weitestgehenden Unabhängigkeit zwischen Losgröße und Preis [48, 49, 52]. Dadurch entsteht die Möglichkeit, eine große Menge unterschiedlicher Einzelstücke kosteneffizient herzustellen, was auch als *mass customization* bezeichnet wird [53]. Die additive Fertigung wird aufgrund ihres Potenzials Geschäftsmodelle, Prozessketten und Entwicklungsstrategien zu beeinflussen auch als disruptives Verfahren bezeichnet [48, 54]. So rechnen das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie Vertreter aus Industrie und Wirtschaft weiterhin mit einer jährlichen Wachstumsrate von mehr als 30 Prozent in den kommenden Jahren [55, 56].

Beim Extrusionsverfahren, dem sogenannten FFF-Prozess (Fused Filament Fabrication), wird ein thermoplastisches Kunststofffilament durch eine oder mehrere beheizte Extruderdüsen gefördert und darin aufgeschmolzen. Die Düse oder die Bauplattform ist in der Horizontalen beweglich und bringt das aufgeschmolzene Material definiert auf die Bauplattform beziehungsweise auf die vorangegangene Schicht auf [49, 53]. Die erreichbare Auflösung im FFF-Prozess liegt bei 50-200 µm in der Ebene. In vertikaler Richtung ist die Auflösung durch die Schichtdicke begrenzt, welche wiederum vom Düsendurchmesser nach oben limitiert wird, und liegt meist ebenfalls zwischen 50 µm und 200 µm [57]. Die mögliche Bauteilgröße ist allein durch den Verfahrensweg der Extruderdüsen begrenzt, wobei sich ein Trend hin zur großformatigen Additiven Fertigung, auch Large-Format Additive Manufacturing (LFAM) genannt, mit Bauvolumen von einem m³ bis hin zu 25 m³ abzeichnet [58]. Die Vorteile der Extrusionsverfahren liegen in den niedrigen Kosten, den hohen Aufbauraten und der Möglichkeit, große Funktions- und Strukturbauteile herzustellen. Nachteilig ist die niedrige Auflösung, die niedrige Oberflächenqualität sowie die hohe Anisotropie und die damit verbundene niedrigere Festigkeit in

Aufbaurichtung im Vergleich zu Verfahren des Selektiven Lasersinterns (SLS) [51, 53, 59]. Die in diesem Forschungsprojekt eingesetzten Fused Granular Fabrication (FGF) 3D-Drucksysteme sind für den Druck thermoplastischer Kunststoffe optimiert. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass Granulatmaterialien direkt verarbeitet werden können. Dies erlaubt eine hohe Flexibilität bei der Auswahl und Entwicklung passender Materialien. Der Umweg über die Herstellung eines Filaments (FFF) oder eines Pulvers (Pulverbett-Verfahren) ist nicht erforderlich. In Abbildung 1.20 sind alle am Markt verfügbaren additiven Fertigungstechnologien für Kunststoffbauteile erfasst und nach ihrem Industrialisierungsindex eingestuft. Hierbei wird der granulatbasierte Materialextrusionsprozess bezeichnet, mit dem Index 3 versehen und erste industrierelevante Anwendungen angeführt. Diese Einschätzung deckt sich mit unseren Erfahrungen und ebenso, dass marktreife Systeme und Anwendungen in ca. 2 Jahren am Markt verfügbar sein werden.

Das am Fraunhofer IWU entwickelte SEAM-3D-Druckverfahren (Screw Extrusion Additive Manufacturing) als ein spezielles FGF Verfahren erreicht im Vergleich zu einem filamentverarbeitenden Fused-Filament-Modeling (FFF)-System eine 8-fach höhere Prozessgeschwindigkeit bei gleicher Oberflächenqualität und eine 12-fache Materialkosteneinsparung trotz Verwendung höherwertigerer Granulate. Dennoch muss das Material für den Prozess bzw. der Prozess an das Material angepasst werden. Wichtige Aspekte sind die rheologischen Eigenschaften, aber auch das Schwindungs- und Verzugsverhalten bei der Abkühlung des Materials. [52, 60, 61]

Laminiervorrichtungen zur Herstellung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen

Faserverstärkte Kunststoffe werden insbesondere im individuellen Prototypenbau in sogenannten Open-Mould-Verfahren zu Bauteilen verarbeitet. In diesen Verfahren (z.B. Handlaminieren oder Faserspritzen) werden Verstärkungsfasern und Kunststoff auf die Oberfläche einer offenen Vorrichtung aufgetragen. Nach Aushärtung des duromeren Kunststoffes wird das Bauteil entformt. Je nach erforderlicher Standzeit, Verfahrenstemperatur und -druck werden die Vorrichtungen aus (glasfaserverstärktem) Kunststoff, Kunstharz, Aluminium oder Stahl in subtraktiven Verfahren gefertigt. In der Serienproduktion werden Laminiervorrichtungen in der Regel aus Aluminium oder Stahl mithilfe spanender Fertigungsverfahren hergestellt. Die hohen Investitionsausgaben für die Fertigung einer Vorrichtung werden hier mit hohen Stückzahlen an produzierten Bauteilen kompensiert. Im Prototypenbau sind Aluminium oder Stahl als Vorrichtungswerkstoff aufgrund der hohen Kosten ungeeignet. Hier qualifiziert die Verwendung von thermoplastischem Kunststoff die additive Fertigung für die Herstellung von Formgebungsvorrichtungen. Eine wichtige Eigenschaft dieser Kunststoffe ist die Formstabilität auch unter Temperatureinfluss, da die Verarbeitung der Duromere häufig bei erhöhter Temperatur stattfindet (z.B. zur Aktivierung oder Beschleunigung des Erstarrungsprozesses). Neben der Formstabilität ist auch die Oberflächenbeschaffenheit der Form von Bedeutung. [62, 63, 64, 65, 66]

Laminiervorrichtungen im Größenbereich von 1 m x 0,55 m x 0,15 m wurden bereits in additiven Fertigungsverfahren hergestellt. Die Formstabilität (auch unter Temperatureinfluss) wurde durch einen Gewichtsanteil von 25 % an Kohlenstoffkurzfasern im Druckwerkstoff realisiert. Eine ausreichende Oberflächengüte und Formstabilität wurde für die Produktion von vier bis fünf Bauteilen in einer Form bereits nachgewiesen. [66, 67, 68]

Eine 13 Meter lange Laminiervorrichtung für Flügel von Windkraftanlagen wurde mit dem Big Area Additive Manufacturing (BAAM) System des Oak Ridge National Laboratory gedruckt. Für die Vorrichtung wurden 16 Teilmodule gedruckt, welche anschließend auf einem Stahlrahmen montiert wurden. Erhebliche Kosteneinsparungen im Vergleich zu Fused Deposition Modeling (FDM) Systemen sind nachgewiesen worden. Nahezu 50 % der Gesamtkosten bei Verwendung des BAAM-Systems entfallen allerdings auf die Nachbearbeitung der Laminiervorrichtungen. [69, 70]

Der 3D-Druck von größeren Laminiervorrichtungen wurde in dem von der TU München mit Projektpartnern durchgeführten Projekt COMBO3D untersucht. Hier wurde zusätzlich eine Temperierung auf einer Fläche von 3 m x 0,6 m in die Form eingebracht. In einem Projekt der BTU Cottbus in Kooperation mit CNC Bárcenas bzw. Discovery 3D Printers wurden ebenfalls Vorrichtungen gedruckt. Die Oberflächengüte und -genauigkeit wurde nach dem Drucken des Volumenkörpers durch einen Finishing-Prozess mittels spanender Bearbeitung realisiert. Die geforderte Lebensdauer des Formwerkzeuges soll hier durch ein erneutes Bedrucken der Oberfläche gewährleistet werden. [71]

1.3 Anwendungsfälle

Je nach Anwendungsfall ergeben sich sehr unterschiedliche Randbedingungen hinsichtlich der Umsetzbarkeit von Funktionsintegration. Maßgebliche Faktoren sind dabei die Produktlebenszeit, Losgrößen, Beanspruchungen während der Nutzung oder Einsetzbarkeit unterschiedlicher Materialien aus Nutzungsanforderungen oder Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Im Rahmen des Projekts werdend deshalb drei sehr unterschiedliche Anwendungsfälle mit individuellen Herausforderungen betrachtet, die nachfolgend vorgestellt werden.

1.3.1 Fahrzeugheckklappe

Für eine strukturierte Einordnung der Heckklappe in das Fahrzeuggesamtsystem werden ein grundsätzlicher Aufbau der Fahrzeugarchitektur und eine übergeordnete Darstellung von gängigen Karosseriebauweisen thematisiert. Darauf aufbauend ist eine Einordnung der Heckklappe in die strukturellen Komponenten eines Fahrzeuges sowie dessen Position aufzuzeigen.

Die Fahrzeugarchitektur beschreibt alle Komponenten und Systeme eines Fahrzeuges in ihrer gesamtheitlichen Struktur. Dabei ist das Gesamtfahrzeug grundsätzlich in die drei folgenden Hauptgruppen zu unterteilen [72]:

- Karosserie
- Antrieb
- Fahrwerk

Die Karosserie hat mit einem Anteil von ca. 50 % den größten Beitrag am Fahrzeuggesamtgewicht. Dem Antrieb wird knapp 30 % und dem Fahrwerk die restlichen 20 % des Gesamtgewichts zugeordnet. Die Elektrik/Elektronik sind allen drei Hauptgruppen zugeteilt. Die Gliederung des Gesamtfahrzeuges in Baugruppen und die wesentlichen Bauteile der jeweiligen Hauptgruppen sind Tabelle 1.2 zu entnehmen. [72]

Tabelle 1.2: Einteilung des Fahrzeugs mit zugehörigen Komponenten nach [72]

Karosserie	Antrieb	Fahrwerk
Rohkarosserie	Motor	Reifen
Türen, Klappe, Verdeck	Ansaug- und Auspufftrakt	Räder
Verglasung	Motorkühlung	Radführung
Dichtung	Energiespeicher	Feder
Tür- und Haubenschlösser	Achsgetriebe	Dämpfer
Scheibenwischenanlage	Antriebswelle	Lenkung
Beleuchtung	Kupplung	Bremsanlage

Elektrik/Elektronik

Die Heckklappe wird als Teil der Karosserie separat gefertigt und als Modul an der Karosserie montiert. Je nach spezifischem Fahrzeugtyp und -klasse unterscheiden sich die Bauformen bestimmter Komponenten. Abbildung 1.15 (oben) zeigt die sieben unterschiedliche Aufbauausprägungen von Fahrzeugen und die daraus resultierende Gestaltung der Heckklappe. Je nach Ausführung variieren Größe und Funktionsumfang der Heckklappen. Bei einem Pickup ist lediglich eine Ladeklappe vorhanden, in die häufig keine Rückleuchten oder ähnliche Funktionskomponenten integriert sind. Bei einer Limousine oder einem Cabrio spricht man von einem Heckdeckel, der charakteristisch in einer Art L-Form abgewinkelt ist. In der Regel sind in einem Heckdeckel mehr Funktionalitäten integriert als in einer Ladeklappe. Die Heckklappe von Kombis, Coupés oder SUVs sind zum Teil deutlich größer als Heckdeckel und verfügen über eine integrierte Heckscheibe, sodass Heckklappen den größten Funktionsumfang aufweisen. Abbildung 1.15 (unten) zeigt den exemplarischen Aufbau einer

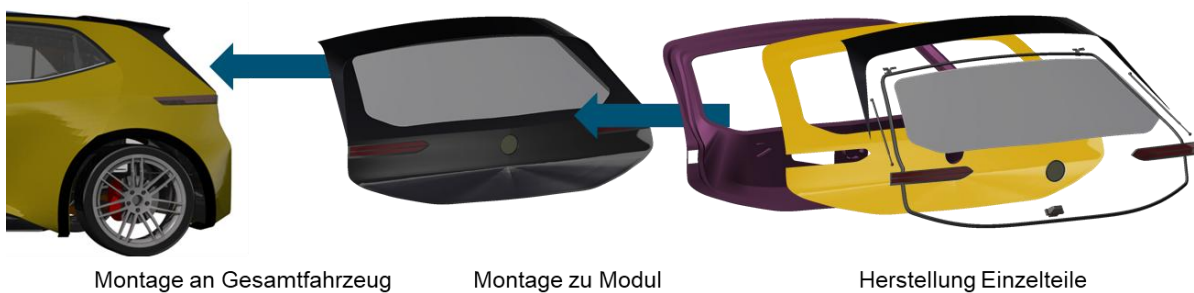
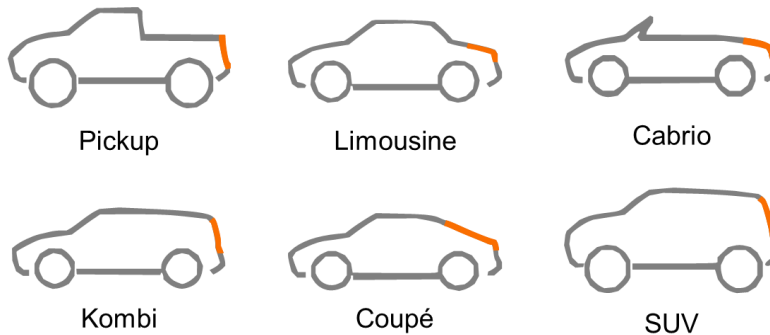


Abbildung 1.15: Fertigung und Montage einer Heckklappe

Heckklappe. Diese besteht in der Regel aus einer Innenverkleidung (violett), die für eine entsprechende Anmutung und Farbvarianz sorgt und zudem funktionale Komponenten, wie bspw. Kabel, verdeckt. Das Strukturteil (gelb) sorgt für die notwendigen strukturellen Eigenschaften der Heckklappe. In diesem Beispiel ist das Exterieur in Form der außen sichtbaren Blechteile Bestandteil des Strukturbauteils. Es existieren aber auch getrennte Ausführungen. Zusätzlich werden diverse Funktionskomponenten in der Heckklappe montiert, wie die Heckscheibe, Dichtungen, Leuchten oder Gasdruckfedern.

1.3.2 Flugwindkraft

Im Zuge der Energiewende hin zu einer nachhaltigen, klimafreundlichen und erneuerbaren Energiegewinnung werden neben den bereits etablierten und konventionellen Arten der Stromerzeugung wie bspw. Photovoltaik-Anlagen, Windkraftanlagen oder Wasserkraftwerken auch neue Ideen und Innovationen vorangetrieben. Eine der vielversprechendsten Entwicklungen der letzten Jahre ist die Nutzung von Windenergie durch Flugwindkraftanlagen. Diese unterscheiden sich von herkömmlichen, stationären Windkraftanlagen im Wesentlichen durch die Art der Befestigung der zur Energiegewinnung genutzten, beweglichen Komponenten. Während der Rotor bei herkömmlichen Anlagen starr mit dem Erdboden verbunden ist, nutzen Flugwindkraftanlagen drachenähnliche Fluggeräte, welche über ein Halteseil mit dem stationären Teil der Anlage am Boden verbunden sind. Dies bietet einige potenzielle Vorteile gegenüber herkömmlichen Anlagen.

Durch die nicht vorhandene starre Verbindung zum Boden, ist der benötigte Materialeinsatz für Flugwindkraftanlagen wesentlich geringer, was einerseits die Kosten des Systems und ihrer Bauteile an sich senkt, andererseits aber auch eine entsprechende Montage bzw. Installation stark vereinfacht. Darüber hinaus ergeben sich auch deutlich geringere maximale Relativgeschwindigkeiten zur Umgebung. Während die Rotorblattspitzen von stationären Windkraftanlagen Relativgeschwindigkeiten von bis zu 360 km/h aufweisen [73] und somit hohem Verschleiß ausgesetzt sind, liegen die Relativgeschwindigkeiten von Flugwindkraftanlagen deutlich darunter.

Ein sich ebenfalls aus der Art der Befestigung ergebender Vorteil stellt die Flughöhe dar. Moderne stationäre Windkraftanlagen erreichen eine Nabenhöhe von bis zu 165 m [74]. Da der dauerhaftere und stärkere Wind in größeren Höhen mit einer höheren Auslastung einhergeht, kann der Wirkungsgrad und die Windleistung entsprechend gesteigert werden [75]. Ein zusätzlicher Vorteil der vergleichsweise hohen Flughöhe ist außerdem die geringere Lärmbelastung der Umgebung.

Flugwindkraftanlagen lassen sich in verschiedene Bauweisen einteilen. Dabei wird vor allem nach dem jeweiligen Ort der Stromerzeugung unterschieden. Erfolgt die Stromerzeugung in der Bodenstation, wird der Flugapparat lediglich über ein Seil gehalten, und durchläuft verschiedene Flugmanöver wie bspw. Jo-Jo-Manöver oder fliegt, wie im Fall von EnerKite, achtförmige Bahnen. Der sich am Boden befindliche Generator wird bei steigender Flughöhe mechanisch über die Seilkraft angetrieben. Das Seil trommelt sich dabei ab. Anschließend wird der Kite in einen kontrollierten Sturzflug versetzt und auf seiner Ausgangshöhe wieder eingefangen. Dabei werden die Seile mit der gleichen Geschwindigkeit aufgewickelt. Anschließend beginnt der Zyklus von vorn. Ist der Generator hingegen in der Luft angebracht, dient die Verbindung zum Boden einerseits dem Transport des gewonnenen Stroms über Leitungen, andererseits der Fixierung des Flugapparats an Ort und Stelle.

Hinsichtlich der Bauweise des Flugapparats lässt sich eine weitere Unterteilung vornehmen. Aufgrund des benötigten geringen Gewichts existieren hier vor allem Lösungen im Bereich des Ultraleichtbaus.

Verwendete Materialien sind daher textile, flexible Stoffe im Sinne des klassischen Flugdrachens, luft- bzw. gasgefüllte Prinzipien, ähnlich Heißluftballons oder Luftschiffen, bis hin zu flugzeugähnlichen/halbstarren Konstruktionen aus Faserverbundstoffen mit entsprechender Bespannung.

1.3.3 Flexible und mobile Ladesäulen

Die Mobilitätswende, also der wirtschaftlich, politisch und gesellschaftlich angestrebte Wandel zu einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Mobilität stellt Unternehmen vor enorme Herausforderungen. Eine dieser Herausforderungen ist die Bereitstellung einer geeigneten Ladeinfrastruktur für Fahrzeuge mit Elektroantrieb. Insgesamt umfasst die Ladeinfrastruktur mit Deutschlands (Stand Mai 2025) etwa 166.900 öffentliche Ladepunkte [Bundenetzagentur]. Dagegen liegt der Neubedarf an Ladestationen alleine für die Großstädte Berlin, Hamburg, München, Köln und Frankfurt im Jahr 2025 bei gut 215.000 [76]. Es existiert also eine hohe Diskrepanz zwischen tatsächlich vorhandener und benötigter Ladepunkte. Neben der Installation fest installierter Ladepunkte und privater Wallboxen kann der Einsatz mobiler Ladesäulen als flexible und innovative Lösung einen Beitrag zur Verbesserung der Ladeinfrastruktur leisten.

Flexible Schnellladesäulen zeichnen sich im Wesentlichen durch folgende mögliche Aspekte aus:

- Teilweise mobil während Operation oder zwischen einzelnen Operationen
- Einfache Installation
- Bedarfsgerechter Einsatz (hinzufügen, entfernen, umstellen)
Durch das Zwischenspeichern von Energie in internen Batterien ist ein Anschluss an das Niederspannungsnetz möglich
- Individualisierung
- Geringe baurechtliche Hürden

Gemäß ihren Eigenschaften erschließen sich hieraus Einsatzgebiete für mobile Konzepte, welche über die klassischen, herkömmlichen Lösungen nicht abdeckbar sind, wie etwa der Einsatz auf kulturellen Großveranstaltungen, flexiblen Ladeparks oder in Unternehmen und Kommunen.

Mobile Ladesäulen lassen sich gemäß ihrer Bauweise weiter differenzieren. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist dabei die Art der Bereitstellung elektrischer Energie und damit indirekt auch der Grad der Mobilität der entsprechenden Ladesäule. Die höchste Mobilität bieten Lösungen in Form von zusätzlichen Akkus, ähnlich einer Powerbank mit einer Leistung von bis zu 4 Kilowattstunden, welche vor allem für den privaten Gebrauch geeignet sind [55]. Am anderen Ende dieses Spektrums stehen sogenannte Ladecontainer, mit einer Speicherleistung von bis zu 700 Kilowattstunden, deren niedrigere Mobilität aufgrund ihres hohen Volumens und Gewichts andere Anwendungsszenarien bedienen [77, 78, 79]. Neben den bereits genannten Lösungen existieren hingegen auch schon Prototypen autonomer Lösungen in Form von Elektrofahrzeugen [80] oder Laderobotern [81].

Wird die Energie nicht in Form von Akkus, sondern über einen externen Stromanschluss bereitgestellt, handelt es sich um sogenannte *Mobile Charger* oder *In-Cable Control Boxes*. Hier können Fahrzeuge je nach Anschluss mit Leistungen von 150 bis 250 Kilowatt versorgt werden [82, 83]. Einerseits bieten diese Lösungen einen noch geringeren Grad an Mobilität und machen einen

entsprechenden Stromanschluss erforderlich, andererseits sind keine erneuten Ladevorgänge der Ladesäule selbst erforderlich.

Literatur

- [1] R. Koller, Konstruktionslehre für den Maschinenbau, Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [2] B. Bender und K. Gericke, Hrsg., Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, Springer Berlin Heidelberg, 2021.
- [3] A. Birkert, S. Haage und M. Straub, Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen, Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [4] D. J. Nestler, „Beitrag zum Thema VERBUNDWERKSTOFFE - WERKSTOFFVERBUNDE,“ 2014.
- [5] S. Kleemann, D. Inkermann, B. Bader, E. Türck und T. Vietor, „A semi-formal approach to structure and access knowledge for multi-material-design,“ in *DS 87-1 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 1: Resource Sensitive Design, Design Research Applications and Case Studies, Vancouver, Canada, 21-25.08.2017*, 2017.
- [6] N. Sakundarini, Z. Taha, S. H. Abdul-Rashid und R. A. R. Ghazila, „Optimal multi-material selection for lightweight design of automotive body assembly incorporating recyclability,“ *Materials & Design*, Bd. 50, p. 846–857, September 2013.
- [7] H. E. Friedrich und G. Müller, Hrsg., Werkstoffe und Bauweisen in der Fahrzeugtechnik, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
- [8] B. Klein, Leichtbau-Konstruktion, 11., überarbeitete und erweiterte Auflage Hrsg., T. Gänsicke, Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [9] T. Schulte, R. Matheis und L. Eckstein, „Strukturauslegung einer Multimaterial-Struktur für Automobilanwendungen: Crashesicher,“ *Lightweight Design*, Bd. 8, p. 38–43, December 2015.
- [10] A. Jäschke und U. Dajek, „Dachrahmen in Hybridbauweise,“ in *VDI-Tagungsband Nr. 4260*, Düsseldorf, 2004.
- [11] M. Neitzel, P. Mitschang und U. P. Breuer, Hrsg., Handbuch Verbundwerkstoffe, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage Hrsg., München: Hanser, 2014.
- [12] P. Kellner, Zur systematischen Bewertung integrativer Leichtbau-Strukturkonzepte für biegebelastete Crashträger, 1st ed. Hrsg., Göttingen: Cuvillier Verlag, 2014.
- [13] M. F. Ashby und Y. J. M. Bréchet, „Designing hybrid materials,“ *Acta Materialia*, Bd. 51, p. 5801–5821, November 2003.
- [14] M. F. Ashby, Materials selection in mechanical design, 3. ed., reprint. Hrsg., Amsterdam: Elsevier, 2010.
- [15] A. Jahan, M. Y. Ismail, S. M. Sapuan und F. Mustapha, „Material screening and choosing methods – A review,“ *Materials & Design*, Bd. 31, p. 696–705, February 2010.

- [16] M. B. Babanli, F. Prima, P. Vermaut, L. D. Demchenko, A. N. Titenko, S. S. Huseynov, R. J. Hajiyev und V. M. Huseynov, „Material Selection Methods: A Review,“ in *13th International Conference on Theory and Application of Fuzzy Systems and Soft Computing — ICAFS-2018*, Springer International Publishing, 2018, p. 929–936.
- [17] S. Giaccobi, F. X. Kromm, H. Wagnier und M. Danis, „Filtration in materials selection and multi-materials design,“ *Materials & Design*, Bd. 31, p. 1842–1847, April 2010.
- [18] C. Weber, „Looking at “DFX” and “Product Maturity” from the Perspective of a New Approach to Modelling Product and Product Development Processes,“ in *The Future of Product Development*, Springer Berlin Heidelberg, p. 85–104.
- [19] C. Köhler, J. Conrad, S. Wanke und C. Weber, „A MATRIX REPRESENTATION OF THE CPM/PDD APPROACH AS A MEANS FOR CHANGE IMPACT ANALYSIS,“ in *DS 48: Proceedings DESIGN 2008, the 10th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia, 2008*.
- [20] S. Kleemann, T. Fröhlich, E. Türck und T. Vietor, „A Methodological Approach Towards Multi-material Design of Automotive Components,“ *Procedia CIRP*, Bd. 60, p. 68–73, 2017.
- [21] T. Fröhlich, S. Kleemann, E. Türck and T. Vietor, "Multi-criteria analysis of multi-material lightweight components on a conceptual level of detail," 2017.
- [22] T. Fröhlich, S. Kleemann, T. Vietor, L. Spresny, M. Abdelwahed, A. Kabelitz und F. Preller, „Development of Automotive Body Parts in Multi-Material Design—Processes and Tools,“ in *Life Cycle Design & Engineering of Lightweight Multi-Material Automotive Body Parts*, Springer Berlin Heidelberg, 2022, p. 15–37.
- [23] J. Altach, Vorgehen zum Gestalten von Karosseriesystemen mithilfe eines Bauweisenkatalogs, 1. Auflage Hrsg., T. Vietor und H. Oehlschlaeger, Hrsg., München: Verlag Dr. Hut, 2022.
- [24] B. Bader, Ein methodischer Ansatz zur Potenzialbewertung hybrider Bauweise bei Fahrzeugstrukturbauteilen, 1. Auflage Hrsg., T. Vietor und K. Dröder, Hrsg., München: Verlag Dr. Hut, 2022.
- [25] K. Roth, Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [26] J. R. Ziebart, Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration, München: Verlag Dr. Hut, 2012.
- [27] D. Klaiber, T. Fröhlich und T. Vietor, „Strategies for function integration in engineering design: from differential design to function adoption,“ *Procedia CIRP*, Bd. 84, p. 599–604, 2019.
- [28] B. Eisenbart, K. Gericke, L. T. M. Blessing und T. C. McAlloone, „A DSM-based framework for integrated function modelling: concept, application and evaluation,“ *Research in Engineering Design*, Bd. 28, p. 25–51, April 2016.
- [29] T. Fröhlich, D. Klaiber, E. Türck und T. Vietor, „Function in a box: An approach for multi-functional design by function integration and separation,“ *Procedia CIRP*, Bd. 84, p. 611–617, 2019.

- [30] D. Klaiber, Eine Methode zur systematischen Bewertung funktionsintegrierter automobiler Strukturkonzepte, 1. Auflage Hrsg., T. Vietor und R. Lachmayer, Hrsg., München: Verlag Dr. Hut, 2022.
- [31] F. Fischer, Funktionsintegrative Mischverbunde für den Systemleichtbau, 1. Aufl. Hrsg., München: Hut, 2011.
- [32] S. Yang, Y. Tang und Y. F. Zhao, „A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing,“ *Journal of Manufacturing Processes*, Bd. 20, p. 444–449, October 2015.
- [33] I. E. Nikolaou, N. Jones und A. Stefanakis, „Circular Economy and Sustainability: the Past, the Present and the Future Directions,“ *Circular Economy and Sustainability*, Bd. 1, p. 1–20, April 2021.
- [34] L. Giorgini, T. Benelli, G. Brancolini und L. Mazzocchetti, „Recycling of carbon fiber reinforced composite waste to close their life cycle in a cradle-to-cradle approach,“ *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Bd. 26, p. 100368, December 2020.
- [35] P. Ghisellini, C. Cialani und S. Ulgiati, „A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems,“ *Journal of Cleaner Production*, Bd. 114, p. 11–32, February 2016.
- [36] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, „DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL,“ *Official Journal of the European Union*, February 2008.
- [37] S. Sihvonen und T. Ritola, „Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development,“ *Procedia CIRP*, Bd. 29, p. 639–644, 2015.
- [38] N. Van Buren, M. Demmers, R. Van der Heijden und F. Witlox, „Towards a Circular Economy: The Role of Dutch Logistics Industries and Governments,“ *Sustainability*, Bd. 8, p. 647, July 2016.
- [39] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions,“ *SSRN Electronic Journal*, 2017.
- [40] The National Renewable Energy Laboratory, „Going the Way of T-Rex: Life Cycle Waste and Emissions in Construction Material Manufacturing,“ *Grid Modernization News*, August 2021.
- [41] International Organisation for Standardisation (IOS), „DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen,“ 2021-02.
- [42] International Organisation for Standardisation (IOS), „DIN EN ISO 14044:2018-05: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen,“ 2018-05.
- [43] L. Ausberg, A. Ciroth, S. Feifel, J. Franze, M. Kaltschmitt, I. Klemmayer, K. Meyer, P. Saling, L. Schebek, J. Weinberg und C. Wulf, „Lebenszyklusanalysen,“ in *Umweltbewertung für Ingenieure*, Springer Berlin Heidelberg, 2015, p. 203–314.

- [44] International Organisation for Standardisation (IOS), „DIN EN ISO 14045:2012-10, Umweltmanagement - Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen - Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien,“ 2012-10.
- [45] I. Schmidt, „Managing Socio-Efficiency of Products and Processes - Further Development of the BASF Eco-Efficiency Analysis by the Social Sustainability Dimension,“ 2003.
- [46] International Organisation for Standardisation (IOS), „Din En Iso 14067:2019-02, Treibhausgase - Carbon Footprint Von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung,“ 2019-02.
- [47] Verein deutscher Ingenieure (VDI), „VDI 4600:2012-01: Kumulier-ter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden,“ 2012.
- [48] I. Gibson, D. Rosen und B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, New, York: Springer New York, 2015.
- [49] M. Grund, Implementierung von schichtadditiven Fertigungsverfahren, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [50] Verein Deutscher Ingenieure e.V., *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 01.12.2014.
- [51] J. Breuninger, R. Becker, A. Wolf, S. Rommel und A. Verl, Generative Fertigung mit Kunststoffen, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [52] C. Klahn, M. Meboldt, F. F. Fontana, B. Leutenecker-Twelsiek und J. Jansen, Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung: Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten, 2. Auflage Hrsg., Würzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 2021.
- [53] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen und D. Hui, „Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,“ *Composites Part B: Engineering*, Bd. 143, p. 172–196, 2018.
- [54] R. van Bracht, P. Pollok, F. T. Piller und E. Marquardt, „Das Potenzial der additiven Fertigung: Digitale Technologien im Unternehmenskontext: Auswertung,“ *VDI-Bericht*, 2019.
- [55] *Additive Manufacturing in Aerospace and Defense*, 01.05.2017.
- [56] *Deutschland druckt dreidimensional: Additive Fertigung revolutioniert die Produktion*.
- [57] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou und D. Hui, „3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective,“ *Composites Part B: Engineering*, Bd. 110, p. 442–458, 2017.
- [58] D. Moreno Nieto, V. Casal López und S. I. Molina, „Large-format polymeric pellet-based additive manufacturing for the naval industry,“ *Additive Manufacturing*, Bd. 23, p. 79–85, 2018.

- [59] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue und C. Charitidis, „Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities,“ *Materials Today*, Bd. 21, p. 22–37, 2018.
- [60] *AMPOWER Report 2022: Additive Manufacturing Report*, 2022.
- [61] J. Blase, C. John, M. Kausch und M. Witt, „Ultraschneller 3D-Druck: Additive High-Speed-Fertigung von Kunststoffbauteilen aus Standardgranulat,“ *Kunststoffe*, Bd. 2019, p. 32–34.
- [62] M. Shah Mohammadi, M. Ghani, M. Komeili, B. Crawford und A. S. Milani, „The effect of manufacturing parameters on the surface roughness of glass fibre reinforced polymer moulds,“ *Composites Part B: Engineering*, Bd. 125, p. 39–48, 2017.
- [63] K. Jost, „Damage resistance, durability and damage tolerance,“ in *CMH-17 composite materials handbook*, p. 543–545.
- [64] Campbell F.C., „Processing science of polymer matrix composites,“ in *Structural Composite Materials*.
- [65] R. Hornfeck, „Rapid Shaping Prozess zur Herstellung von CFK-Bauteilen,“ *Schriftenreihe der Georg-Simon-Hochschule Nürnberg*.
- [66] T. Z. Sudbury, R. Springfield, V. Kunc und C. Duty, „An assessment of additive manufactured molds for hand-laid fiber reinforced composites,“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 90, p. 1659–1664, 2017.
- [67] A. A. Hassen, R. Springfield, J. Lindahl, B. Post, L. Love, C. Duty, U. Vaidya, R. B. Pipes und V. Kunc, „The Durability of Large-Scale Additive Manufacturing Composite Molds,“ *CAMX Conference Proceedings*, 2016.
- [68] V. Kunc, J. Lindahl, R. B. Dinwiddie, B. Post, L. Love, C. Duty, M. Matlack und A. A. Hassen, „Investigation of In-Autoclave Additive Manufacturing Composite Tooling,“ *CAMX Conference Proceedings*, 2016.
- [69] B. Post, R. F. Lind, P. D. Lloyd, V. Kunc, J. M. Linhal und L. Love, „The Economics of Big Area Additive Manufacturing,“ *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2016.
- [70] B. Post, B. Richardson, R. F. Lind, L. Love, P. D. Lloyd, V. Kunc, B. J. Rhyne, A. Roschli, J. Hannan, S. Nolet, K. Veloso, P. Kurup, T. Remo und J. Dale, „Big Area Additive Manufacturing Application in Wind Turbine Molds,“ *Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2017.
- [71] A. K. Bledzki, H. Seidlitz, J. Krenz, K. Goracy, M. Urbaniak und J. J. Rösch, „Recycling of Carbon Fiber Reinforced Composite Polymers-Review-Part 2: Recovery and Application of Recycled Carbon Fibers,“ *Polymers*, Bd. 12, 2020.
- [72] K.-L. Haken, *Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik*, 5., aktualisierte Auflage Hrsg., München: Hanser, 2018.

- [73] Bundesverband Windenergie (BWE), „Faktencheck: Erosion an Rotorblättern,“ 2024.
- [74] Vestas Deutschland GmbH, „Unsere Anlagen: Die Zukunft der Windenergie - EnVentus,“ [Online]. Available: <https://www.vestas.de/de-de/anlagentechnologie/unsere-anlagen>. [Zugriff am 15 Juni 2025].
- [75] C. L. Archer und K. Caldeira, „Global Assessment of High-Altitude Wind Power,“ *Energies*, Bd. 2, p. 307–319, May 2009.
- [76] Horváth & Partners, *Prognostizierter Neubedarf an Ladestationen für Elektroautos in ausgewählten Großstädten in Deutschland in den Jahren 2019 bis 2025*, 2025.
- [77] Franke-Media.net, *Ladecontainer - XXL Stromspeicher - Zukunft für Haus, Industrie, Notstrom: LADECONTAINER - XXL STROMSPEICHER DER ZUKUNFT*.
- [78] Clausohm-Software GmbH, *Ladecontainer für E-Mikromobilität: INTELLIGENT, KOMPATIBEL, GESCHÜTZT*.
- [79] ABS intec GmbH, *BATTERIECONTAINER IN PLUG & PLAY BAUWEISE: Batteriecontainer von ABS intec*.
- [80] eTree mobility GmbH, *eTree - Powering the future: Die Revolution des Ladens_*.
- [81] Volkswagen AG, *Weltpremiere: Revolution in der Tiefgarage – Volkswagen lässt die Laderoboter los*.
- [82] Volkswagen Group Charging GmbH, *Noch schneller installiert. Die brandneue Flexpole Plus..*
- [83] me energy Technologies GmbH, *Der Rapid Charger 150. Die mobile Schnellladestation..*
- [84] WV Stahl, Marvin Bender, presse@wvstahl.de, „Wirtschaftsvereinigung Stahl,“ 01 2024. [Online]. Available: <https://www.wvstahl.de/stahlstandort-deutschland/>.
- [85] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker und M. Khorasani, *Additive Manufacturing Technologies*, Springer International Publishing, 2021.
- [86] B. Müller, Hrsg., *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2020: Conference Proceedings*, March 2020, Berlin, Germany, Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2020.
- [87] D. Küpper, W. Heising, G. Corman, M. Wolfgang, C. Knizek und V. Lukic, *Get Ready for Industrialized Additive Manufacturing*, 2017.

Anhang

Rohstahlerzeugung 2023
(Gesamterzeugung Deutschland):
35,4 Mio. t

- (1) ArcelorMittal Hamburg
- (2) ArcelorMittal Bremen
- (3) Benteler
- (4) Georgsmarienhütte Holding
- (5) Salzgitter
- (6) Brandenburger Elektrostahlwerk
- (7) Hennigsdorfer Elektrostahlwerk
- (8) ArcelorMittal Eisenhüttenstadt
- (9) thyssenkrupp Steel Europe
- (10) HKM
- (11) ArcelorMittal Duisburg
- (12) Deutsche Edelstahlwerke
- (13) Buderus Edelstahl
- (14) Stahlwerk Thüringen
- (15) ESF Elbe-Stahlwerke Feralpi
- (16) BGH Edelstahl
- (17) Dillinger Hüttenwerke
- (18) Saarstahl
- (19) Badische Stahlwerke
- (20) Lech-Stahlwerke
- (21) Friedr. Lohmann
- (22) VDM Metals
- (23) Dörrenberg Edelstahl
- (24) Kind & Co. Edelstahlwerk
- (25) Vacuumschmelze

● **Integriertes Hüttenwerk**
 (Hochofen, Stahl- und Walzwerk)
 Stahlproduktion auf Basis von
 Eisenerz (Primärstahlproduktion)

● **Elektrostahlwerk**
 Stahlproduktion mit Strom
 auf Basis von Stahlschrott
 (Sekundärstahlproduktion)



Stand: Januar 2024
 Quelle: WV Stahl

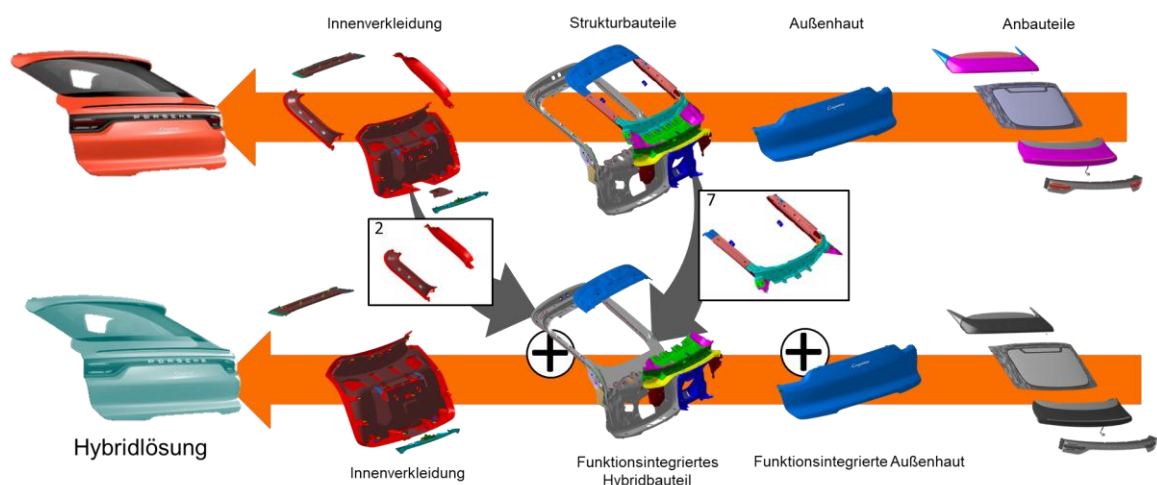
Abbildung A.1: Integrierte Hüttenwerke und Elektrostahlwerke in der Bundesrepublik Deutschland [84]

2 Fahrzeugheckklappe

Tim Fröhlich ✉, Oliver Huxdorf, Daniel Nebel

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202507110645-0>

Die Trends der Automobilbranche „Elektrifizierung“, „Digitalisierung“ und „Automatisierung“ führen zu einer Zunahme an Funktionen in Mobilitätssystemen und damit zu einer erhöhten Forderung nach neuartigen Konstruktionsprinzipien sowie Fertigungskonzepten. Diese sollen eine wirtschaftliche Funktionsintegration (z. B. in Karosseriestrukturen) ermöglichen und gleichzeitig dem Anstieg des Gewichts sowie des Werkzeug- und Anlageninvests entgegenwirken. In diesem Kontext bieten die verschiedenen Hybridbauweisen neue Möglichkeiten auf und erlauben die Integration der Funktionen auf den verschiedensten Systemebenen: im (textilen) Halbzeug, im Einleger, in der Baugruppe. Bei der Umsetzung der hybriden Bauweisen kann dabei im Allgemeinen auf einen bereits existierenden Erfahrungsschatz zurückgegriffen werden. Diese hatten bislang allerdings nicht die gezielte, systematische Umsetzung der Funktionsintegration in serientauglichen hybriden Strukturen im Fokus, wenngleich diese vereinzelt im wissenschaftlichen Kontext beschrieben und diskutiert werden. Daher ist es Ziel im Forschungsvorhaben „TechnoHyb“, die Potenziale der Hybridbauweise in Bezug auf die großserientaugliche Herstellung von funktionsintegrierten Karosseriestrukturen anhand von Funktionsmustern und anschließend mithilfe von Demonstratoren zu untersuchen. In diesem Kontext werden die unterschiedlichen Konstruktionsprinzipien der Funktionsintegration analysiert und ausgewählte Lösungen konstruktiv umgesetzt. Anschließend werden die hierzu notwendigen Prozess- sowie Werkzeugtechnologien erarbeitet und ausgewählte Ansätze anhand von Probekörpern validiert. Darüber hinaus wurden grundlegende Arten der Funktionsintegration untersucht und in Form von methodischen Hilfsmitteln bereitgestellt (vgl. Kapitel 7).



2.1 Referenzanalyse

Zu Beginn des Arbeitsschwerpunkts *funktionsintegrierte Fahrzeugheckklappe* wurde auf Grundlage der für das Projekt definierten Ziele eine Referenzheckklappe bzw. ein Referenzfahrzeug identifiziert. Ziel war die Auswahl einer Referenz mit einer hinreichenden Komplexität bzw. Funktionsumfang. Zudem sollte es sich um ein aktuelles Fahrzeug handeln, um den Stand der Technik abdecken zu können. Auf der anderen Seite sollte es sich jedoch um ein Serienfahrzeug handeln, damit alle relevanten Anforderungen und Randbedingungen innerhalb des Projekts, ohne Einschränkung zu Geheimhaltung oder Ähnliches, berücksichtigt werden konnten. Basierend auf diesen Anforderungen wurde die Heckklappe des Porsche Cayenne Coupé (PO536C) als erfolgsversprechende Referenz identifiziert. Grund hierfür war die Aktualität des Serienstands, das anspruchsvolle Package und der umfangreiche Funktionsumfang.

Die ausgewählte Heckklappe wurde anschließend hinsichtlich der Produktstruktur in Form der beinhalteten Komponenten und Funktionen sowie deren einzelnen Gewichte und zur Verfügung stehenden Bauräume analysiert. Auf Grundlage der Ziele und Möglichkeiten innerhalb des Projekts wurden zudem die möglichen Änderungsumfänge definiert (vgl. Abbildung 2.1). Als zu ändernde Bauteile wurden alle Bauteile der Fahrzeugstruktur (innen und außen) sowie der Anbauteile im Interieur- und Grauzonenbereich identifiziert. Als Übernahmeteile für die funktionsintegrierte Heckklappe wurden die Heckscheibe, der Spoiler, das Leuchtenband, weitere Anbauteile sowie Steuergeräte und Zusatzbauteile festgelegt.

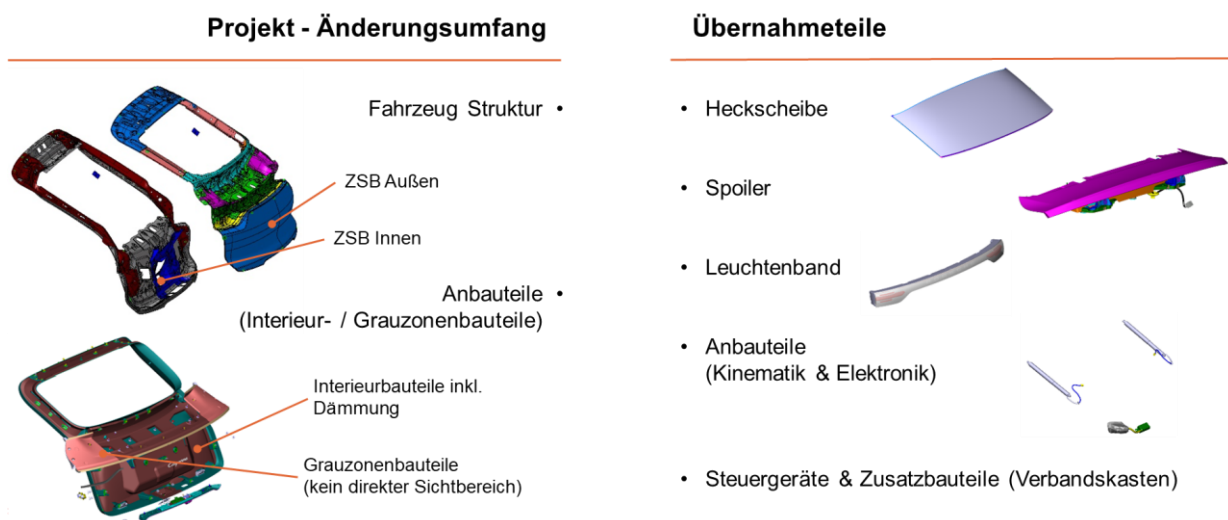


Abbildung 2.1: Darstellung der Änderungsumfänge und Übernahmeteile innerhalb des Projekts

Nach der durchgeführten Referenzauswahl konnten die zu erreichenden Ziele für die funktionsintegrierte Heckklappe definiert werden. Diese umfassten die maßgeblichen Punkte:

- **Funktionsintegration** nicht-struktureller Funktionen in die Bauteilstruktur
- Erhöhung des **Leichtbaugrades** durch Funktionsintegration und daraus resultierende weitere Freiheiten in der Bauteilgestaltung
- **Visualisierung** der Ergebnisse für eine Beurteilung
- Berücksichtigung der notwendigen **Wirtschaftlichkeit**
- **Numerische Absicherung** der erarbeiteten Konzepte
- **Reduzierung der Teilezahl** im Vergleich zur Referenz

- **Bauraumoptimierung** auf Basis der neuen Gestaltungsfreiheiten
- **Hardwarevalidierung** durch Fertigung von Funktionsmustern und Demonstratoren
- **Verbaubarkeit** der gefertigten Demonstratoren im Referenzfahrzeug
- Entwicklung und Anwendung einer **Methodik** für die Entwicklung funktionsintegrierter Bauteile

Aus der Referenz und den gesteckten Zielen bzw. Untersuchungsumfängen wurde eine detaillierte Anforderungsliste der funktionsintegrierten Heckklappe erstellt und während der weiteren Bearbeitung des Projekts fortlaufend angepasst und aktualisiert. Basierend auf den Ergebnissen der Referenzanalyse und Anforderungsdefinition konnten systematisch Grundkonzepte für die funktionsintegrierte Heckklappe erarbeitet werden. Hierfür wurden zunächst grundlegende Analysen der zu integrierenden Funktionen, möglicher Fertigungsverfahren und einsetzbarer Materialien sowie entstehenden Abhängigkeiten zwischen diesen analysiert. Zur Identifikation des möglichen Umfangs der zu integrierenden Funktionen wurden die in der Referenzheckklappe beinhalteten Funktionen um mögliche zusätzliche Funktionen unter Berücksichtigung der Möglichkeiten zur Integration erweitert. Diese stammten maßgeblich aus einer Benchmarkanalyse, die funktionsintegrierte Bauteile verschiedener Anwendungsfelder aus Forschungsvorhaben, Konzeptstudien und dem Serieneinsatz betrachtete. Darüber hinaus wurde die Sammlung möglicher Funktionen durch Befragung und Workshops erweitert. Die identifizierten Funktionen wurden nachfolgend hinsichtlich der Erfüllung der nachfolgenden Kriterien ausgewählt:

- **Mehrwert** der Untersuchung im Allgemeinen sowie in Bezug auf die Heckklappe im Speziellen
- **Vereinbarkeit** der Ansätze mit den Randbedingungen des Anwendungsfalls (insb. Serientauglichkeit)
- **Forschungsbedarf** (allgemein und anwendungsfallsspezifisch)
- **Umsetzbarkeit** innerhalb des Projekts (verfügbare Ressourcen und Zeit, Expertise innerhalb des Konsortiums)

Das Ergebnis war eine Liste von 38 spezifischen Funktionen samt grundlegender Umsetzungsmöglichkeiten gegliedert in 14 Unterkategorien sowie 7 Grundkategorien. Zur Identifikation bzw. Auswahl der vielversprechendsten Funktionen wurde auf Basis der Unterkategorien ein paarweiser Vergleich vorgenommen. Das Ergebnis der im Rahmen der Entwicklung der Grundkonzepte weiterverfolgten Funktionen ist in Tabelle B.1 im Anhang dargestellt.

2.2 Untersuchung von Grundvarianten

Eines der entscheidenden Potenziale der Funktionsintegration ist die integralere Gestaltung von Bauteilen, da die Notwendigkeit einer Zugänglichkeit zur Montage von Komponenten entfällt. Diese sekundären Effekte der Funktionsintegration bieten einen großen Hebel zur Realisierung einer zusätzlichen Reduzierung von bspw. Gewicht, Kosten und Montagezeit. Deshalb wurden basierend auf der Produktarchitektur der Referenzheckklappe unterschiedliche Grundkonzepte einer integraleren Gestaltung der Heckklappe erarbeitet und analysiert. Basis hierfür bildet die Einteilung der Heckklappe in die drei Bereiche *Innen*, *Struktur* und *Außen*, denen jeweils spezifische, aber auch allgemeingültige Funktionen zugewiesen werden können. Ein Beispiel für allgemeingültige Funktionen sind die Nachhaltigkeit und Reparaturfähigkeit. Bereichsspezifische Funktionen sind bspw. die Steifigkeit für den Bereich *Struktur*, eine gute Haptik für den Bereich *Innen* oder die Aerodynamik für den Bereich *Außen*. Durch die Zusammenfassung einzelner Bereiche oder die Verschiebung einzelner

Systemgrenzen konnten unter Zuweisung bzw. Bezeichnung der resultierenden Komponenten fünf grundlegende Varianten der funktionsintegrierten Heckklappe abgeleitet werden:

- **Grundvariante 0:** Beibehaltung der aktuellen Trennung
- **Grundvariante 1:** Erweiterung der Systemgrenze des Bereichs *Struktur* auf Teile bzw. Funktionen der Bereiche *Innen* und *Außen*
- **Grundvariante 2:** Zusammenfassen der Bereiche *Innen* und *Struktur* zu integralem Innenteil
- **Grundvariante 3:** Zusammenfassen der Bereiche *Außen* und *Struktur* zu integralem Außenteil
- **Grundvariante 4:** Zusammenfassen aller Bereiche zu einem einzigen Integralteil

Die ermittelten Grundvarianten wurden anschließend einer Bewertung hinsichtlich der Umsetzbarkeit bzw. des Potenzials einer Umsetzung für die zuvor identifizierten Funktionen unterzogen. Dabei wurden die Möglichkeiten zur Umsetzung der Funktionen innerhalb der zur Verfügung stehenden Einzelteile (bspw. integrales Innenteil oder integrales Außenteil) bzw. die sich ergebenden Eigenschaften aus der Gesamtheit der Einzelteile (bspw. Gewichtersparnis durch Integralbauweise) qualitativ abgeschätzt. Unter Betrachtung aller Einzelbewertungen in Kombination mit der Gewichtung der einzelnen Funktionen haben sich die Grundvarianten 1 und 2 als erfolgversprechendste Varianten herausgestellt (vgl. Abbildung 2.2, oben).

Zur Identifikation der erfolgversprechendsten Fertigungskonzepte wurde eine Bewertung der Fertigungsverfahren durchgeführt. Dabei wurde sowohl die Umsetzung der identifizierten Grundvarianten als auch zu integrierenden Funktionen in Bezug zu den Grundvarianten berücksichtigt. Das Ergebnis der Analysen ist in Abbildung 2.2 (unten) dargestellt. Das erweiterte Innenteil der Grundvariante 1 wird durch Mehrkomponentenspritzguss oder alternativ Verbundspritzguss hergestellt. Für die Außenbeplankung wurde der Verbundspritzguss unter Einsatz endlosfaserverstärkter Kunststoffe oder alternativ das Carbon Preimpregnated Pressforming (CPP) identifiziert. Die Umsetzung der Innenkaschierung wurde an dieser Stelle noch nicht festgelegt. Die für Grundvariante 2 identifizierten Fertigungsverfahren entsprechen denen der Grundvariante 1 bis auf die unterschiedliche Reihenfolge von Verbundspritzguss und Mehrkomponentenspritzguss.

2.3 Struktur-, Funktions- und Fertigungskonzepte

Zur näheren Spezifikation der genauen Umsetzung der Funktionsintegration wurden parallel zu den vorherigen Arbeiten grundlegende Ansätze zur Realisierung einer Funktionsintegration identifiziert. Hierfür wurden basierend auf der Auswahl der Fertigungsverfahren und der sich daraus ableitenden möglichen Materialien zunächst generische Lösungen aus spezifischeren Umsetzungen möglicher Funktionsintegrationen aus der Literatur abgeleitet. Abbildung 2.3 zeigt einen Auszug dieser generischen Lösungen für die Funktion *elektrischen Strom Leiten*. Die Lösungen berücksichtigen die zuvor ausgewählten Fertigungsverfahren sowie die dafür einsetzbaren Materialien. Die erarbeiteten Lösungen wurden anschließend hinsichtlich zu erwartender Herausforderungen beschrieben sowie definierter Bewertungskriterien bewertet. Dabei lag der Fokus auf der Umsetzbarkeit innerhalb des Projekts (Entwicklungsaufwand und Expertise), der Anwendbarkeit unter den gegebenen Randbedingungen (Kosten, Reparatur, Umweltwirkung und Recycling) sowie den Anforderungen zur Umsetzung spezifischer Funktionen bzw. Komponenten.

Die Erstellung und Bewertung der generischen Umsetzungsmöglichkeiten wurde zunächst für die Funktionen

- Farbvarianz,
- Steifigkeit,
- Strom leiten,
- Medien leiten,
- elektrisches Signal leiten,
- Innenbeleuchtung,
- Touchfunktion,
- akustische Isolation und
- thermische Isolation

durchgeführt. Dabei wurden je Funktion Gespräche mit den jeweiligen Fachabteilungen der Porsche AG durchgeführt. Zur Ableitung von Konzepten wurde eine Morphologieanalyse der

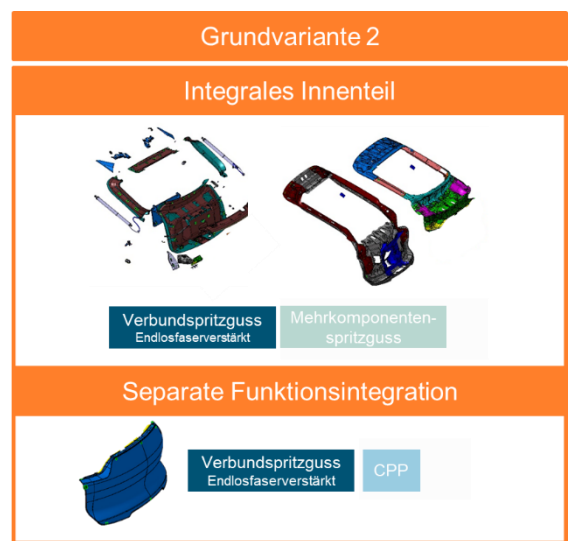
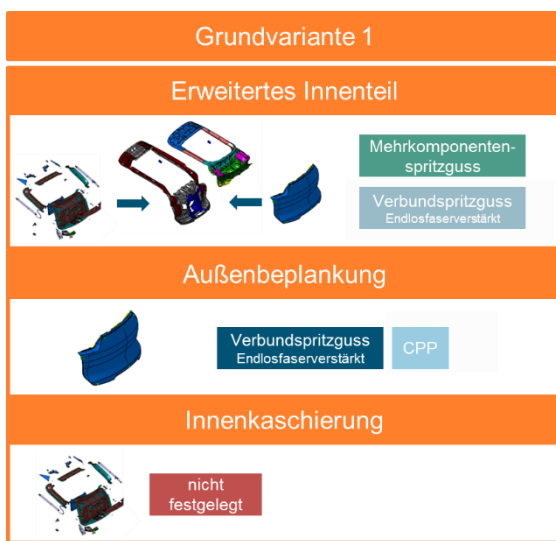
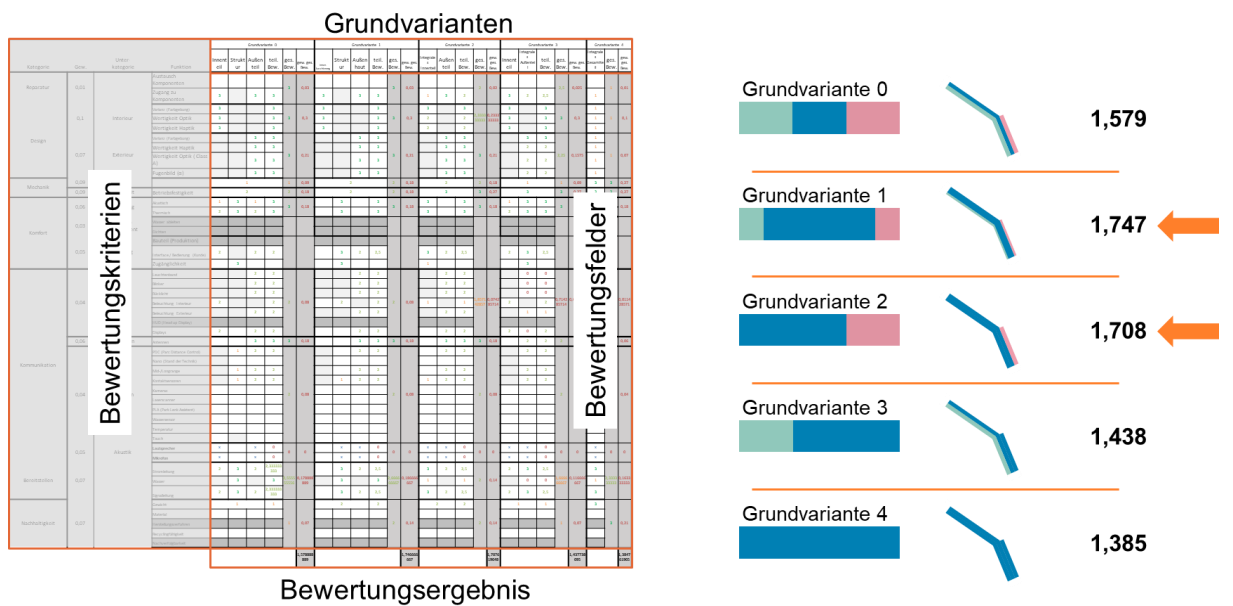


Abbildung 2.2: Ranking der abgeleiteten Grundkonzepte (oben) sowie Definition der beiden erfolgversprechendsten Grundvarianten (unten)

Informationen	Klassische Leitungen als Einleger			Leiter auf Halbzug			Variierter Leiter	
	1	2	3	4	5	6	7	
Nummer	1	2	3	4	5	6	7	
Bezeichnung	Leitungen als Einleger SG	Leitungen als Einleger im Schaumspritzguss	Faserhalbzeug mit applizierten Leitern	Halbzug mit applizierten Leitern (z.B. Folie)	Schaumhalbzeug mit applizierten Leitern	Variierter (flächiger) Leiter (z.B. Kupferbedecktes Vlies) als Einleger	Metalleinleger (auch Strukturleitungen)	
Beschreibung	Leitungseinleger in Spritzgusswerkzeug mittels Scheiber	Leitungseinleger in Schaumspritzgusswerkzeug mittels Scheiber	Applizierung auf Faserhalbzeug und anschließendes Einlegen in Werkzeug (z.B. einleimen oder aufgedrückt)	Applizierung auf Halbzug allgemein (Bism-Folie) und anschließendes Einlegen in Werkzeug	Applizierung in Schaumhalbzeug und anschließendes Einlegen in Werkzeug	Möglichkeit: CF-Bänder in GFK, Formstabilität von Vlies in Prozess	In Verbundspritzguss eingeleitetes Halbzug	
Herstellung								
Herausforderungen (limitierende Faktoren)	Ggf. Isolierung notwendig Verschiebung im Prozess (Kriechbildung)	Ggf. Isolierung notwendig Verschiebung im Prozess (Kriechbildung)	ggf. vorgeschalteter Prozess zur Konsolidierung des Faserhalbzeugs Anheftung Dämmen auf Kupfer (z.B. einleimen) ggf. notwendig 3D-Krümmung ggf. schwierig	3D-Krümmung ggf. schwierig	Halbbarkeit Schaum im Prozess		Herausforderung bei Notwendigkeit unterschiedlicher Spannungen	
Prozesse	Spritzguss mit Einleger	Schaumspritzguss	Verbundspritzguss mit FKV Einleger	Verbundspritzguss mit flächigen Einleger	Verbundspritzguss mit Schaum Einleger	Spritzguss mit Einleger	Spritzguss mit Einleger	
Ergebniszeit	umsetzbar	umsetzbar	Umsetzbarkeit prüfen	umsetzbar	nicht umsetzbar	nicht umsetzbar	nicht umsetzbar	
Entwicklungsaufwand bzgl. Technologie					großflächiges Halbzug			
Entwicklungsaufwand bzgl. Funktionsintegration	Anzahl Scheiber etc.	Anzahl Scheiber etc.	Applikation	Halbzugherstellung	Bestückung Halbzug und Spritzgussprozess	Leiterdefinition		
Expertes Know-how	Verfahrens Know-How geben; Erfahrung notwendig							
Kostenabschätzung								
Reparatur und Wartung	Ziel Dauerfestigkeit	Ziel Dauerfestigkeit	Ziel Dauerfestigkeit	Ziel Dauerfestigkeit	Ziel Dauerfestigkeit	Ziel Dauerfestigkeit	Ziel Dauerfestigkeit	
GWV	Kunststoffauswahl prüfen	Kunststoffauswahl prüfen		Kunststoffauswahl prüfen	Kunststoffauswahl prüfen	Kunststoffauswahl prüfen	Kunststoffauswahl prüfen	
Recyclingfähigkeit			FKV		nur wenn Schaum gleiches Material			
Anforderungen an Funktion			Kombination mit FKV		Halbzuggröße kritisch	Umsetzbarkeit fraglich	Anzahl Leitungen	
Heckleuchte (1,5 A)						Umsetzbarkeit fraglich	Umsetzbarkeit fraglich	
Spiegel (max. 15,3 A sehr kurz; 3 A über 3 s)						Umsetzbarkeit fraglich	Umsetzbarkeit fraglich	
Schnittstelle (Einleitung und externe Bauteile)	Schnittstelle definieren	Schnittstelle definieren	Schnittstelle definieren	Schnittstelle definieren	Schnittstelle definieren	Umsetzbarkeit fraglich	Umsetzbarkeit fraglich	
Heckklappe						Anzahl Leitungen		
Übersetzung								

Abbildung 2.3: Auszug aus der Zusammenstellung generischer Ansätze zur Integration elektrischer Leitungen in funktionsintegrierte Bauteile

Umsetzungsmöglichkeiten durchgeführt. Ziel war es dabei unter Berücksichtigung der möglichen Material- und Verfahrenskombinationen bzw. deren Restriktionen umsetzbare Gesamtlösungen zu generieren. Beispielsweise kann durch den Einsatz eines 2-Komponenten-Spritzguss neben dem Strukturkunststoff nur eine weitere Kunststoffkomponente verarbeitet werden. Somit schließt sich die Kombination von zwei Integrationslösungen, die unterschiedliche Kunststoffe benötigen, aus. Die Darstellung des Morphologischen Kastens zur Kombination der einzelnen Lösungen zu einer Gesamtlösung ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Aus der Kombinationsanalyse wurden drei Gesamtlösungen, davon zwei mit jeweils zwei Unterlösungen, als erfolgversprechend identifiziert und zur weiteren Betrachtung ausgewählt. Die Gesamtkonzepte definieren sich wie folgt:

Kategorie	Gen.	Unter-kategorie	Funktion	Form	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11
Design	0.1	Interieur	Verweis												
Mechanik	0.03	Strukturteil	Stützbohle												
Folger-Funktion		Stabilität + Oberflächenqualität	Flappen												
Rezeption	0.07	Leitungen	Medien, Leitungen												
Kommunikation	0.04	Verkehr	Leitungsverbindungen												
Konfort	0.06	Übersetzung	Akustik												

Abbildung 2.4: Morphologischer Kasten zur verträglichen Kombination von Einzellösungen zu Gesamtlösungen

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>1a) Farbvarianz: In-Mould Coating
Steifigkeit: Rippen und Metalleinleger
Abzeichnung verhindern: Metalleinleger</p> <p>1b) Farbvarianz: Zweikomponentenspritzguss
Steifigkeit: Rippen und Metalleinleger
Abzeichnung verhindern: Metalleinleger</p> <p>2) Farbvarianz: In-Mould Coating
Steifigkeit: Rippen und FKV
Abzeichnung verhindern: FKV</p> | <p>3a) Farbvarianz: In-Mould Coating
Steifigkeit: Hohlkörper und Sandwich
Abzeichnung verhindern: nicht erforderlich</p> <p>3b) Farbvarianz: Hinterspritzter Einleger
Steifigkeit: Hohlkörper und Sandwich
Abzeichnung verhindern: nicht erforderlich</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Durch Kombination möglicher generischer Umsetzungen der Integration der identifizierten Funktionen (vgl. Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3) sowie Fertigungskonzepten konnten spezifische Lösungen zur Umsetzung der Funktionsintegration unter Definition der Funktionskomponenten auf Basis der Grundkonzepte erarbeitet werden. Zudem wurden bestehende Spritzguss- und Presswerkzeuge identifiziert, die sich für die Durchführung von Vorversuchen zur Umsetzung von Funktionsintegration sowie die grundlegende Bauweise der Heckklappe eignen. Die für die Voruntersuchungen nutzbaren Werkzeuge erstreckten sich von einfachen Plattenwerkzeugen für Versuche für Materialpaarungen und Oberflächenbeschaffenheiten bis hin zu komplexen Werkzeugen, die sich für Untersuchungen möglicher Formgebungen unter Berücksichtigung von Funktionsintegration eignen.

Zur Vorauslegung der mechanischen Eigenschaften wurden neben anderen Bereichen die Holme als steifigkeitskritische Bereiche durch die Anwendung unterschiedlicher Bauweisen näher untersucht. Aus dem abgeleiteten Bauraummodell konnten Analysen hinsichtlich der Steifigkeit im Vergleich zur Aluminium-Referenz durchgeführt werden. Durch die Zusammenlegung der Innenverkleidung und der Tragstruktur resultiert ein deutlich vergrößerter Bauraum im Vergleich zur Referenz (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Aufgrund des dennoch begrenzten Bauraums war ein Einsatz zusätzlicher Verstärkungsstrukturen zwingend erforderlich, da die notwendige Steifigkeit durch Kunststoff allein nicht realisierbar war. Der Einsatz von Verbundspritzguss erlaubt an dieser Stelle den Einsatz unterschiedlicher Verstärkungsstrukturen. Im Rahmen der Untersuchungen wurde sich auf den Einsatz von Stahleinlegern oder Faser-Kunststoff-Verbunden (GFK und CFK) fokussiert. Um eine

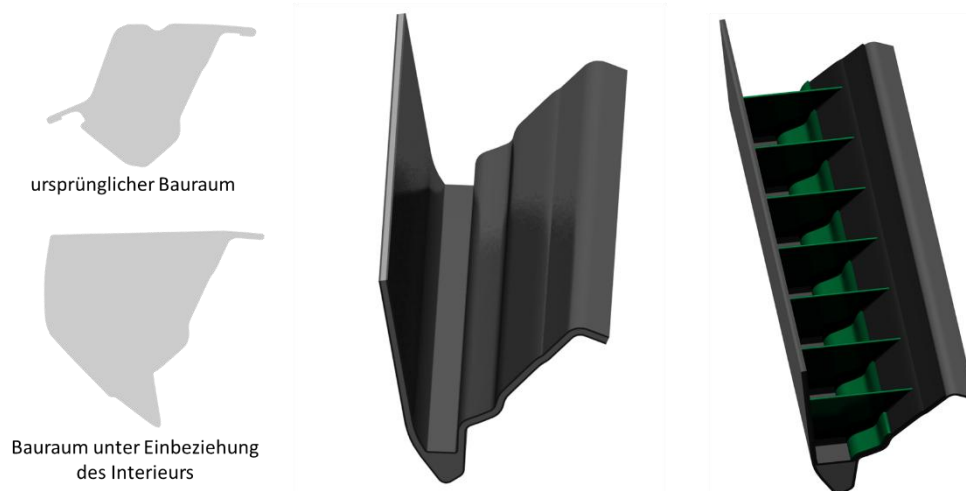


Abbildung 2.5: Beispiele für die Anwendung unterschiedlicher Bauweisen auf den Holmbereich auf Grundlage des vergrößerten Bauraums

möglichst hohe Steifigkeit zu gewährleisten, muss die Verstärkungsstruktur im äußeren Bereich des Querschnitts liegen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse hatten maßgeblichen Einfluss auf die Bewertung der notwendigen Versteifungsstrukturen im weiteren Verlauf des Projekts.

Zur Gestaltung der eigentlichen Heckklappe wurden mehrere Alternativen entwickelt und auf ihre Eignung für das Projekt untersucht. Die einteilige Ausführung als reine Spritzgussvariante hat sich aufgrund diverser Faktoren, wie entstehender Verzüge oder hohen Zuhaltekräften als nicht für die Umsetzung innerhalb des Forschungsprojekts geeignet erwiesen. Eine mehrteilige Fertigung der Heckklappe mit nachträglichem Fügen hat sich aufgrund des Fügeaufwands und zusätzlich entstehenden Herausforderungen hinsichtlich der nachträglichen Kontaktierung von bspw. integrierten Leitern als ungeeignet herausgestellt. Für die Konzeption der Heckklappe als Split-Tailgate (horizontal oder vertikal geteilte Heckklappe) waren keine Vergleichsmodelle vorhanden. Die Kombination aus Thermoformen oder Prepreg-Pressen (CPP) einer Faserverbandschale mit lokalem Spritzguss stellte sich als erfolgversprechende Variante heraus. Die vielfältigen Möglichkeiten zur Integration von Funktionen durch die zweiteilige Prozessführung eröffneten neue Möglichkeiten in der Untersuchung verschiedener Ansätze von Funktionsintegration. Die nachfolgende Planung sah die Fertigung eines integralen Innenteils durch die Kombination eines Press- und Spritzgussprozesses sowie die Fertigung einer gepressten Außenhaut vor. Die vorherige Absicherung der Umsetzbarkeit sollten durch vorhandene Versuchswerkzeuge sowie die Fertigung eines neu konstruierten Funktionsmusters realisiert werden (vgl. Abbildung 2.6).

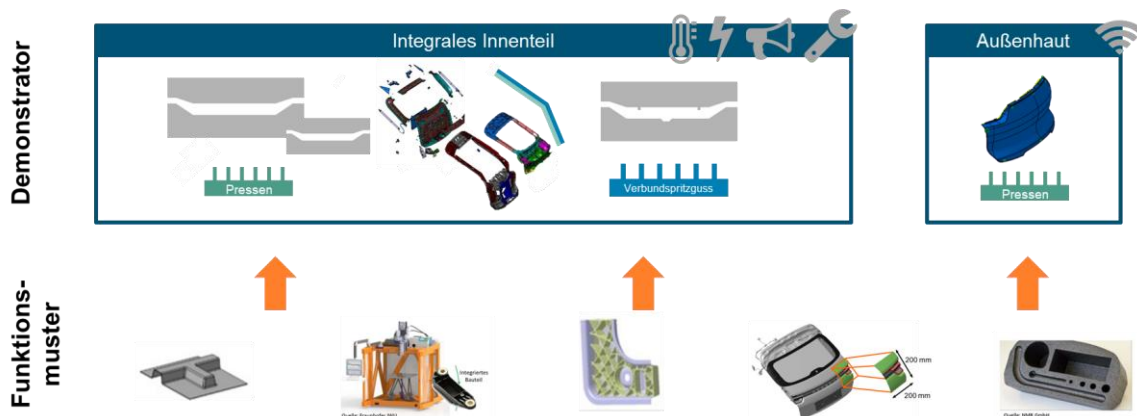


Abbildung 2.6: Planung der Demonstratoren

2.4 Definition der Demonstratorheckklappe

Auf Grundlage der Voruntersuchungen für das neue Konzept der funktionsintegrierten Heckklappe konnten die Planungen für die genaue Umsetzung des integralen Innenteils, der Außenbeplankung sowie des Funktionsmusters erfolgen. Das Konzept für das integrale Innenteil bestand aus einer ganzflächigen CFK-Schale (Prepreg-Pressverfahren). Einer strukturversteifenden Verrippung aus kurzfaserverstärktem Thermoplast sowie geschäumten Struktureinlegern und der integralen Umsetzung der Innenverkleidung über In-Mould Coating (IMC). Das Innenteil kombiniert somit die Struktur der Heckklappe mit dem Interieur und integriert dabei Bauteile, Leitungen und Sensoren. Das Konzept der Außenbeplankung besteht aus GFK (Prepreg-Pressverfahren) und integriert dabei Antennen. Um die Herausforderungen der Werkstoffpaarung sowie die Absicherung der Fertigung samt Ermittlung von Fertigungsparametern zu analysieren wurde zudem die Konstruktion eines als Teilausschnitt der Heckklappe gestalteten Funktionsmusters erarbeitet (vgl. Abbildung 2.7). Zur Validierung ausgewählter Ansätze wurden Versuche anhand von bestehenden Werkzeugen

durchgeführt. Eine detailliertere Beschreibung der Herausforderungen und Untersuchungen erfolgt nachfolgend.

Zur Umsetzung des integralen Innenteils wurde anschließend der Fertigungsprozess anhand zweier Varianten konzeptioniert. Aufgrund der Begrenzung der vorhandenen Anlagentechnik wurde für beide Varianten sowohl ein Fertigungskonzept für die Umsetzung im Rahmen des Projekts als auch ein optimierter Serienprozess erarbeitet. Das als erfolgversprechend ausgewählte Konzept sieht eine Fertigung der CFK Schale durch ein vorbereitendes Preformen, das aufgrund der komplexen Formgebung notwendig ist, und ein anschließendes Verpressen vor. Anschließend erfolgt die Erstellung des Interieurs durch einen IMC-Prozess mit abschließendem Spritzgussprozess der inneren Rippengeometrie.

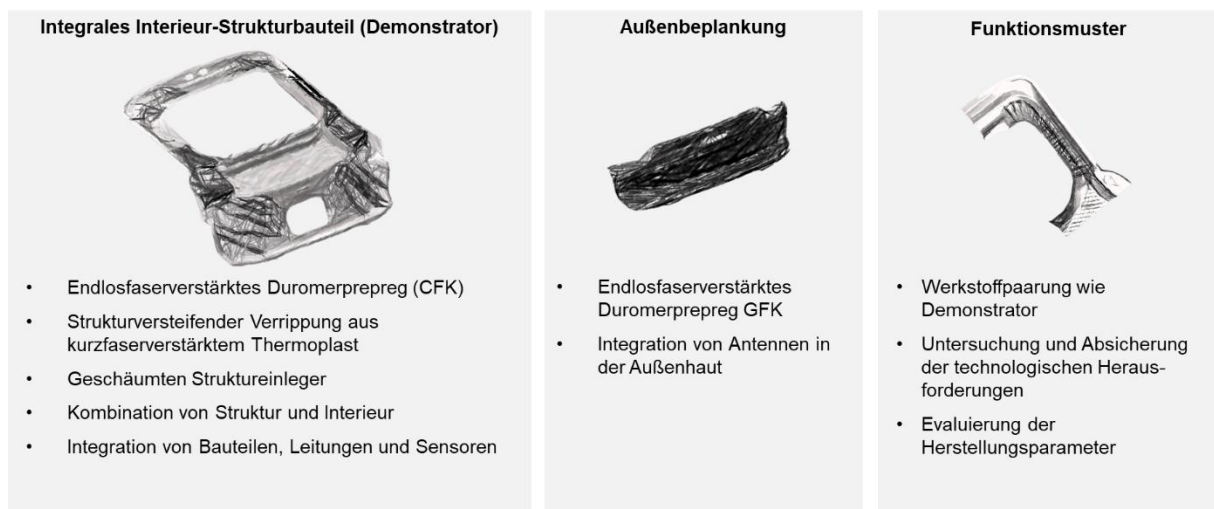


Abbildung 2.7: Konzeptplanung für Demonstrator, Außenbeplankung und Funktionsmuster

Nach der Spezifikation des Konzepts konnten weitere Voruntersuchungen hinsichtlich einer mechanischen Auslegung durchgeführt werden. Dafür wurde zunächst anhand eines Bauraummodells eine Topologieoptimierung durchgeführt. Durch den Einsatz von Einheitslastfällen konnten somit die relevanten Lastpfade bzw. kritische Bereiche hinsichtlich der zu erzielenden Steifigkeit identifiziert werden. Abbildung 2.8 zeigt exemplarische Ergebnisse der Untersuchungen für unterschiedliche Lastfälle und Kontaktbedingungen zu Anbauteilen. In der oberen Analyse wurde als Vergleich eine Optimierung mit leerem Bauraum durchgeführt. Es lässt sich dabei in allen Ergebnissen die Ausbildung einer Ringstruktur sowie die Bedeutung des Holmbereiches rechts und links der Scheibe erkennen. Die unteren Optimierungsergebnisse zeigen den Materialbedarf beim Einsatz einer CFK-Schale mit 3 mm Wandstärke. Im unteren Bereich der Heckklappe ergibt sich ein deutlich geringerer Materialbedarf, was auf die tragende Wirkung der Schale zurückzuführen ist. Im Holmbereich besteht jedoch weiterhin der größte Bedarf an zusätzlichem Material. Aus den Ergebnissen lassen sich Bedarfe für zusätzliche Spritzgussverrippungen ableiten.

Die Identifikation und Auswahl der genauen Umsetzung der zu integrierenden Funktionen erfolgte analog zu den vorherigen Untersuchungen für Verbundspritzguss über generische Materialpaarungen bis hin zur Auswahl bzw. Entwicklung spezifischer Umsetzungsansätze. Hauptfokus lag auf der Integration eines Piezonetzes sowie weiterer elektrischer Leitungen für bestehende Verbraucher. Hierfür wurde eine detaillierte Analyse der in der Referenzheckklappe vorhandenen Verbraucher samt Anschlussspannung, maximaler Leistung, Kabellängen sowie Anzahl individueller Anschlusspins

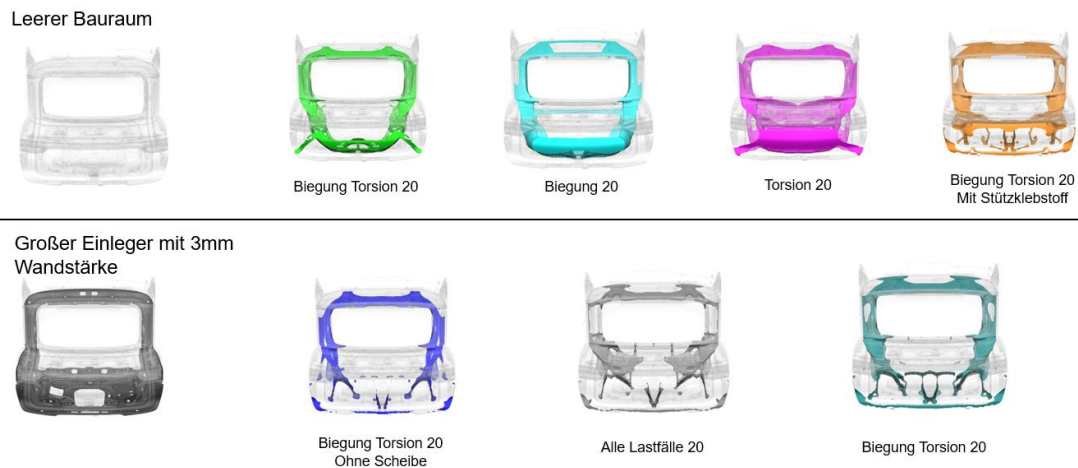


Abbildung 2.8: Topologieoptimierung in Kombination mit einer CFK-Schale (unten) im Vergleich zu den ursprünglichen Ergebnissen (oben)

anhand des Schaltplans aller elektrischen Komponenten der Heckklappe durchgeführt. Zu betrachtende Randbedingungen waren hierbei insbesondere:

- die **Position der Leiterbahn**, da diese im Bereich der im Spritzgussverfahren hergestellten Teilkomponenten liegen sollte
- der aufsummierte **Querschnitt der Leiterbahn**, um die Integrationsfähigkeit in Bereichen mit geringer Wandstärke darstellen zu können.
- **Position der zu integrierenden Piezokeramiken**, um den Einfluss der Prozessparameter des Spritzgusses auf die Funktionsfähigkeit der Piezokeramiken bewerten zu können

Hierfür wurde eine Übersicht der Integrations- und Kontaktierungsmöglichkeiten für piezokeramische Wandler erarbeitet (vgl. hierzu Abbildung 2.9). Dies war notwendig, da die Entwicklung sowie die Integration eines Netzwerks auf vielfältige Arten realisiert werden kann. Darüber hinaus umfasst die Kontaktierung des Netzwerks an die Elektronik verschiedene Möglichkeiten. Mit der Heizung und der Zuziehhilfe der Heckklappe konnten zwei Verbraucher identifiziert und ausgewählt werden, die diese Randbedingungen erfüllen. Für den zweiten Integrationsfall wurden ähnlich wie im obigen ersten Fall die Randbedingungen zur Integration untersucht. Piezokeramische Wandler können aktorisch als auch sensorisch betrieben werden und eignen sich damit sowohl zur Aussendung als auch zum Empfang von Körperschallwellen. Mittels einer geeigneten Elektronik können somit Strukturschwingungen sowohl unterdrückt bzw. gedämpft als auch angeregt werden. Auch in diesem Integrationsfall wurde in Abstimmung mit Porsche die Auswahl der Funktionen spezifiziert. Um beide Anwendungsmodi (dämpfen und anregen) darstellen zu können, wurden in der ersten Iterationsschleife zwei Anwendungsfälle spezifiziert. Beide Varianten werden in den nachgelagerten Arbeitspaketen weiter evaluiert und ausgearbeitet. Die beiden Anwendungsfälle lauten wie folgt:

- Reduktion des von außen in das Fahrzeug eingebrachten Lärmes
- Funktion eines Lautsprechers, indem Schallwellen ausgesendet werden

Basierend auf diesen Vorarbeiten begann die fertigungsgerechte Konstruktion des Demonstrators parallel zu den Vertiefungen der vorherigen Untersuchungen. Dabei wurde zunächst die CFK Schale hinsichtlich der Randbedingungen des Bauraums, der Fügstellen für die Übernahmeteile und insbesondere des fertigungstechnisch realisierbaren Umformgrades konstruiert. Basierend auf den

	Lösung 1	Lösung 2	Lösung 3	Lösung 4	Lösung 5	Lösung 6	Lösung 7	Lösung 8	Lösung 9
Wandler-kontaktierung	Lötunkte „DuraAct“ (W) 	Crimpen 	Wandlernaher Steckverbinder 	Durchkontaktierung / Vias 	Direkt- / In-Situ Kontaktierung (Z) 	Kontaktierung über Hutprofil (Y) 	Pinkontaktierung (X) 		
Leiterbahnen	Flachleiter 	Kupfervlies 	(Starre) Leiterplatte 	Kabel integriert 	Kabel extern 	Gestickte Leiterbahnen 	Gedruckte Leiterbahnen 	Kupferfolie 	Kaltplasmaspritzen
Leiterzusammenführung und Kontaktierung	Direktkontaktierung Flachleiternetzwerk 	Platine + Kontaktierung an Platine (z.B. SMD) 	Direktkontaktierung Kabel 	Platine + Kabel 					
Steckverbinder/ Verbindung zur Messhardware	ZIF Stecker 	SMD-Stecker 	Pin-basierter Stecker (z.B. D-Sub) 	Crimp-Kontakt Stecker 	Schraubkontakt Stecker 	Ohne Stecker Crimp-Kontakt 			

Abbildung 2.9: Ausschnitt aus möglichen Integrations- und Kontaktierungsmöglichkeiten für Netzwerke und piezokeramische Wandler

Untersuchungen der zuvor gezeigten Topologieoptimierung wurde anschließend das Rippenbild konstruiert sowie auf Basis von weiteren lokalen Optimierungen angepasst. Am Übergangsbereich der Holmunterseiten wurde zudem ein Sandwich-Struktureinleger konstruiert. Das Zwischenergebnis der Konstruktion ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

2.5 Vorversuche und Funktionsmuster

Aus der Definition des Demonstrators sowie dem Zwischenstand der Konstruktion konnten zentrale Herausforderungen abgeleitet werden, die anhand von Vorversuchen bzw. dem zu konstruierenden Funktionsmuster analysiert werden sollten. Diese waren:

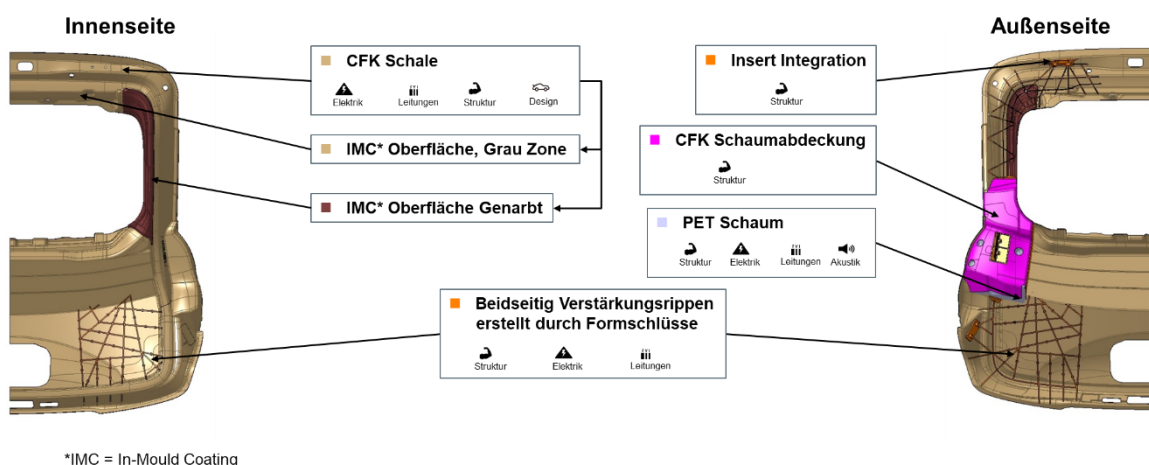


Abbildung 2.10: Zwischenstand der konstruktiven Umsetzung der Heckklappe

- Bauteilgröße und Komplexität der Geometrie
 - Genarbte Interieuroberfläche durch IMC
 - Drapierung des CFK
 - Handling des Prozesses
 - Verzug der Bauteile
- Anhaftung
 - CFK – IMC
 - CFK – Schaum
 - CFK – Thermoplast
 - Schaum – Thermoplast
- Abzeichnung der Spritzgussrippen
- Korrosion von Inserts
- Funktionsintegration von E-Komponenten
 - Piezokeramiken
 - Leitungen
 - Akustikkomponenten

Zur Untersuchung dieser Herausforderungen wurde eine Versuchsplanung definiert, die zunächst eine Voruntersuchung anhand von bestehenden Werkzeugen vorsieht, bevor bauteilnahe Prüfungen anhand des Funktionsmusters vorgenommen werden. Die Planungen sind in Abbildung 2.11 dargestellt.

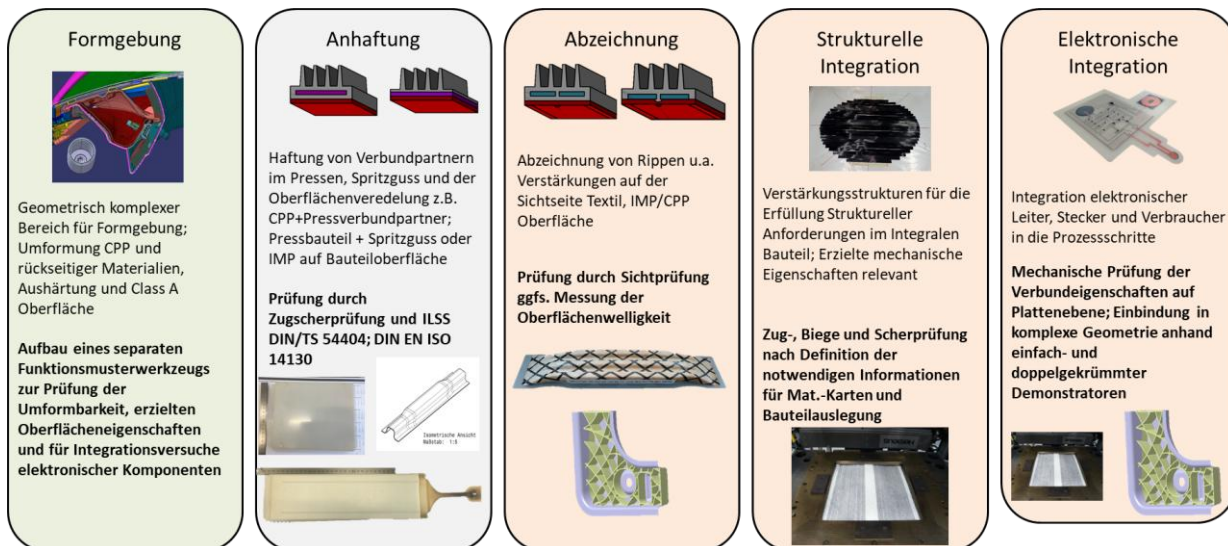


Abbildung 2.11: Planung der Vorversuche anhand von bestehenden Werkzeugen

Die notwendigen Ziehtiefen für die CFK Schale durch die komplexe Formgebung der Heckklappe insbesondere im Bereich der seitlichen Holme erfordert die Absicherung der Drapierbarkeit. Diese Untersuchung sollte anhand des nachfolgend näher beschriebenen Funktionsmusters als Teilausschnitt der Heckklappe durchgeführt werden. Zur Untersuchung der Anhaftung zwischen dem Thermoplastspritzguss und dem Duromer-CFK wurden Anhaftungsversuche anhand eines vorhandenen Platte-Rippen-Spritzgusswerkzeugs (siehe Abbildung 2.12) mit unterschiedlichen Rippenausprägungen durchgeführt. Dabei wurden alle CFK Probeplatten im Vorfeld presstechnisch konsolidiert. Die Probekörper wurden mit unterschiedlicher Faserorientierung der Decklagen, unterschiedlichen Schliffstärken sowie einer Nachbehandlung mit Isopropanol und Beflammen untersucht. Im Maximum konnte für beflamte Proben und bei Vergrößerung der Rippenhöhe eine durchschnittliche Festigkeit von 3 MPa erzielt werden.



Abbildung 2.12: Platte-Rippen-Spritzgusswerkzeug (links) und generierte Probekörper mit 3 mm und 6 mm Rippenstärke (rechts)

Die Versuche offenbarten eine nicht ausreichende Haftung des Thermoplasts auf dem Duromer, sodass haftvermittelnde Maßnahmen untersucht wurden. Neben der Betrachtung eines in der Serienfertigung aufwändigen Einsatzes von Haftvermittlern wurden alternative Konzepte zur Verbesserung der Anhaftung untersucht. Dazu wurde ein Fasergewebe nur einseitig mit Thermoplastmatrix imprägniert und anschließend zusammen mit dem CFK-Prepreg verpresst. Durch das Eindringen des Duromerharzes in das einseitig noch unimprägnierte Gewebe konnte eine haltbare Verbindung zwischen Thermoplastgewebe und Duromerprepreg hergestellt werden. Die thermoplastische Außenseite versprach wiederum eine gute Anhaftung des Spritzgussmaterials. Zusätzlich wurde eine Versuchsreihe mit PET und PA Folien durchgeführt, welche im Konsolidierungsprozess der CFK-Prepregs aufgebracht wurden. Im weiteren Verlauf waren Untersuchungen der Verbundfestigkeit durch Zugscherproben sowie ein Anspritzen von Rippen zur Verifikation des Konzepts geplant.

Vorbereitend auf die Integration eines Sensornetzwerkes mit Piezokeramiken wurden Pressversuche unternommen, um die Haltbarkeit bzw. Funktionsfähigkeit der Piezokeramiken nach dem Pressvorgang der elektronischen Komponente zu überprüfen. Dabei wurden funktionsfähige Piezokeramiken zusammen mit dem Duromerprepreg verpresst und anschließend einer Funktionsprüfung unterzogen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Piezokeramiken trotz der vergleichsweise hohen Drücke und Temperaturen während des Verpressens funktionsfähig blieben.

Nach der initialen Erprobung der Integration von Piezokeramiken wurde damit begonnen ein Design eines Piezonetzwerks anhand der CAD-Daten des nachfolgend näher beschriebenen Funktionsmuster zu entwerfen. Da das Modell des Netzwerks in einer 2D-Umgebung modelliert wird, musste zunächst eine Abwicklung der Funktionsmustergeometrie erstellt werden, in die das Netzwerk integriert werden sollte. Zunächst wurden zwei identische rechteckige Piezokeramiken eingefügt, um zwei verschiedene Bereiche der Struktur anregen zu können. So kann in der künftigen Messung ein aussagekräftiger Vergleich geometrisch unterschiedlicher Bereiche getätigt werden. Dabei wurde berücksichtigt, dass das Netzwerk mit entsprechenden Toleranzen in den Bereich passt, der für den Spritzguss vorgesehen ist. Die notwendigen Bauräume zur Integration der Verbraucher der Heckklappe wurden vorgehalten und können genutzt werden.

Parallel zu den Voruntersuchungen fand die Erarbeitung und Konstruktion des Funktionsmusters statt, das die zentralen Herausforderungen des Demonstratorkonzepts bauteilnah untersuchen sollte. Das

Funktionsmuster bildete dementsprechend einen Teilausschnitt der Heckklappe ab. Die Darstellung des Funktionsmusters zusammen mit den Untersuchungsgegenständen ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Als Ausschnitt der Heckklappe im Holmbereich samt oben und unten angrenzender Übergangsbereiche kann die komplexe Formgebung der Heckklappe und insbesondere die notwendige Ziehtiefe im Holmbereich abgeprüft werden. Zudem kann durch die Rippenstruktur eine Aussage hinsichtlich der Füllung der Rippen, der Anhaftung auch in Bezug auf unterschiedliche Rippenfüße, der möglichen minimalen Auszugsschrägen der Rippen sowie einer Abzeichnung auf der Innenseite getroffen werden. Darüber hinaus sind im Funktionsmuster Strukturversteifungen auch zur Integration von Extrusions- oder Partikelschaumeinlegern sowie Inserts, Onserts und Dome integriert. Für die nicht-strukturellen Funktionen sollten das zuvor entwickelte Piezonetzwerk, die zusätzlichen elektrischen Leitungen samt Kontaktierungen zwischen CFK-Prepreg und Spritzguss eingebracht werden. Zur Überprüfung der Realisierbarkeit der Interieuroberfläche wurde das Funktionsmuster in unterschiedliche Bereiche mit unterschiedlicher Oberfläche und Narbungsart eingeteilt. Für die einzelnen Fragestellungen wurden jeweils notwendige Vor- und Nachuntersuchungen definiert.

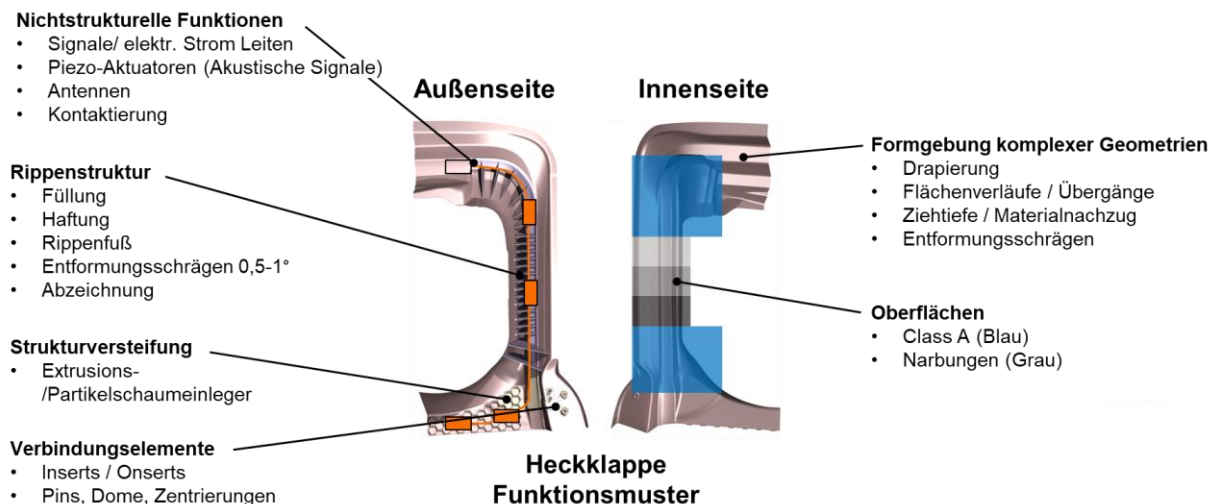


Abbildung 2.13: Definition des Funktionsmusters samt Untersuchungsgegenstände

Um die Einbringung der nicht-strukturellen Funktionen in die Prozessführung zu ermöglichen, erfolgte die Konzeption und der Entwurf eines funktionsintegrierten Einlegers. Hierfür flossen die Anforderungen aus Funktionsmuster und Demonstrator mit den Erkenntnissen der Press- und Anhaftungsversuche zusammen.

Als Trägermaterial wurden sowohl die hybrid-imprägnierte Haftvermittlungsschicht als auch die Folienmaterialien definiert. Nach Aufstellung unterschiedlichster Varianten für die Funktionshalbzeuge wurden die Funktionen und Anforderungen als Bewertungskriterien in die Variantenbewertungen eingebunden. Hierbei hat sich insbesondere das Konzept einer Folie mit metallisch-beschichteten Leiterbahnen, einer zusätzlichen EMV Decklage sowie geschäumten Gehäusen für druckempfindliche Komponenten durchgesetzt und wurde konzeptionell ausgearbeitet (siehe Abbildung 2.14). Eine analytische Vorabschätzung konnte noch nicht in hinreichender Absicherung erfolgen, da die notwendigen Parameter aus der Spritzgussimulation der Werkzeugentwicklung extrahiert werden.

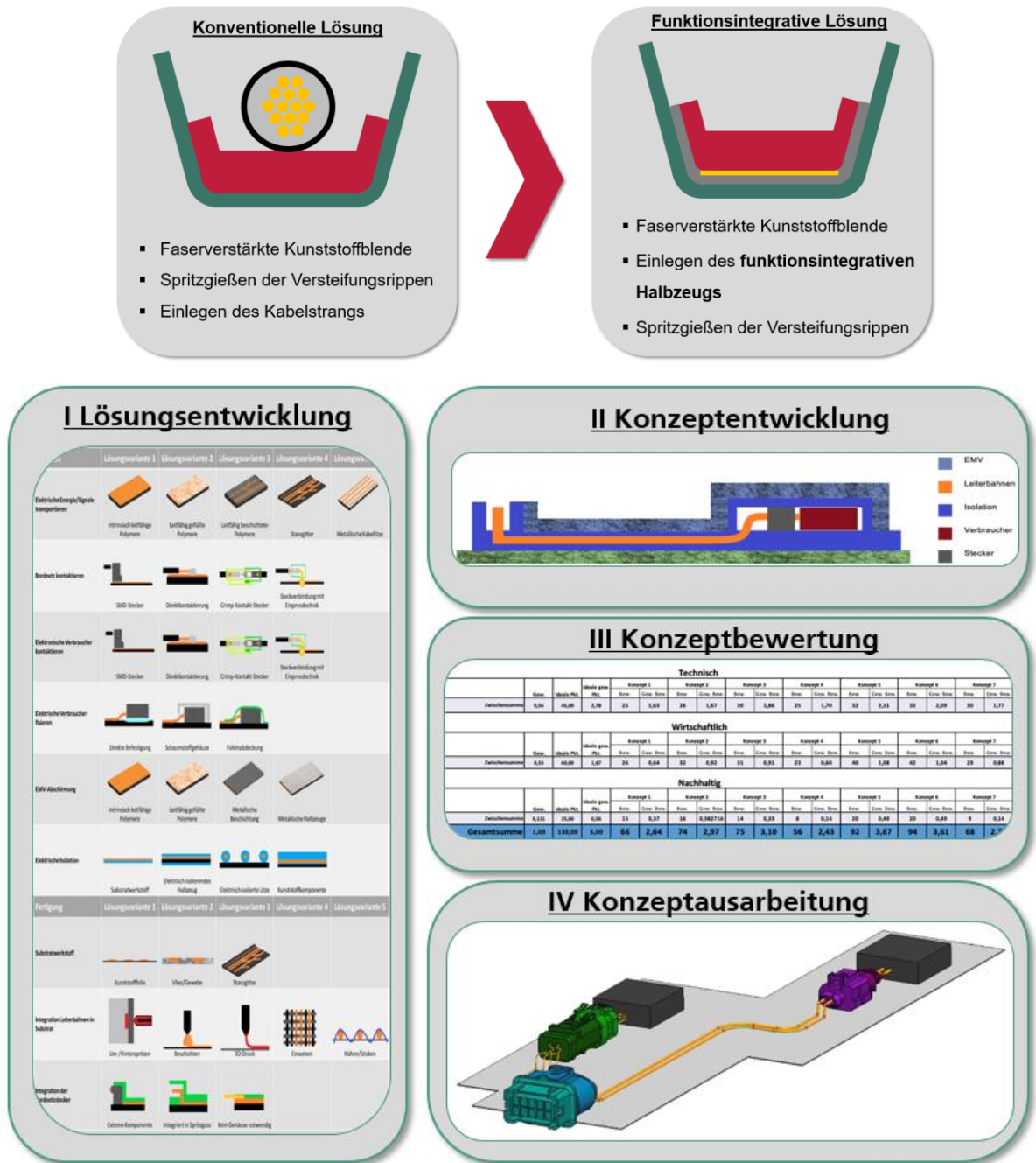


Abbildung 2.14: Wechsel von konventioneller Integration im Montageprozess zu funktionsintegrierter Lösung (oben) und Entwicklung funktionsintegrierter Einleger (unten)

Durch die Verschweißbarkeit der Trägerfolie ist die Applikation von Kontaktierungselementen von Steckern und Buchsen möglich. Die elektrische Isolierung von Leitern kann in Teilen von der späteren Spritzgussmasse erfolgen. Zur Herstellung der geschäumten Einhausungen wurde aufgrund thermischer Prozessanforderungen PET und recyceltes PET definiert und dies in Form von Partikelschaum betrachtet. Zugleich wurde für weniger komplexe Bereiche Extrusionsschaum vergleichend betrachtet, welcher gefräst verfügbar ist oder aber durch spezifische Extrusionswerkzeuge im Falle einer Skalierung möglich wäre. Für die Herstellung hinreichender Probekörper aus Partikelschaum ist ein entsprechender Prozess notwendig. Hierbei ist recyceltes PET (rPET) als Partikelschaum nicht im gängigen Dampfverfahren verarbeitbar. Für Wandstärken im

Bereich unter 20 mm ist hierbei eine Variothermie über die Werkzeugwand hinreichend. Hierfür ist ein Werkzeug geringer Masse, oberflächennaher Heizung und hoher Leistung und Energieeffizienz notwendig. Nach Gegenüberstellung und Bewertung unterschiedlicher Varianten fiel die Wahl auf ein widerstandsbeheiztes Hybridwerkzeug mit rückseitiger Fluidkühlung. Die Widerstandsheizung soll hierbei über im Werkzeug integrierte und diesem seine Steifigkeit gebende CFK-Struktur umgesetzt werden (Abbildung 2.15). Die zugehörige Steuerungseinheit ermöglicht die heizzonenindividuelle Temperierung des Werkzeugs.

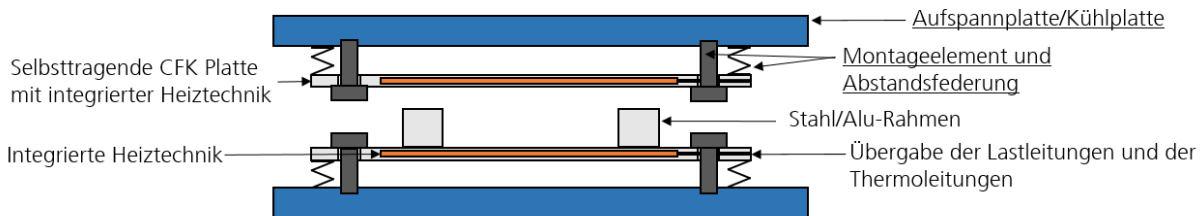


Abbildung 2.15: Variothermes Versuchswerkzeug auf Basis integrierter Widerstandsheizung und rückseitiger fluidgekühlter Trägerplatten

Für die Einbettung wurden Hochtemperatursilikone als auch Benzoldicarbonitrilharze bewertet, wobei sich Hochtemperatursilikone als erfolgversprechendste Variante herausgestellt haben. Die in Silikon eingebettete Faserverbundmatte erzeugt hierbei keine hinreichende Steifigkeit, weswegen ein hybrider Aufbau gewählt wurde und die Heizmatte mit einer dünnwandigen Metallkavität verbunden wird. Entgegen dem Konzept aus Abbildung 2.15 kann hier in einer Erweiterung die Fluidkühlung in die Formhälften direkt integriert werden.

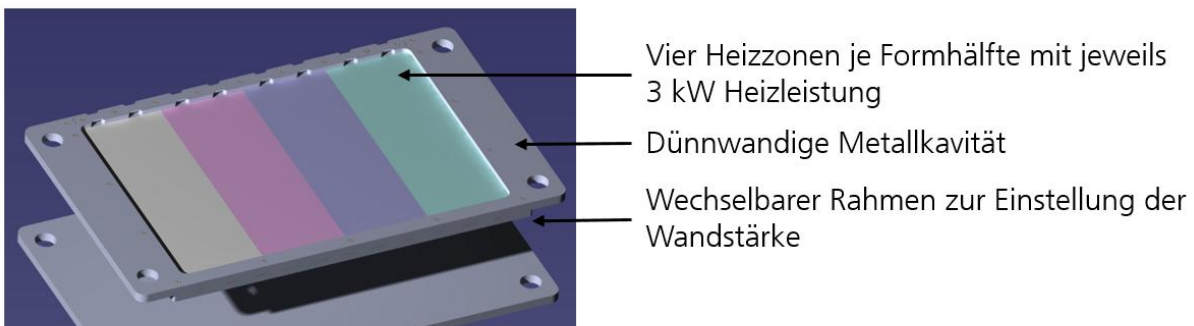


Abbildung 2.16: Konstruktion widerstandsbeheiztes Hybridwerkzeug mit vier regelbaren Heizzonen

Für die praktische Umsetzung sind zwei Silikonvarianten zur Anwendung gekommen. Variante A wurde hierbei unter Atmosphärenbedingungen in die Heizstruktur eingebracht, während Variante B unter Vakuum imprägniert und ausgehärtet wurde.

Im Rahmen der Funktionsprüfung mit Variante A wurde zunächst ein Temperaturversuch mit einer Temperaturrampe von 10 K/min ab 20 °C bis zu einer Zieltemperatur von 250 °C durchgeführt. Bereits ab einer Temperatur von 200 °C trat eine signifikante Rauchentwicklung auf, die nach etwa 15 Minuten nachließ. Die Rauchbildung wird auf die thermische Zersetzung von Polyester-Nähfäden oder Silikonbestandteilen zurückgeführt. Eine weitere Temperaturerhöhung führte zu erneuter Rauchentwicklung sowie zur Blasenbildung innerhalb der Silikonschicht, was auf die Ausdehnung eingeschlossener Luft während des Erhitzens zurückzuführen ist. Aus Sicherheitsgründen wurde der

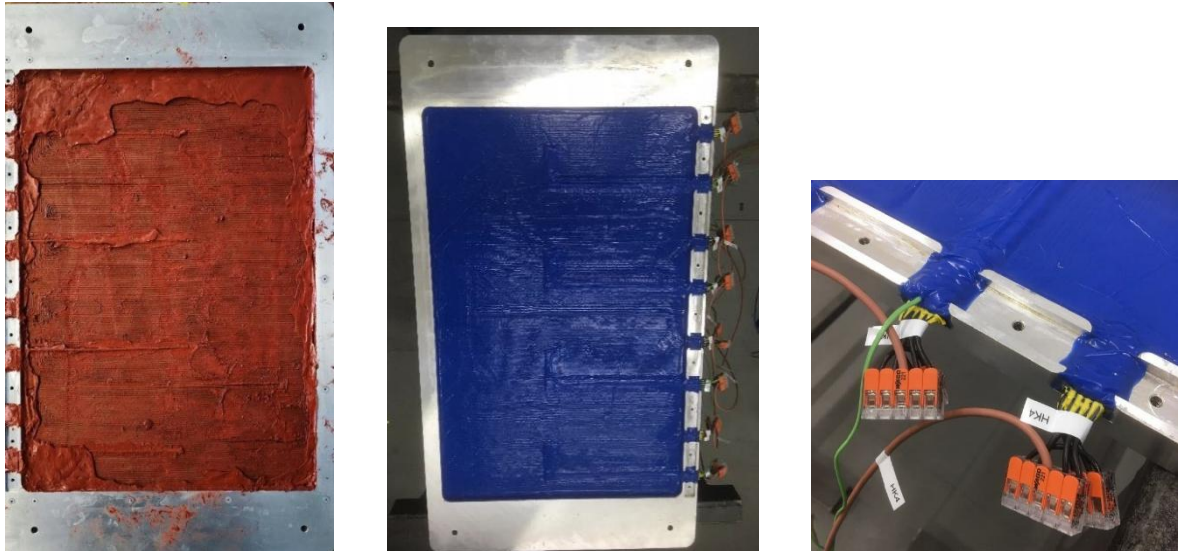


Abbildung 2.17: Widerstandsheizsystem in Aluminiumwerkzeug Variante A (links) und Variante B (mitte) sowie Anschlussintegration (rechts)

Versuch bei 250 °C abgebrochen, da die Gefahr einer Delamination der Heizstruktur mit anschließendem Kurzschluss bestand.

Im Anschluss wurde der Versuch mit Variante B erprobt, mit dem Silikon HFH5770/64 welches unter Vakuumbedingungen verarbeitet wurde, um Lufteinschlüsse zu vermeiden. Der Aufheizprozess erfolgte mit einer reduzierten Heizrate von 1 K/min, unter definierten Haltezeiten von 10 Minuten pro 10 K, bis zu einer maximalen Zieltemperatur von 250 °C. Während dieses Versuchs zeigten sich keine Anzeichen von Blasenbildung oder Delamination. Aussagen zur Langzeitstabilität des Materials bei dieser Temperatur oder darüber hinaus sind auf Grundlage der durchgeführten Versuche nicht möglich.

2.6 Schlussbetrachtung

Durch die tiefgreifende Analyse der Referenzheckklappe sowie die zusätzliche Betrachtung weiterer Anwendungsfälle konnten Funktionen mit Potenzial zur Integration systematisch analysiert und ausgewählt werden. Für diese Funktionen wurden zahlreiche Prinzipien bzw. Ansätze zur Funktionsintegration mit unterschiedlichen Integrationstiefen und Fertigungskonzepten identifiziert, spezifiziert sowie für den Anwendungsfall Heckklappe bewertet und ausgewählt werden. Parallel hierzu konnten erste Schritte zur Erstellung einer Datenbank für funktionsintegrierte Lösungen unternommen werden. Die systematische Analyse in Bezug auf den Anwendungsfall ermöglichte zudem die Entwicklung eines methodischen Grundansatzes zur Identifikation geeigneter Lösungen für Funktionsintegration in Bezug auf unterschiedliche Filtergrößen (Integrationstiefe, Fertigungsverfahren, Materialien/Materialverbunde etc.).

Auf Grundlage dieser Vorarbeiten konnten unterschiedliche Konzepte für eine funktionsintegrierte Heckklappe erarbeitet werden. Die Konzepte unterschieden sich dabei in der Anzahl integrierter Funktionen, der Tiefe der Funktionsintegration sowie alternativer Bauteilaufteilungen. Durch die Bewertung der Konzepte hinsichtlich der zuvor gesteckten Anforderungen und Ziele konnte ein Vorzugskonzept identifiziert werden. Für das favorisierte Konzept einer hochintegralen Heckklappe konnten wiederum unterschiedliche Konzepte ausgearbeitet werden. Durch die Abschätzung und Bewertung zentraler Eigenschaften, wie den Fertigungskonzepten, notwendigen Werkzeugumfängen,


mechanischen Eigenschaften oder Kosten und Umweltwirkungen, konnte das finale Konzept abgeleitet werden. Dieses wurde anschließend konstruktiv umgesetzt und durch numerische Simulationen validiert sowie hinsichtlich der zuvor gesteckten Anforderungen und Ziele bewertet und ausgewählt. Zudem konnten erste fertigungstechnische Untersuchungen zur Umsetzung von Funktionsintegration, wie dem gleichzeitigen Verpressen von Piezoaktuatoren zusammen mit CFK-Prepreg und anschließender erfolgreicher Funktionsprüfung durchgeführt werden. Darüber hinaus wurde ein Funktionsmuster erarbeitet und konstruiert, welches sich dazu eignet, die Ansätze in weiterführenden Untersuchungen physisch zu validieren.

Anhang

Tabelle B.1: Vorauswahl von zu berücksichtigenden Funktionen

Kategorie	Gew.	Unterkategorie	Funktion/Funktionskomponenten
Reparatur	0,01	Reparatur	Austausch Komponenten, Zugang zu Komponenten
Design	0,1	Interieur	Varianz (Farbgebung), Wertigkeit Optik, Wertigkeit Haptik
	0,07	Exterieur	Varianz (Farbgebung), Wertigkeit Haptik, Wertigkeit Optik (Class A), Fugensbild (α)
Mechanik	0,09	Steifigkeit	Steifigkeit
	0,09	Festigkeit	Betriebsfestigkeit
Komfort	0,06	Dämmung	Akustisch, Thermisch
	0,03	Wassermanagement	Wasser ableiten, Dichten
	0,05	Handling	Bauteil (Produktion), Interface / Bedienung (Kunde), Zugänglichkeit
Kommunikation	0,04	Optisch	Leuchtenband, Blinker, Rücklicht, Beleuchtung Interieur, Beleuchtung Exterieur, HUD (Head-up Display), Displays
	0,06	Antennen	Antennen
	0,04	Sensoren	PDC (Parc Distance Control), Nano, Mid-/Longrange, Kontaktsensoren
	0,05	Akustik	Lautsprecher, Mikrofon
Bereitstellen	0,07	Leitungen	Stromleitung, Wasser, Signalleitung
Nachhaltigkeit	0,07	Nachhaltigkeit	Gewicht, Material, Recyclingfähigkeit

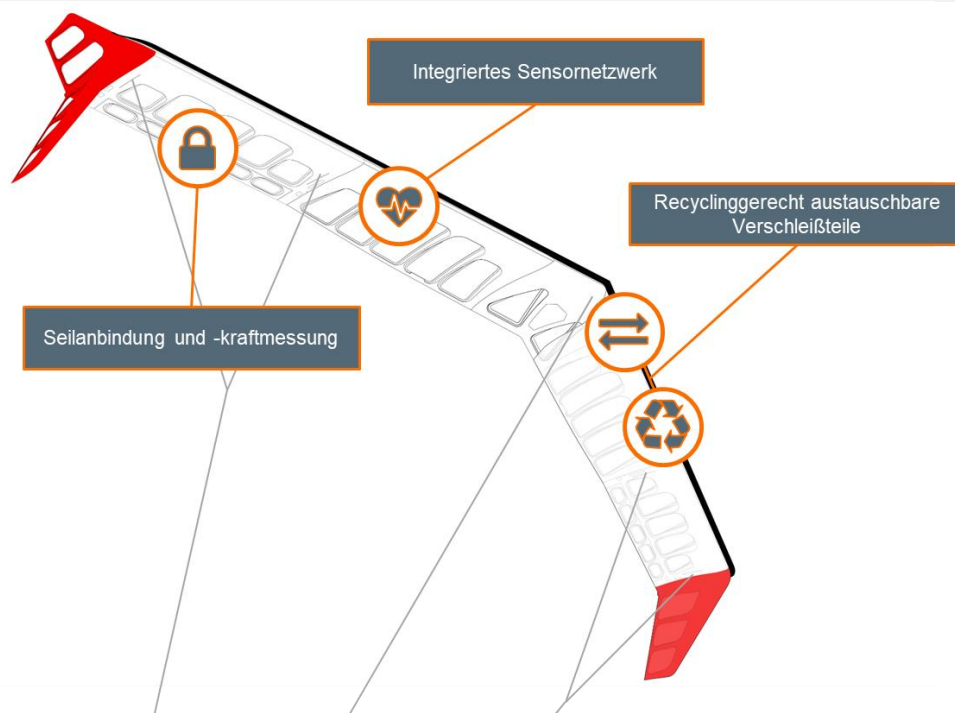
3 Flugwindkraftanlage

Ashwin Candade , Tim Fröhlich, Lars Hemme, Oliver Huxdorf,
Julian Redeker, Frank Schlegel, Tjark Sonnemann

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202507110648-0>

In diesem Kapitel werden die Projektinhalte an der Flugwindkraftanlage dargestellt. Diese beziehen sich maßgeblich auf den Kite (siehe Abschnitt 2.1). Die CFK-intensive Bauweise des Kites führt zu entsprechend hohen Umweltwirkungen in der Herstellung und einem herausfordernden Umgang mit den CFK-Strukturen am Lebensende des Kites. Aufgrund der extremen Leichtbauanforderungen ist die Anwendung von CFK als Strukturmaterial jedoch zwingend erforderlich. Auch wenn die Herausforderungen in Bezug auf Nachhaltigkeit und Zirkularität deutlich geringer sind als bei konventionellen Windkraftanlagen (vgl. Abschnitt 5.1), ist die Untersuchung von Verbesserungsmaßnahmen auch an dieser Stelle zielführend. Übergeordnetes Ziel der Arbeiten am Flügel der Flugwindkraftanlage ist die Verlängerung der Lebensdauer, sodass die CFK-Strukturen bis zum Lebensende möglichst lange Einsatzzeiten aufweisen. Der Kite steht somit für unterschiedliche Produkte aus Faserverbunden, wie bspw. in der Luft- und Raumfahrt oder auch bei Sportgeräten üblich.

In Abschnitt 3.1 findet zunächst eine Analyse des Referenzsystems der Flugwindkraftanlage statt. Die Arbeiten an der Flugwindkraftanlage im Rahmen des Projekts gliedern sich in drei Arbeitsschwerpunkte. Abschnitt 3.2 betrachtet die Möglichkeiten für eine Integration eines Sensornetzwerks in die Flügelstruktur. Abschnitt 3.3 untersucht alternative Auslegungsmöglichkeiten des Vorflügels als besonders verschleißbehaftetes Bauteil.



3.1 Systemdarstellung

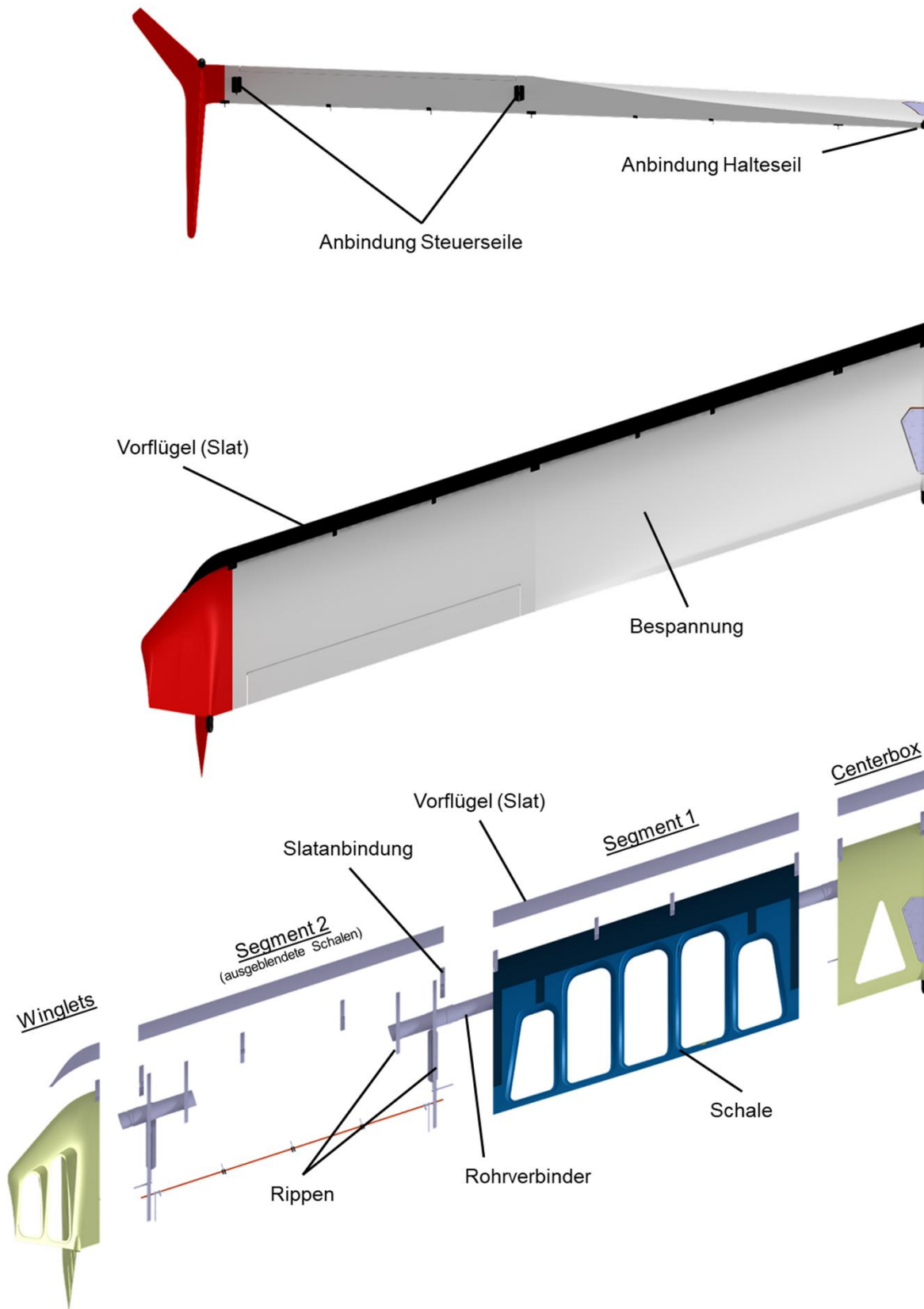


Abbildung 3.1: Aufbau des Prototypenflügels der betrachteten Flugwindkraftanlage

Der Flügel der betrachteten Flugwindkraftanlage (vgl. Abbildung 3.1) besitzt sehr strenge Anforderungen hinsichtlich Leichtbau. Diese resultieren zum einen aus einem Maximalgewicht für die grundsätzliche Nutzbarkeit. Zum anderen ist die Energieausbeute stark an das Gewicht des Flügels gekoppelt. Ein zu hohes Gewicht führt so zu einer Unwirtschaftlichkeit des Ansatzes bzw. verringert die Ausbeute an erneuerbar produzierter Energie. Zudem wirken durch die Halteseile und aerodynamische Einflüsse dynamische und komplexe Lasten auf den Flügel. Aus diesem Grund gibt es aktuell keine Alternative zum Einsatz von Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK). CFK weist jedoch grundsätzlich eine aufwändige Recyclingfähigkeit auf. Dem gegenüber steht allerdings eine gute Dauerfestigkeit und somit Langlebigkeit. Somit gilt es den CFK-Grundkörper so lange wie möglich zu verwenden und Funktionen mit einem voraussichtlich kürzeren Lebenszyklus trennbar oder in separate Module zu integrieren. Für ersteres sind passende Integrationsstrategien bzw. Funktionsumsetzungen zu wählen. Für letzteres bieten sich verschleißbehaftete Komponenten, wie der Vorflügel an, die wiederum von der CFK-Struktur trennbar sein müssen. Ähnliches gilt für die Anbindung der Halte- und Steuerseile an die CFK-Struktur. Aktuell ist die Seilanbindung über einen Schäkel an eine Erweiterung des Grundkörpers in Form einer erweiterten Rippe des Rumpfes und zwei Versteifungsstrukturen realisiert. Durch diese Form der Befestigung kann die Anbindung flexibel auf unterschiedliche Richtungen der Seillasten reagieren, deren Größe und Richtung in Bezug auf unterschiedliche Flugzustände aktuell nur abgeschätzt werden kann. Die Flexibilität der Anbindung sorgt jedoch an den Kontaktstellen zwischen Schäkel und CFK-Erweiterung zu Problemen in Form von Verschleiß und stellt deshalb eine Gefährdung des CFK-Grundkörpers dar.

Der Einfluss der Masse des Kites lässt sich als erzeugte Energie in einer bestimmten Höhe über der Windgeschwindigkeit darstellen. Abbildung 3.2 zeigt diesen Zusammenhang für unterschiedliche Flächengewichte des Kites durch unterschiedliche Kurven. Es wird ersichtlich, dass die maximale Energieerzeugung aller Kurven nahe beieinander liegen. Die Masse des Kites hat also nur einen geringen Einfluss auf die maximal erzeugbare Energie. Die Rechtsverschiebung der Kurven zeigt jedoch,

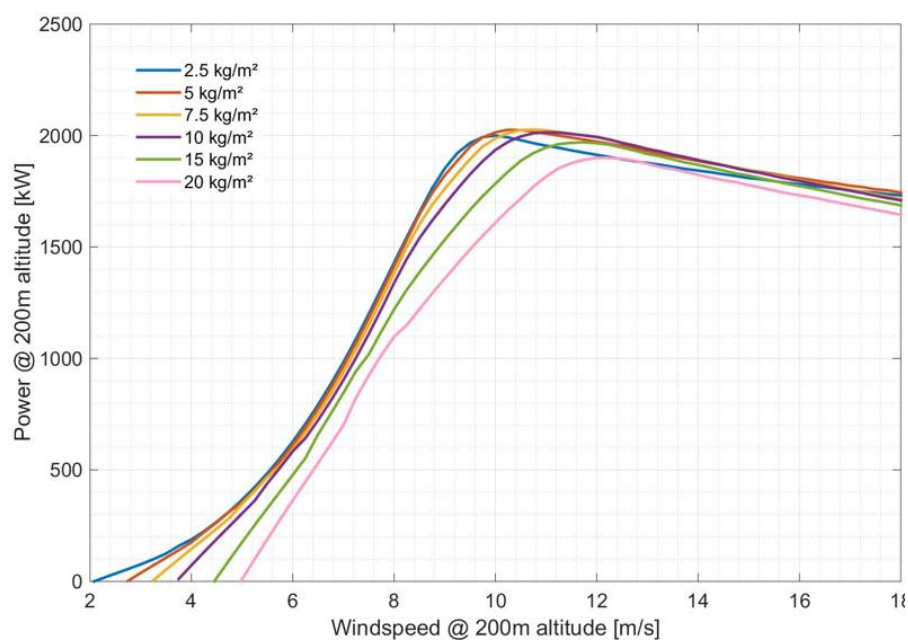


Abbildung 3.2: Abhängigkeit der Stromerzeugung über der Windgeschwindigkeit vom Flächengewicht des Flügels

dass für die Erzeugung der gleichen Energiemenge mit zunehmender Flügelmasse auch höhere Windgeschwindigkeiten notwendig sind. Dies kann einen großen Einfluss auf die über das Jahr erzeugte Energie und somit auch einer Wirtschaftlichkeit einer Flugwindkraftanlage haben.

3.2 Sensornetzwerk

Ein Themenschwerpunkt der Arbeiten an der Flugwindkraftanlage war die Erarbeitung eines speziell für den Kite und seine Anforderungen ausgelegtes Sensornetzwerk. Das Sensornetzwerk soll dabei die folgenden Funktionen erfüllen:

1. Detektion von anhaftendem Eis
2. Ermittlung der im Kite auftretenden Dehnungen im Betrieb

Flugwindkraftanlagen operieren in Höhen von mehreren hundert Metern. Ähnlich wie bei Flugzeugen und klassischen Windkraftanlagen können dabei Eisanhaftungen am Kite entstehen – abhängig von den vorherrschenden Wetterbedingungen. Neben den damit verbundenen Ertragseinbußen aufgrund des reduzierten Auftriebs durch die zusätzliche Masse des Eises und der schlechteren aerodynamischen Leistungsfähigkeit drohen herabfallende Eisstücke. Dies kann Gefährdungen für Personen oder Sachwerte in der näheren Umgebung zur Folge haben. Mit einem auf der Struktur applizierten Eisdetektionssystem ist der Vereisungszustand bereits frühzeitig detektierbar. Der Kite kann sicher gelandet werden und es besteht keine weitere Gefahr. Im Vergleich zu klassischen Windkraftanlagen ist dies ein enormer Vorteil für Flugwindkraftanlagen. Klassische Windkraftanlagen werden im vereisten Zustand in der Regel nur gestoppt. Das Eis verbleibt am Rotor und kann dennoch herabfallen.

Im Weiteren wurde ein Sensornetzwerk zur Ermittlung der im Kite auftretenden Lasten erarbeitet. Flugwindkraftanlagen sind eine innovative und vergleichsweise neue Technologie. Hinsichtlich der Funktionsweise stellt das im Projekt TechnoHyb betrachtete Konzept der Flugwindkraftanlage im Wesentlichen ein gefesseltes Flugzeug dar. Die hierfür benötigten Auslegungstools sind zum Teil vorhanden, jedoch nur rudimentär validiert. Mit dem Sensornetzwerk zur Lastermittlung sollen erstmalig die im Betrieb auftretenden strukturellen Dehnungen ermittelt werden und zur Validierung der Simulationsmodelle verwendet werden.

In den folgenden Abschnitten werden die Arbeiten zur Entwicklung der beiden Sensornetze beschrieben.

3.2.1 Belastungssituation

Die strukturellen Lastannahmen für Flugwindkraftanlagen ergeben sich aus dem Zusammenspiel aerodynamischer Kräfte, Seil- bzw. Leinenkräfte (Tether und Bridle) sowie der daraus resultierenden inneren Strukturreaktionen. Diese Annahmen bilden die Grundlage für eine präzise Spannungsanalyse, die Auslegung von Strukturkomponenten und die gezielte Platzierung von Sensorik.

Die aerodynamische Belastung wird als entlang der Spannweite verteilte Kraft aufgebracht. Sie basiert auf Ergebnissen aus numerischer Strömungssimulation (CFD) sowie ergänzenden Abschätzungsverfahren zur Ermittlung aerodynamischer Kennwerte. Diese Belastungen spiegeln den Einfluss der relativen Windgeschwindigkeit, der Flügelgeometrie sowie typischer Quersegel-Flugbahnen wider und tragen wesentlich zu Biege- und Torsionsbeanspruchungen des Flügels bei.

Zusätzlich zu den verteilten aerodynamischen Kräften erzeugen die durch das Seilsystem eingebrachten Bridle-Kräfte konzentrierte Reaktionskräfte an diskreten strukturellen Anbindungspunkten. Diese Kräfte sind in der Regel asymmetrisch und variieren mit Flugmanövern wie Kurvenflug oder Änderungen der Fluglage.

Für die strukturelle Modellierung wurden folgende zentrale Lastannahmen getroffen:

- Für jeden Zeitschritt wird ein stationäres Gleichgewicht unter pseudostatischen Bedingungen angenommen, bei dem alle Kräfte und Reaktionen aufgelöst sind.
- Die aerodynamische Last wird als entlang der Spannweite verteilte Kraft aufgebracht, basierend auf Kraftkoeffizienten, die mithilfe von CFD und ergänzenden Methoden bestimmt wurden.
- Diskrete Tether- und Bridle-Kräfte werden an den bekannten Anbindungspunkten eingebracht.
- Eine Symmetrie-Randbedingung entlang der Längsmittlebene erlaubt die Modellierung als Halbspannweitenstruktur.

Diese Annahmen wurden in einem reduzierten Strukturmodell des Flügels umgesetzt (siehe Abbildung 3.3), mit dem die kombinierten Effekte aus verteilten aerodynamischen und diskreten Seilkräften analysiert wurden. Dieses Modell diente der Definition repräsentativer Design Load Cases (DLCs), indem die relevanten Lastdomänen unter stationären Betriebsbedingungen integriert wurden. Die resultierenden DLCs bildeten die Grundlage für weiterführende detaillierte Strukturuntersuchungen, um Spannungskonzentrationen gezielt zu analysieren und die strategische Platzierung von Sensoren zur Zustandsüberwachung und Lastvalidierung im AWE-System zu unterstützen.

Zur Ermittlung geeigneter Sensorpositionen wurden Abschätzung der während des Betriebs auftretenden Beanspruchungen des Flügels auf Grundlage der zuvor dargestellten Lastannahmen

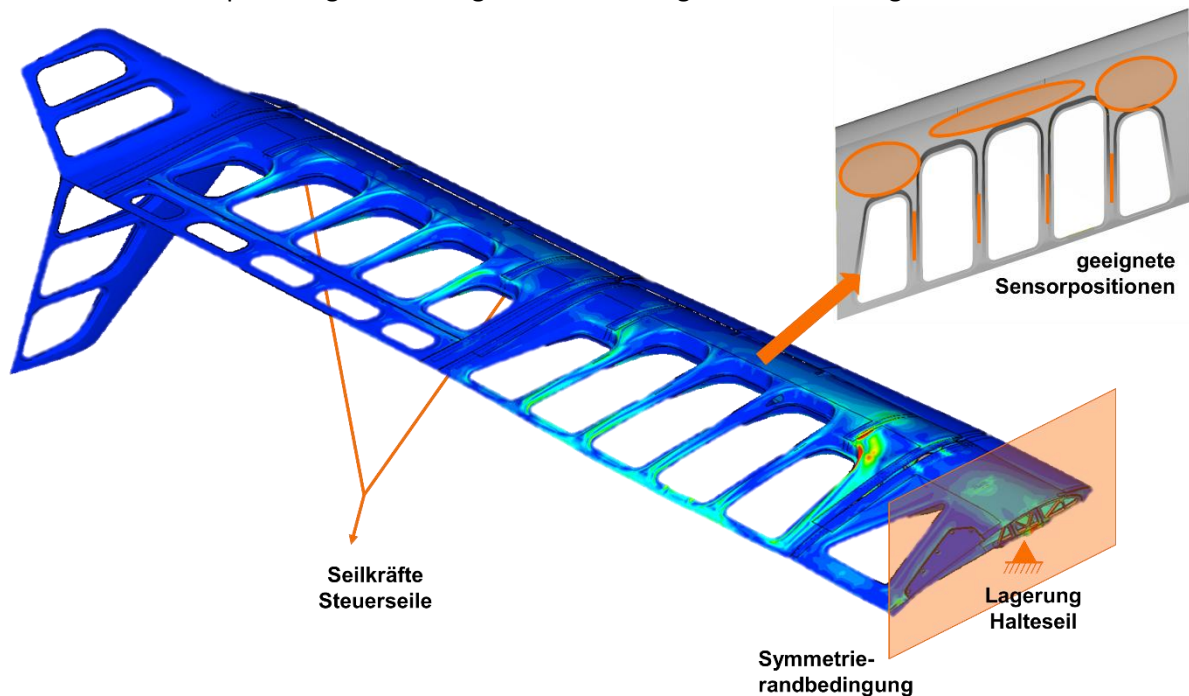


Abbildung 3.3: Simulationsmodell sowie resultierende Sensorpositionen

durchgeführt. Hierfür wurden die Lasten auf ein Halbmodell des Flügels aufgebracht (vgl. Abbildung 3.3). Der Flügel wurde dabei in der Schnittebene über eine Symmetrierandbedingung gelagert. An den Steuerseilen werden die Reaktionsseillasten aufgebracht. Damit das Modell fixiert ist, wird dieser an der Halteseilposition fixiert.

Aus den durchgeführten Simulationen wurden Stellen mit potenziell großer Dehnung ermittelt. Zusammen mit der Berücksichtigung von Eigenmoden des Flügels mittels einer Modalanalyse konnten so die erfolgversprechendsten Positionen der zu integrierenden Sensoren für das betrachtete Segment 1 ermittelt werden (siehe Abschnitt 3.2.4). Abbildung 3.3 zeigt diese Positionen durch orange markierte Bereiche.

Für Validierung der Projektergebnisse ist die Fertigung eines Segmentes der Flugwindkraftanlage geplant. Grundlage hierfür ist der durch INVENT im Projekt EnerWing (FKZ: 0324355D) gefertigte segmentierte Kite. Zur Erprobung und Validierung der Arbeiten ist im Projekt TechnoHyb die Fertigung eines weiteren Segmentes für diesen Kite geplant.

3.2.2 Segmentauswahl

In einem ersten Schritt wurde basierend auf die vorherigen Simulationsergebnisse zunächst das dafür geeignete Segment ausgewählt. In Bezug auf die auftretenden strukturellen Dehnungen kann davon ausgegangen werden, dass die höchste Belastung im Bereich der Seilanbindungen auftritt. Darüber hinaus wurde angenommen, dass die durchschnittlichen Lasten im Bereich der mittleren Seilanbindung an der Center-Wing-Box höher sind als an den Seilanbindungen der äußeren beiden Segmente. Dies konnte durch die vorhergehenden Untersuchungen bestätigt werden. Vergleiche hierzu Abbildung 3.3.

In Bezug auf die Eisanhaftung ist darauf hinzuweisen, dass im Projekt TechnoHyb keine gesonderten Eisakkretionssimulationen durchgeführt werden konnten. Aus diesem Grund wurde vereinfachend angenommen, dass die Eisbildung auf allen Segmenten gleichmäßig erfolgt. Weil sich die Bauweise der verschiedenen Segmente hinsichtlich der aerodynamischen Profilverteilung über die Spannweite nur leicht unterscheidet, kann außerdem davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse der Eisdetektionsversuche für das betrachtete Segmente qualitativ auch auf die anderen Segmente übertragen lässt.

Wesentliches Kriterium für die Segmentauswahl stellen daher die im Kite auftretenden Lasten dar. Zusammenfassend wurde daher entschieden, dass eines der inneren Segmente betrachtet werden soll. Weil im vorangegangenen EnerWing – Projekt das innere linke Segment mit einer zusätzlichen Messrippe zur Erfassung der aerodynamischen Druckverteilung ausgestattet wurde, sind für dieses Segment potenziell die meisten Erkenntnisse vorhanden. Im Projekt TechnoHyb wurde daher das innere linke Segment der Flugwindkraftanlage ausgewählt.

Das Sensornetzwerk muss zwei Funktionen erfüllen. Zum einen dient es der Eisdetektion und zum anderen der Erfassung der im Kite auftretenden Belastungen während Anlagenbetriebes. Aufgrund der beiden grundsätzlich unterschiedlichen Anforderungen wird im Folgenden zwischen beiden Netzwerktypen unterschieden. Dem Sensornetzwerk zur Eisdetektion sowie dem Netzwerk zur Ermittlung der im Betrieb auftretenden Belastungen.

3.2.3 Sensornetzwerk zur Eisdetektion

Für die Detektion möglicher Eisanhaftungen werden mehrere baugleiche piezokeramische Flächenwandler in DuraAct – Bauweise verwendet. Diese Wandler werden auf die Oberfläche des Kites

appliziert. Durch das Anlegen einer hochfrequenten Spannung von zum Teil mehreren hundert kHz an einen der Piezowandler werden Lambwellen in der Struktur angeregt. Die Lambwellen breiten sich im Segment aus und werden durch die übrigen Piezosensoren erfasst. Befinden sich auf dieser Signalstrecke Eisanhaftungen auf der Oberfläche des Kites kommt es zu einer Änderung der Welleneigenschaften. Dazu zählt insbesondere die Abnahme der Amplitude infolge einer strukturellen Dämpfung. Nach der Durchführung einer eisfreien Referenzmessung sowie der Charakterisierung der Amplitudenänderungen infolge einer Eisanhaftung kann anschließend auf mögliche Eisanhaftungen während des Flugbetriebes zurückgeschlossen werden.

Zielstellung für das Projekt TechnoHyb ist die Durchführung einer Machbarkeitsanalyse. Dazu soll das Sensornetzwerk entworfen, gefertigt und experimentell erprobt werden. Ergänzend wurde für das zu fertigende Segment ein kommerziell erhältlicher Eisdetektionssensor für klassische Windkraftanlagen verbaut und vergleichend untersucht.

a) Positionierung der Sensoren

Die Positionierung der Sensoren wurde in Zusammenarbeit mit DLR-SY in Braunschweig erarbeitet. Als Aktuatoren bzw. Sensoren werden piezokeramische Flächenwandler in DuraAct – Bauweise vom Typ P-876.SP1 verwendet. Für die Positionierung der Sensoren werden 2 verschiedene Fälle unterschieden. Zum einen sollen Untersuchungen auf der Hauptstruktur des Segmentes durchgeführt werden. Weil der Einfluss der Bespannung und der dazugehörigen Klebschicht auf die Funktionsweise des Sensornetzwerkes nicht valide abgeschätzt werden kann, werden zusätzlich Untersuchungen auf dem unbespannten Vorflügel durchgeführt.

Als Grundlage für die Positionierung der Sensoren auf der Hauptstruktur des Segmentes dienten die Profildruckverteilungen bzw. der damit verbundene Staupunkt der Strömung. Weil der Kite größtenteils in einem Anstellwinkel von 15° bis 20° fliegt, wurden diese Druckverteilungen für die Bestimmung der Positionen verwendet. Die daraus resultierenden Positionen sind in Abbildung 3.4 erkennbar. Hinweis: Im späteren Verlauf wurde diese Position aufgrund weiterer Erkenntnisse weiter zur Hinterkante des Segmentes verschoben.

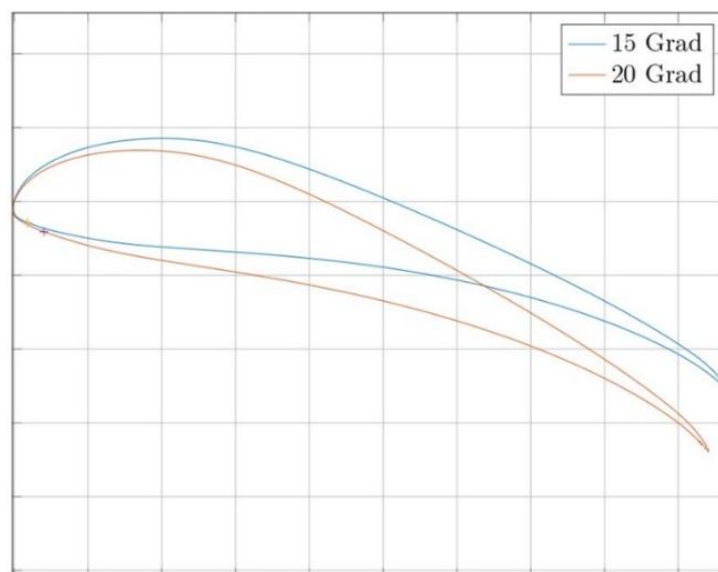


Abbildung 3.4: Betrachtetes aerodynamisches Profil zur Bestimmung der Positionen für den Eisdetektionssensor.

Hinsichtlich der Positionierung der Elemente wurde die Tatsache zugrunde gelegt, dass die Eisanlagerung initial am Staupunkt einsetzt. Beim Vorflügel, der nur aus einer einzelnen Faserverbundschicht besteht, befindet sich dieser direkt an der Vorderkante des Profils. Da diese keine Ausdehnung besitzt und damit keine Montagemöglichkeit bietet, wurden die Wandler im vorderen Bereich der Struktur auf der Innenseite mittels Vakuumaufbau angebracht und verkabelt.

b) Vorversuch mittels Vorabsegment

In der aktuell vorliegenden Bauweise wird der Kite am Ende des Fertigungsprozesses bespannt. In Kombination mit der dazugehörigen Klebschicht besitzt die Bespannung eine nicht vernachlässigbare dämpfende Wirkung auf die Ausbreitung der Lambwellen. Weil dies im Vorfeld nicht valide abgeschätzt werden konnte, wurde ein Vorversuch durchgeführt. Für diesen Vorversuch wurde das skalierte Vorabsegment aus dem Projekt EnerWing (FKZ: 0324355D) verwendet. Das Vorabsegment ist ebenfalls bespannt. Das Vorabsegment ohne applizierte Piezowandler ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Die piezokeramischen Flächenaktuatoren in DuraAct – Bauweise wurden im Rahmen des Projektes TechnoHyb appliziert. Das Vorabsegment mit applizierten Wandlern ist in Abbildung 3.6 dargestellt.



*Abbildung 3.5: Für die Vorversuche zur Positionierung der Piezowandler verwendetes Vorabsegment.
Hinweis: Das Vorabsegment wurde im Projekt EnerWing (FKZ: 0324355D) gefertigt.*

Auf dem Vorabsegment sind 5 piezokeramische Flächenwandler in DuraAct – Bauweise vom Typ P-876.SP1 appliziert. Als Aktuatoren zur Aussendung der Lambwellen wurden zwei Wandler appliziert. Zur Erhöhung der Signalleistung können diese zusätzlich parallelgeschaltet werden. Die übrigen 3 Wandler wurden als Sensoren zur Detektion der Lambwellen verwendet. Der Abstand zwischen den jeweiligen Wandlerpositionen beträgt 150 mm.

Im nächsten Schritt wurden die Voruntersuchungen ohne Vereisung durchgeführt. Zielstellung dabei war die grundlegende Charakterisierung der sich ausbreitenden Lambwellen im Segment. Darüber hinaus sollte insbesondere die Detektierbarkeit der Lambwellen bewertet werden. Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 3.7 bis Abbildung 3.9 dargestellt. Die Diagramme zeigen die mittels Sensoren detektierten Lambwellen mit den dazugehörigen Spannungen, Laufzeiten und Frequenzen. Die Anregung der Aktuatoren erfolgte mittels Sweep bis hin zu mehreren hundert kHz. Die Signalamplitude betrug dabei die in der Legende angegebene Spannung, verstärkt um den Faktor 10. Die Detektierten Lambwellen weisen sehr geringe Spannungsamplituden auf. Dies fällt

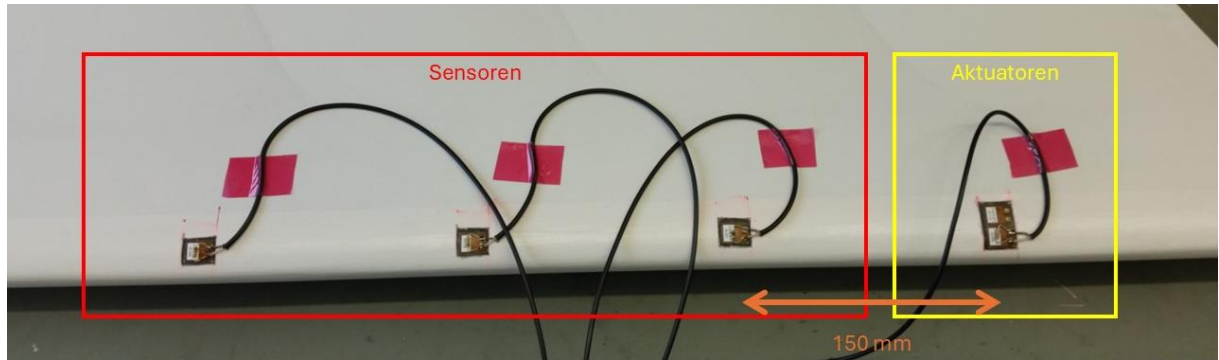


Abbildung 3.6: Auf dem Vorabsegment applizierte piezokeramischen Flächenaktuatoren für Vorversuche.

insbesondere beim Vergleich mit dem Messwert auf dem Vorflügel in Abbildung 3.11 bis Abbildung 3.13 auf. Die Ursache hierfür liegt in der Bespannung und dem damit verbundenen Klebstoffauftrag. Beide Materialien verursachen eine hohe Dämpfung, sodass die gemessenen Spannungsamplituden der Lambwellen sehr klein sind.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Eisdetektion auf Basis von Lambwellen mittels Piezosensoren auf der Hauptstruktur des Segmentes für die derzeitige Bauweise des Kites nicht zielführend ist. Im Folgenden wurden daher zusätzliche Voruntersuchungen auf dem unbespannten Vorflügel durchgeführt.

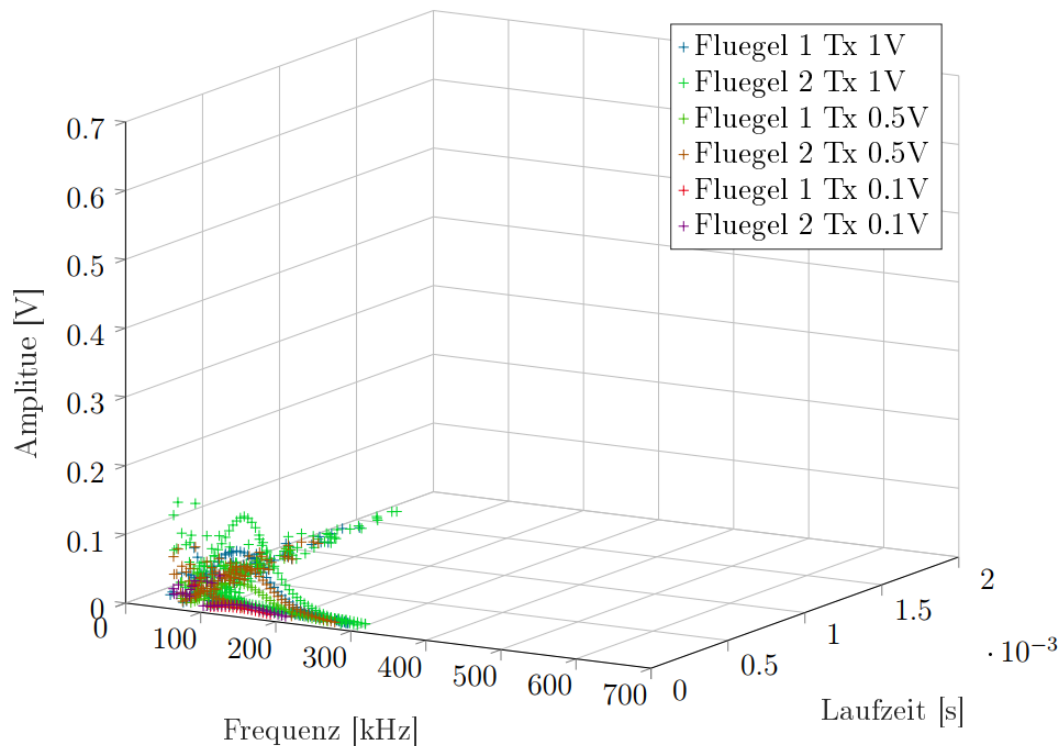


Abbildung 3.7: Ergebnisse der Lambwellenausbreitung auf dem Vorabsegment zwischen Aktuator und dem ersten Sensor. Die Laufstrecke zwischen beiden Positionen beträgt 150 mm.

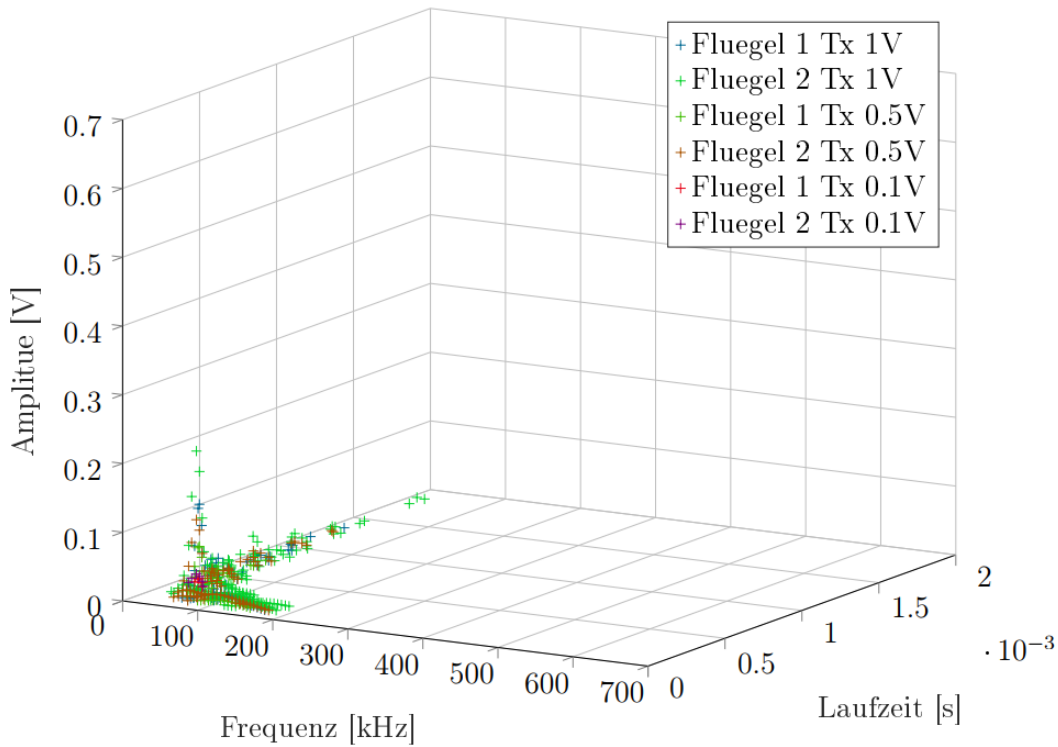


Abbildung 3.8: Ergebnisse der Lambwellenausbreitung auf dem Vorabsegment zwischen Aktuator und dem ersten Sensor. Die Laufstrecke zwischen beiden Positionen beträgt 300 mm.

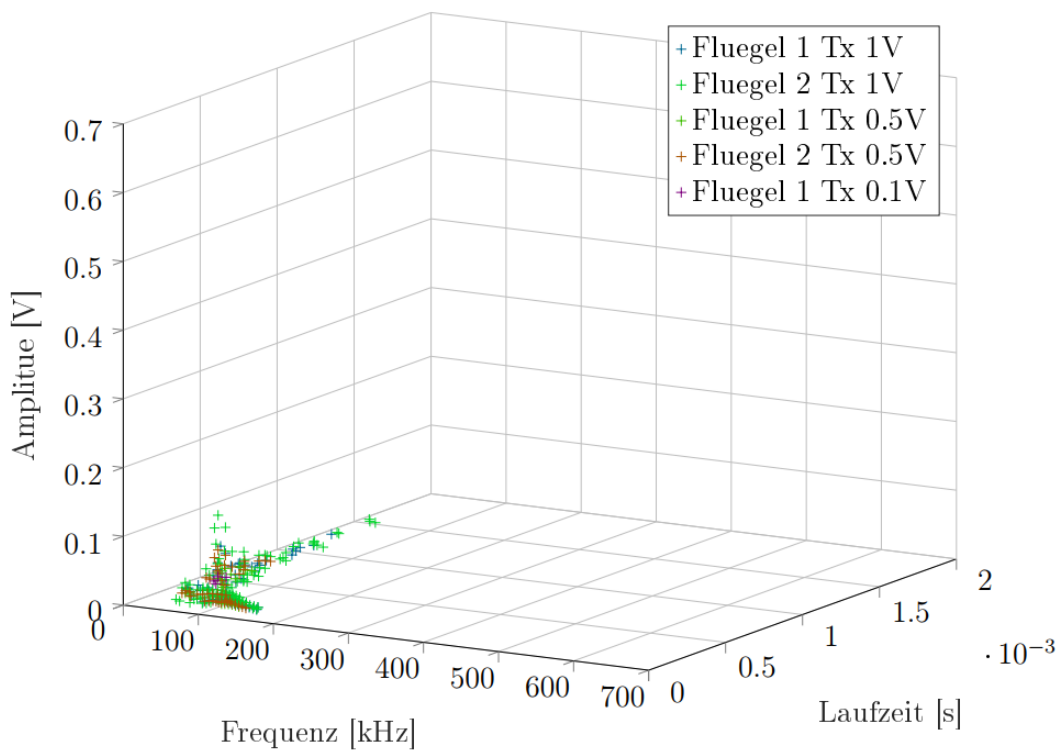


Abbildung 3.9: Ergebnisse der Lambwellenausbreitung auf dem Vorabsegment zwischen Aktuator und dem ersten Sensor. Die Laufstrecke zwischen beiden Positionen beträgt 450 mm.

c) Vorversuch mittels Vorflügel



Abbildung 3.10: Auf dem Vorflügel applizierte piezokeramischen Flächenaktuatoren für Vorversuche.

Die vorherigen Abschnitte haben gezeigt, dass eine Eisdetektion auf Basis von Lambwellen mittels Piezoelementen auf dem Vorabsegment nicht zielführend ist. Im Folgenden werden daher zusätzliche Untersuchungen auf dem unbespannten Vorflügel des Segmentes durchgeführt. Der für diese Arbeiten verwendete unskalierte Vorflügel des Kites wird als Restbestand auf dem Projekt EnerWing verwendet. Der Vorflügel ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die piezokeramischen Flächenaktuatoren in DuraAct – Bauweise wurden im Rahmen des Projektes TechnoHyb appliziert. Die Positionierung der Piezoelemente zueinander ist identisch mit dem Versuchsaufbau auf dem Vorabsegment.

Die Versuchsergebnisse zur Lambwellendetektion mittels Piezoelementen sind in Abbildung 3.11 bis Abbildung 3.13 dargestellt. Die Versuchsergebnisse aus Abbildung 3.11 können direkt mit den Versuchsergebnisse auf dem Vorabsegment in Abbildung 3.7 verglichen werden. Beide Diagramme zeigen die Ergebnisse der Signalstrecke zwischen dem Aktuator und dem ersten Sensor mit einem

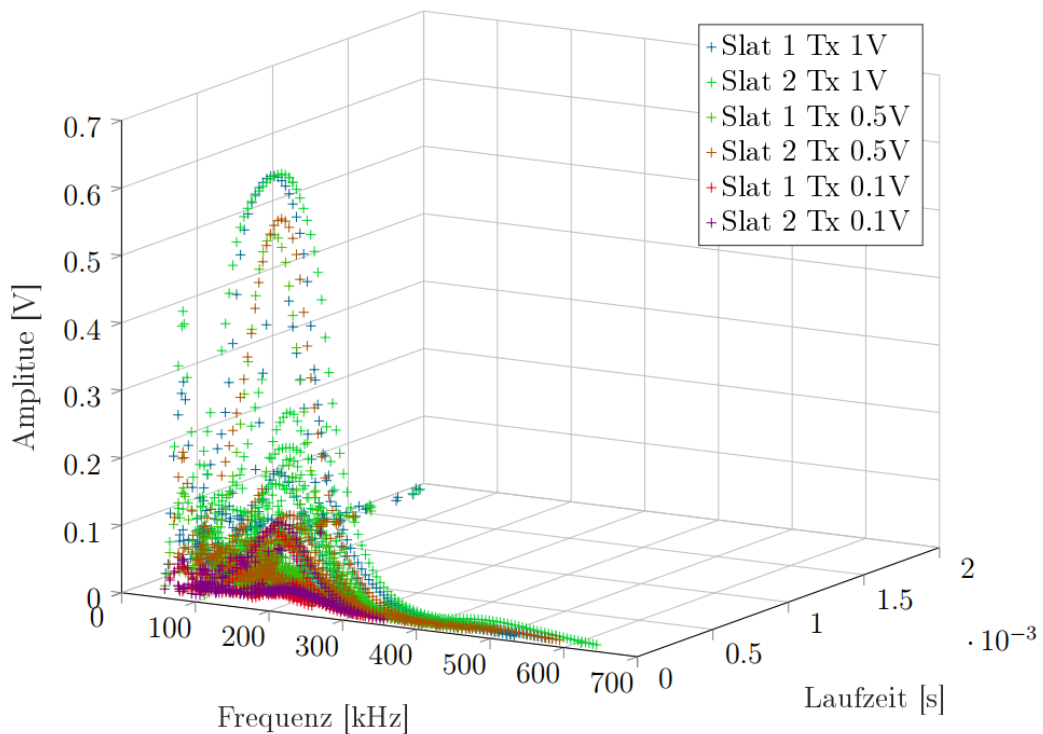


Abbildung 3.11: Ergebnisse der Lambwellenausbreitung auf dem Vorflügel zwischen Aktuator und dem ersten Sensor. Die Laufstrecke zwischen beiden Positionen beträgt 150 mm.

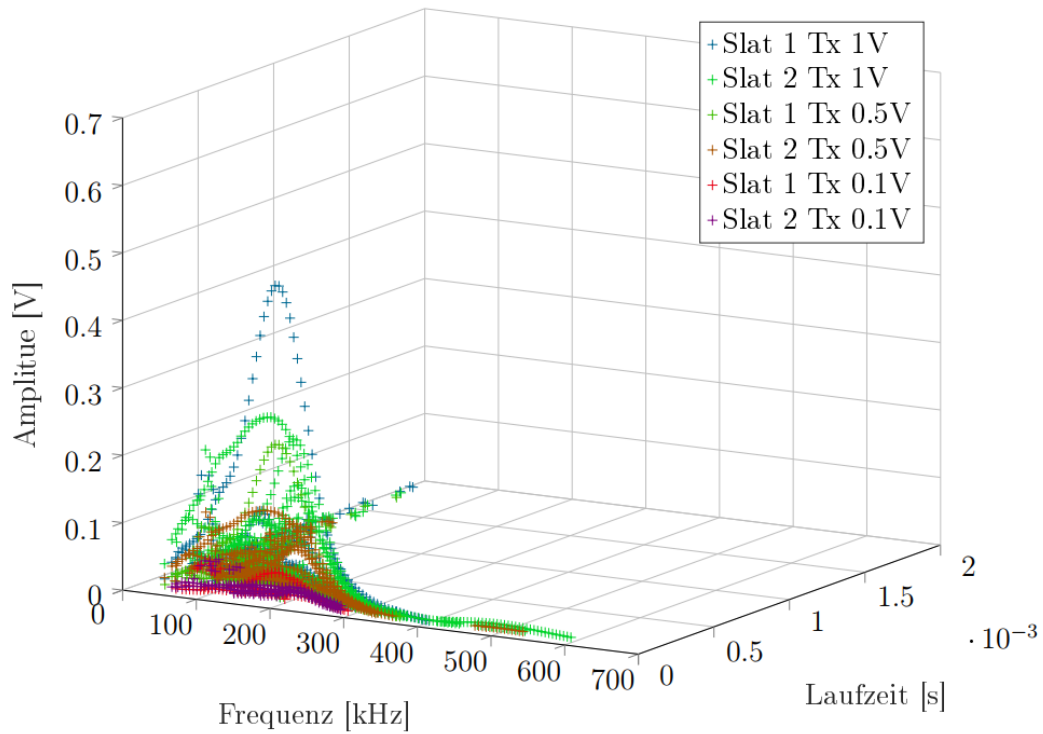


Abbildung 3.13: Ergebnisse der Lambwellenausbreitung auf dem Vorflügel zwischen Aktuator und dem zweiten Sensor. Die Laufstrecke zwischen beiden Positionen beträgt 300 mm

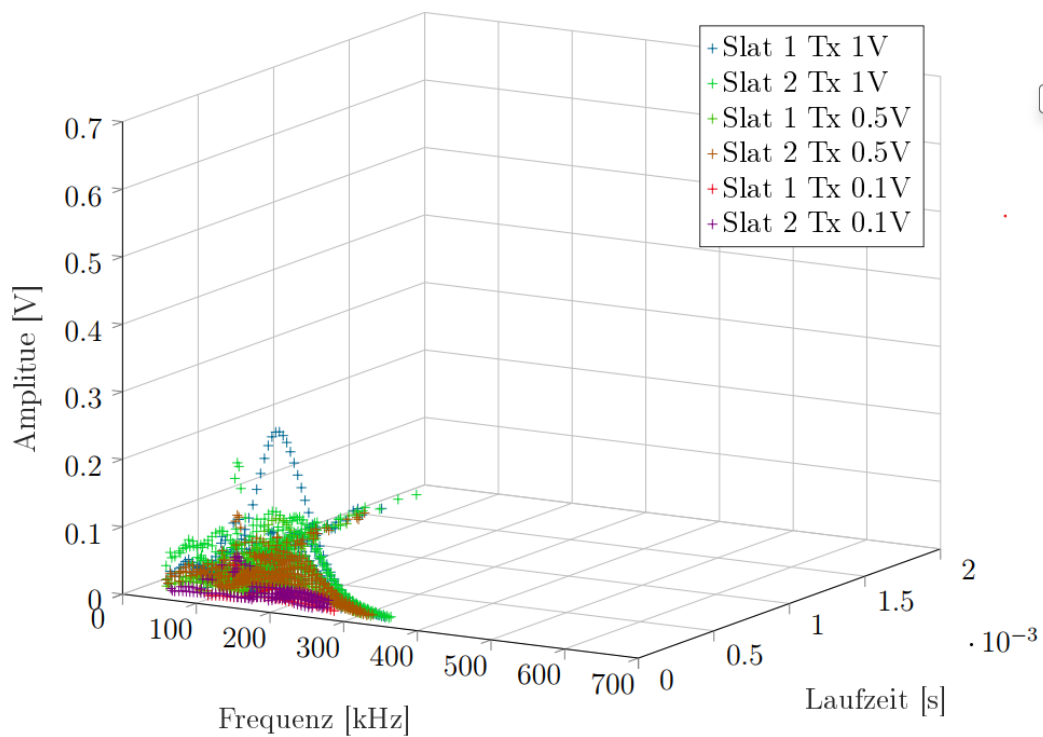


Abbildung 3.13: Ergebnisse der Lambwellenausbreitung auf dem Vorflügel zwischen Aktuator und dem dritten Sensor. Die Laufstrecke zwischen beiden Positionen beträgt 450 mm.

Abstand von 150 mm zueinander. Erkennbar ist, dass sich der optimale Frequenzbereich von ca. 100 kHz für das Vorabsegment auf ca. 150 bis 250 kHz für den Vorflügel verschiebt. Darüber hinaus nehmen die gemessenen Signalamplituden von unter 0,1 V für das Vorabsegment auf ca. 0,6 V für den Vorflügel zu (Absolutwerte sind abhängig von der Amplitude des Anregungssignales vom Aktuator).

Aus den Vorversuchen kann geschlossen werden, dass ein Eisdetektionsnetzwerk auf dem Segment selbst aufgrund der hohen Dämpfung durch die Bespannung und dem Klebstoff nicht zielführend ist. Die Vorversuche auf dem Vorflügel selbst sind vielversprechender. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird das Eisdetektionsnetzwerk daher nur für den Vorflügel weiterverfolgt.

d) Fertigung des Sensornetzwerkes

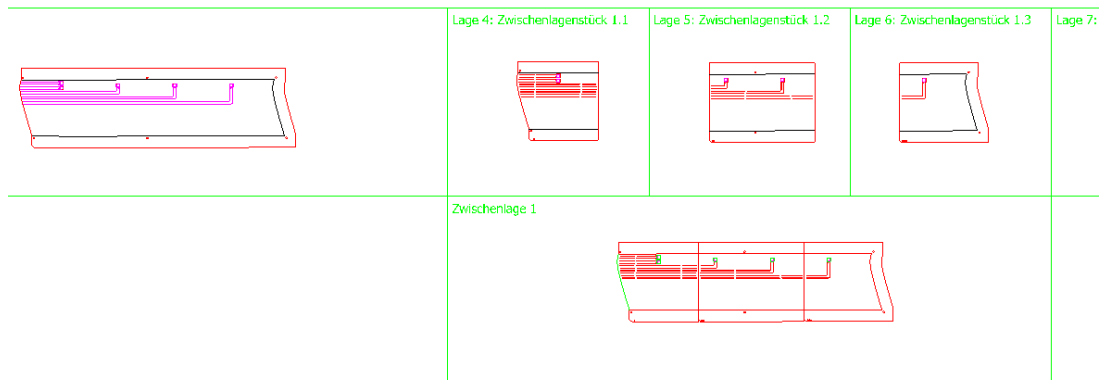


Abbildung 3.14: Layer zur Fertigung des Sensornetzwerk

Auf Basis der vorangegangenen Versuche wurden die Abstände der einzelnen Piezokeramiken zueinander, festgesetzt. Im nächsten Schritt wurde eine Abwicklung des Vorflügels erzeugt, welche als Basis für die geometrischen Abmaße des Sensornetzwerkes dient. Anschließend wurden alle für die Herstellung relevanten Layer konstruiert und die Kabel, welche in den Aufbau eingelegt wurden, auf die entsprechenden Längen konfektioniert. In Abbildung 3.14 ist ein Ausschnitt der Layerzeichnungen zusehen.

Die einzelnen Layer sowie die Einleger wie Piezokeramiken und Anschlusskabel wurden übereinander gestackt und mittels punktuellen Wärmeeintrages miteinander fixiert. Im Autoklav wurde das Stack im Injektionsverfahren ausgehärtet. Nach der Aushärtung wurde das Sensornetzwerk mittels eines CO₂ Lasers auf die finale Kontur zugeschnitten. In Abbildung 3.15 ist das fertige Sensornetzwerk dargestellt.



Abbildung 3.15: Gefertigtes Sensornetzwerk vor der Verklebung auf der Vorflügelinnenseite

Hinweis: Die Strömung zwischen Vorflügel und Hauptprofil reagiert sehr sensibel auf Kanten oder ähnliche Störungen auf der Oberflächen. Aus diesem Grund wurde das Sensornetzwerk als vollflächiger Patch konzipiert. Dies minimiert ungewollte Störungen auf der Oberfläche des Vorflügels.

Im Anschluss wurde das Sensornetzwerk auf die Innenseite des Vorflügels, wie in Abbildung 3.16 zu sehen, appliziert.

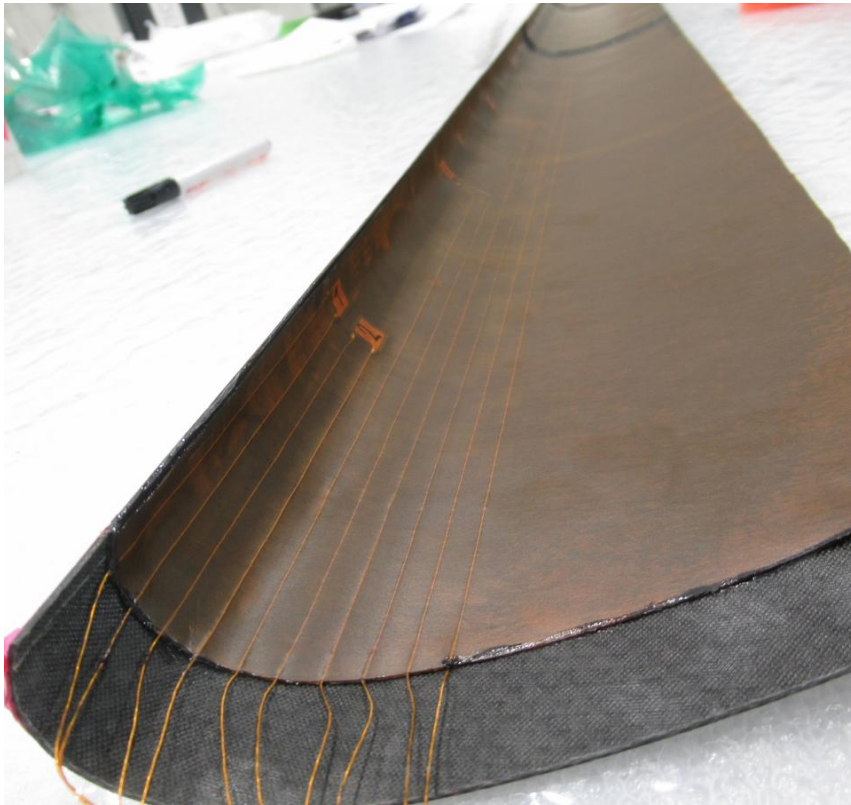


Abbildung 3.16: Auf der Innenseite des Vorflügel appliziertes Sensornetzwerk

e) Versuchsdurchführung und -auswertung

Die Untersuchungen des Sensornetzwerks wurden teilweise im Rahmen eines Unterauftrages an das DLR durchgeführt. An den von EnerKite bereitgestellten Flügel und Flügelsegmente wurden Versuche in Laborumgebung durchgeführt. Die Eisauflage ist in Abbildung 3.17 exemplarisch dargestellt. Zur Detektion kam ein piezoelektrisches Sensorsystem auf Basis von Lambwellen zum Einsatz (vgl.



Abbildung 3.17: Eisauflage auf dem Vorflügel bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Abbildung 3.18). Die Bestimmung der geeigneten Sensorpositionen erfolgte ebenfalls in enger Zusammenarbeit mit INVENT und unter Einbeziehung aerodynamischer Analysen, unterstützt durch Expertise des DLR. Zusätzlich wurde eine experimentelle Studie zur Eisdetektion durchgeführt, um die Wirksamkeit des gewählten Ansatzes zu validieren.

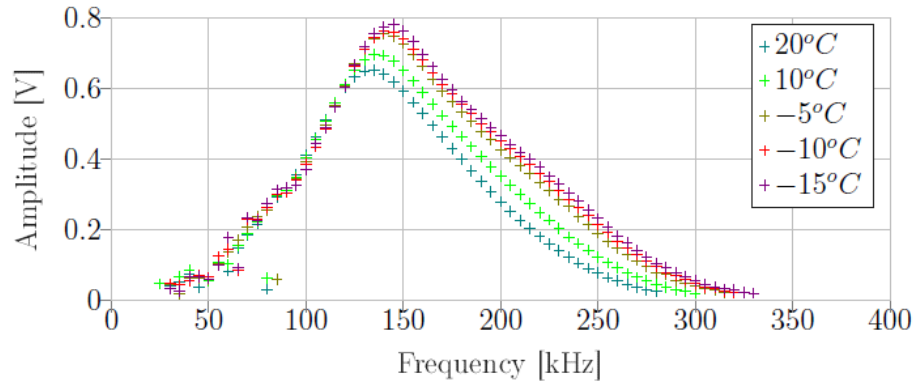


Abbildung 3.18: Einfluss der Temperatur auf die Lamb-Wellenausbreitung

Es wurde ermittelt, dass vorhandenes Eis bereits bei dem ersten oder maximal zweiten Sprühvorgang erkannt wird (vgl. Abbildung 3.19). Entsprechend der Abschätzung der Eisdicken auf Basis der Annahme eines gleichmäßigen Auftrages und der Messung der Eisdicke nach dem letzten Sprühvorgang reichen bereits ein bis zwei Zehntelmillimeter Eisdicke für die Detektion aus. Das ist vergleichbar mit Resultaten aus Eiswindkanalversuchen [1]. Bei den kontinuierlichen Messungen sind die Resultate ähnlich. Auch hier wird Eis bereits bei wenigen Zehntelmillimetern Dicke erkannt.

Zusammenfassend kann eine Eisanlagerung mittels Lambwellen zuverlässig ab bereits sehr geringer Eisdicke mit vernachlässigbarer Verzögerung detektiert werden. Durch die Empfindlichkeit im Bereich von Zehntelmillimetern Schichtdicke sind katastrophale Auswirkungen der Vereisung auf die

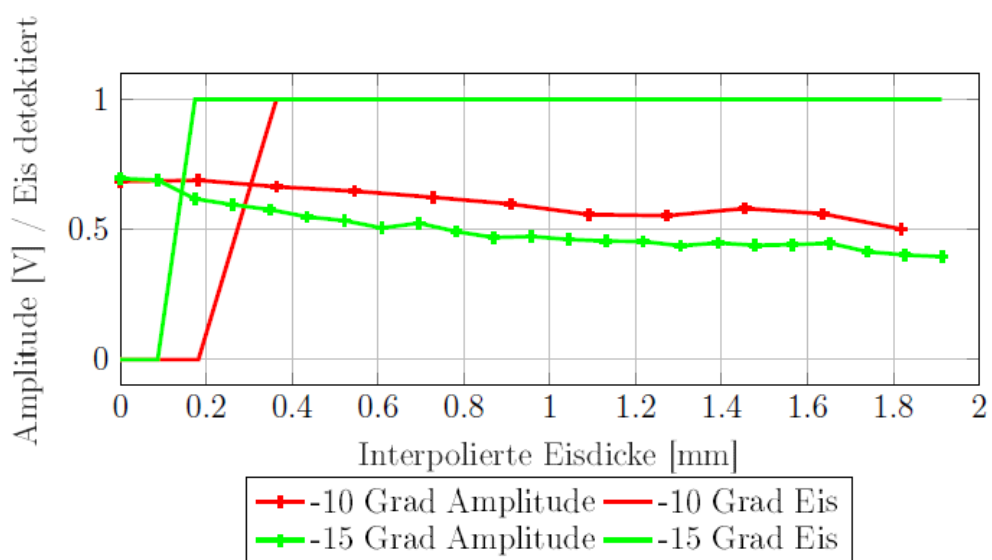


Abbildung 3.19: Amplituden und Eiserkennung mit Lamb-Wellen

Aerodynamik zum Zeitpunkt der Eisdetektion nicht zu erwarten, sodass Zeit zum Reagieren auf die Eisanlagerung bleibt.

Für die Bestimmung zusätzlicher Parameter, z. B. der Eisschichtdicke oder des Eisschichtwachstums sind noch weitergehende Untersuchungen notwendig, da Kreuzempfindlichkeiten, z. B. durch Temperaturänderungen in der Eisschicht infolge von Latentwärmefreisetzung zu inkludieren sind. Eine Temperaturmessung direkt an der Position der piezoelektrischen Elemente ist daher angebracht. Darüber hinaus sind die Eisschichtdicken im Rahmen dieser Untersuchungen nur aus der Enddicke geschätzt. Für eine exakte Modellierung des Verhaltens ist daher eine präzisere Dickenmessung notwendig.

3.2.4 Sensornetzwerk Lastermittlung

Die im Betrieb auftretenden strukturellen Belastungen werden mittels Dehnungsmessstreifen erfasst. Die Funktionsweise von Dehnungsmessstreifen kann in [2] nachgelesen werden.

a) Positionierung und Auswahl der Sensoren

Die Positionierung der Dehnungsmessstreifen erfolgte auf Basis der Simulationsergebnisse der TU-BS. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abschnitt 3.2.1 ab Seite 60 beschrieben. Zielstellung für die Positionierung war zum einen eine gleichmäßige Erfassung der Dehnungen für das gesamte Segment. Zusätzlich sollten die relevanten hochbelasteten Bereiche mit Dehnungsmessstreifen instrumentiert werden. Für die Positionierung wurden die Ergebnisse für zwei relevante Lastfälle beschrieben. Die Dehnungsverteilung der beiden Lastfälle ist in Abbildung 3.20 dargestellt.

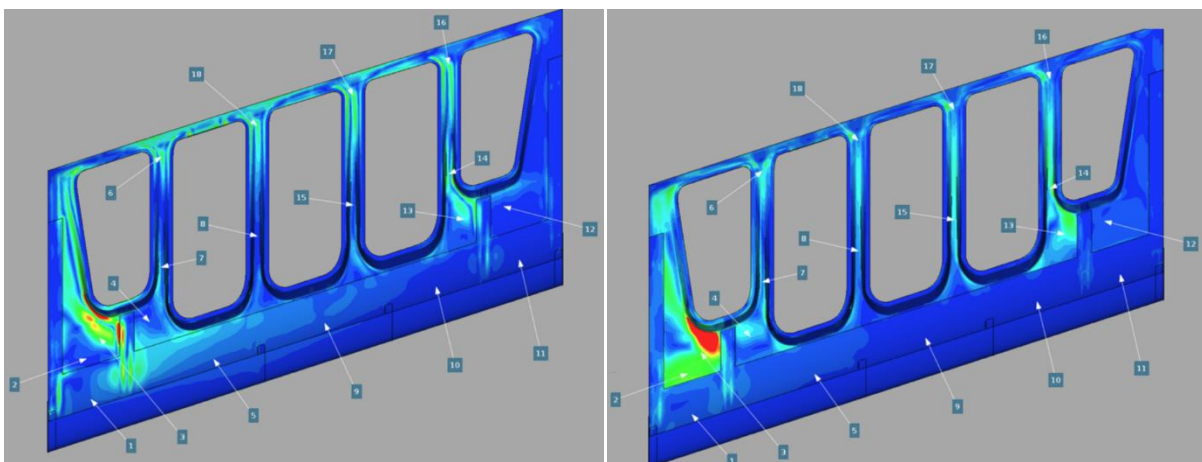


Abbildung 3.20: Positionierung der Dehnungsmessstreifen auf Basis der durch die Simulation bereitgestellten Dehnungsverteilung

Weil die Genauigkeit der Simulationsergebnisse aufgrund der komplexen Anwendung und der derzeitigen Systemreife vor dem mit DMS instrumentierten Flugversuch nicht abschließend abgeschätzt werden kann, wurde bei der Auswahl der Dehnungsmessstreifen differenziert vorgegangen: In bauraumunkritischen Bereichen wurden DMS-Rosetten verwendet. Dies ermöglicht die Messung der Dehnungen in drei verschiedenen Richtungen. Auf dieser Datenbasis können anschließend sowohl die Normal- als auch die Hauptdehnungen und Schubdehnungen innerhalb der Ebene ermittelt werden. Das Fehlerrisiko bei falscher DMS - Ausrichtung ist damit minimiert. In bauraumkritischen Bereichen wurden lineare Dehnungsmessstreifen mit einer Messrichtung verwendet.

Aufgrund Messtechnischer Einschränkungen im Kite während des Flugversuches wurde entschieden nur die Oberschale (Saugseite) des Segmentes mit Dehnungsmessstreifen zu instrumentieren. Dies sichert eine gleichmäßige Verteilung der Messpositionen auf einer Schale.

Die ausgewählten Positionen für die Dehnungsmessstreifen sind mit Nummern bzw. Pfeilen in Abbildung 3.20 gekennzeichnet. Es wurden 2 unterschiedliche Typen verwendet. An den Positionen 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12 und 13 wurden DMS – Rosetten vom Typ 1-RY16-6/120 von HBK verwendet. In den bauraumkritischen Bereichen wurden lineare DMS vom Typ 1-LY16-6/120 verwendet. Dies sind die Positionen 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17 und 18.

b) Fertigung des Sensornetzwerkes

In Vorbereitung für die Applikation der Dehnungsmessstreifen (DMS) , wurden im ersten Schritt Positionierungsschablonen erzeugt. Die Schablonen sind eine Abwicklung des zu bestückenden Segments mit Aussparungen an den jeweiligen Positionen an denen die DMS appliziert werden sollen. Die Positionen der DMS wurden im vorherigen Abschnitt definiert. Im Anschluss wurden die Schablonen auf dem Segment fixiert und die Aussparungen für die Sensoren auf die Struktur übertragen. Die Schablonen wurden nach dem Übertragen wieder entfernt, da diese für die Applikation nicht weiter relevant waren. Im nächsten Schritt wurde das Segment im Bereich der DMS - Positionen angeschliffen und gereinigt. Als nächstes wurden die DMS Sensoren sowie Lötstützpunkte an den jeweiligen Positionen appliziert. Im Anschluss wurden die Sensoren und Kabel auf die Lötstützpunkte gelötet. Die Kabel wurden in 4-Leitertechnik ausgeführt, in Richtung der angrenzenden Center Wing Box verlegt und zum Schutz vor äußeren elektromagnetischen Einflüssen mit einem Schirmungsband abgeschirmt. Im Anschluss wurden alle Sensoren mittels Widerstandsmessung auf Funktionalität geprüft.



Abbildung 3.21: Segment mit applizierten DMS Sensoren und geschirmten Kabeln. Hinweis: Die Schirmung der Kabel ist in diesem Status noch nicht vollständig ausgeführt.

c) Segmentfertigung

Im nächsten Schritt wurde das Segment für weitere Untersuchungen gefertigt. Hierfür mussten zunächst alle Einzelkomponenten gefertigt werden. Die gefertigten Einzelkomponenten können Tabelle 3.1 entnommen werden. Für weitere Details zum Fertigungsprozess selbst, sei an dieser Stelle auf den Abschlussbericht zum EnerWing – Projekt (FKZ: 0324355D) verwiesen.

Tabelle 3.1: Übersicht über die für das Projekt gefertigten Einzelkomponenten des Kites

Bezeichnung	Stk.	Materialien	Fertigungsverfahren	Bemerkungen
Segmentenhalben	2	CFK	Prepreg; Autoklav	
Rippen	4	Sandwich (Decklagen – CFK; Kern – Schaum)	Ausgefräst aus Sandwichplatte	Sandwichplatte war ein Restbestand aus dem Projekt EnerWing
Slatenbindungen	4	CFK	Prepreg; Autoklav	
Verbinderrohre	6	CFK	Ablängen von CFK - Präzisionsrohren, Verkleben, Einpassen mittels Schleifen	Direkt aus dem Projekt EnerWing übernommen.
Lagerhülsen	4	Aluminium	CNC – gesteuertes Drehen aus Aluminium	
Vorflügel	1	CFK	Infusion	Beigestellt von DLR-SY als Restbestand aus dem EnerWing - Projekt
Sensornetzwerk	3	DuraAct - Flächenwandler		DuraAct – Flächenwandler eingebettet in flächigen Patch in der Größe des Vorflügels.

Nach der Fertigung der Einzelkomponenten erfolgte anschließend der Zusammenbau des Segmentes. Die Basis hierfür bildete Zusammenbauprozess aus dem Projekt EnerWing. Der Zusammenbau erfolgte in folgenden Schritten:

1. Ausrichtung des Segmentes anhand der vorhandenen Segmente
2. Fügen der Rippen und der Lagerhülsen in der Segmentoberschale
3. Fügen der Segmentunterschale
4. Fügen der Slatenbindungen
5. Fügen des Vorflügels
6. Bespannen des Segmentes

Im Vergleich zum Projekt EnerWing mussten Anpassungen im Zusammenbauprozess durchgeführt werden. Hierzu zählen die folgende wesentlichen Aspekte:

1. Segmentaufnahmen: Im Projekt EnerWing wurden CNC – gefräste Segmentaufnahmen zur Ablage und Fixierung der Segmente im unbespannten Zustand ohne Vorflügel verwendet. Weil die an dem Segment angrenzenden Segmente bereits existieren und mit einem Vorflügel versehen sind, wurden die Segmentaufnahmen zerspanend angepasst.
2. Segmentausrichtung: Im Projekt EnerWing wurde die Pfeilung des Kites mittels Laser anstatt mit einer Lehr sichergestellt
3. Verbindungstechnik: Im Projekt EnerWing wurden die Rippen und Verbinderrohre gemeinsam auf den Segmentoberschalen gefügt, was eine passgenaue Re-Montage nach dem Transport ermöglichte. In TechnoHyb wurde das Vorgehen angepasst: Das Verbinderrohr wurde in die vorhandenen Nachbarsegmente gesteckt, die Rippenflächen vorbereitet, Klebstoff aufgetragen und die Rippen durch Schwenken aufgefädelt. Danach härtete der Klebstoff aus.

Hinweis: Die Fertigung der Sensornetzwerke für die Eisdetektion und für die Lastermittlung wurde zur Herstellung des Segmentes selbst mit eingetaktet. Die Fertigung der beiden Sensornetzwerke wird jedoch in den Abschnitten d) auf Seite 69 und b) auf Seite 73 beschrieben.

d) Versuchsdurchführung und -auswertung

Die vorgesehenen Flugtests mit Demonstrator-Flügeln mit integrierter Sensorik konnten im Projektzeitraum nicht mehr durchgeführt werden. Verzögerungen in den Lieferketten führten zu einer verspäteten Fertigstellung der neuen Bodenstation (II. Quartal 2025 realisiert), deren Entwicklung und Aufbau jedoch nicht im unmittelbaren Leistungsumfang dieses Projekts lagen. Ein Betrieb des neuen Flügelsegments an der alten Bodenstation wurde aus technischer Sicht als zu risikoreich eingestuft. Zudem verzögerte sich auch die Fertigung des Flügelsegments gegenüber dem ursprünglichen Zeitplan. Die Flugtests werden unmittelbar nach der Inbetriebnahme der neuen Bodenstation erfolgen.

3.2.5 Auswirkungen Eissensors auf die Umweltwirkungen und Recyclingfähigkeit

Die von der Firma INVENT eingebrachte Sensorik umfasst folgende Komponenten:

- Eissensor,
- Heißkleber,
- Kabel,
- DMS,
- Lötzinn,
- Piezokeramik,
- Vlies,
- Elektrodenvlies,
- Kaptonfolie,
- Harz.

Der Anteil am Segment 01 links (gesamt 5,2 kg) beträgt 0,8 kg. In der folgenden Abbildung (Dominanzanalyse Materialbereitstellung Segment 01 links) sieht man, dass der Eissensor einen gravierenden Einfluss in den Kategorien Ozonabbaupotenzial und abiotischer Ressourcenverbrauch

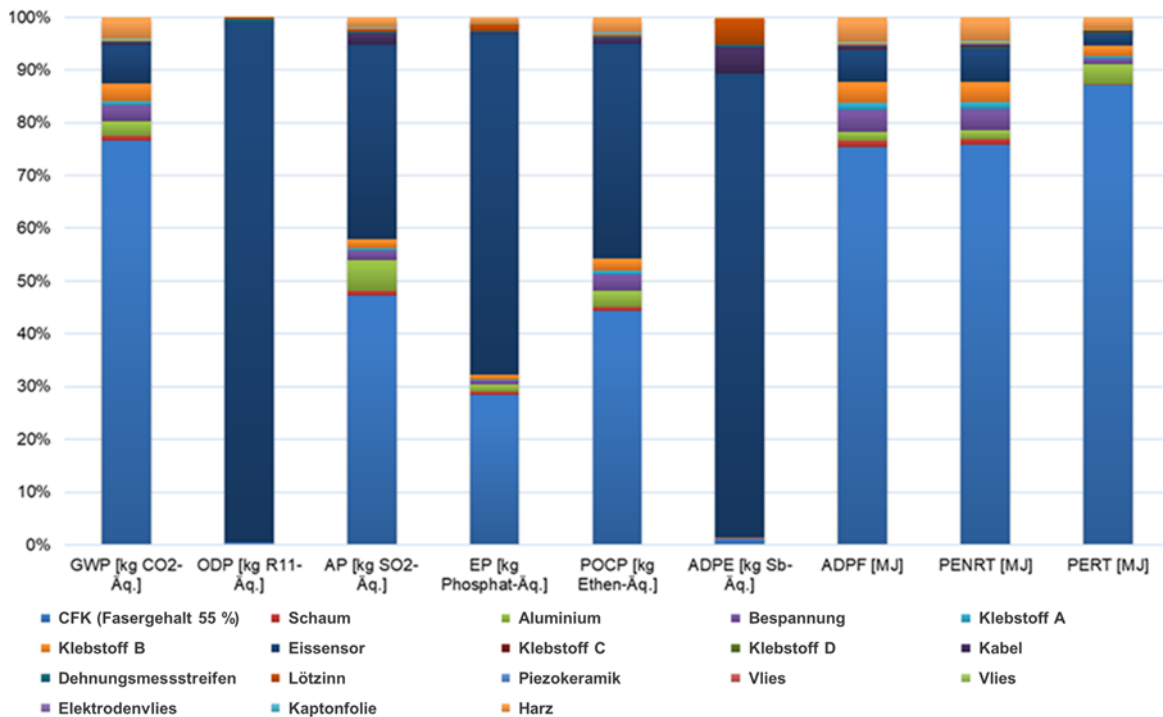


Abbildung 3.22: Dominanzanalyse Materialbereitstellung Segment 01 links

hat. Einen großen Einfluss besitzt der Eissensor auch in den Kategorien Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial sowie dem photochemischen Oxidantienbildungspotenzial.

In den übrigen Wirkungskategorien haben die Komponenten einen marginalen Einfluss. Besonders im GWP ist der Einfluss, der oben gelisteten Komponenten, bei 5 % der Umweltwirkung.

Die Komponenten sind zum Teil im Inneren der Struktur verbaut, somit ist eine Demontage der Komponenten sehr aufwendig und somit wenig zielführend. Einzig der Eissensor wäre unter einem vertretbaren Aufwand vor der Verwertung demontierbar. Er ist an der äußeren Struktur mit geklebt und an den Kanten mit Sekundenkleber gesichert. Die Demontage ist möglich. Nach derzeitigem Stand, aus Sicht des Konsortiums, ist der Eissensor mit vertretbarem Aufwand wiederverwendbar.

3.3 Austauschbare Verschleißteile

Die Auslegung des Flügels der Flugwindkraftanlage unterliegt vielen zum Teil gegenläufigen Anforderungen. Für eine möglichst große Effizienz sind diese in einer ultraleichten CFK-Bauweise auszuführen. Weil die Herstellung der Strukturen vergleichsweise energieintensiv mit einem entsprechend negativen ökologischen Fußabdruck ist, sind diese jedoch für eine möglichst lange Lebensdauer und damit entsprechend robust und dick auszulegen. Die Einsatzumgebung mit erhöhtem Verschleiß durch Niederschläge und Partikel in der Luft erfordert ebenfalls ein robustes Design. Zur Lösung dieses Problems ist der Einsatz gezielt trennbarer verschleißbehafteter Komponenten mittels lösbarer Klebverbindungen denkbar. Damit kann der gesamte Kite in einer ultraleichten Bauweise umgesetzt werden. Verschleißbehaftete Komponenten wie Vorflügel können hingegen einfach und sortenrein ausgetauscht werden. Dieser Ansatz stellt einen essentiellen Beitrag zur Circular Economy von Flugwindkraftanlagen dar und wird daher in diesem Arbeitspaket untersucht.

Darüber hinaus sind die betrachteten Bereiche für die weitere Konzeption des Flügels von zentraler Bedeutung, da für einen Serieneinsatz möglicherweise weitere Funktionen, wie beispielsweise eine

Enteisung, notwendig sind. Aus diesen Gründen bedarf es einer Modularisierung der Komponenten unter Berücksichtigung der auftretenden Belastungen sowie weiterer Anforderungen, wie Bauraum und Gewicht. Basierend auf einem vereinfachten Ersatzmodell werden Untersuchungen hinsichtlich der mechanischen Belastungen auf den Vorflügel durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden die Grundlage für die Erarbeitung alternativer Vorflügelkonzepte. Hierbei werden sowohl der Einsatz alternativer Materialien als auch alternative Formgebungen zur aktuellen CFK-Schale zur Verringerung des Umwelteinflusses untersucht. In diesem Zuge werden unterschiedliche Grundkonzepte des Vorflügels analysiert. Beispielsweise kann der Vorflügel mit geringem Materialeinsatz, aber häufigerem Austauschbedarf oder verschleißfester, mit längerer Haltbarkeit ausgeführt werden. Zudem wird die Vereinbarkeit der Konzepte mit Umsetzungsmöglichkeiten für weitere zu integrierende Funktionen (bspw. Enteisung) und lösbaren Anbindungskonzepte untersucht. Dabei werden mit einer lösbaren Klebverbindung sowie einer alternativen Schnellverschlusslösung zwei unterschiedliche Anbindungskonzepte untersucht. Der Schnellverschluss ist für einen häufigeren Austausch eines schneller verschleißenden Vorflügels geeignet (Austausch im Feld), während sich die lösbare Klebverbindung für Vorflügel mit einer längeren Haltbarkeit eignet (aufwändige Prozesse zum Lösen der Verbindung sowie notwendige Nacharbeiten). Das Klebstoffsystem wird an die auftretenden Temperaturen angepasst und anschließend anhand von Probekörpern validiert. Die erfolgversprechenden Gesamtkonzepte werden nach einer ersten Bewertung ausgearbeitet und hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen ausgelegt. Auf Grundlage einer weiteren Bewertung wird ein Vorzugskonzept identifiziert und unter Berücksichtigung des Fertigungsverfahrens samt Anbindung fertigungsgerecht konstruktiv umgesetzt.

3.3.1 Systemanalyse Vorflügel und Vorflügelanbindung

Der Vorflügel ist an der Flügelvorderkante des Kites montiert und besitzt eine Art C-Form. Der Vorflügel ist nicht über den gesamten Flügel durchgängig, sondern entsprechend der Segmente des Flügels unterteilt (vgl. Abbildung 3.1). Abbildung 3.24 (oben) zeigt die Formgebung und Position am Beispiel von Segment 1 des Flügels. Es ist zu erkennen, dass Segment 1 eine Torsion vollführt und das Segment selbst sowie auch der Vorflügel des Segments entlang des Flügels keinen konstanten Querschnitt aufweist. Die weiteren Vorflügel verfügen hingegen über einen konstanten Querschnitt. Abbildung 3.24 (mittig) zeigt die Rückseite eines Vorflügelsegments zusammen mit den dazugehörigen Anbindungen. Diese sind aktuell fest mit dem Vorderflügel und der Flügelvorderkante verklebt. Der Vorflügel und die Anbindungen bestehen jeweils aus CFK (Duromermatrix) mit einer Wandstärke von 1 mm.

Insgesamt verfügt der aktuelle Prototyp des Flügels über acht Vorflügelsegmente mit insgesamt 22 Anbindungen (vgl. Abbildung 3.24, unten). Diese besitzen aufgrund der sich verändernden Flügelgeometrien und Orientierungen maßgeblich individuelle Formgebungen.

3.3.2 Anforderungen und Randbedingungen

Vor der Erarbeitung alternativer Konzepte sind die Anforderungen und Randbedingungen bzgl. des Einsatzes im aktuellen Prototypenflügel zu untersuchen. Insbesondere hinsichtlich der geometrischen Randbedingungen ergeben sich Restriktionen hinsichtlich der Gestaltung neuer Vorflügelkonzepte (vgl. Abbildung 3.24). Aufgrund der aerodynamischen Eigenschaften darf die Außenkontur des Vorflügels nicht verändert werden. Dies bezieht sich auf die Formgebung sowie Veränderungen der Oberfläche bspw. durch Strukturierung oder Sickenbilder. Darüber hinaus spielt auch der Luftstrom zwischen Flügel und Vorflügel eine wichtige Rolle. So muss der Vorflügel am unteren Ende weiterhin eine scharfe Kante aufweisen. Darüber bildet sich ein Totwasserbereich, der größere Freiheiten bzgl. geometrischer

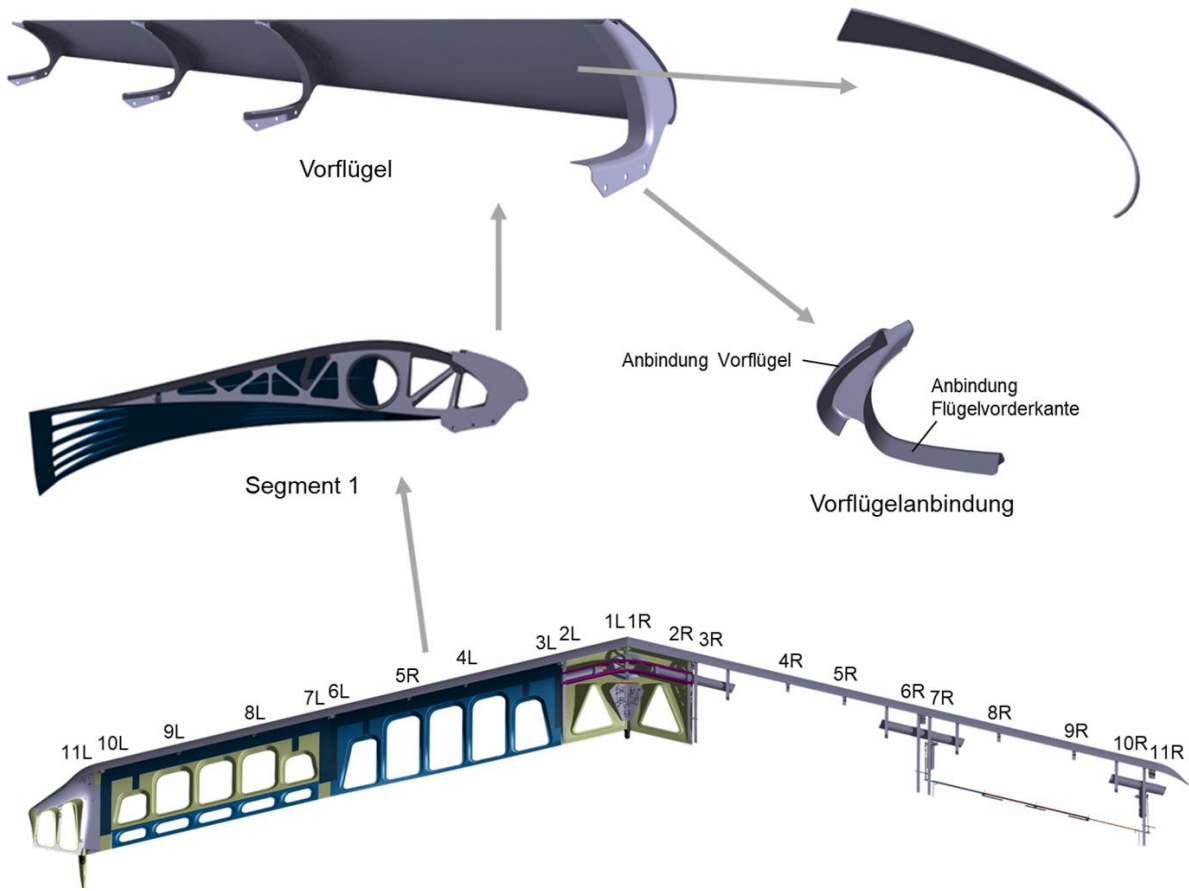


Abbildung 3.24: Darstellung der Vorflügel samt Anbindung an den Flügel

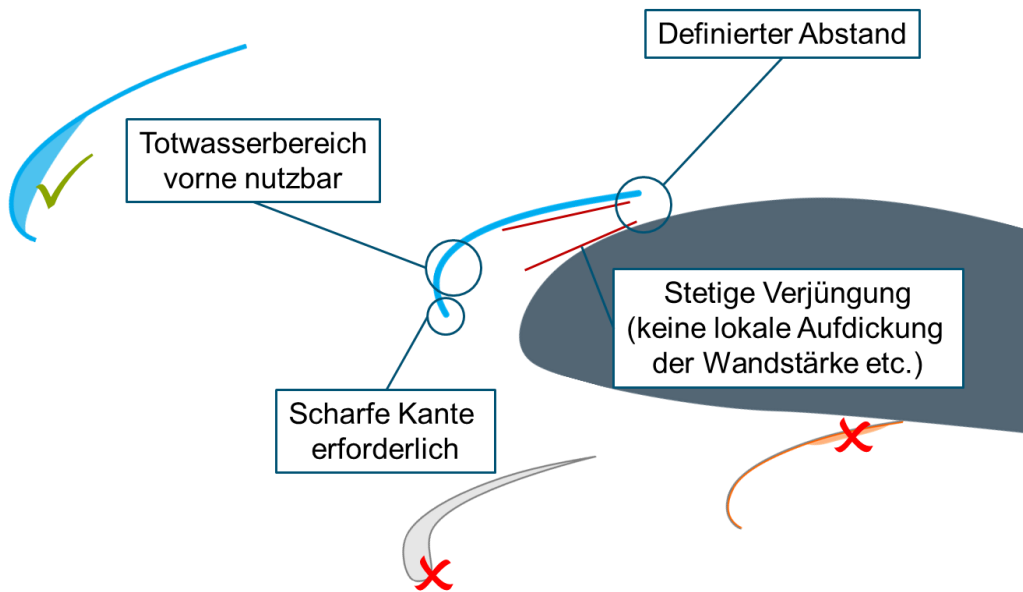


Abbildung 3.24: Randbedingungen und Restriktionen

Änderungen erlaubt. Der Auslass des Luftstroms an der oberen Seite besitzt einen definierten Abstand, welcher nur in geringem Maße, bspw. durch Wandstärkenerhöhung, verändert werden darf. Der Bereich davor muss eine stetige Verjüngung aufweisen. Diese darf nicht durch bspw. lokale Aufdickungen unterbrochen werden.

Neben umwelttechnischen und wirtschaftlichen Kriterien spielen im Rahmen der Untersuchungen insbesondere mechanische Kriterien eine zentrale Rolle. Diese sind:

- **Steifigkeit:** Verformung aufgrund von aerodynamischen Kräften
- **Festigkeit:** Beständigkeit gegenüber Betriebslasten
- **Betriebsfestigkeit:** Beständigkeit über Lebenszeit des Flügels
- **Abrasionsbeständigkeit:** geringer Verschleiß durch Luft, Sand, Regen etc.
- **Schlagzähigkeit:** Beständigkeit gegenüber Schlägen, wie Hagel
- **Temperaturbeständigkeit:** Formbeständigkeit bei Wärmeeinwirkung

Aufgrund des aktuellen Prototypenstadiums der Flugwindkraftanlage fehlen gesicherte Daten aus längeren Einsatzzeiten, sodass für einige dieser Kriterien Annahmen getroffen werden oder überschlägige Auslegungen vorgenommen werden mussten. So fehlen für die Betriebsfestigkeit genaue Lastspielzahlen und -amplituden, speziell für potenzielle Austauschteile, wie den Vorflügel. Die Abrasion bzw. Erosion am Vorflügel hängt sehr stark vom Betriebsort ab. Auch hier fehlen Langzeiterfahrungen. Die Schlagzähigkeit gilt in diesem Zusammenhang nicht als normale Betriebslast, sondern stellt eher einen Missbrauchslastfall dar und ist somit sehr schwer abzuschätzen. Für die Temperaturbeständigkeit lassen sich unterschiedliche Wärmeformbeständigkeiten, wie die Heat Deflection Temperature (HDT) anwenden. Dabei werden unterschiedliche Spannungen auf die Struktur angewendet, sodass belastungsabhängige Wärmeformbeständigkeiten angegeben werden können. Aufgrund der permanenten Umströmung des Flügels während des Betriebs ist hier auch bei starker Sonneneinstrahlung nicht mit hohen Temperaturen zu rechnen. Diese treten vielmehr in Parkposition am Boden oder während des Transports auf. Da in diesen Situationen keine hohen Kräfte auftreten, bestehen keine besonders hohen Anforderungen an die Wärmeformgeständigkeit. Steifigkeiten und Festigkeiten lassen sich hingegen unter Anwendung von Druckverteilungen aus CFD Simulationen hinreichend gut abschätzen. Zwar handelt es sich in diesem Fall nur um unveränderliche Lasten an bestimmten Betriebspunkten, für die im Rahmen dieses Projekts gesteckten Ziele ist dies jedoch ausreichend.

Zur Simulation der Lasten wurde ein Ersatzmodell des Vorflügels aufgebaut, das in Abbildung 3.25 (oben) dargestellt ist. Dabei handelt es sich um einen extrudierten Querschnitt des Vorflügels. Dieser ist an den Enden und in der Mitte fest eingespannt. Somit besteht das Ersatzmodell aus zwei Abschnitten, die in ihrer Länge jeweils in etwa dem Abstand zwischen zwei Vorflügelanbindungen entsprechen. So bildet das Modell die geometrischen Randbedingungen des Referenzvorflügels ab und es lassen sich zwei Ansätze direkt miteinander vergleichen.

Zur Berechnung der aerodynamischen Lasten wurden die berechneten Druckverteilungen per Mapping auf den Flügel übertragen. Abbildung 3.25 (unten) zeigt das Ergebnis der Simulation der Referenzkonfiguration (CFK, 1 mm) als Draufsicht auf den Flügel in Form der Verschiebung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die höchsten Verformungen am oberen Ende des Vorflügels in der Mitte zwischen zwei Anbindungen auftreten. Dies deckt sich mit den Erwartungen. Die Verformung liegt bei dem betrachteten Lastfall bei rund 1,13 mm. Dieser Verschiebungswert erscheint zunächst nicht sehr hoch. Aufgrund des geringen Abstands an dieser Stelle von 16,6 mm bei dem betrachteten

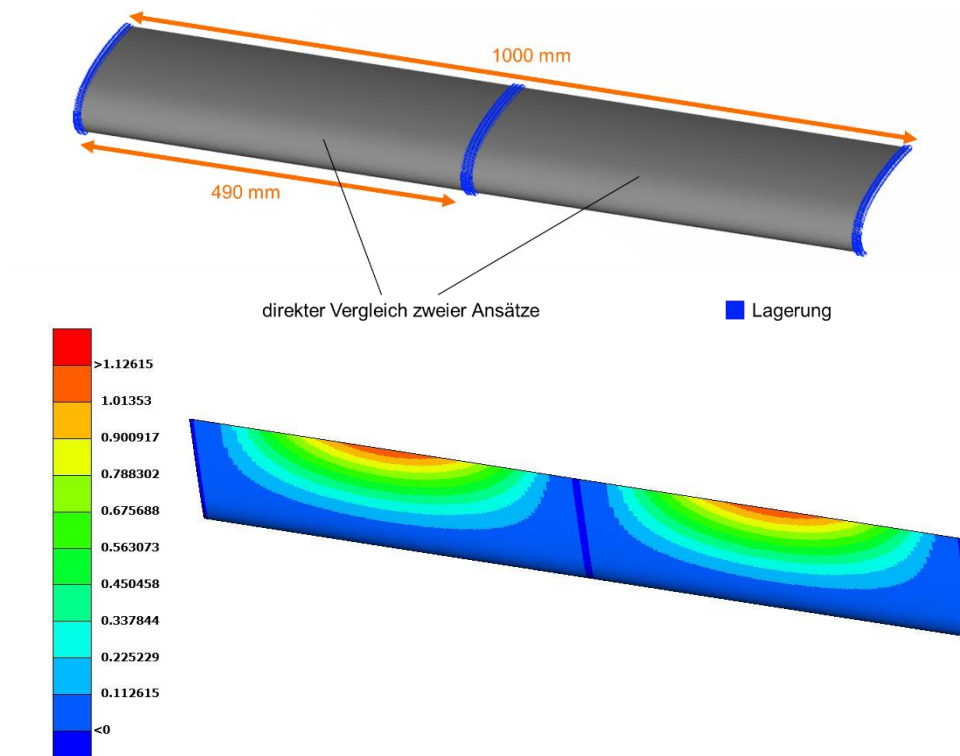


Abbildung 3.25: Modell des Vorflügels für die numerische Simulation und Ergebnis der Verformung

Prototypenflügel und den hohen Anforderungen an die Konstanz des Abstandes kann keine Verschlechterung der Verformung zugelassen werden.

Ergebnisse nicht nur in Bezug auf diese Konfiguration, sondern auch allgemein oder für Größenstufen des Kites; deshalb werden auch Materialkonfigurationen untersucht, die in dieser Form nicht praktikabel sind, jedoch bei größeren Kites und entsprechend insgesamt höheren Wandstärken funktionieren.

3.3.3 Alternative Materialkonzepte

Aufgrund der hohen Anforderungen an die spezifische Steifigkeit sowie den sehr guten Eigenschaften von CFK in diesen Bereichen, ist die Auswahl geeigneter Materialien für eine Substitution entscheidend. Dabei spielen die Verlängerung der Lebensdauer durch eine verbesserte Abrasions-/Erosionsbeständigkeit und die Verbesserung der Recyclingfähigkeit eine entscheidende Rolle. Bei diesen Punkten schneidet CFK im Allgemeinen nicht gut ab. Bei Verbesserungen der letzten beiden Eigenschaften ist unter Umständen auch eine Erhöhung der Masse möglich. Da die meisten Materialien über eine zum Teil deutlich niedrigere spezifische Biege- und Beulsteifigkeit aufweisen als CFK, werden an dieser Stelle Materialien bzw. Materialverbunde untersucht, deren Eigenschaften sich durch bestimmte Maßnahmen verbessern lassen. Dabei werden folgende Grundansätze untersucht:

- Erhöhung der Steifigkeit durch Änderungen des Materialaufbaus
- Erhöhung der Steifigkeit durch geometrische Maßnahmen
- Erhöhung der Lebensdauer durch äußeren/zusätzlichen Schutz
- Erhöhung der Lebensdauer durch inneren Schutz

Bei der Änderung des Materialaufbaus wurde zunächst eine reine Materialsubstitution untersucht. Aufgrund der guten spezifischen mechanischen Eigenschaften von CFK erreicht keines der

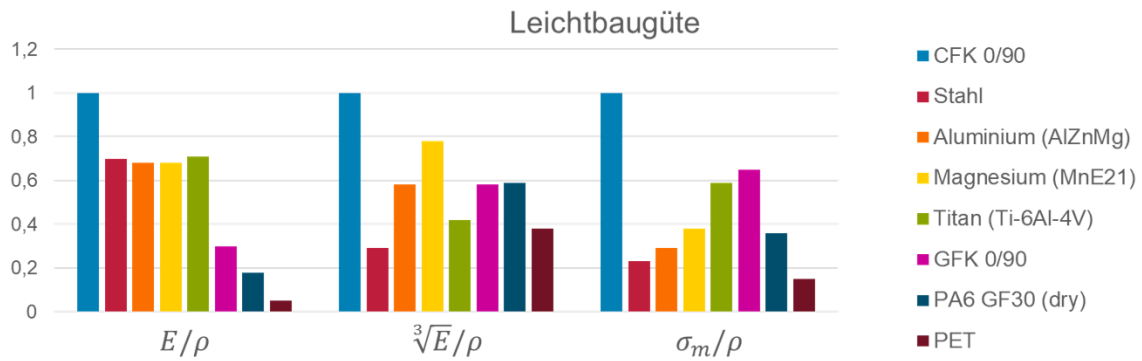


Abbildung 3.26: Vergleich der Leichtbaugüte exemplarischer Materialien im Vergleich zu CFK

untersuchten Materialien die mechanischen Eigenschaften von CFK bei gleichem Gewicht. Abbildung 3.26 stellt die spezifischen mechanischen Eigenschaften exemplarischer Materialien im Vergleich zu CFK für Zugsteifigkeit, Biegesteifigkeit und Zugfestigkeit in Form der Leichtbaugüte dar. Die Ergebnisse sind dabei auf die jeweiligen Werte von CFK normiert.

Durch die geringeren mechanischen Eigenschaften alternativer Materialien sind zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der Steifigkeit notwendig. Die Membransteifigkeit ist linear vom E-Modul sowie der Dichte des Materials abhängig. Eine Erhöhung des E-Moduls ist bspw. durch Mischung verschiedener Materialien oder die Additivierung von Kunststoffen möglich. Allerdings erhöht sich so häufig auch die Dichte der resultierenden Werkstoffverbunde bzw. Verbundwerkstoffe. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen liegt in der sogenannten Eigenverstärkung. Dabei sind Kunststofffasern in eine Matrix aus dem gleichen Kunststoff eingebettet. Durch die starke Streckung bzw. Orientierung der Molekülketten in den Fasern verfügt dieser sortenreine Verbundwerkstoff jedoch über deutlich gesteigerte mechanische Kennwerte [3] [4]. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Plattensteifigkeit bildet die Erhöhung der Wandstärke bspw. in Form von Sandwichverbunden. Auch bei höheren Umweltwirkungen in der Herstellung lassen sich je nach Anwendung durch den Leichtbaueffekt über den gesamten Lebenszyklus niedrigere Umweltwirkungen erzielen [5]. Grundlegende Herausforderung von Sandwichverbunden ist die stoffschlüssige Verbindung verschiedener Werkstoffe, die sich häufig am Lebensende nicht sauber voneinander trennen lassen. Zusätzlich werden Deckschichten und Kern häufig verklebt, sodass es zu Verunreinigungen des späteren Rezyklats durch Klebstoffreste kommen kann. Ein Ansatz, um die Zirkularitätseigenschaften von Sandwichverbunden zu verbessern, ist der Einsatz von ReUse-Komponenten für Sandwichkerne, wie bspw. Deckel von Plastikflaschen [6] oder Weinkorken [7]. Solche Ansätze sind jedoch aufgrund der unflexiblen Randbedingungen, schwankenden Eigenschaften und technisch hohen Anforderungen für diese Anwendung nicht geeignet. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von sortenreinen Sandwichverbunden, bei denen Decklagen und Kern aus dem gleichen Grundmaterial bestehen. Durch die Verbindung von Aluminiumblechen und Aluminiumschaum lassen sich bspw. Aluminiumsandwichverbunde realisieren [8]. Durch die Gradierung von Luftblasen in Schaumspritzguss lassen sich Schaumwerkstoffe mit konsolidierten Decklagen erzeugen [9]. Während für Aluminiumsandwichverbunde die Formfreiheit und insbesondere die nachträgliche Umformung begrenzt ist, sind für Schaumwerkstoffe mit konsolidierten Decklagen die Flexibilität der Einstellmöglichkeiten hinsichtlich Dicke der Decklagen begrenzt. Eine alternative Maßnahme zur Erhöhung der Plattensteifigkeit sind geometrische Maßnahmen, wie Hohlräume, Sicken oder Rippen.

Die Verlängerung der Lebensdauer eines Vorflügels erfordert einen entsprechenden Schutz vor Erosion. Diese kann durch Regen, Sand oder sich in der Luft befindliche Festkörper verursacht werden [10]. Mögliche Ansätze zur Verbesserung der Erosionsbeständigkeit sind die Verbesserung der Grundmaterialeigenschaften oder ein zusätzlicher Schutz von außen. Die Grundmaterialeigenschaften lassen sich bspw. durch Zugabe von Füllstoffen realisieren [11] [12]. Allerdings setzen die meisten dieser Füllstoffe die mechanischen Eigenschaften der Materialien herab und lassen sich nicht mehr vom Grundmaterial trennen [13]. Beschichtungen zur Verbesserung der Erosionsbeständigkeit finden bereits breiten Einsatz bei konventionellen Windkraftanlagen. Die dortigen Anforderungen für eine Beschichtung sind ähnlich derer für den untersuchten Flügel der Flugwindkraftanlage. Die nachfolgende Auflistung zeigt wichtige Anforderungen nach Chen et al. [14]:

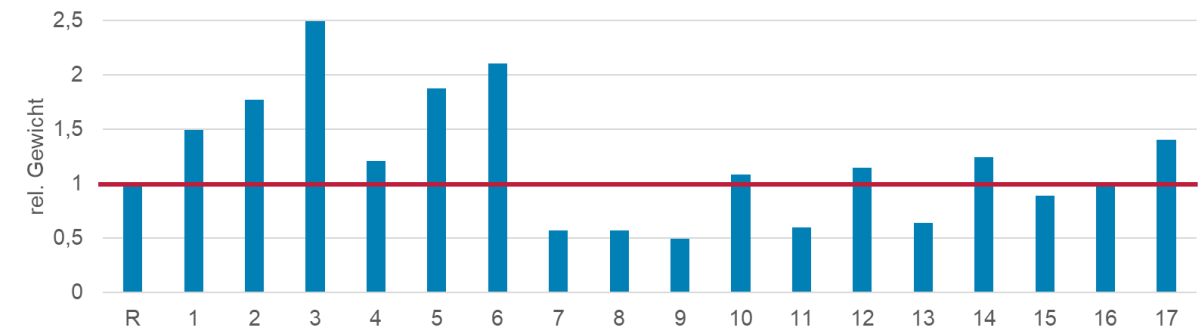
- Witterungsbeständigkeit (bspw. UV-Resistenz)
- Hinreichende Flexibilität bei hohen und niedrigen Temperaturen
- Widerstand gegen Regenerosion
- Säure- und Alkalibeständigkeit
- Verschleißbeständigkeit (bspw. Sand)
- Gute Haftung am Grundmaterial
- Widerstand gegen Salz und Feuchtigkeit
- Verhinderung/Verringerung von Eisablagerungen
- Geringe Umweltwirkungen

Eine Übersicht über mögliche Beschichtungen finden sich bspw. in [10] [14] [15]. Beschichtungen sind grundsätzlich kritisch zu hinterfragen, da diese als Verunreinigungen im Rezyklat verbleiben können. In Kombination mit Kunststoffen eignen sich metallische Schichten, da diese grundsätzlich gut vom Kunststoff trennbar sind. Für die Kombination von Kunststoffen oder Faserverbunden mit Metallschichten gibt es zahlreiche Umsetzungsmöglichkeiten, Fertigungsverfahren und Anwendungsbeispiele [16] [17] [18] [19].

Neben der Verbesserung der Lebensdauer müssen in jedem Fall die Trennbarkeit und die Recyclingfähigkeit untersucht werden. So kann der Einsatz von Klebstoff in Materialverbunden mit Thermoplasten zur Verunreinigung des Kunststoffes führen und somit die Rezyklatqualität herabsetzen. Unkritischer ist der Einsatz hingegen für Metalle, da Klebstoffreste im Recyclingprozess verbrennen bzw. in die Schlacke übergehen. Nicht oder nur sehr begrenzt recyclingfähige Materialien sind grundsätzlich zu vermeiden, jedoch führt auch hier der Einsatz von Klebstoffen zu keinen Problemen. Somit müssen spezifische Ansätze und Materialkombinationen individuell bewertet werden.

3.3.4 Berechnung

Zur Abschätzung der mechanischen Eigenschaften wurden zunächst vereinfachte Berechnungen zum Vergleich unterschiedlicher Materialien sowie geometrischer Maßnahmen in Bezug auf die Steifigkeit durchgeführt. Hierfür wurde das bereits zur Berechnung der Referenz verwendete Simulationsmodell verwendet (vgl. Abbildung 3.25). Abbildung 3.27 (oben) zeigt den relativen Vergleich der Masse einer Auswahl von Materialkonzepten bei gleicher Durchbiegung. Es zeigt sich, dass die meisten Materialkonzepte bei gleicher Durchbiegung eine höhere Masse aufweisen. Lediglich die untersuchten Sandwichlösungen besitzen vergleichbare Steifigkeitseigenschaften bzw. sind mit Decklagen aus CFK deutlich leichter. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass es sich an dieser Stelle um



Environmental impact category	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Treibhauspotential	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Ozonabbaupotential	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Versauerungspotential	Yellow	Green	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Eutrophierungspotential	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Photochem. Oxidantienbildungspot.	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Abiotischer Ressourcenverbrauch	Yellow	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Orange	Red	Orange	Green	Green	Green	Green
Abiotischer Ressourcenverbrauch	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Primärenergiebedarf aus nicht reg. Ressourcen	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Primärenergiebedarf aus reg. Ressourcen	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Wasserverbrauch	Yellow	Green	Green	Green	Orange	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow
Luftverschmutzung	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Wasserverschmutzung	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Gefährlicher Abfall zur Deponie	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall	Yellow	Orange	Orange	Green	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Red
Esorgter radioaktiver Abfall	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

R: CFK (Epoxy) 1 mm | 1: GFK (Epoxy) 1,45 mm | 2: PA66 GF50 1,7 mm | 3: PET 3,7 mm | 4: Aluminium 0,65 mm
 5: Stahl 0,35 mm | 6: Eigenverstärktes PP 3,4 mm | 7: CFK (Epoxy) 0,25 mm + Schaum 1,4 mm + CFK (Epoxy) 0,25 mm
 8: CFK (PA6) 0,25 mm + Schaum 1,4 mm + CFK (PA6) 0,25 mm | 9: CFK (Epoxy) 0,2 mm + Schaum 1,4 mm + CFK (Epoxy) 0,2 mm
 10: GFK (Epoxy) 0,5 mm + Schaum 1 mm + GFK (Epoxy) 0,5 mm | 11: GFK (Epoxy) 0,2 mm + Schaum 3,5 mm + GFK (Epoxy) 0,2 mm
 12: PA66GF50 0,5 mm + Schaum 1,4 mm + PA66GF50 0,5 mm | 13: PA66GF50 0,2 mm + Schaum 4 mm + PA66GF50 0,2 mm
 14: PET 0,5 mm + PET-Schaum 5,75 mm + PET 0,5 mm | 15: PET 0,2 mm + PET-Schaum 10 mm + PET 0,2 mm
 16: AL 0,25 mm + PET 0,2 mm + PET-Schaum 3 mm + PET 0,2 mm | 17: EiG_PP 1 mm + PP-Schaum 4 mm + Eig_PP 1 mm

Abbildung 3.27: Vergleich der relativen Masse bei gleicher Steifigkeit (oben) und Umweltwirkungen (unten) für ausgewählte Konzepte

grundlegende Untersuchungen anhand des Prototypenflügels handelt. Aus diesem Grund wurde keine Rücksicht auf die minimale Dicke einzelner Decklagen gelegt. Abbildung 3.27 (oben) zeigt die resultierenden Umweltwirkungen der einzelnen Konzepte für verschiedene Wirkungskategorien als relativen Vergleich zur Referenz (R) aus CFK in der ersten Spalte. Je grüner das entsprechende Feld, desto geringer sind die relativen Umweltwirkungen, je röter, desto schlechter. Es zeigt sich für alle Konzepte ein positives Ergebnis. Lediglich für einzelne Wirkungskategorien weisen bestimmte Konzepte höhere Werte auf, wie bspw. Konzepte mit Glasfasern beim abiotischen Ressourcenverbrauch oder Konzepte mit Aluminium bei entsorgtem nicht radioaktivem Abfall.

Neben alternativen Materialkonzepten wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Versteifungsmaßnahmen untersucht. Hierfür wurde das für die Berechnung von Materialkonzepten verwendete Simulationsmodell um die Definition verschiedener Abschnitte erweitert (vgl. Abbildung

3.28, oben). Auf einer Seite des Modells wurden Abschnitte entlang des Vorflügels definiert. Auf der anderen Seite wurden Abschnitte entlang des Profilquerschnitts definiert. Zur Untersuchung möglicher Versteifungsmaßnahmen wurde den einzelnen Bereichen ein Sandwichtaufbau mit 0,5 mm CFK-Decklagen und einem 10 mm Schaumkern zugewiesen. Die Grundstruktur besteht entsprechend der Referenz aus 1 mm CFK. Abgesehen von der Variante (L4 + T) führen alle Verstärkungsmaßnahmen zum gleichen Zusatzgewicht.

Abbildung 3.28 (unten) zeigt die Ergebnisse für die unterschiedlichen Positionen in Form der maximalen Durchbiegung relativ zur Referenz (R). Wie zu erwarten, führt eine Versteifung an der Position der maximalen Durchbiegung (L1) zu den stärksten Verbesserungen mit unter 20 % der ursprünglichen Durchbiegung. Diese Position ist jedoch gemäß der Anforderungen (vgl. Abbildung XY) ungeeignet für eine lokale Versteifung, da so die stetige Verjüngung des Abstandes zwischen Flügel und Vorflügel in Richtung des Strömungsaustritts gestört wird. Der für Versteifungsmaßnahmen aufgrund der Anforderungen optimale Totwasserbereich führt jedoch trotz deutlich mehr Materialeinsatz zu einer erheblich geringeren Versteifung mit weiterhin über 80 % der maximalen Durchbiegung. Eine Alternative für eine Versteifung an Stelle der maximalen Durchbiegung bietet eine Versteifung in Querschnittsrichtung (PA + PI), da so eine Konstante Aufdickung entlang des Luftstroms realisiert werden kann. Die Verbesserung fällt zwar mit gut 60 % der ursprünglichen Durchbiegung deutlich geringer aus als eine Versteifung entlang des Profils an Position 1. Im Vergleich zum Totwasserbereich entsteht jedoch eine deutlich bessere Versteifung.

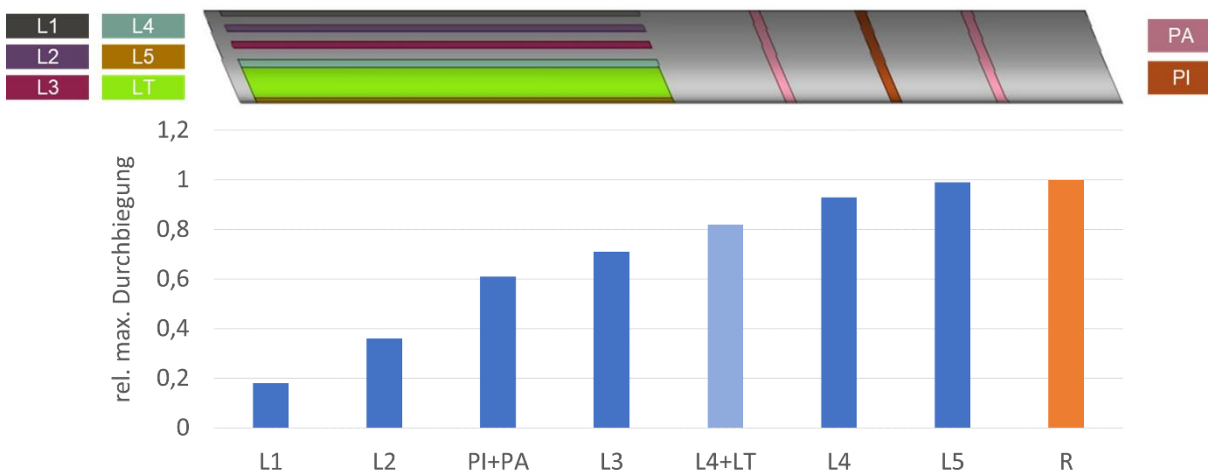


Abbildung 3.28: Auswirkungen von Versteifungsmaßnahmen an unterschiedlichen Positionen

3.3.5 Basiskonzepte

Auf Grundlage der verschiedenen Umsetzungsmöglichkeiten für die einzelnen Teilfunktionen des Vorflügels (vgl. Abbildung C.1 im Anhang) wurden verschiedene Basiskonzepte erstellt und exemplarisch hinsichtlich genauer Materialwahl präzisiert.

a) Zusatzschicht

Grundansatz des ersten Basiskonzepts ist der Schutz des Grundmaterials vor Verschleiß durch eine zusätzliche Schutzschicht. Diese ist vorrangig aus Metall, wobei dieses als Blech aufgebracht oder auch beschichtet sein kann. Zusätzlich sind auch Beschichtungen aus alternativen Materialien möglich. Maßgabe ist dabei jedoch, dass sich Schutzschichtmaterial und Grundmaterial am Ende gut

voneinander separieren und die sortenreinen Materialien gut recyceln lassen. Dies ist bspw. bei einer intrinsischen Verbindung von Metall und Kunststoff grundsätzlich gut möglich. Neben der Materialwahl hat die Recyclingfähigkeit auch Auswirkungen auf die Fügeverbindung. Bei einzeln gut recycelbaren Materialien (Thermoplast und Metall) darf bspw. keine Klebschicht den ggf. eingesetzten Kunststoff verunreinigen. Hier bietet sich ein intrinsisches Fügen an. Besteht das Grundmaterial allerdings aus FKV mit Duromermatrix, ist die Recyclingfähigkeit ohnehin sehr eingeschränkt möglich, sodass der eingesetzte Klebstoff keine Verunreinigungen in später aus dem FKV gewonnenen Rezyklat verursachen kann. Die Schutzschicht kann entweder vollflächig (außen oder auch innen) oder nur lokal an besonders verschleißbehafteten Stellen bzw. als Kantenschutz appliziert werden. Diese Stellen sind allerdings noch nicht bekannt und müssten durch weitere Analysen definiert werden. Beim Einsatz von Metall als Schutzmaterial ist zudem auf eine mögliche Korrosion zu achten, da das Material grundsätzlich durchgängig der Witterung ausgesetzt ist.

b) Verstärktes Thermoplastkonzept

Das Grundmaterial des zweiten Basiskonzepts besteht aus thermoplastischem Kunststoff und ist somit grundsätzlich gut recyclingfähig. Aufgrund der geringeren Steifigkeit sind zur Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit zusätzliche Verstärkungsmaßnahmen erforderlich. Diese können sowohl auf Material- (Erhöhung der Membransteifigkeit) als auch Geometrie- (Erhöhung der Plattensteifigkeit) liegen. Maßgabe ist hier die Recyclingfähigkeit bzw. der Einsatz von recyceltem Material. So können neben Glasfasern bspw. auch recycelte Kohlenstofffasern (kurz, lang, Matte) zum Einsatz kommen. Die geometrische Versteifung muss den Anforderungen und Randbedingungen des Flügels genügen. Beim Einsatz von Thermoplast sind zwingend die Anforderungen hinsichtlich Einsatztemperaturen und Wärmeformbeständigkeit des Kunststoffs zu überprüfen. Da für dieses Konzept kein zusätzlicher Verschleißschutz vorliegt, ist es vorrangig für einen häufigeren Austausch geeignet. Aus diesem Grund hat die Recyclingfähigkeit einen besonders hohen Stellenwert.

c) Sandwichkonzept

Beim dritten Basiskonzept wird eine Erhöhung der Plattensteifigkeit durch einen Sandwichaufbau realisiert. Die Wahl der Decklagen und des Kerns ist dabei grundsätzlich flexibel. Der Kern kann bspw. aus Schaum, einem Faltkern oder einem Hohlraum mit Stegen bestehen. Für höhere Stabilität ist auch ein Kern aus Vollkunststoff oder für bessere Nachhaltigkeit aus organischem oder sonstigem Füllmaterial möglich. Als Decklagen bietet sich weiterhin der Einsatz von CFK oder alternativ auch Metall oder Thermoplast an. Im Falle von Thermoplasten ist auch der Einsatz eines sortenreinen Sandwichs möglich. Ein Beispiel hierfür ist das durch Volkswagen entwickelte KuFizz-Verfahren, das als Schaumspritzguss einen porösen Kern und konsolidierte Decklagen besitzt. Alternativ müssen Kern und Decklagen bestmöglich trennbar sein. Der Verbund kann als quasi-Halbzeug mit durchgehend gleicher Wandstärke gestaltet sein oder als lokaler Sandwichaufbau. Im Falle von separaten Decklagen ist auf die notwendige Mindestdicke zu achten, damit es nicht zum Einbeulen oder spontanem Knickversagen kommt. Dies gilt bspw. für CFK, das als 0,4 mm Decklage ausgeführt werden kann. Im Falle von nachträglich geklebten Verbunden ist darauf zu achten, ob der eingesetzte Kunststoff ein Recycling verhindert oder die Rezyklatqualität verschlechtert. Die Fertigungsmöglichkeiten/-restriktionen/-kosten sind individuell zu bestimmen.

d) Eigenverstärkter Kunststoff

Das vierte Basiskonzept versucht aus sortenreinen Thermoplasten das Maximum herauszuholen, indem ein eigenverstärkter Thermoplast eingesetzt wird (vgl. Abschnitt 3.3.3). Da die Molekülketten bei den Fasern hochorientiert und vorgestreckt sind, überragen die mechanischen Eigenschaften im Fall von Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit die des Spritzgussmaterials bei weitem. Aufgrund der Sortenreinheit ist die Recyclingfähigkeit theoretisch als sehr gut zu bewerten. Aufgrund der komplizierteren Herstellung der Gewebe und der geringen Verbreitung sind die Kosten deutlich

e) Konzeptvergleich

Die vier dargestellten Konzepte besitzen individuelle Vor- und Nachteile. Tabelle 3.2 zeigt die Bewertung der Konzepte in Bezug auf sieben Kriterien.

Tabelle 3.2: Vergleich der Basiskonzepte

Konzept	Gewicht	Verschleiß- beständigkeit	Schlag- zähigkeit	Trennbarkeit	Recycling	Rezyklat- einsatz	Zusatz- funktionen
Schutzschicht	o/-	++	o/+	o	o/+	o/+	o/+
Kunststoff mit Verstärkung	-/--	o/-	-	++	++	++	+
Sandwich	+/**	o	+	++/--	o	+	++
Eigenverstärkter Kunststoff	-	o/-	++	++	++	+	o/+

Als abschließender Vergleich der Konzepte muss eine mögliche Verbesserung der Zirkularität mit den Auswirkungen auf die Umweltwirkungen verglichen werden. Bei einer Substitution von CFK mit den vorgestellten Werkstoffen ist auch bei einer Zunahme des Bauteilgewichts von einer Verbesserung der Umweltwirkungen in den meisten Kategorien auszugehen. Jedoch existiert auch ein Zusammenhang zwischen der Gesamtmasse des Kites und der erzeugten Energie durch diesen. Bei zunehmendem Gewicht steigt die notwendige Windgeschwindigkeit zur Erreichung der Nennleistung des Kites, sodass im Schnitt weniger Energie produziert wird (vgl. Abbildung 3.2). Aufgrund der geringen Gewichtszunahme durch die alternativen Slatkonzepte liegt die Verringerung der Energieausbeute auf Basis der angewendeten Modelle jedoch unterhalb der quantifizierbaren Modellaufösung. Deshalb kann an dieser Stelle keine Auswirkung der Gewichtszunahme als Vergleich möglicher Verbesserungen durchgeführt werden.

3.3.6 Schnellwechselsystem zur Anbindung des SLAT an den Flügel

Der SLAT (Vorflügel) stellt eine aerodynamisch relevante Komponente der Flugwindkraftanlage dar, welche während des Betriebs stark belastet wird und damit einem erhöhten Verschleiß unterliegt.

Bedingt durch die Reibung bei der Umströmung sowie mechanische Beanspruchungen durch Partikel und Niederschlag, ist die Lebensdauer des SLATs im Vergleich zur CFK-Grundstruktur des Flügels signifikant eingeschränkt. Um einen wirtschaftlich und ökologisch sinnvollen Betrieb der Flugwindkraftanlage zu ermöglichen, ist ein regelmäßiger Austausch des SLATs erforderlich. Ziel ist es, ein Schnellwechselsystem zu entwickeln, das einen werkzeugarmen oder -freien Austausch der SLAT-Baugruppe erlaubt und dabei die aerodynamischen, strukturellen sowie ökologischen Anforderungen erfüllt.

Zur Identifikation einer geeigneten Lösung wurden im Rahmen des Projekts sechs verschiedene Konzepte für die mechanische Anbindung des SLATs an die Flügelstruktur entwickelt und bewertet. Die Konzepte unterscheiden sich hinsichtlich des Anbindungsprinzips (Bolzenverbindung, Schraubverbindung, Schnellspannmechanismus, Klemmsystem) sowie dem Ausmaß der Austauschbarkeit (nur SLAT, SLAT inkl. Anbindung). Wesentliche Randbedingungen wie geometrische Toleranzen, Werkstoffwahl, Handhabbarkeit sowie die Fertigungs- und Montageaufwände wurden in die Betrachtung einbezogen.

a) Konzept 1: SLAT mit Bolzen an Anbindung bzw. Flügel befestigt

Das erste Konzept sieht eine direkte Anbindung des SLATs an die bestehende Anbindungseinheit oder unmittelbar an die Flügelstruktur über eine Bolzenverbindung vor (vgl. Abbildung 3.29). Der Bolzen wird dabei durch die SLAT-Struktur geführt und durch einen Splint gesichert. Um die axiale Ausrichtung des Bolzens sicherzustellen, ist eine lokale Anpassung der SLAT-Geometrie erforderlich. Die Montage gestaltet sich in der Praxis jedoch schwierig, da der Bolzen im unteren, vorderen Bereich eingeführt werden muss und dort „in der Luft“ steht. Eine Verschraubung ist in diesem Bereich nicht umsetzbar, was die Handhabung deutlich erschwert. Zusätzlich besteht die Problematik, dass durch Spiel in der Verbindung ein „Klappern“ auftreten kann, dem durch die Integration von Dicht- oder Schaumstoffelementen entgegengewirkt werden muss.

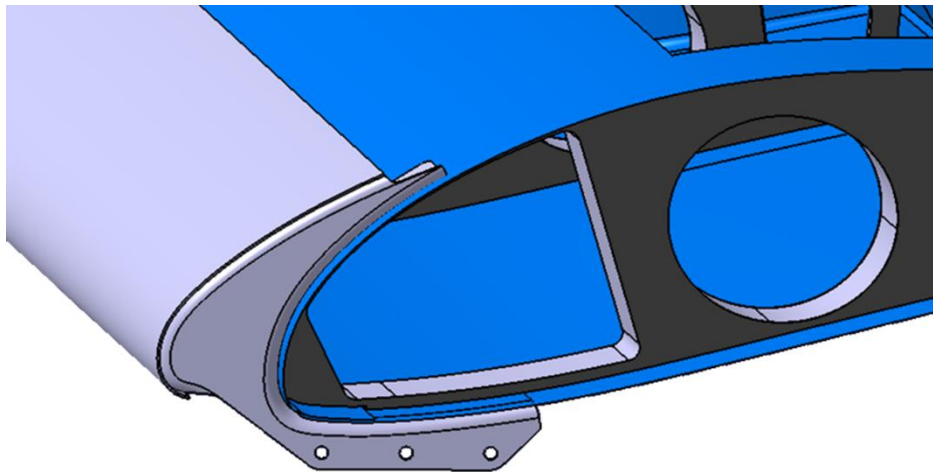


Abbildung 3.29: SLAT inklusive Anbindung mit Bolzen an Flügel befestigt

b) Konzept 2: SLAT inklusive Anbindung mit Bolzen an Flügel befestigt

Im zweiten Konzept wird nicht nur der SLAT selbst, sondern auch seine zugehörige Anbindung als eine vollständige Einheit betrachtet, die gemeinsam über eine Bolzenverbindung mit der Flügelstruktur gekoppelt wird. Auch hier erfolgt die Sicherung des Bolzens durch einen Splint. Die Verbindung

durchdringt dabei sowohl den SLAT als auch das Anbindungselement und die Tragstruktur des Flügels. Die Integration dieser Komponenten zu einem gemeinsamen Modul erhöht die Austauschbarkeit, erfordert jedoch ebenfalls eine präzise geometrische Ausrichtung, insbesondere im Hinblick auf die fluchtende Positionierung des Bolzens. Auch in diesem Fall müssen Maßnahmen zur akustischen Entkopplung und zur Erhöhung der Verbindungssicherheit vorgesehen werden.

c) Konzept 3: SLAT auf fest verklebte SLAT-Anbindung verschraubt

Das dritte Konzept sieht eine dauerhafte Verklebung der SLAT-Anbindung mit der Flügelstruktur vor (vgl. Abbildung 3.30). Die Anbindung besteht aus einem additiv gefertigten Vollmaterial und ist mit integrierten Gewindeinsätzen ausgestattet, in die der SLAT eingeschraubt wird. Um die notwendige Verschraubung zu ermöglichen, muss der SLAT lokal aufgedickt werden, wobei die Aufdickungen präzise mit den Gewindepositionen in der Anbindung korrespondieren. Die Anbindung selbst ist aufgrund des nichtlinearen Verlaufs des Flügelprofils an jeder Einbaustelle individuell zu fertigen. Die Austauschbarkeit beschränkt sich in diesem Konzept auf den SLAT, da die Anbindung fest mit dem Flügel verbunden bleibt. Die Lösung eignet sich insbesondere für Anwendungen mit geringer Austauschfrequenz und erlaubt durch die Gewindeinsätze eine zuverlässige Verbindung.

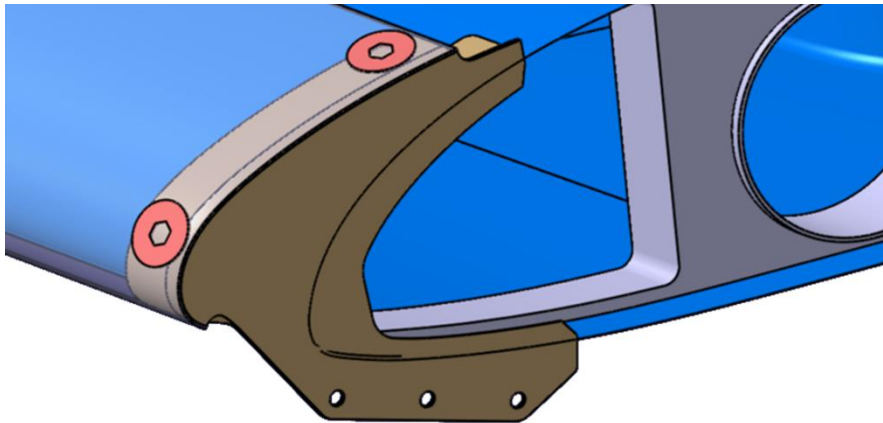


Abbildung 3.30: SLAT auf fest verklebte SLAT-Anbindung verschraubt

d) Konzept 4: SLAT mit zweiteiliger SLAT-Anbindung (Schraubverbindung)

Das vierte Konzept stellt eine modulare Schraubverbindung dar, bei der die SLAT-Anbindung aus einem Ober- und einem Unterteil besteht (vgl. Abbildung 3.31). Das Unterteil wird fest auf den Flügel verklebt, während das Oberteil auf der SLAT-Struktur montiert ist. Beide Elemente werden durch zwei Senkschrauben M5x25 aus Stahl verbunden, die in Messing-Gewindebuchsen eingeschraubt werden. Die Bauteile bestehen aus PA12 und werden im Rapid-Prototyping-Verfahren mittels SLS oder MJF gefertigt. Die Anbindung erfolgt senkrecht zum SLAT, was eine gute Zugänglichkeit bei der Montage ermöglicht. Da das Flügelprofil nicht linear verläuft, müssen die Anbindungselemente je nach Einbauposition individuell angepasst werden. Die Gesamtabmessungen der Anbindungseinheit betragen etwa 130 mm × 74 mm × 21 mm bei einem Gesamtgewicht von rund 102 g pro Einheit. Die Konstruktion ermöglicht den werkzeuggestützten, aber einfachen Austausch von SLAT und Anbindungsoberteil, ohne dass die Verbindung zur Flügelstruktur gelöst werden muss. Aufgrund der Kombination aus einfacher Handhabung, niedrigen Stückkosten und hoher aerodynamischer Güte

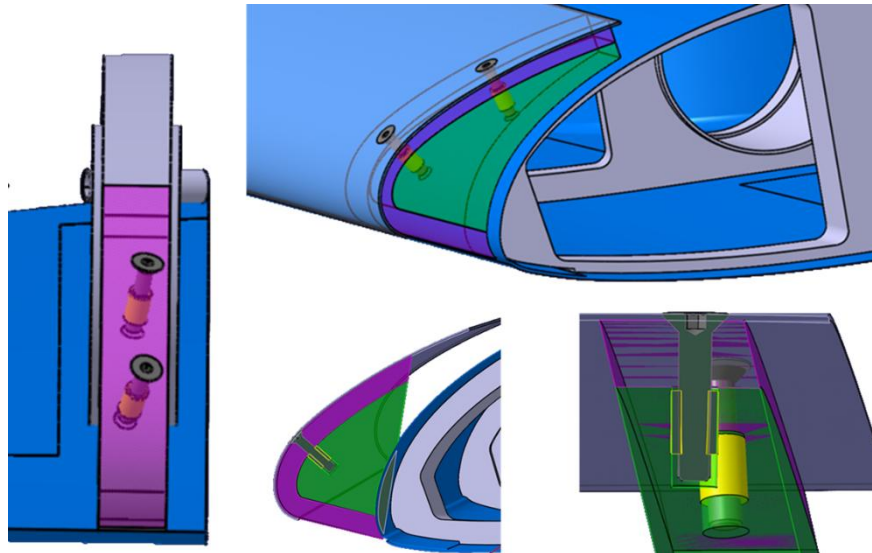


Abbildung 3.31: SLAT mit zweiteiliger SLAT-Anbindung (Schraubverbindung)

wurde dieses Konzept im Rahmen der Bewertung als wirtschaftlich und technisch besonders vorteilhaft eingeschätzt.

e) Konzept 5: SLAT auf SLAT-Anbindung mit Schnellspannsystem (Hebel)

Konzept 5 basiert auf einem Schnellspannsystem, das über einen Hebelmechanismus realisiert werden soll (vgl. Abbildung 3.32). Die Verbindung erfolgt über eine Verspannung in eine Gewindebuchse innerhalb der Grundstruktur. Die Grundidee liegt in einer werkzeuglosen oder werkzeugarminimierten Befestigung, die eine zeitsparende Montage erlaubt. In der praktischen Bewertung zeigte sich jedoch, dass das System potenziell langsamer ist als eine klassische Schraubverbindung mit Drehmomentschlüssel. Zudem besteht das Risiko einer ungleichmäßigen Verspannung, was insbesondere bei variierenden Toleranzen kritisch sein kann. Auch die resultierenden Störkonturen und die bislang ungeklärte Umsetzung des Hebelmechanismus führten zu einer eher zurückhaltenden Bewertung hinsichtlich Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit.

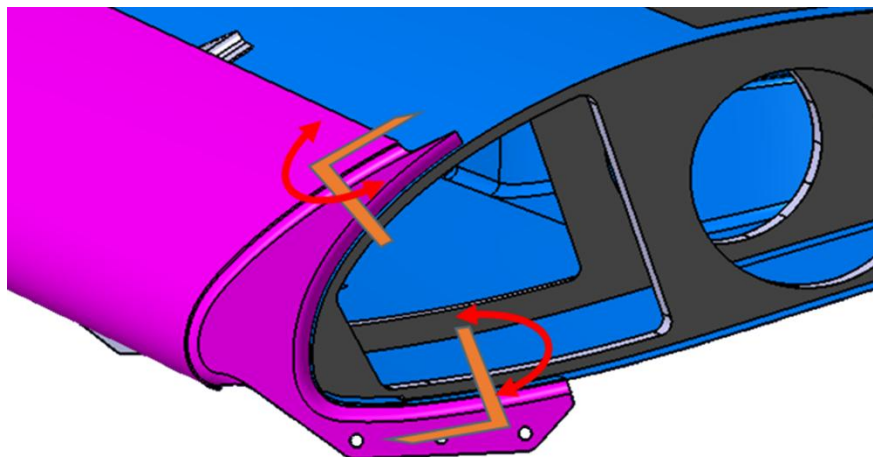


Abbildung 3.32: SLAT auf SLAT-Anbindung mit Schnellspannsystem (Hebel)

f) Konzept 6: SLAT mit Klemmsystem „Schnapphaken“

Das sechste Konzept sieht ein zweiteiliges Klemmsystem vor, bei dem die Verbindung über einen sogenannten Schnapphaken realisiert wird (vgl. Abbildung 3.33). Das Anbindungsunterteil wird auf den Flügel geklebt, während das Oberteil mit dem SLAT verbunden ist. Die beiden Elemente werden entweder über ein Einhaken von unten oder ein seitliches Aufschieben miteinander verbunden. Die Fertigung der Komponenten erfolgt ebenfalls aus PA12 im additiven Verfahren als Vollmaterial. Die mechanische Verbindung erfolgt durch Einschnappen des Oberteils in das Unterteil, was eine werkzeuglose Montage prinzipiell ermöglicht. Zur Sicherung gegen ein unbeabsichtigtes seitliches Verschieben sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Auch bei diesem Konzept ist eine individuelle Anpassung der Bauteile je nach Einbaulage erforderlich, da das Flügelprofil nicht konstant ist. Die Lösung ist hinsichtlich ihrer Montagefreundlichkeit vielversprechend, erfordert jedoch ein präzises Zusammenspiel der Bauteile und ist aufgrund der offenen Punkte hinsichtlich Festigkeit und Langzeitverhalten nur eingeschränkt für die seriennahe Umsetzung geeignet.

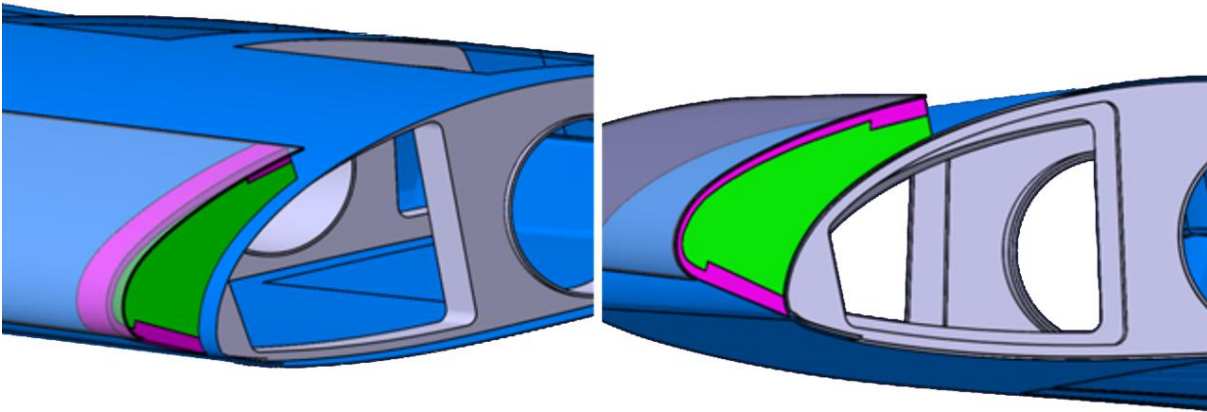


Abbildung 3.33: SLAT mit Klemmsystem „Schnapphaken“

Bewertung und Zusammenfassung

Im Rahmen der Konzepterarbeitung und -bewertung wurde insbesondere Konzept 4 als wirtschaftlich und technisch besonders geeignet identifiziert. Es erlaubt eine modulare Trennung von SLAT und Flügelstruktur, gewährleistet eine sichere und einfache Verbindung und berücksichtigt die Anforderungen an Aerodynamik, Gewicht, Fertigung und Austauschbarkeit. Aufgrund der Kombination aus Rapid-Prototyping-Fertigung, einfachem Montageprinzip und robustem Design stellt dieses Konzept die vielversprechendste Lösung für ein seriennahe Schnellwechselsystem zur Anbindung des SLATs an den Flügel dar.

3.4 Seilanbindung und -kraftmessung

Die Seilanbindung ist während des Betriebs hohen dynamischen Lasten ausgesetzt. Durch die lokal konzentrierte Krafteinleitung entsteht ein potenzielles Risiko für Beschädigungen der CFK-Grundstruktur des Flügels, da die Seilanbindung irreversibel mit dem Flügel verklebt ist. Zur Sicherstellung der Haltbarkeit und dem Schutz der CFK-Struktur werden Konzepte für die Seilanbindung entwickelt, die die Problemstellungen der Seilanbindungen lösen sollen. Dies betrifft insbesondere eine Verlängerung der Lebensdauer der Seilanbindung durch die Verstärkung der Anbindungsstellen, um eine Beschädigung der Anbindung zu verhindern.

Eine Möglichkeit zur Umsetzung ist der Einsatz einer Metallkomponente, die eine deutlich höhere Festigkeit in Bezug auf lokale Lastspitzen besitzt als CFK, welches an dieser Stelle maßgeblich durch die Festigkeit der Matrix dominiert wird. Für den Einsatz von FKV-Metall-Strukturen bestehen zahlreiche Umsetzungsmöglichkeiten, die unterschiedliche Festigkeiten und Möglichkeiten zur Trennbarkeit aufweisen. Aus diesem Grund werden Konzepte für unterschiedliche Umsetzungsmöglichkeiten erarbeitet und bewertet. Das vielversprechendste Konzept wird anschließend auf Grundlage bekannter Größen zur Seillast mechanisch ausgelegt. Abseits von Materialkonzepten wird untersucht, inwiefern eine Winkelanpassung der Seilanbindung als konstruktive Maßnahme die Belastung und Haltbarkeit der Seilanbindung verbessern kann. Um genauere Erkenntnisse über die Seillasten während des Betriebs zu erlangen, wird innerhalb des Arbeitspakets die Integration einer Kraftmessung für die Seilkräfte untersucht. Die Belastung durch die Seile ist dynamisch und ändert ihre Richtung. Es wird deshalb ein Konzept für ein integriertes Messgerät entwickelt, das sowohl die Kraft als auch die angewandte Richtung ermitteln kann.

Die Positionierung und der Aufbau der Seilanbindungen sind in Abbildung 3.34 dargestellt. Das Halteseil ist in der Mitte des Flügels befestigt, die außenliegenden Steuerseile werden über eine Umlenkrolle zusammengeführt, sodass lediglich ein Steuerseil pro Seite zur Bodenstation führt. Die dabei entstehenden Winkel sind abhängig von Position und Höhe des Flügels. Flügelseitig besteht die

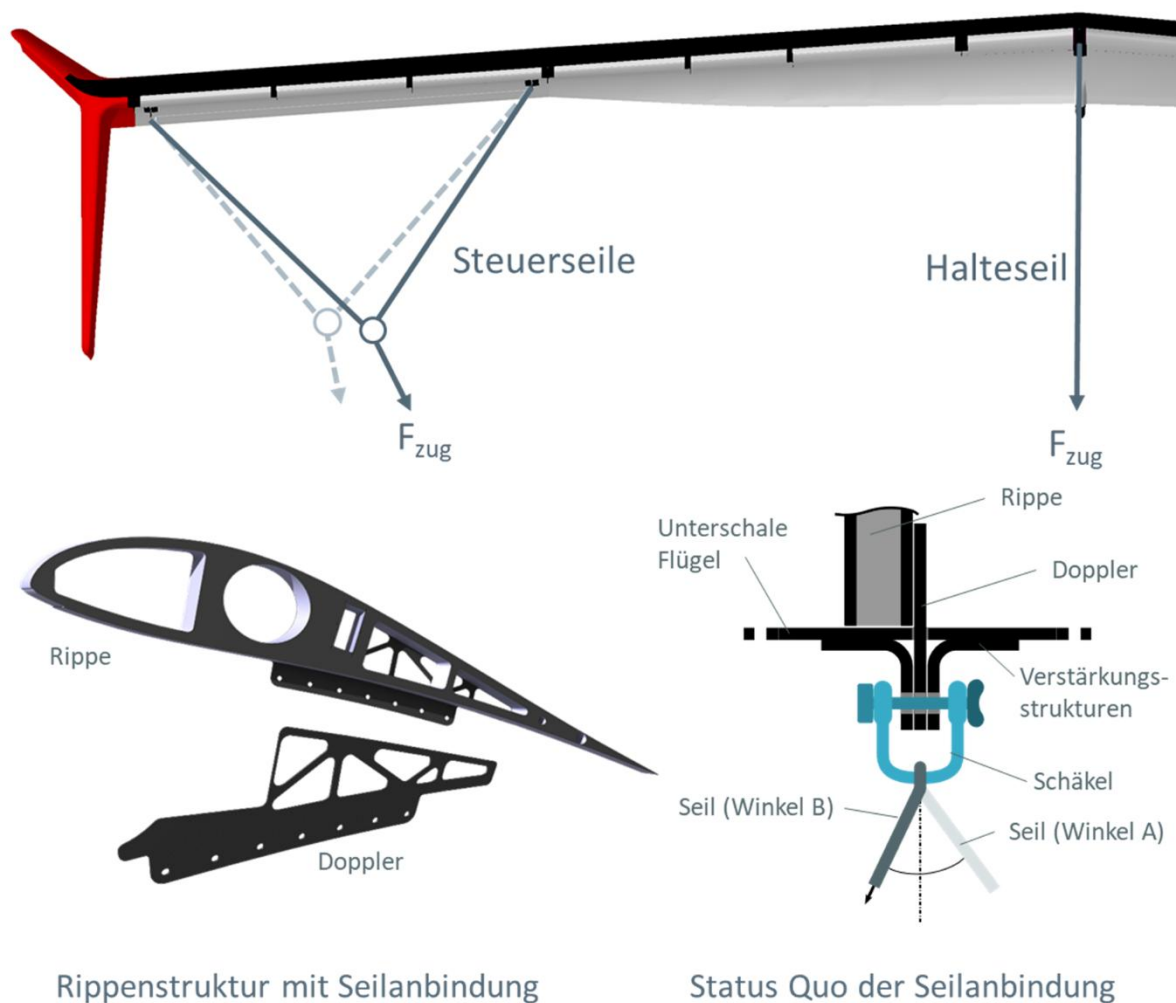


Abbildung 3.34: Darstellung der Seilanbindung und den jeweiligen Seillasten

Seilanbindung aus einem sogenannten Doppler (CFK-Schale), der mit einer der sich im Flügel befindlichen Rippen verklebt ist. Der Doppler ist am unteren Ende partiell verlängert und ragt über einen Spalt in der Unterschale des Flügels heraus. Dieses sogenannte Schwert ist wiederum mittels zweier L-Profile an beiden Seiten verstärkt, die sowohl mit dem Schwert als auch mit der Unterschale des Flügels verklebt sind. Seil Anbindung zum Seil erfolgt über einen Schäkel, der durch eine Anbindungsöffnung der Seilanbindung geführt wird.

3.4.1 Belastungssituation

Zur Ermittlung der anzunehmenden Lasten wurden exemplarische Seillasten anhand des in Abbildung 3.35 (oben) dargestellten Modells des Flügels unter Variation des Anstellwinkels und der daraus resultierenden aerodynamischen Lasten ermittelt. Es zeigt sich je nach Anstellwinkel eine stark unterschiedliche aerodynamische Last, die gleichermaßen als Reaktionskraft an den Seilanbindungen vorliegt. Zur Auslegung der Seilanbindung wurden die höchsten auftretenden Seillasten unter einem Anstellwinkel von 30° verwendet. Abbildung 3.35 (unten) zeigt die Verteilung der Lasten auf die vier Seilanbindungen. An der Halteseilanbindung wirken die größten Lasten mit gut 3000 N. Die Kraft wirkt dabei im Mittel senkrecht zum Kite, variiert jedoch während des Fluges. An den beiden Halteseilanbindungen wirken unterschiedliche starke Kräfte. Während an der inneren

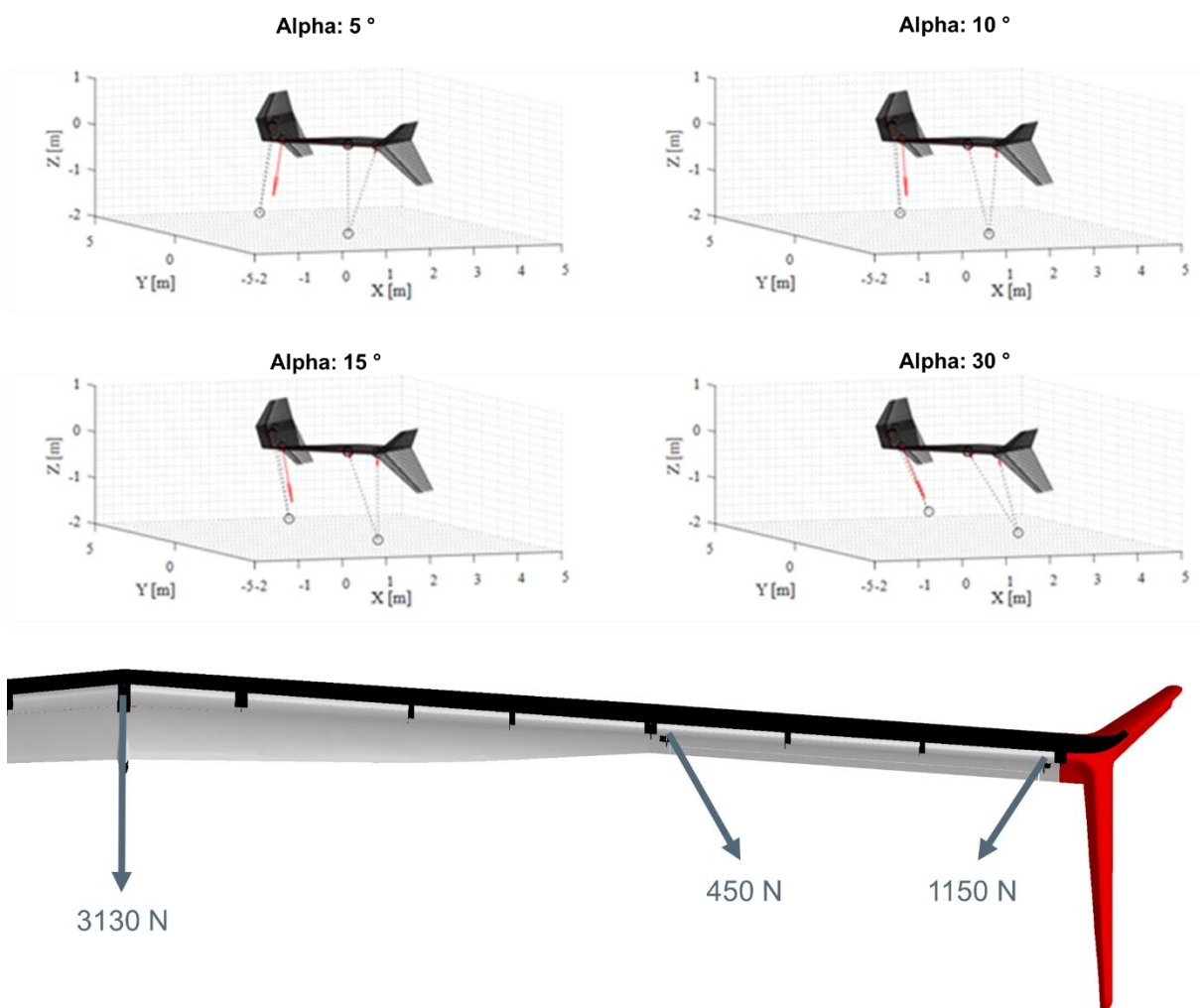


Abbildung 3.35: Aus verschiedenen Anstellwinkeln resultierende Lastsituationen

Halteseilanbindung eine Kraft in Höhe von 450 N nach außen wirkt, wird die äußere Halteseilanbindung mit 1150 N nach innen gerichtet belastet.

Zur Analyse der alternativen Seilanbindungskonzepte hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit, Festigkeit) mittels FE-Analyse wird ein Submodell der Referenzbauweise erstellt (siehe Abbildung 3.36, oben). Das FE-Modell bildet den äußeren Anbindungspunkt der Steuerseile ab, bestehend aus dem Doppler, der Verstärkungsstruktur sowie deren Anbindung an die benachbarte Rippe sowie der Unterschale des Flügels. Die Lagerung erfolgt durch eine Einspannung an der Schnittebene des Teilsystems und an den Rohrverbindern. Aufgrund des betrachteten Lastszenarios wird eine lokal begrenzte Spannungsverteilung um den Anbindungspunkt erwartet.

Zur Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit der CFK-Referenzbauweise des Anbindungspunktes wird das Tsai-Wu-Versagenskriterium herangezogen. Dabei werden die Versagensmodi Matrix- und Faserbruch infolge von Zug- bzw. Druckbelastungen sowie Schubversagen indirekt durch das Kriterium berücksichtigt. Die Versagensinteraktion bei gleichzeitiger Beanspruchung in Längs- und Querrichtung wird zugunsten einer konservativen Bewertung vernachlässigt. Ein Versagensindex größer als 1 weist auf ein Materialversagen hin. Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt eine lokale Spannungskonzentration, insbesondere im Bereich des Dopplers und der Verstärkungsstruktur. Damit kann der gewählte Modellausschnitt als ausreichend repräsentativ für die Vergleichsstudien der unterschiedlichen Anbindungskonzepte angesehen werden. Belastungsspitzen treten in beiden Komponenten im Bereich der Lasteinleitung sowie an den Anbindungspunkten zur Kitestruktur auf,

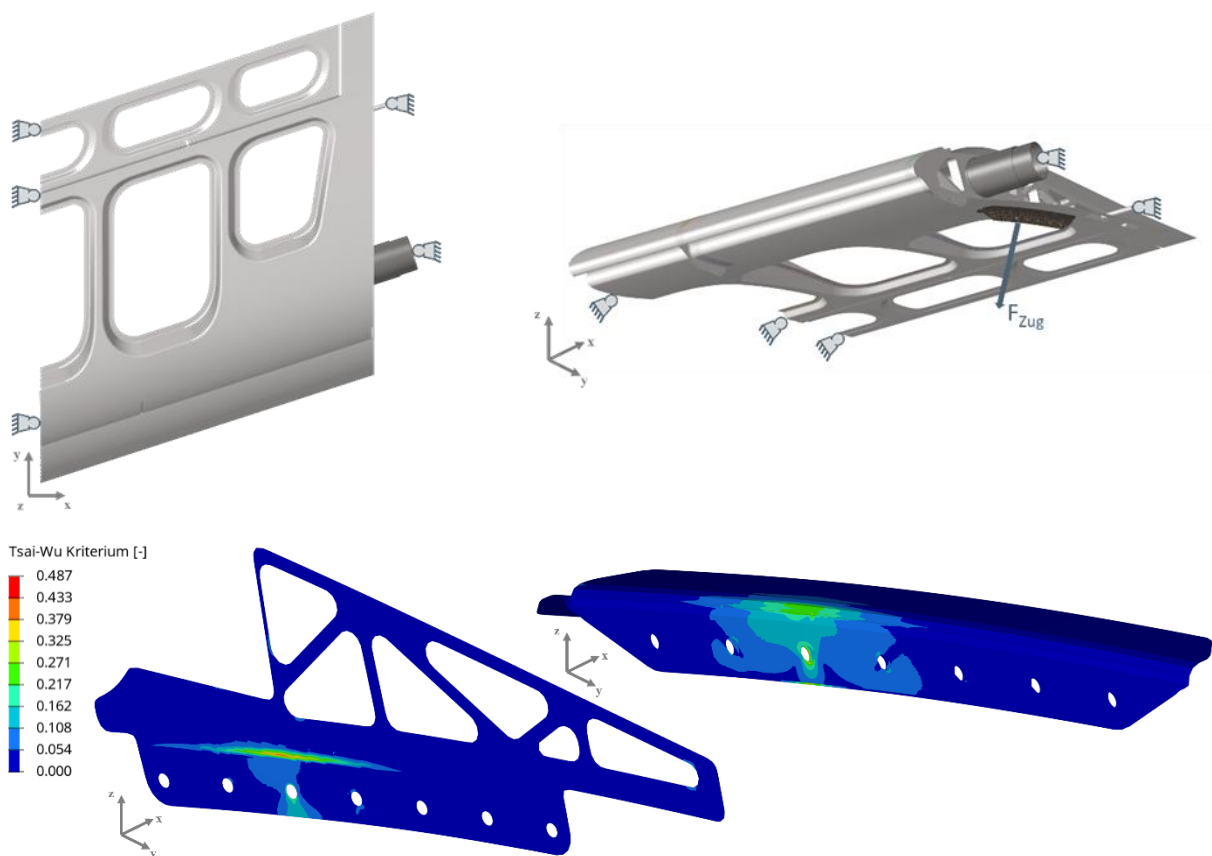


Abbildung 3.36: Teilmodell des Kites zur strukturmechanischen Bewertung (oben) sowie die Simulationsergebnisse Doppler (links) und Verstärkungsstruktur (rechts) der Referenz CFK-Seilanbindung (unten)

welche aufgrund der Belastungsrichtung primär Zug- und Biegebeanspruchungen unterliegen (siehe Abbildung 3.36, unten). Die Simulationsergebnisse zeigen somit das Potenzial hinsichtlich einer konstruktiven Änderung in Form einer Abschrägung des Dopplers und der L-Profile (Verstärkungsstruktur) auf. In der Referenzbauweise wird ein Versagensindex von 0,5 nicht überschritten, was einem Reservefaktor von 2 entspricht. Dieser Sicherheitsfaktor wird für die in den folgenden Abschnitten ausgelegten Konzepte angestrebt.

3.4.2 Einsatz von FKV-Metall-Verbunden

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Verschleißeigenschaften von CFK durch lokale Belastungen bzw. zur Verbesserung der Anbindung an andere Komponenten liegt in der Kombination mit Metallen. Diese können lokale Lasten deutlich besser aufnehmen, als Faserverbunde, deren Eigenschaften in diesen Fällen stark von der Matrix dominiert sind. So lassen sich Kräfte besser aufnehmen und in die Faserverbundstrukturen einleiten. Zur Untersuchung der Möglichkeiten von FKV-Metall-Verbunden werden nachfolgend verschiedene Sichtweisen bzw. Detaillierungsgrade der Anforderungen untersucht. Zunächst erfolgt eine Untersuchung allgemeiner, generischer Lösungen für FKV-Metall-Verbunde. Anschließend werden spezifischere Lösungen für die Krafteinleitung und schließlich für den Anwendungsfall der Seilanbindung des Flügels untersucht. Abschließend erfolgt eine Untersuchung der Übertragbarkeit auf andere Bereiche des Flügels.

Im Rahmen der generischen Lösungen wurden grundlegende Kombinationsmöglichkeiten von Faserverbunden und Metallen untersucht und mit Literaturbeispielen verknüpft, die Anwendungen dieser Kombinationen zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit anwenden.

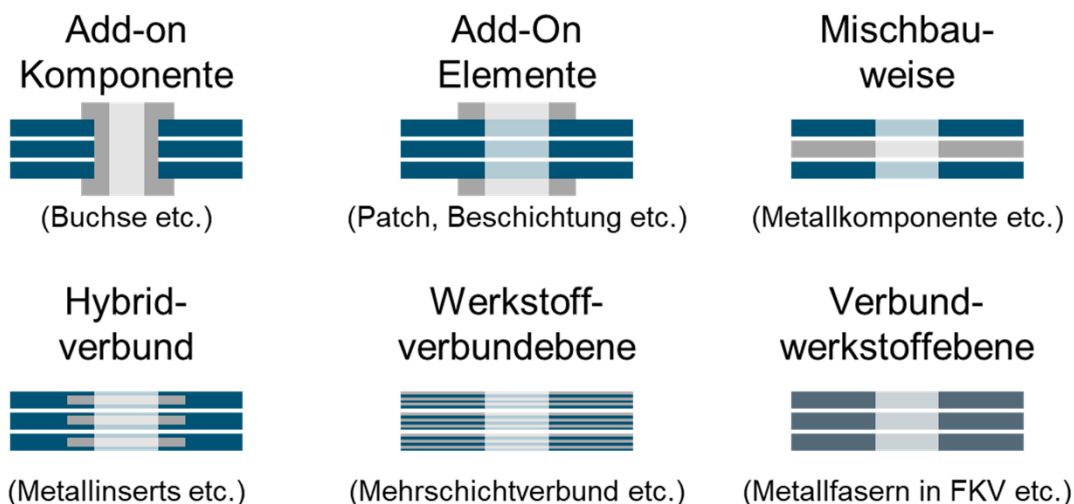


Abbildung 3.37: Grundansätze zur Verstärkung der Seilanbindung

Im Weiteren wird der Grundsatz der Mischbauweise auf die Seilanbindung angewandt. Dabei wird eine Materialsubstitution für den Doppler mit entsprechender Dimensionierung der Wandstärke vorgenommen, um äquivalente mechanische Eigenschaften (Steifigkeit, Festigkeit), wie das Referenzdesign zu realisieren und eine Vergleichbarkeit herzustellen. Die Mischbauweise wird im Kontext der Seilanbindung als vielversprechend eingestuft, da neben den bereits aufgeführten strukturmechanischen Vorzügen in Bezug auf die Festigkeit zusätzlich durch eine Substitution von CFK

durch metallische Werkstoffe die Recyclingquote erhöht werden kann und auf Materialien mit einem geringeren Material-Carbon-Footprint zurückgegriffen werden kann.

Es werden Varianten des Dopplers aus einem mittelfesten und einem hochfesten Stahl (X6CrNiMoTi17-12-2, X10CrNi18-8) sowie aus einer Aluminiumlegierung (AlSi1MgMn) mit mittleren mechanischen Eigenschaften untersucht. Zur Indikation des Versagens des Dopplers aus isotropem Werkstoff wird die von Mises-Spannung ins Verhältnis zur Streckgrenze des jeweiligen Werkstoffs gesetzt. Dieser Spannungsvergleich dient für die Vergleichsstudien als Versagenskriterium im elastischen Bereich, um plastisches Fließen zuverlässig auszuschließen. Da das Tsai-Wu-Kriterium ein First-Ply-Failure-Kriterium für anisotrope Faserverbundwerkstoffe darstellt und dort nur das initiale Lagenversagen beschreibt, wird für den isotropen Werkstoff ergänzend die von Mises-Spannung herangezogen, um eine werkstoffgerechte Bewertung zu ermöglichen. Aufgrund der hervorragenden spezifischen Eigenschaften von CFK (vgl. Abbildung 3.26) ist mit einer höheren Masse im Vergleich zur Referenzbauweise zu rechnen.

Die Auslegung der Varianten erfolgte unter Berücksichtigung sowohl der Steifigkeit als auch der Festigkeit. Es stellte sich jedoch die Festigkeit gegen plastisches Fließen als maßgebliche Auslegungsgrenze heraus. Die Substitution mit dem mittelfesten Stahl resultiert in einer signifikanten Massensteigerung um mehr als das Zehnfache. Hingegen erlaubt die Auslegung des Dopplers mit hochfestem Stahl eine Reduktion der Wandstärke um 25 % im Vergleich zur CFK-Referenz, führt jedoch zu einer Massensteigerung um den Faktor 4. Abbildung 3.38 zeigt exemplarisch den ermittelten Versagensindex für die Variante aus hochfestem Stahl. Die Skalenobergrenze entspricht dabei dem Maximalwert der Referenzbauweise aus CFK.

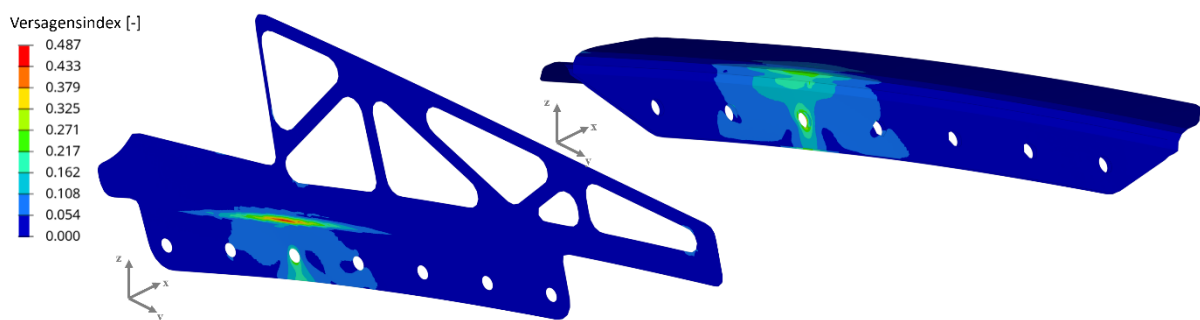


Abbildung 3.38: Ermittelter Versagensindex für den Doppler aus hochfestem Stahl (links) und der Verstärkungsstruktur (rechts) der Seilanbindung aus CFK

Bei dem Einsatz der Aluminiumlegierung ist hingegen eine Verdoppelung der Wandstärke erforderlich, um ähnliche mechanische Eigenschaften zu gewährleisten, was zu einer Erhöhung der Bauteilmasse um den Faktor 3,7 führt. Es kann festgehalten werden, dass die Mischbauweise grundsätzlich für die Seilanbindung geeignet ist. Durch die Substitution von CFK durch Stahl oder Aluminium ergibt sich ein Potenzial für ein verbessertes Eco-Design, insbesondere aufgrund der Recyclingfähigkeit der metallischen Werkstoffe.

3.4.3 Schräge Seilanbindung

Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Belastungen in der Seilanbindung liegt in der Anpassung an die Richtungen der Seilkräfte. Während aufgrund der zentralen Lage die Kräfte am Halteseil im Mittel senkrecht zu Flügel wirken, weisen die Kräfte der Steuerseile einen Winkel auf (vgl. Abbildung 3.39, oben). Durch die Zusammenführung der beiden Steuerseile je Seite sind die Kräfte an der äußeren

Seilanbindung nach innen und die der inneren Seilanbindung nach außen gerichtet. Aus den Definitionen der Seillasten (vgl. Abschnitt 3.4.1) ergeben sich die mittleren Winkel an der äußeren Seilanbindung zu $22,6^\circ$ und an der inneren Seilanbindung zu $24,0^\circ$. Aufgrund der höheren Kräfte werden nachfolgend die Ergebnisse einer schrägen Ausrichtung der äußeren Seilanbindung im Vergleich zur geraden Ausführung dargestellt. Abbildung 3.39 (unten) zeigt die Seilanbindung zusammen mit der angebundenen Rippe für eine schräge Ausführung im Vergleich zur geraden Ausführung. Wie die Ergebnisse der Simulation gezeigt haben, befinden sich die höchsten Spannungen im Bereich über der Anbindung des Seils, an dem es einen Übergang von der Anbindung des Dopplers an die L-Profile zur Anbindung des Dopplers an die Rippe gibt, an dem der Doppler keine Anbindung zu anderen Komponenten hat. Dies resultiert aus dem durch den Übergang vorliegenden Steifigkeitssprung. Durch eine Abwinkelung kann die Steifigkeit des Dopplers in diesem Bereich erhöht und somit der Steifigkeitssprung reduziert werden.

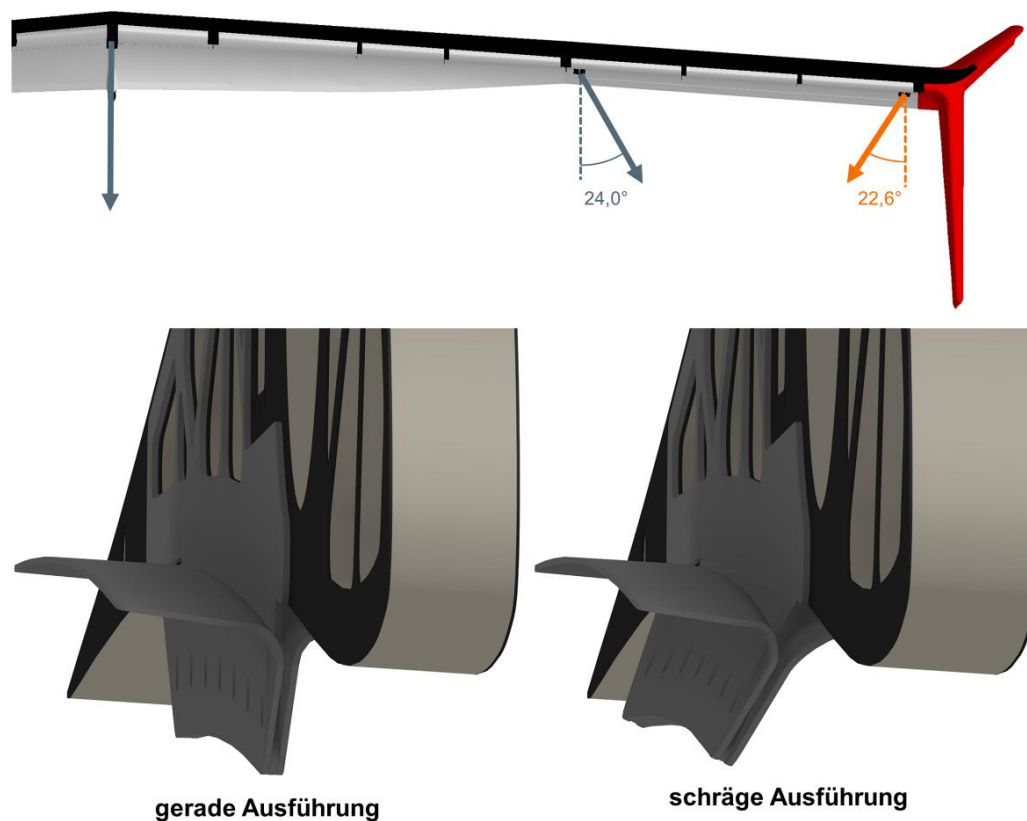


Abbildung 3.39: Vergleich der schrägen Seilanbindung

Die Auswertung der Simulationen (vgl. Abbildung 3.40) demonstrieren die Potenziale durch eine schräge Ausführung der Seilanbindung. Im Vergleich zu der Referenz konnten die maximal resultierenden Verschiebungen halbiert werden, was einem Steifigkeitsanstieg um den Faktor 2 entspricht. Ebenso ist eine deutlich geringere Belastung festzuhalten.

Die geometrischen Anpassungen führen zu einer Verbesserung der mechanischen Bauteileigenschaften. Dies ermöglicht bei der Materialsubstitution zusätzliche Masseeinsparungen durch reduzierte Wandstärken. Auch bei der Dimensionierung des überarbeiteten Designs stellte sich die Festigkeit erneut als maßgebliche Auslegungsgrenze heraus. Im Fall der Substitution mit dem mittelfesten Stahl können ähnliche strukturelle Eigenschaften mit einer Massenzunahme um den

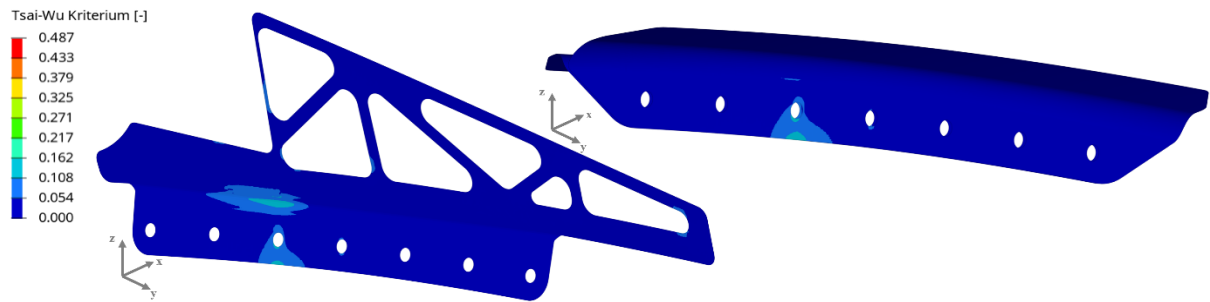


Abbildung 3.40: Simulationsergebnisse Doppler (links) und Verstärkungsstruktur (rechts) der abgewinkelten Seilanbindung aus CFK

Faktor 5,4 umgesetzt werden. Der Einsatz eines hochfesten Stahls ermöglicht eine deutliche Reduktion der Wandstärke gegenüber der Referenz, was sich in einem vergleichsweise moderaten Massenzuwachs um den Faktor 1,6 niederschlägt. Die Verwendung von Aluminium führt zu einer Masseerhöhung um den Faktor 1,5.

Durch den Einsatz von Metall ergibt sich im Vergleich zur Ausführung in CFK auch ein Vorteil in der Fertigung des Dopplers. Die Abwinkelung ist in diesem Fall nicht entlang der gekrümmten Unterschale des Flügels, sondern gerade ausgeführt. Dadurch lässt sich das Bauteil durch Ausstanzen aus einfachen Blechhalbzeugen mit anschließender Abkantung effizient herstellen. Die Untersuchungen zur Seilanbindung bestätigen somit die grundsätzliche Umsetzbarkeit der Mischbauweise mit einer teilweisen Substitution von CFK durch metallische Werkstoffe. Zudem zeigen sich positive Effekte auf die Nachhaltigkeit, insbesondere durch vereinfachte Fertigungsprozesse und eine verbesserte Recyclingfähigkeit.

3.4.4 Konzept einer Seilkraftmessung

Zur Exploration des Designraums für die Kraftmessung an der Seilanbindung wurden unterschiedliche Messsysteme betrachtet. Zu diesen zählten unter anderem:

- Kraftmessbolzen, der direkt in den Schäkel integriert wird und eine direkte Messung der axialen Seilkraft ermöglicht.
- Inline-Kraftmesszellen, die zwischen Seil und Schäkel positioniert werden, wodurch eine flexible und gut skalierbare Lösung für unterschiedliche Lastbereiche entsteht.
- Spezialisierte Messzellen, welche direkt an den Seilen befestigt werden und eine minimalinvasive Integration in bestehende Systeme erlauben.
- Mehrkomponenten-Kraftmesssysteme, die zusätzlich zu axialen Kräften Komponenten erfassen, um umfassendere Lastbilder und Belastungsszenarien abzudecken.

Die Auswahl des geeigneten Messsystems hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie Messgenauigkeit, Integrationsmöglichkeit, Robustheit und Wartungsaufwand. Ziel der Exploration war es, das bestmögliche Messkonzept für die spezifischen Anforderungen des Fluggeräts und der geplanten Betriebszenarien zu identifizieren

Ein Kraftmessbolzen, der direkt in den Schäkel integriert wird, ermöglicht eine sehr hohe Messgenauigkeit, da die Kraft unmittelbar entlang des Lastpfades gemessen wird. Die robuste

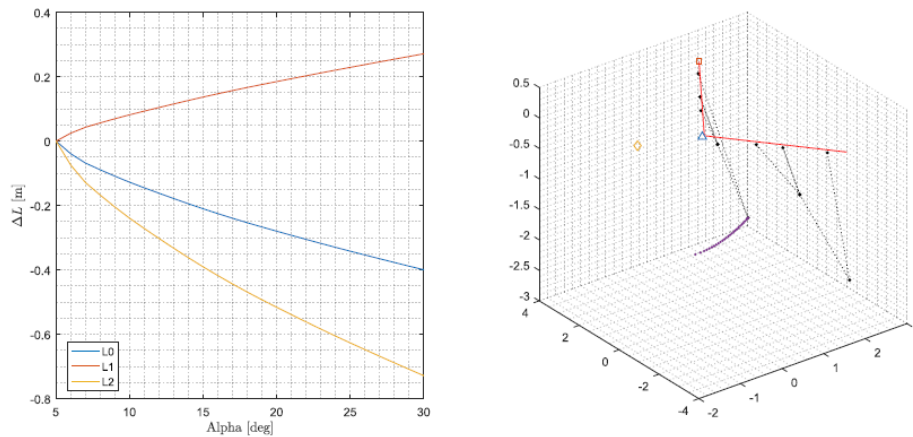


Abbildung 3.41: Darstellung der räumlichen Lage und Kräfte an der Seilanbindung für ausgewählte Flugzustände aus Simulationsergebnissen

Bauweise im Inneren des Schäkels schützt die Sensorik effektiv vor äußeren Einflüssen, wodurch dieses System äußerst zuverlässig ist. Allerdings gestaltet sich Wartung oder Kalibrierung aufgrund der tiefen Integration aufwändiger, was zu erhöhtem Arbeitsaufwand bei Servicearbeiten führt.

Inline-Kraftmesszellen, die zwischen Seil und Schäkel eingesetzt werden, bieten ebenfalls eine hohe Messgenauigkeit durch direkte Messung der axialen Kraft. Die modulare Integration erlaubt Flexibilität und einfache Anpassung an unterschiedliche Lastbereiche, bringt jedoch eine gewisse Exponiertheit gegenüber mechanischen und umweltbedingten Einflüssen mit sich. Zudem erhöht sich die Gesamtlänge der Verbindung zwischen Seil und Schäkel, was unter Umständen unerwünscht sein könnte.

Spezialisierte Messzellen, welche direkt an den Seilen angebracht werden, stellen einen minimalinvasiven Ansatz dar, der insbesondere bei bestehenden Systemen ohne umfangreiche bauliche Änderungen attraktiv ist. Jedoch bedingt die indirekte Messung eine potenzielle Verringerung der Messgenauigkeit, und die exponierte Positionierung am Seil macht die Sensoren anfälliger gegenüber äußeren Einflüssen wie Witterung und Vibrationen. Dies kann die Robustheit und langfristige Zuverlässigkeit beeinträchtigen.

Mehrkomponenten-Kraftmesssysteme ermöglichen die umfassendste Analyse, indem sie zusätzlich zu axialen Kräften auch Querkräfte und Momente erfassen. Dadurch entsteht ein detailliertes Lastbild, welches besonders bei komplexen Belastungsszenarien wertvoll ist. Jedoch erhöht der komplexere Aufbau sowohl den Wartungsaufwand als auch die Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Schäden und Umwelteinflüssen, was möglicherweise die langfristige Robustheit und Zuverlässigkeit reduziert.

Literatur

- [1] M. Pohl, „Flight testing a lamb wave based ice accretion sensor,“ *AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND*, 27 Juli 2024.
- [2] „HBK,“ HBK Hottinger Brüel & Kjaer, [Online]. Available: <https://www.hbm.com/de/7074/grundlagen-der-dehnungsmessstreifen/>. [Zugriff am 08 05 2025].
- [3] A. Ries, Thermo-mechanische Gradierung eigenverstärkter Polypropylen-Composite, Kassel: Kassel University Press, 2015.
- [4] Á. Kmetty, T. Bárány und J. Karger-Kocsis, „Self-reinforced polymeric materials: A review,“ *Progress in Polymer Science*, Bd. 35, p. 1288–1310, October 2010.
- [5] A. Özdemir und A. Önder, „An environmental life cycle comparison of various sandwich composite panels for railway passenger vehicle applications,“ *Environmental Science and Pollution Research*, Bd. 27, p. 45076–45094, August 2020.
- [6] P. R. Oliveira, M. May, T. H. Panzera und S. Hiermaier, „Bio-based/green sandwich structures: A review,“ *Thin-Walled Structures*, Bd. 177, p. 109426, August 2022.
- [7] C.-X. Liu, Z.-Y. Fu, P. Li und G. Qi, „Bending and environmental characteristics of an eco-friendly sandwich panel with cork stopper cores,“ *Developments in the Built Environment*, Bd. 15, p. 100206, October 2023.
- [8] T. R. Neu, K. Heim, W. Seeliger, P. H. Kamm und F. García-Moreno, „Aluminum Foam Sandwiches: A Lighter Future for Car Bodies,“ *JOM*, Bd. 76, p. 2619–2630, March 2024.
- [9] S. A. Simon, J. Hain und T. Osswald, „Effect of gas pressure on the microstructure of parts foamed with the novel microcellular injection molding technology Ku-Fizz™,“ *SPE Polymers*, Bd. 2, p. 311–324, May 2021.
- [10] A. Dashtkar, H. Hadavinia, M. N. Sahinkaya, N. A. Williams, S. Vahid, F. Ismail und M. Turner, „Rain erosion-resistant coatings for wind turbine blades: A review,“ *Polymers and Polymer Composites*, Bd. 27, p. 443–475, May 2019.
- [11] P. Mayana, A. V. Raviprakash, S. Mohamed Ali und R. Mohammed, „Erosion wear behavior of polymer based hybrid composites -A review,“ *Materials Today: Proceedings*, Bd. 77, p. 424–429, 2023.
- [12] H. T. N. Kuan, M. Y. Tan, Y. Shen und M. Y. Yahya, „Mechanical properties of particulate organic natural filler-reinforced polymer composite: A review,“ *Composites and Advanced Materials*, Bd. 30, January 2021.
- [13] A. Pegoretti, „Recycling concepts for short-fiber-reinforced and particle-filled thermoplastic composites: A review,“ *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Bd. 4, p. 93–104, April 2021.

- [14] J. Chen, J. Wang und A. Ni, „A review on rain erosion protection of wind turbine blades,“ *Journal of Coatings Technology and Research*, Bd. 16, p. 15–24, October 2018.
- [15] M. Grundwürmer, O. Nuyken, M. Meyer, J. Wehr und N. Schupp, „Sol–gel derived erosion protection coatings against damage caused by liquid impact,“ *Wear*, Bd. 263, p. 318–329, September 2007.
- [16] J. Min, J. Hu, C. Sun, H. Wan, P. Liao, H. Teng und J. Lin, „Fabrication processes of metal-fiber reinforced polymer hybrid components: a review,“ *Advanced Composites and Hybrid Materials*, Bd. 5, p. 651–678, January 2022.
- [17] T. Lindner, E. Saborowski, M. Scholze, B. Zillmann und T. Lampke, „Thermal Spray Coatings as an Adhesion Promoter in Metal/FRP Joints,“ *Metals*, Bd. 8, p. 769, September 2018.
- [18] R. Gonzalez, H. Ashrafizadeh, A. Lopera, P. Mertiny und A. McDonald, „A Review of Thermal Spray Metallization of Polymer-Based Structures,“ *Journal of Thermal Spray Technology*, Bd. 25, p. 897–919, May 2016.
- [19] C. Hopmann, P. Ochotta, M. Theunissen, S. Katmer, K. Bobzin, M. Öte, M. A. Knoch und X. Liao, „Production of plastics parts with partially or fully metallic surfaces using the in-mould-metal-spraying (IMMS),“ in *AIP Conference Proceedings*, 2017.

Anhang









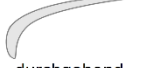













	Teillösung A		Teillösung B		Teillösung C		Teillösung D		Teillösung E	
Material	Faserverbunde		Kunststoffe				Metalle		Sortenreine WW/VW	
	FKV		Schaum		Kunststoff		Stahl	Aluminium	Werkstoff-	Verbund-
	Duroplast	Thermoplast	Extrusions-schaum	Partikel-schaum	Duroplast	Thermoplast			Sandwich	Faser-verbund
Fertigung	Pressen/ Umformen		Thermoformen		Pultrusion		Spritzguss		Rollprofilieren	
Membransteifigkeit	 Grundmaterial		 lokale Einleger		 lokale Patches					
Plattensteifigkeit	 Hohlprofil		 Sandwich		 Rippen		 Sicken		 Stützen	
Positionierung Verstärkung	 durchgehend		lokal linear				Bereich			
			 entlang Querschnitt		 entlang Profil					
Erosionsbeständigkeit	 Grundmaterial		Beschichtung				Verbund			
			 Folie		 Lackierung		 Metallschicht			
Elemente	 Einteilig		 Mehrteilig							
Fügen	 Intrinsisch		 Kleben							
Anbindung Flügel	 Kleben		 Schnellwechselsystem							

Abbildung C.1: Morphologischer Kasten "Vorflügel"

4 Flexible Ladesäule























Frank Schlegel , Tim Fröhlich, Lars Hemme, Kai Kraske, Joachim Schmidt

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202507110650-0>

Für die Umsetzung von Strategien zur Verbesserung der Zirkularität und Nachhaltigkeit von Produkten stehen unterschiedliche Maßnahmen zur Verfügung. Dabei entstehen auch unterschiedliche Änderungsbedarfe bzw. -tiefen an das Produkt. Ziel dieses Arbeitspakets ist die Untersuchung der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verbesserung der Zirkularität und Nachhaltigkeit unter zunehmender Änderung der Produktgestalt und -architektur. Hierfür werden exemplarisch Untersuchungen an dem Produkt *flexible Ladesäule* vorgenommen (vgl. Abschnitt 4.1). Auf Basis von Untersuchungen des Status Quo hinsichtlich Demontage- und Recyclingfähigkeit, Materialzusammensetzung sowie Umweltwirkung (vgl. Abschnitt 4.2) werden Verbesserungen unter Beibehaltung der aktuellen Bauweise und Materialzusammensetzung vorgenommen (vgl. Abschnitt 4.3). Im nächsten Schritt erfolgt die Änderung einzelner Materialien, die auch im Hinblick auf mögliche technische Verbesserungen untersucht wird (vgl. Abschnitt 4.4). Von besonderer Bedeutung ist hierbei der Einsatz von Kunststoffrezyklaten und biobasierten Materialien. Im letzten Schritt werden tiefgreifendere Änderungen der Produktarchitektur hinsichtlich der Auswirkungen auf Zirkularität und Nachhaltigkeit untersucht (vgl. Abschnitt 4.5).



Die Auswirkungen der für die Ladesäule untersuchten Maßnahmen werden anhand der nachfolgend in Abbildung 4.1 aufgeführten Kategorien dargestellt. Dabei werden maßgeblich die Auswirkungen der Maßnahmen auf die Zirkularität betrachtet. Dies erfolgt durch die Betrachtung der R-Strategien nach Kirchherr et al. [1] sowie spezifischeren Maßnahmen bzw. Effekten, wie der Demontagefähigkeit, der Reduzierung der Umweltwirkungen oder dem Einsatz von Rezyklat bzw. biobasierter Werkstoffe. Darüber hinaus werden auch weitere Aspekte, wie die Individualisierbarkeit oder technische Verbesserungen berücksichtigt. Zusätzlich wird zu den einzelnen Kriterien ein Gesamteinfluss angegeben. Verbesserungen, die sich lediglich auf einzelne Komponenten beschränken, wirken sich dabei weniger stark aus als solche, die das gesamte Produkt betreffen. Die Bewertung der einzelnen Aspekte findet nach jeder Maßnahme innerhalb dieses Kapitels auf einer Skala von 0 bis 5 statt. Die Bewertung wird dabei durch die zunehmende Grünfärbung des Bewertungskriteriums repräsentiert.

Gesamt	 Gesamteinfluss	Gesamteinfluss der Maßnahme auf das Produkt bezogen				
R-Strategien	 Refuse	Produkt unnötig machen oder durch ein radikal anderes Produkt umsetzen	 Rethink	Intensivierung des Produktnutzens	 Reduce	Reduzierung von Emissionen und Verbräuchen
	 Reuse	Direkte Wiederverwendung des Produkts oder einzelner Komponenten für den gleichen Einsatzzweck	 Repair	Reparieren von defekten Komponenten bzw. deren Austausch	 Refurbish	Wiederverwendung des Produkts oder einzelner Komponenten für den gleichen Einsatzzweck nach Aufbereitung
	 Remanufacturing	Nutzung von Teilen des Produkts zur Herstellung neuer Teile	 Repurpose	Verwendung des Produkts oder einzelner Komponenten für einen anderen Zweck	 Recycle	Recycling der eingesetzten Materialien
Maßnahmen/Effekte	 Rezyklat	Einsatzmöglichkeit von Rezyklat oder biobasierten Materialien	 Umweltwirkung	Verringerung der Umweltwirkungen	 Demontage	Verbesserung der Demontierbarkeit einzelner Komponenten
	 Austausch	Austauschbarkeit von Komponenten bspw. bei Defekt oder Upgrade	 Trennung	Bessere Trennbarkeit zu sortenreinen Materialien für Recycling	 Lebensdauer	Verlängerung der Lebensdauer
	 Modularisierung	Produktmodularisierung für bessere technische, wirtschaftliche und ökologische Produkteigenschaften	 Leichtbau	Reduzierung des Gesamtgewichts oder kritischer Komponenten	 Individualisierung	Verbesserung der Individualisierbarkeit
	 Technik	Technische Verbesserungen des Produkts, wie verbesserte Funktionalität	 Funktionserweit.	Integration neuer Funktionen	 Funktionstrennung	Trennung von Funktionen als Gegenentwurf zur Funktionsintegration

Bewertung

- 1 2 3 4 5

Abbildung 4.1: Kriterien zur Bewertung der Maßnahmen

4.1 Systemdarstellung

Bei der untersuchten flexiblen Ladesäule handelt es sich um eine Ladesäule mit integriertem Batteriespeicher. Die Ladesäule ist in Abbildung 4.2 samt relevanter Aspekte dargestellt. Neben der Möglichkeit einer netzunabhängigen Bereitstellung von Ladestrom bieten sich die Batterien insbesondere als Pufferspeicher an. Dabei wird die Ladesäule an das Niederspannungsnetz angeschlossen und lädt die internen Batterien. Aus dem Batteriespeicher kann so zyklisch ein Schnellladen von bis zu 150 kW ermöglicht werden (einseitiger Betrieb). Beim Laden an beiden Seiten können für die zweite Seite zusätzlich 100 kW zur Verfügung gestellt werden. Die Ladesäule besitzt ein Gesamtgewicht von ca. 2.650 kg und kann entweder mittels eines Staplers (unten) oder eines Krans (oben, seitlich) transportiert werden. Im Rahmen dieser Darstellung lässt sich die Ladesäule in die vier Bereiche *Gehäuse*, *Batterien*, *Elektrik/Elektronik* und *Kühlung* einteilen.

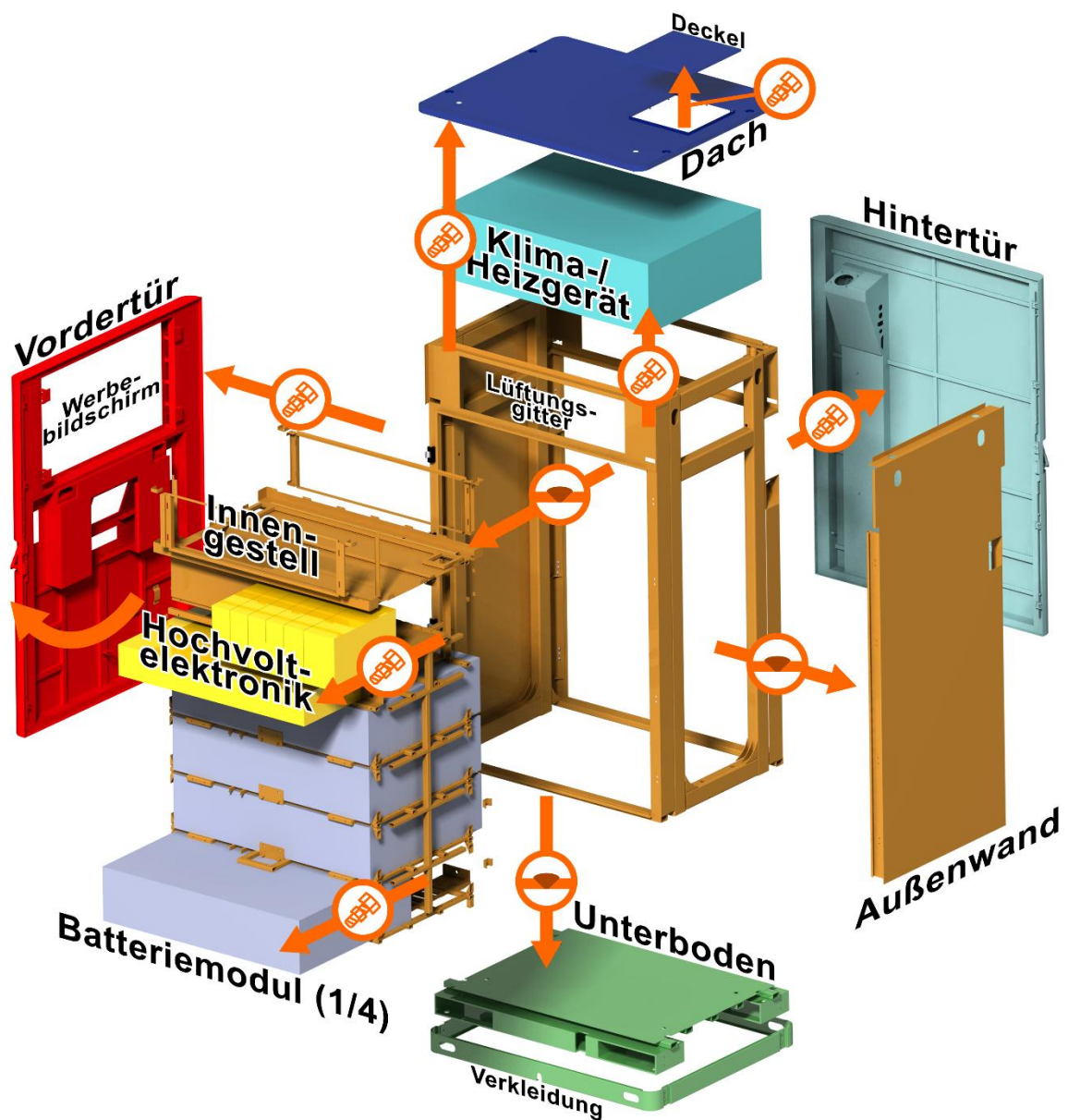


Abbildung 4.2: Aufbau und Komponenten der flexiblen Ladesäule

Das Gehäuse der Ladesäule besteht hauptsächlich aus einer Stahlschweißbaugruppe und verfügt vorne und hinten über eine Zugänglichkeit durch Türen sowie durch eine Klappe auf dem Dach. Zusätzlich lassen sich das Dach und der Boden mit den Stapleraufnahmen demontieren. Die beiden Seitenwände sind mit dem innenliegenden Gestell verschweißt. Das Gestell besteht aus verschweißten Profilen und dient zur Aufnahme und Leitung von Kräften sowie der Aufnahme der innenliegenden Komponenten. Im unteren Teil der Ladesäule sind die vier integrierten Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP-Batterien) untergebracht. Diese besitzen zusammen eine nutzbare Kapazität von 160 kWh und machen mit einem Gewicht von etwa 1.600 kg den Großteil des Gesamtgewichts der Ladesäule aus. Die Batteriepacks sind paarweise zu einer galvanischen Einheit verschaltet. Jedes Batteriepaar versorgt dabei eine Ladeseite mit der für das Schnellladen notwendigen Leistung.

Über den Batterien sind die Hochvoltelektronik (HV-Board) sowie diverse elektrische Komponenten, wie bspw. Wechselrichter, untergebracht. Im oberen Teil der Ladesäule befindet sich die Kühleinheit zur Kühlung der Batterien. Hierbei handelt es sich um eine Flüssigkühlung. Die Wärme wird mittels erzwungener Konvektion eines Luftstroms über Lüftungsgitter an der Vorder- und Hinterseite abgeleitet. Schnittstellen zum Nutzer der Ladesäule bestehen in den beiden Ladepistolen, dem Nutzerinterface in der Mitte der Vordertür, das ein kleines Touchdisplay zur Steuerung der Säule und einen Kartenleser für den Bezahlvorgang umfasst. Im oberen Teil der Tür ist ein Werbebildschirm untergebracht, der individuell bespielt werden kann. Zusätzlich zu den dargestellten Komponenten befinden sich zahlreiche weitere Komponenten in der Ladesäule, wie Leitungen für Kühlflüssigkeit, elektrische Leitungen oder Statusleuchten.

Die Ladesäule besitzt zahlreiche sicherheitskritische Anforderungen, bspw. hinsichtlich mechanischer Stabilität und Dichtigkeit. Die Umgebung muss bei Einwirken hoher mechanischer Lasten, wie bei einem Parkrempler oder Vandalismus, vor der Elektrizität im Inneren geschützt werden. Zudem muss zum Schutz der inneren Komponenten eine hinreichende Dichtigkeit gegenüber Feuchtigkeit und Staub bestehen. Somit müssen alle Öffnungen entsprechend abgedichtet sein. Die Lebensdauer der Ladesäule ist auf drei Jahre bzw. 126.000 kWh maximale Leistungsabgabe ausgelegt [2].

Zur Beurteilung der Umsetzbarkeit von Produktänderungen, wie bspw. eine Materialreduzierung oder ein Materialwechsel, ist eine Analyse der mechanischen Beanspruchungen der Ladesäule von entscheidender Bedeutung. Nachfolgend werden exemplarisch mögliche Belastungsfälle der Ladesäule und davon betroffene Komponenten erläutert. Der Transport der fertig montierten Ladesäule kann entweder über einen Stapler oder über einen Kran erfolgen. Die Staplerschnittstelle befindet sich am unteren Ende der Ladesäule in Form von Staplerschuhen. Dabei lastet das gesamte Gewicht der Ladesäule auf den vier Kontaktstellen zu den Staplergabeln. Da es sich hierbei maßgeblich um eine Druckbelastung handelt, kann die mechanische Belastung als weniger kritisch angesehen werden. Aufgrund des Kontakts mit den Staplergabeln und dadurch entstehenden Abrasionen und Kratzern bestehen jedoch besondere Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit des Materials der Staplerschuhe. Für einen Krantransport werden Haken an den dafür vorgesehenen Öffnungen außen am oberen Ende der Ladesäule befestigt. Somit lastet das Gesamtgewicht der Ladesäule an den vier Aufnahmepunkten. Diese Lasten müssen zudem innerhalb der Ladesäule durch entsprechend ausgelegte Profile verteilt werden. Zu den vorgesehenen und vorhersehbaren Lasten kommen zusätzliche Missbrauchslasten während des Betriebs der Ladesäule. Hierzu gehören bspw. hohe Punkt- und Flächenlasten auf dem Ladesäulendach durch Personen, die auf die Ladesäule klettern und dort herumspringen. Weiterhin müssen hohe seitliche Flächenlasten bspw. durch Parkrempler, die insbesondere durch das innenliegende Gestell aufgenommen werden müssen, sowie punktuelle Intrusionslasten bspw. durch Vandalismus, denen die Außenhaut standhalten muss, beachtet werden.

Die hohen elektrischen Spannungen im Inneren der Ladesäule erfordern eine zuverlässige Abschottung gegenüber der Außenwelt und stellen damit eine wesentliche Sicherheitsanforderung dar. Vor und während der Bearbeitung der nachfolgenden Inhalte wurden zahlreiche numerische Simulationen durchgeführt, um die Einhaltung der oben aufgeführten Belastungen zu überprüfen.

4.2 Status Quo

Für eine Ermittlung möglicher Ansatzpunkte für eine Optimierung hinsichtlich Zirkularität und weiterer Produkteigenschaften wurde zu Beginn der Status Quo der Ladesäule ermittelt. Basierend auf einer kompletten Demontage und Zerlegung der Ladesäule wurden die Demontagereihenfolge und -zeiten sowie die genaue Materialverteilung der Ladesäule ermittelt. Basierend auf den dabei ermittelten Daten wurden ein Recyclingkonzept erarbeitet und die Umweltwirkungen der Ladesäule ermittelt. Zudem wurde vorbereitend auf die Änderungen in den weiterführenden Arbeitspaketen eine genaue Analyse der Produktarchitektur und der mechanischen Eigenschaften der strukturellen Teile der Ladesäule durchgeführt.

4.2.1 Demontage und Zerlegung mit Ergebnissen

Zur Ermittlung der recyclingspezifischen Eigenschaften eines Produktes (in diesem Fall einer mobilen Ladesäule der Fa. ELLI) kann eine Demontage- und Zerlegeanalyse durchgeführt werden. Unter Demontage ist dabei die zerstörungsfreie Auflösung eines Produktes an den in der Montage geschaffenen Verbindungsstellen (lösbaren Verbindungen wie Formschluss, Kraftschluss, Reibschluss) zu verstehen. Unter Zerlegung hingegen ist die Auflösung eines Produktes an Trenn- und Bruchstellen gemeint, die nicht mit den während der Fertigung und Montage geschaffenen Verbindungsstellen identisch sein müssen.

Aus der Analyse der Referenzanlage lassen sich produktspezifische Daten gewinnen, die zur Beurteilung der Recyclingfähigkeit des Produktes oder Teilen des Produktes relevant sind. Hierzu gehören

- verwendete Werkstoffe,
- Werkstoffspezifikation (z. B. Guss- oder Knetlegierung, Faser- oder Teilchenverstärkung),
- Werkstoffmasse,
- Werkstoffidentifikation (normgerechte Werkstoffkennzeichnung),
- Schad- und Störstoffpotenzial (z. B. Bleigehalt in Platinen und Lötunkten, unerwünschte Anhaftungen, Betriebsflüssigkeiten wie Kältemittel und Kühlmittel der Klimaanlage),
- Demontagezeit,
- Demontageschritte,
- Verbindungstechnik,
- Demontagewerkzeuge und notwendige Werkzeugwechsel.

Dabei ist es hilfreich, die Demontage und Zerlegung mit Foto- und ggf. Videomaterial zu dokumentieren.

Aus den gewonnenen Primärdaten lassen sich Rückschlüsse auf die Komplexität der Referenzanlage schließen und relevante recyclingspezifische Kenngrößen wie

- Baustruktur,
- Auffälligkeiten bei der Demontage,
- Potenzial wiederverwendbarer Bauteile,
- Potenzial wiederverwertbarer Bauteile,
- Komplexität der Materialverteilung,
- Recycling- und Verwertungsquoten,
- Aufbereitungs- und Verwertungskonzept,
- Recyclingrouten für Werkstoffe und
- Verbesserungspotenziale

ermitteln.

Bei der Demontage und Zerlegung werden Zeiten zur Kosten- bzw. Aufwandsabschätzung erfasst. Diese Zeiten werden analog einer REFA-Zeitaufnahme ermittelt. Hierbei gibt es unterschiedliche Tätigkeitszeiten, die sich durch Summierung aller relevanten Zeitarten ergeben:

- **Grundzeit mit Unterteilung nach Tätigkeits- und Wartezeit.**
Haupttätigkeitszeit für die Entnahme des zu demontierenden Bauteiles
- **Erholungszeit**
Zeit für das arbeitsbedingte Erholen des Menschen. Sie ist abhängig von Art und Dauer der Belastung (betrieblich geregelt)
- **Verteilzeit**
Zeit zur Erfassung und Abbildung der Struktur des Betriebes (z.B. Einlagerungszeit, verwaltungstechnische Aufgaben, unplanmäßige Abläufe / Störungen, Rüstzeiten, auftragsunabhängige Arbeitsabläufe)

Im Rahmen der Untersuchungen innerhalb dieses Projekts wurden ausschließlich die Grundzeiten (Haupttätigkeitszeiten) ermittelt. Somit ist gewährleistet, dass die ermittelten Zeiten betriebsunabhängig sind. Durch betriebsbedingte Nebentätigkeitszeiten (Verteilzeiten) können die ermittelten Haupttätigkeitszeiten auf jegliche Betriebsform umgerechnet werden.

Als Vorbehandlung werden die notwendigen Prozesse vor der eigentlichen Demontage verstanden. Dazu gehört die Freischaltung der Hochvoltbatterien sowie die Entnahme von Kälte- und Kühlmittel aus dem Klima-/Heizgerät (Trockenlegung). In der nachfolgenden Tabelle 4.1 sind die Haupttätigkeitszeiten sowie die demontierten Massen dargestellt. Die Haupttätigkeitszeit ist hier die Zeit zwischen Demontagebeginn und Ablegen des demontierten Bauteils. Die Trockenlegungszeit ist analog die Zeit für den Absaugprozess der Betriebsflüssigkeiten (Kälte- und Kühlmittel) bis zum größten möglichen Trockenlegungsgrad. Die Ladesäule kann mit einer Gesamtmasse von 2.575 kg in 5,7 Stunden demontiert werden.

Tabelle 4.1: Demontagezeiten und -massen

Art	Haupttätigkeitszeit	Masse
HV Freischaltung	35 min	-
Trockenlegung	30 min	12 kg
Demontage Batterien	44 min	1.545 kg
Demontage Ladesäule	233 min	390,5 kg
Gehäuse Ladesäule	-	627,5 kg
Gesamt	342 min = 5,7 h	2575 kg

In der nächsten Tabelle 4.2 sind die entnommenen Mengen an Kälte- und Kühlmittel, die im flüssigkeitstragenden Bauteil verbleiben, sowie der resultierende Trockenlegungsgrad dargestellt. Flüssigkeiten verbleiben immer konstruktiv oder physikalisch bedingt in den flüssigkeitstragenden Bauteilen. Als eine konstruktive Lösung gilt, dass die Ablassvorrichtungen immer an der tiefsten Stelle des Bauteils angebracht werden sollten.

Tabelle 4.2: Flüssigkeiten Klima-Heizgerät und Trockenlegungsgrad

Medium	Entnommene Menge	Verbleibende Menge	Trockenlegungsgrad
Kältemittel	800 g	50 g	94,1 %
Kühlmittel	11150 g	1575 g	87,6 %
Gesamt	11950 g	1625 g	88,0 %

Zur Demontage ist in der Regel das Lösen von Verbindungsmitteln bzw. Hilfsfügeteilen notwendig. Eine große Anzahl an Verbindungselementen und eine große Verbindungsvielfalt erfordern dabei viele Werkzeuge und Werkzeugwechsel, die einen Demontageprozess verkomplizieren und somit möglicherweise unwirtschaftlich werden lassen. In Tabelle 4.3 sind die Verbindungselemente und deren Vielfalt zusammengefasst. Danach müssen bei der Demontage der Ladesäule 760 Verbindungselemente gelöst werden. Eine Diskussion zu den Verbindungselementen der Ladesäule erfolgt in Abschnitt 4.3.1.

Tabelle 4.3: Verbindungselemente im Demontageprozess

Verbindung	Anzahl	Verbindung	Anzahl	Verbindung	Anzahl
Abdeckungen	6	ISK 6	1	SKM 34	2
Dichtung	20	Isolatoren (zusammengefügt)	4	SKM 6	8
geclipst	4	Kabelbinder	34	SKM 7	12
geschraubt	2	Klemmschellen	2	SKM 8	18
gesteckt	12	Kreuzschlitz	36	SKS 10	4
Halteplatte	9	RJ45	4	SKS 13	5
Halter	38	Schlauchklemme	4	Sprengring	12

Halteschienen	4	Schnellverschluss	28	Stecker	78
Hülsen	4	Schrauben	2	TX 10	8
ISK 2	13	Schraubklammern	4	TX m. Zapfen	16
ISK 2.5	108	Sicherungshalter	2	U-Scheiben	44
ISK 3	83	SKM	5	Verriegelt	12
ISK 4	27	SKM 13	12		
ISK 5	68	SKM 32	5	Gesamt	760

Für ein komplexes Produkt wie die flexible Ladesäule ist die Demontage in Subsysteme vorteilhaft. Mit Subsystemen sind Zusammenbauteile (ZSB), gemischte Teile (GT) und reine Endteile (RT) zu verstehen. Zusammenbauteile sind dabei Bauteilverbunde, die im Allgemeinen durch eine weitere Demontage in gemischte Teile oder reine Endteile separiert werden können. Gemischte Teile sind Werkstoffverbindungen oder Verbundwerkstoffe, die mithilfe einer (zerstörenden) Zerlegung separiert werden müssen. Reine Endteile hingegen sind homogene Werkstoffe, für die keine weiteren Trennoperationen notwendig sind.

Abbildung 4.3: Ausschnitt aus einem Demontagefließbild zeigt exemplarisch die Subsysteme in einem Demontagefließbild, das auch als Demontagevorranggraph bekannt ist. Jedes Bauteil wird dabei durch ein Kästchen symbolisiert, aus dem man das Subsystem (ZSB, GT, RT), die Demontagezeit und die Bauteilmasse entnehmen kann. Zusätzlich werden auch nicht wertschöpfende Arbeitsschritte (AS) dargestellt (z. B. Öffnen der vorderen Tür) und deren Zeit erfasst.

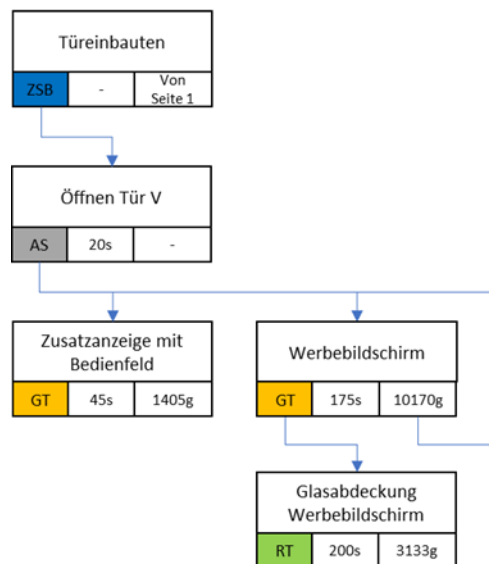


Abbildung 4.3: Ausschnitt aus einem Demontagefließbild

Aus der Erfassung der genannten Primärdaten lässt sich das Demontagefließbild der Ladesäule als abstraktes Abbild darstellen. Zur Übersicht ist die gesamte Ladesäule im Anhang in drei Teilsystemen aufgeteilt (vgl. Abbildung D.1 bis Abbildung D.3). Bauteile in einer Demontageebene sind unabhängig voneinander demontierbar, senkrecht mit Verbindungspfeilen angeordnete Bauteile haben eine Zwangsreihenfolge. Eine Diskussion zur Baustruktur der Ladesäule erfolgt in Abschnitt 4.3.

Hohe Modulgewichte sowie komplizierte Demontage- und Entnahmeoperationen stellen im Rahmen der Demontage potenzielle Herausforderungen dar. Nachfolgend sind drei Herausforderungen bei der Demontage der Ladesäule aufgeführt.

- **Gehäusedach (Hardtop):** Das Bauteil hat eine Masse von 25 kg und befindet sich in relativ großer Höhe. Die Abdeckung ist mit vier Muttern gut lösbar, muss jedoch aus Gewindestangen gehoben werden. Dazu werden zwei Arbeitsbühnen/-leitern, drei Demontagekräfte sowie ein Gabelstapler benötigt. Alternativ sollte aus Arbeitsschutzgründen eine geeignete Hebevorrichtung eingesetzt werden. Die Demontage des Hardtops ist für die Demontage der Klimaanlage notwendig.
- **Klimaanlage:** Das Bauteil hat eine Masse von 77,5 kg und befindet sich ebenfalls in relativ großer Höhe. Die Befestigung mit Schrauben ist gut lösbar, die Klimaanlage muss jedoch in der verbauten Höhe aus dem Ladesäulengehäuse gehoben werden. Dazu werden zwei Arbeitsbühnen/-leitern, drei Demontagekräfte sowie ein Gabelstapler benötigt. Alternativ sollte aus Arbeitsschutzgründen auch hier eine geeignete Hebevorrichtung eingesetzt werden. Das Heiz- und Klimagerät besitzt eine asymmetrische Gewichtsverteilung. Zur Entnahme müssen zwei Demontagekräfte das Bauteil aus dem Gehäuse herausführen, damit es sich nicht verkantet.
- **Hauptplatine:** Das Bauteil hat eine Masse von 54,5 kg und befindet sich in einem Einschub der Ladesäule. Im Gegensatz zu den Batterien, die rollengelagert sind, ist dieses Modul auf dem Rahmen eingeschoben. Zur Demontage werden mindestens drei Demontagekräfte und ein Gabelstapler benötigt. Alternativ sollte aus Arbeitsschutzgründen eine geeignete Hebevorrichtung zur Entnahme der Hauptplatine eingesetzt werden. Ein weiteres Problem sind die beiden „Herausfallsicherungen“ an den Seiten im hinteren Bereich. Die Verschraubung ist schwer einsehbar und stark eingeschränkt erreichbar. Diese Sicherungen müssen demontiert werden, bevor das Bauteil nach vorn herausgezogen werden kann. Wenn das gesamte Bauteil ersetzt werden muss, ist eine fast vollständige Demontage der Ladesäule notwendig.

4.2.2 Zerlegeanalyse

Am Ende der Demontage liegt eine Situation vor, wie sie in der Massenverteilung der Ladesäule in Abbildung 4.4 (links) dargestellt ist. Gemischte Ausbauteile (Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbindungen), die 15% der Gesamtmasse der Ladesäule ausmachen, wurden im Rahmen der Demontage demontiert, aber nicht weiter analysiert.

Zur Vervollständigung der Ergebnisse wurden alle gemischten Teile bei der FIT-Umwelttechnik GmbH händisch zerlegt, werkstofflich analysiert und in die Materialdatenbank der Ladesäule eingegeben (vgl. Abbildung 4.4, rechts). Nicht gekennzeichnete Kunststoffteile wurden dabei mithilfe der Infrarotspektroskopie analysiert. Im Verlauf der Zerlegung wurden auch die Verbindungselemente aufgenommen, um einen vollständigen Überblick über die Produktarchitektur zu bekommen. Die Lösbarkeit von Verbindungen ist allerdings nur für die Wiederverwendung von Bauteilen relevant. In der Verwertungspraxis ist die Kenntnis über die Verbindungselemente von gemischten Teilen nicht relevant, weil dort eine mechanische Zerkleinerung mit nachfolgenden Trennprozessen erfolgt. Ziel ist dabei die Rückgewinnung verwertbarer Materialien. Wie Tabelle 4.4 zu entnehmen, ist der Anteil an lösbaren Verbindungen sehr groß. Die diversen Schraubverbindungen sorgen dafür, dass z. B. die stromführenden Bauteile wie Schütze, Wandler, Sicherungsautomaten und Stromschienen sicher verbaut sind.

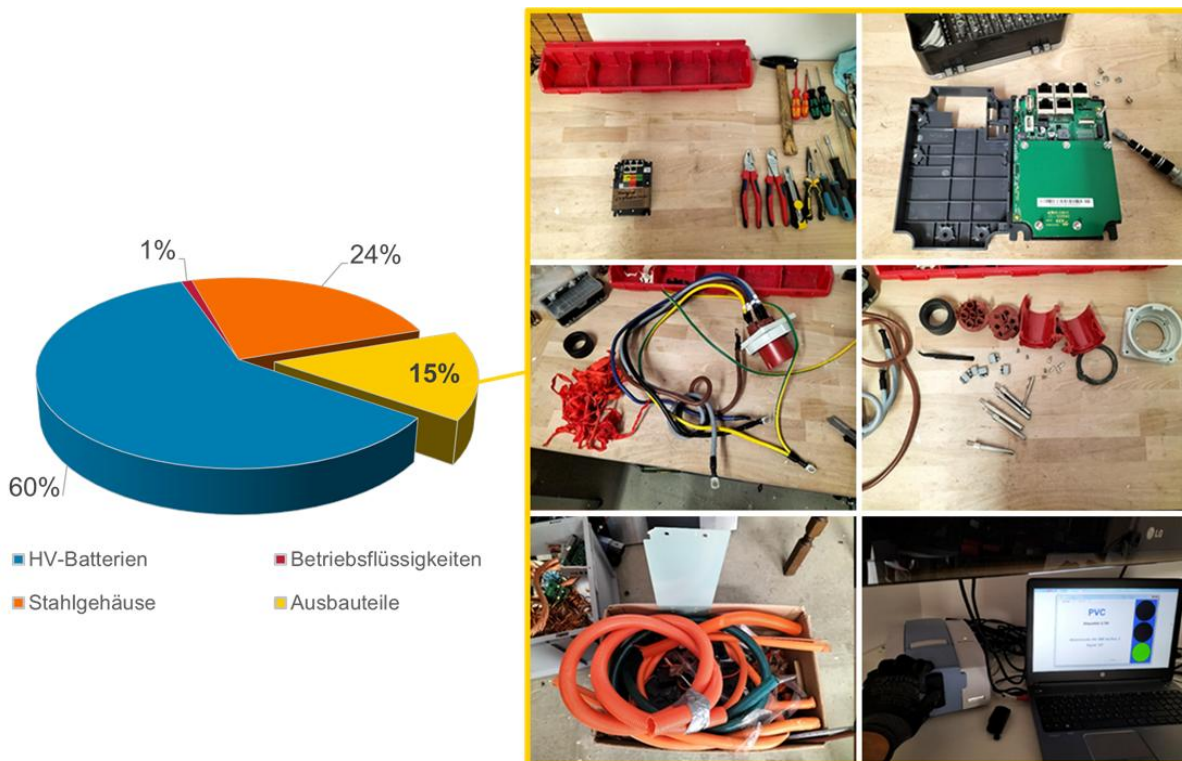


Abbildung 4.4: Massenverteilung der Ladesäule aus der Demontageuntersuchung (links) und Zerlegung und Analyse gemischter Teile (rechts)

Tabelle 4.4: Verbindungselemente aus der Weiterzerlegung der Teile

Verbindung	Anzahl	Verbindung	Anzahl	Verbindung	Anzahl
Abdeckung	5	ISK 4	66	Stecker	78
Blenden	5	ISK 5	68	Stopfen	1
Clip	40	ISK 6	8	Unterlegscheiben	28
Dämpfer	2	Kabelbinder	92	U-Scheiben	72
Dichtung	17	Klebeband	4	SKS 10	95
eingehakt	12	Kreuzschlitz	101	Klemmschellen	2
geklemmt	34	Schlauchklemme	11	TX 27	8
geschraubt	39	Schlitz	10	Hülse	8
gesteckt	67	Schlitzschraube	14	Klammer	3
Halteplatte	2	SKM 10	65	geklebt	3
Halter	7	SKM 13	43	SKM 22	4
ISK 2	8	SKM 5	8		
ISK 2.5	159	SKM 6	28		
ISK 3	52	SKS 13	11	Gesamt	1260

4.2.3 Werkstoffverteilung

In der Automobilindustrie ist es üblich, die Materialverteilung eines Fahrzeugs nach einer Empfehlung des Verbandes der Deutschen Automobilindustrie (VDA 231-106 [3]) anzugeben. Dadurch sind Fahrzeuge verschiedener Hersteller und verschiedener Klassen bezüglich ihrer Werkstoffe miteinander vergleichbar. Nach der VDA 231-106 gibt es neun Werkstoff-Hauptgruppen:

- **Hauptgruppe 1:** Stahl- und Eisenwerkstoffe (Stähle, Stahlguss, Sinterstahl, Gusseisen)
- **Hauptgruppe 2:** Leichtmetalle, Guss- und Knetlegierungen (Aluminium, Magnesium, Titan)
- **Hauptgruppe 3:** Buntmetalle, Guss- und Knetlegierungen (Kupfer und Kupferlegierungen, Zink, Nickel, Blei)
- **Hauptgruppe 4:** Sondermetalle (Platin, Rhodium, sonstige)
- **Hauptgruppe 5:** Polymerwerkstoffe (Thermoplaste, Elastomere, Duroplaste)
- **Hauptgruppe 6:** Prozesspolymere (Lacke, Kleber, Dichtstoffe, Unterbodenschutz)
- **Hauptgruppe 7:** Sonstige Werkstoffe/Werkstoffverbunde (modifizierte organische Naturwerkstoffe, MON (Leder, Holz, Pappe, Baumwollvlies), Keramik, Glas, Sonstige)
- **Hauptgruppe 8:** Elektrische und elektronische Komponenten
- **Hauptgruppe 9:** Betriebsstoffe und Hilfsmittel (Kraftstoffe, Öle, Säuren etc.)

In der Hauptgruppe 8 „Elektrische und elektronische Komponenten“ finden sich diverse metallische, halbleitende und nichtmetallische Werkstoffe im Milli- und Mikrogrammbereich wieder. Darum ist es sinnvoll, diese Bauteile als Werkstoffgruppe zusammenzufassen.

Abbildung 4.5 stellt die Materialverteilung der Ladesäule nach der VDA 231-106 dar, wobei die Hauptgruppen 4 und 6 nicht betrachtet werden. Prozesspolymere wie Lacke, Kleber und Dichtstoffe werden bei der Demontage- und Zerlegeanalyse in die anderen Werkstoffgruppen verschleppt.

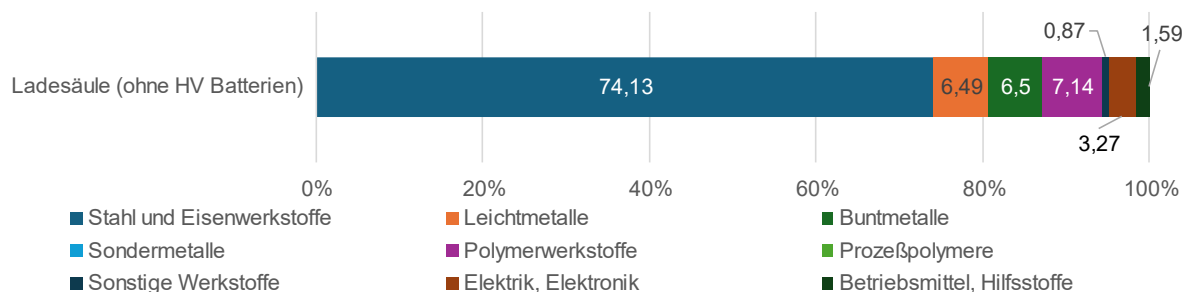


Abbildung 4.5: Werkstoffverteilung der Ladesäule nach VDA 231-106 in Prozentwerten (ohne Batterien)

Die Werkstoffverteilung der Lithium-Eisenphosphat-Batterien wird gesondert betrachtet. Idealerweise werden die Batterien einer Wiederverwendung (2nd use) oder einer Weiterverwendung (2nd life) als Energiespeicher für nichtautomobile Anwendungen zugeführt. In der Verwertungspraxis werden die Batterien in jedem Fall aus der Ladesäule ausgebaut und einer separaten pyrometallurgischen und hydrometallurgischen Verwertung zugeführt. Hierauf wird nachfolgend und in Abschnitt 4.2.5 eingegangen.

Wie zu erwarten, dominieren die Stahlwerkstoffe. Bezogen auf die Gesamtmasse der Ladesäule (ohne Batterien) sind das 74,1 % der Werkstoffmasse. Es folgt Aluminium und die Buntmetalle mit jeweils 6,5 %, wobei allein das Kupfer aus Stromleitern mit 5,9 % in dieser Werkstoffgruppe vertreten ist. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 4.6 gesondert dargestellt. Wie in Abschnitt 1.2.3 dargestellt, existieren für alle genannten Werkstoffe etablierte Recyclingrouten.

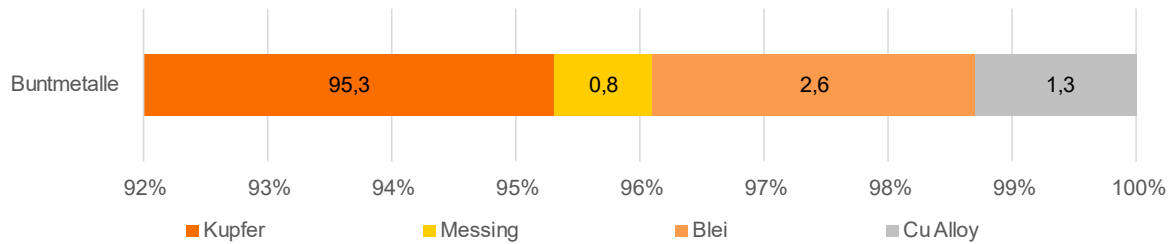


Abbildung 4.6: Werkstoffverteilung in der Hauptgruppe 3 (Buntmetalle)

In der Hauptgruppe 5 dominieren die thermoplastischen Werkstoffe Polycarbonat PC, Polyamid PA und Polyvinylchlorid PVC mit großem Abstand (vgl. Abbildung 4.7). Insbesondere PC sowie die Modifikation PC + ABS aus der Abdeckung des Werbebildschirms und den Lüftungsgittern sind als massereiche Bauteile für eine stoffliche Verwertung interessant.

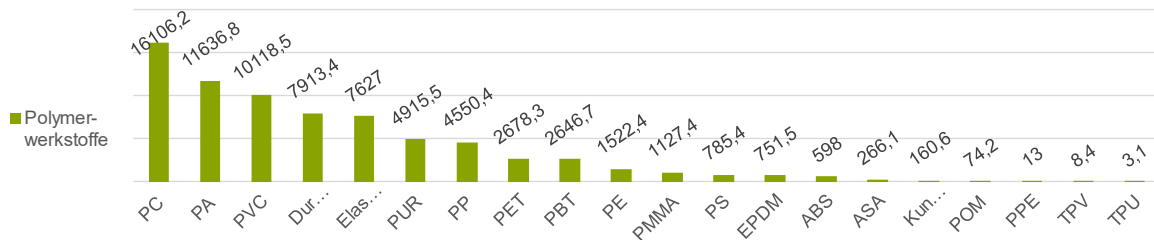


Abbildung 4.7: Verteilung der Polymerwerkstoffe in der Ladesäule

Hervorzuheben ist auch die große Anzahl unterschiedlicher Polyamid-Werkstoffe mit und ohne Glasfaserverstärkung. In der Ladesäule befinden sich 15 verschiedene Modifikationen, die zudem in kleinen Massen über die gesamte Ladesäule verstreut sind.

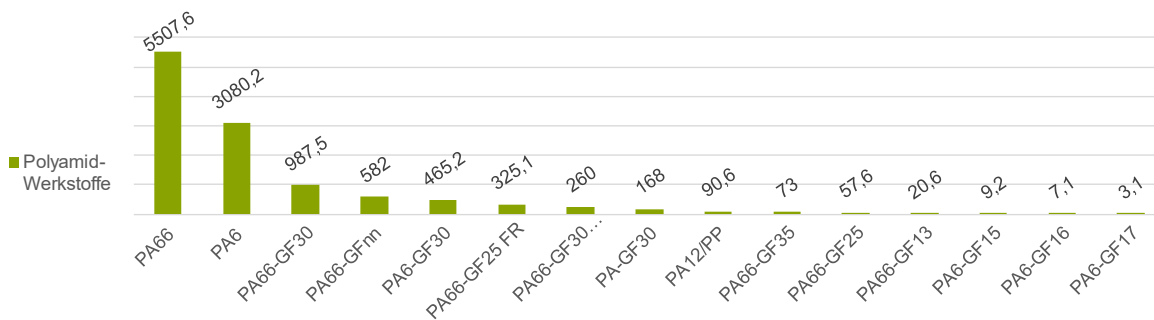


Abbildung 4.8: Polyamid Werkstoffe in der Ladesäule

In der Hauptgruppe 7, *Sonstige Werkstoffe und Werkstoffverbunde*, dominieren Silikon (51,8 %), oxidische Keramik (25,5 %) und Ferrit (11,5 %). Diese Werkstoffe besitzen infolge der geringen Massen wenig Relevanz für eine stoffliche Verwertung.

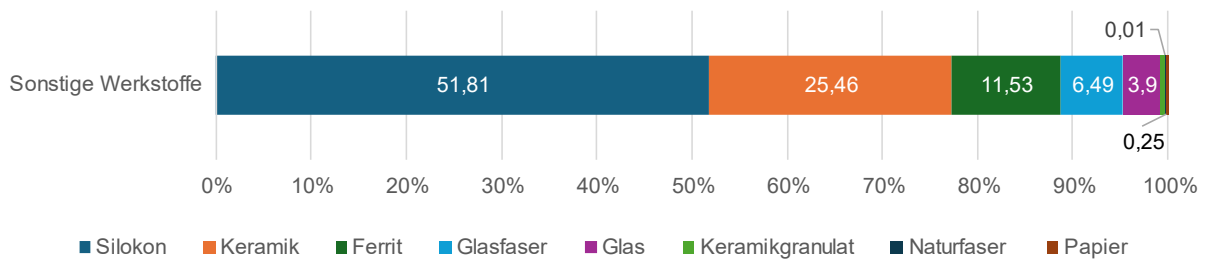


Abbildung 4.9: Werkstoffverteilung der Hauptgruppe 7

Schließlich sei noch die Hauptgruppe 9, Betriebsstoffe und Hilfsmittel, genannt. Für diese sehr inhomogene Gruppe existieren teilweise Recyclingrouten. Beispielsweise wird die Schwefelsäure aus der verbauten Bleibatterie mithilfe von Natronlauge zu Natriumsulfat neutralisiert, welches in verschiedenen Industriezweigen als wichtiger Rohstoff eingesetzt wird.

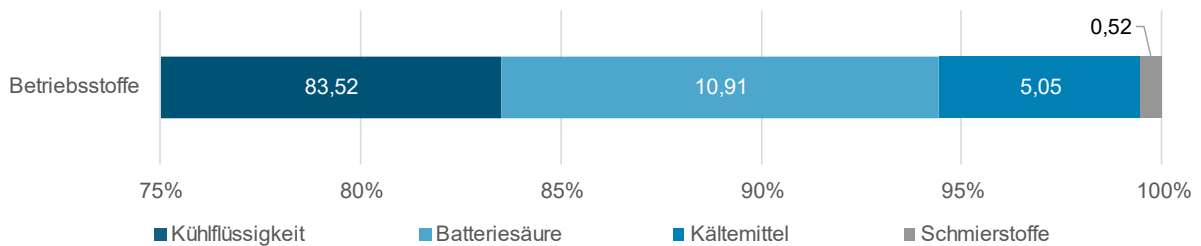


Abbildung 4.10: Werkstoffverteilung der Hauptgruppe 9

Analog zur Materialverteilung nach VDA 231-106 wird in der Automobilindustrie für die Typprüfung Recycling auch eine Materialverteilung nach DIN ISO 22628 [4] genutzt. Sinn der Verteilung ist es, über die DIN ISO-Norm einen standardisierten Prozess zu haben, mit dem man die theoretische Recycling- und Verwertungsquote eines Automobils (85 % / 95 %) bei der behördlichen Typzulassung nachweisen kann.

Nach der Norm DIN ISO 22628 kann ein Produkt in 7 Werkstoffgruppen eingeteilt werden:

- Werkstoffgruppe 1: Metalle (Stahl und Eisen, Leicht-, Bunt- und Sondermetalle)
- Werkstoffgruppe 2: Polymere (ohne Elastomere)
- Werkstoffgruppe 3: Elastomere
- Werkstoffgruppe 4: Glas (inkl. Keramik)
- Werkstoffgruppe 5: Flüssigkeiten
- Werkstoffgruppe 6: Nachwachsende Rohstoffe (MON)
- Werkstoffgruppe 7: Sonstige

Abbildung 4.11 zeigt die Materialverteilung der Ladesäule ohne Batterien nach obiger Werkstoffgruppen-Zuordnung. Die Diskussion der Verteilung liefert keinen Mehrwert hinsichtlich der Materialeigenschaften der Ladesäule und soll darum nicht weiterverfolgt werden.

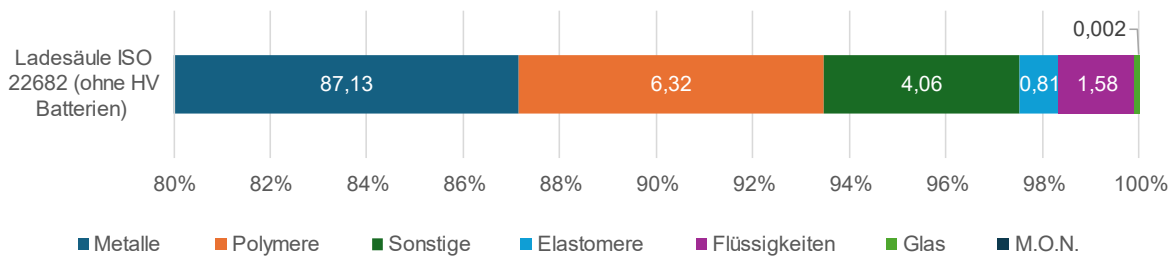


Abbildung 4.11: Werkstoffverteilung der Ladesäule nach DIN ISO 22628 (ohne Batterien)

Wenn die Lithium-Ionen-Batterien in die Betrachtungen einbezogen werden, ergibt sich die in nachstehender Abbildung 4.12 dargestellte Materialverteilung. Auf die Werkstoffe der Batterien wird im weiteren Verlauf dieses Abschnitts gesondert eingegangen. In dem großen Anteil sonstiger Werkstoffe dieser Abbildung befindet sich insbesondere das Lithium-Eisenphosphat der Kathode sowie der Elektrolyt.

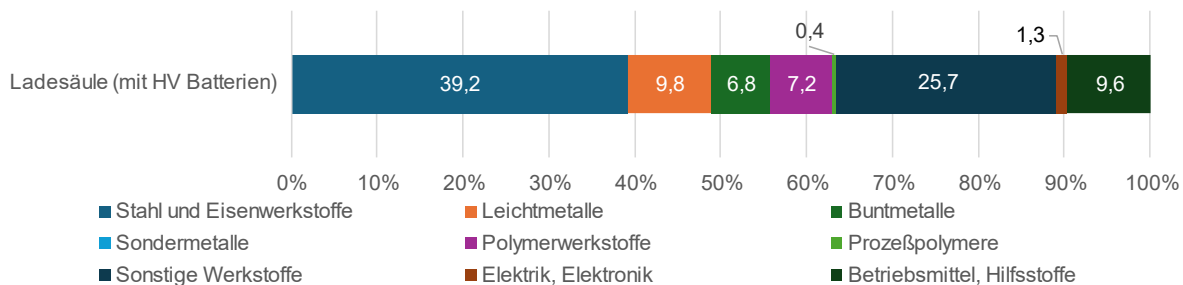


Abbildung 4.12: Werkstoffverteilung der Ladesäule nach VDA 231-106 (mit Batterien)

4.2.4 Quotenberechnung

Um in einem ersten Schritt die Recyclingfähigkeit eines Produktes beurteilen zu können, kann eine Quotenbetrachtung durchgeführt werden. Dabei ist die Recyclingquote (Recycability rate) R_{cyc} per Definition die Summe aus wiederverwendbaren Bauteilen und stofflich verwertbaren Materialien, bezogen auf die Gesamtmasse des Produktes:

$$R_{cyc} = \frac{m_{Verwendung} + m_{Verwertung}}{m_{Produkt}}$$

Die Verwertungsquote (Recoveryability rate) R_{cov} berücksichtigt die thermische Verwertung von z. B. Polymerwerkstoffen aus dem Produkt und wird damit wie folgt definiert:

$$R_{cov} = \frac{m_{Verwendung} + m_{Verwertung} + m_{Thermisch}}{m_{Produkt}}$$

Bei jedem Produkt bleiben definierte oder undefinierte Reststoffe übrig, die keinem Recyclingprozess oder thermischen Behandlungsprozess zugeführt werden können. Entsprechend definiert man die Beseitigungsquote $R_{disposal}$:

$$R_{disposal} = \frac{m_{Reststoffe}}{m_{Produkt}}$$

Ein Automobil muss per Gesetz (Europäische End of Life vehicle-directive bzw. bundesdeutsche Altfahrzeugverordnung [5]) die Werte $R_{cyc} = 0,85$ (85 %) bzw. $R_{cov} = 0,95$ (95 %) erreichen. In der folgenden Abbildung 4.13 werden die Definitionen zu den Quoten noch einmal veranschaulicht.

	Verwertung (Recovery)		Undefinierte Reststoffe
Verwendung (Re use)	Verwertung (Materialrecycling)	Thermische Verwertung	
Recyclingquote (Recycability rate) R_{cyc}			
Verwertungsquote (Recoverability rate) R_{cov}			

Abbildung 4.13: Definition der Recycling- und Verwertungsquote

Unter der optimistischen Annahme, dass alle metallischen Werkstoffe der Ladesäule sowie die thermoplastischen Bauteile Abdeckung Werbebildschirm und Lüftungsgitter (Masse 10,79 kg) stofflich verwertet werden können, ergibt sich eine Recyclingquote (ohne Batterien)

$$R_{cyc} = \frac{m_{\text{Verwertung Metall}} + m_{\text{Verwertung Thermoplast}}}{m_{\text{Produkt}}}$$

$$R_{cyc} = \frac{897,33 \text{ kg} + 10,79 \text{ kg}}{1030 \text{ kg}} = 0,88 = 88 \%$$

Die Batterien in der Ladesäule haben eine Masse von 1.545 kg und damit beträgt die Gesamtmasse der Ladesäule 2.575 kg. Nach der europäischen Batterieverordnung wird gegenwärtig eine Batterie-Recyclingquote von 50 % gefordert. Damit ergibt sich die Recyclingquote zu

$$R_{cyc} = \frac{m_{\text{Verwertung Metall}} + m_{\text{Verwertung Thermoplast}} + m_{\text{Batterie (50\%)}}}{m_{\text{Produkt}}}$$

$$R_{cyc} = \frac{897,33 \text{ kg} + 10,79 \text{ kg} + 772,5 \text{ kg}}{2575 \text{ kg}} = 0,65 = 65 \%$$

Generell macht eine Quotenbetrachtung nur Sinn, wenn ein Verwertungskonzept für die Ladesäule vorliegt, etablierte Recyclingrouten für die Materialien vorhanden sind und ein Konzept zur Wiederverwendung von Bauteilen existiert. Darauf wird in den nächsten Abschnitten eingegangen.

4.2.5 Recyclingkonzept

Die stoffliche Verwertung von komplexen Produkten wie der Ladesäule zu Sekundärprodukten erfolgt immer in den Schritten: *Sammellogistik, Teilen, Trennen, Homogenisieren, Reinigen (Raffinieren) und Veredelung*.

Zunächst müssen die ausgedienten Ladesäulen mithilfe einer Sammellogistik an Recyclingbetriebe überführt werden. Dort finden Prozesse statt, die in der mechanischen Verfahrenstechnik als „Teilen“ bezeichnet werden. Dazu gehört u. a. die (zerstörungsfreie) Demontage, die (üblicherweise zerstörende) Zerlegung und die Zerkleinerung. Ziele der Demontage sind:

- die Gewinnung **wiederverwendbarer Bauteile** für ein 2nd use oder ein 2nd life (z. B. LiFePo4-Batterien, AC/AC-Wandler, AC/DC-Wandler),

- die Gewinnung vollständig sortenrein **verwertbarer Werkstoffe** (z. B. Abdeckung Werbebildschirm, Lüftungsgitter),
- die kontrollierte Entnahme von **Störstoffen, Schadstoffen und schadstoffhaltigen Bauteilen** (z. B. Blei-Säure-Batterie) sowie die
- Entnahme der **Betriebsflüssigkeiten** (Absaugen bzw. Ablassen von Kältemittel und Kühlflüssigkeit).

Die genannten Prozesse werden häufig auch als Vorbehandlungsschritte (Pre-treatment) vor der mechanischen Zerkleinerung bezeichnet.

Die mechanische Zerkleinerung dient anschließend dazu, das komplexe Produkt mit seiner Vielfalt von Werkstoffen aufzuschließen (Aufschließen von Bauteilverbindungen und Verbundwerkstoffen). Dazu stehen je nach Materialkombination Hammermühlen, Schneidmühlen, Granulatoren und Zerspaner zur Verfügung. In der Automobilverwertung werden seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts zur Zerkleinerung der Fahrzeuge Hammermühlen eingesetzt, die mit den dazugehörigen Anlagenteilen auch als Shredder bezeichnet werden. Da es sich bei der Ladesäule ebenfalls um einen massiven Körper aus Stahlblech handelt, bietet sich ein Shredder zur Zerkleinerung an.

Am Ende des Zerkleinerungsprozesses liegt ein körniges Haufwerk unterschiedlicher Materialien und Korngrößen vor, das durch die verfahrenstechnischen Trennprozesse „Klassieren“ und „Sortieren“ weiterverarbeitet wird. Beim Klassieren erfolgt die Zerlegung eines körnigen Haufwerkes in einzelne Kornklassen unterschiedlicher Korngrößenbereiche. In einer Shredderanlage wird die Klassierung durch ein Sieb realisiert, das die zerkleinerten Teile passieren müssen. Anschließend erfolgt eine Sortierung, also die Trennung des Zerkleinerungsgutes in Komponenten unterschiedlicher Stoffart oder Eigenschaften. In einer Shredderanlage wird die Sortierung durch einen Überbandmagneten realisiert, um zunächst die magnetischen Stahlbestandteile abzutrennen. Anschließend werden durch Wirbelstromabscheider, Schwimm-Sink-Anlagen und gelegentlich auch Handsortierung (Klauben) elektrisch leitfähige Werkstoffe wie Aluminium und Kupfer separiert. In Abbildung 4.14 ist das Verfahrensfliessbild für die Behandlung der Ladesäule dargestellt.

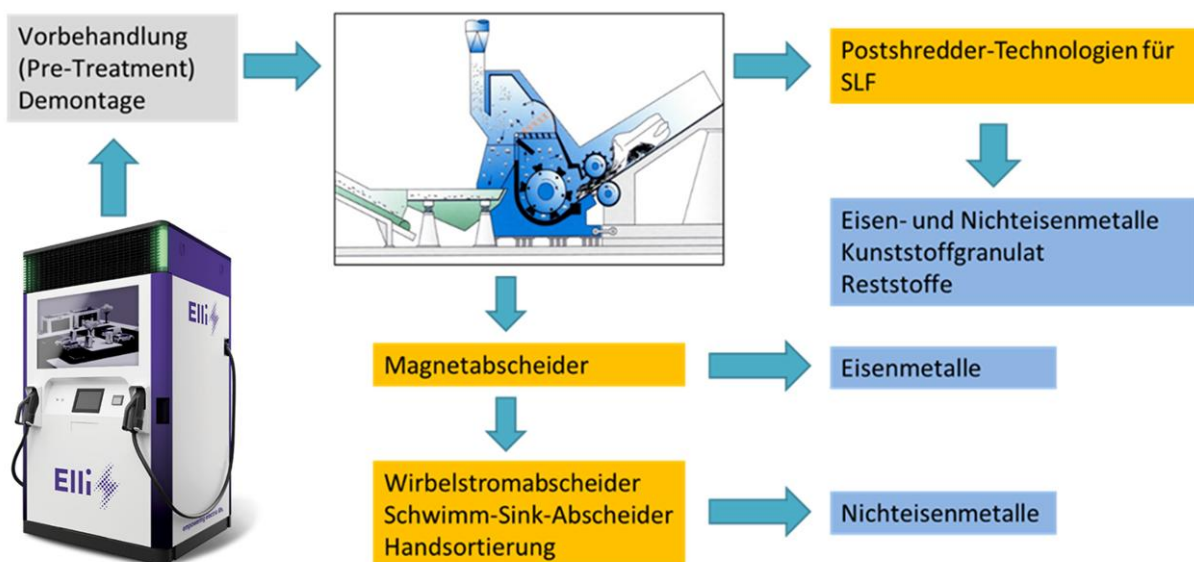


Abbildung 4.14: Verfahrenskonzept zur Behandlung der Ladesäule

Zunächst erfolgt eine Vorbehandlung mit den Schritten

- Freischaltung der LiFePO₄-Batterien,
- Trockenlegung des Klima-/Heizgerätes,
- Demontage der LiFePO₄-Batterien,
- Demontage der Blei-Schwefelsäure-Batterie,
- Demontage von Bauteilen für ein 2nd Use/2nd Life,
- Demontage von wiederverwertbaren Kunststoffbauteilen.

Anschließend wird die Ladesäule einem Shredder zugeführt und dort zunächst an der Abschlagkante einer Hammermühle zerkleinert. Das Zerkleinerungsgut wird im Zerkleinerungsraum hochgeschleudert und passiert dabei ein Gitter. Nicht genügend zerkleinertes Material durchläuft nochmals den Zerkleinerungsprozess. Nach dem Klassierprozess wird das leichte und flugfähige Material durch eine staubsaugerartige Vorrichtung, den Windsichter, abgesaugt. In dieser sogenannten Shredderleichtfraktion befinden sich Kunststoff- und Gummiteile sowie leichte Metallteile und andere leichte nichtmetallische Bestandteile. Um die Ausbeute an Sekundärrohstoffen zu erhöhen, werden für die Shredderleichtfraktion häufig „Post-Shredder-Technologien“ eingesetzt, bei denen in verfeinerten Trennprozessen die Materialien nachsortiert werden. Schwere Metall- und Nichtmetallteile fallen auf ein Sortierband und durchlaufen dabei einen Magnetabscheider und einen Wirbelstromabscheider bzw. eine Handsortierung. Im Magnetabscheider werden die ferromagnetischen Eigenschaften des Sortiergutes ausgenutzt und durch die anziehende Wirkung des Magneten die Stahlblechteilchen ausgeschleust. Im Wirbelstromabscheider hingegen werden durch einen rotierenden Magneten im Inneren eines Förderbandes Wirbelströme im Aufgabegut erzeugt, die eine abstoßende Kraft auf das Sortiergut haben und dadurch aus dem Materialstrom aussortiert werden. Während die Trennung durch den Magnet- und Wirbelstromabscheider als Massenstromsortierung bezeichnet wird, zählt die Handsortierung zu den Einzelstücksortierverfahren, weil jedes zu sortierende Teil einzeln betrachtet und abgelegt wird. Bei der Handsortierung ist das Auge der Detektor für den Werkstoff und die Hand die Auswurfeinheit. In automatisierten Anlagen werden bei Metallen Laser- oder Röntgenstrahlen zur Erzeugung eines Sekundärröntgenspektrums eingesetzt, welches durch eine elektronische Spektren-Bibliothek ausgewertet wird und Signale an eine Auswurfeinheit sendet (Stößel oder Fallklappe). Im Fall der Kunststoffsortierung wird mit einer Anregung der Polymerketten durch Infrarotstrahlen gearbeitet. Die Schwingungsspektren der Polymerketten werden dann als Signal ausgewertet und damit eine Auswurfeinheit angesteuert.

Durch die Elektromobilität erleben die Batterien mit Lithium-Ionen-Technologie einen starken Wachstumsmarkt und damit verbunden wächst auch der Markt für das Recycling der Batterien. Es herrscht ein starker Konkurrenzkampf zwischen etablierten und neu gegründeten Recyclingunternehmen, insbesondere auch durch viele Neugründungen in China. Als wichtige Akteure auf dem Recyclingmarkt seien genannt:

- Accurec GmbH – Deutschland,
- Batrec AG – Schweiz,
- Nickelhütte Aue – Deutschland,
- Recupyl – Frankreich, Polen, Italien, USA, Singapur,
- SNAM – Frankreich, Toxco – USA, Canada,
- Umicore – Belgien,
- Xstrata – Kanada,
- Duesenfeld – Deutschland,
- Shenzhen – China,
- Hunan BRUNP – China

Auch wenn sich die Unternehmen mit der Veröffentlichung von Informationen bedeckt halten, kann gesagt werden, dass die Prozesse Deaktivierung, Demontage, Mechanische Behandlung (unter Schutzgas), Pyrometallurgie, Hydrometallurgie und Pyrolyse je nach Firmenphilosophie in unterschiedlicher Kombination angewendet werden (vgl. Abbildung 4.15).

In Abbildung 4.16 ist eine vereinfachte Prozesskette zur Gewinnung der metallischen Werkstoffe aus Li-Ionen-Batterien dargestellt. Bei den Hochvoltbatterien in Elektrofahrzeugen wird die Kathode vorrangig aus einer Verbindung Lithium-Metalloxid in Schichtstruktur realisiert (LiNiO₂, LiCoO₂, LiMn₂O₄), die auf eine Aluminiumfolie aufgebracht ist. Die Anode besteht aus einer Kupferfolie, auf die eine poröse Graphitschicht aufgebracht ist. Bei den in der Ladesäule befindlichen Batterien

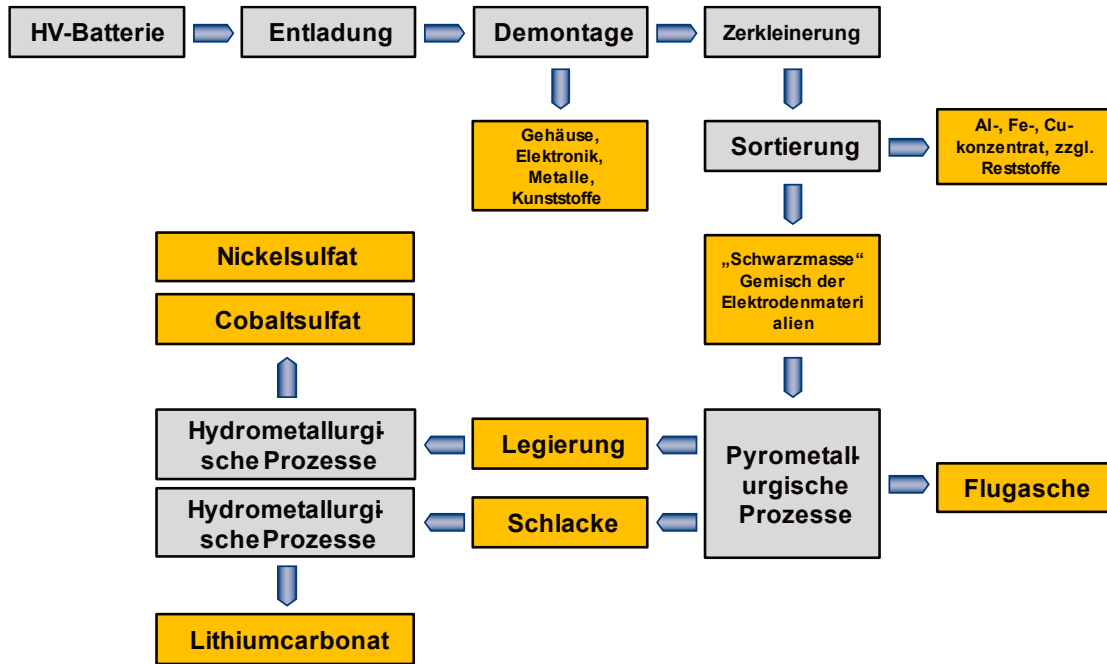


Abbildung 4.15: Allgemeines Verfahrensfließbild zum Recycling von Li-Ionen-Batterien

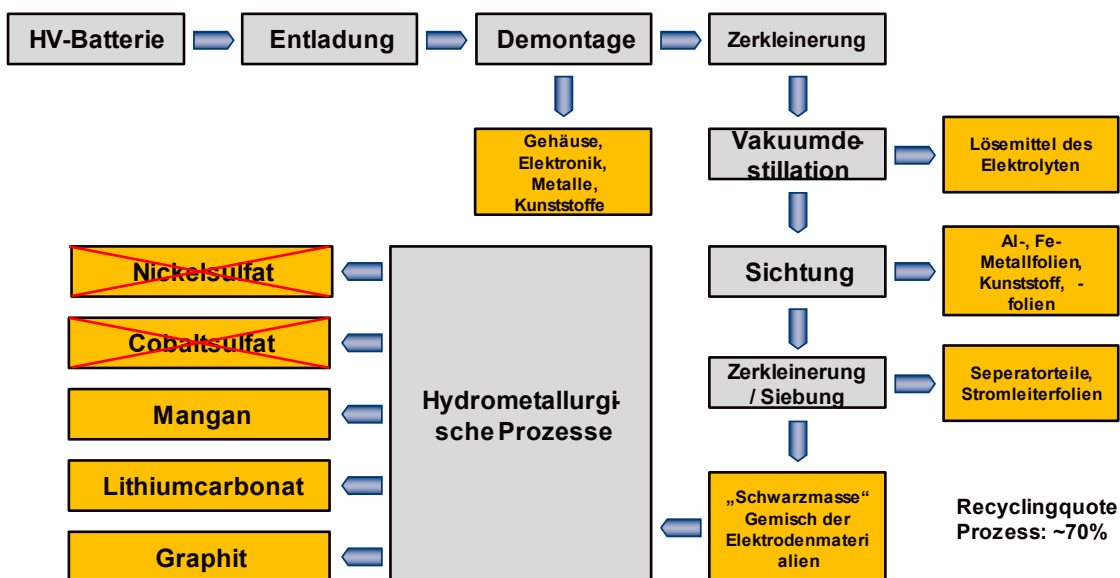


Abbildung 4.16: Behandlung von Li-Ion-Batterien nach dem Düsenfeldverfahren

(richtigerweise Akkumulatoren) besteht die Kathode aus Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO₄). Bei den gängigen Recyclingverfahren geht zurzeit das Lithium in die Schlacke über und damit in den Straßenbau. Damit entfällt hier eine Wertschöpfung durch die Rückgewinnung der hochpreisigen Metalle Kobalt oder Nickel und daraus resultierend ist eine Zuzahlung für den Recyclingprozess notwendig. Als ein Fazit kann daraus gezogen werden, dass die LFP-Batterien aus Ladesäulen so lange wie möglich in der Gebrauchsphase gehalten werden sollten (1st Life, 2nd Life, 2nd Use).

In nachfolgender Tabelle 4.5 wird der dargestellte Sachverhalt durch einen Vergleich zwischen einer Antriebsbatterie von Volkswagen (410 kg Masse) und einer Ladesäulenbatterie von ELLI (386 kg Masse) untermauert. Wenn man davon ausgeht, dass die Metalle Stahl, Aluminium, Kupfer, Mangan, Kobalt und Nickel wertschöpfend sind und das Lithium in der Schlacke verschwindet, hat man mit dem gegenwärtigen Marktwert der Metalle (ermittelt im Juni 2024) bei der VW-Antriebsbatterie eine Wertschöpfung von 1.713 Euro und bei der ELLI-Ladesäulenbatterie eine Wertschöpfung von 264 Euro.

Tabelle 4.5: Werkstoffverteilung und Wertschöpfung verschiedener LI-Ionen-Batterien

Werkstoffmassen VW-Antriebsbatterie (410 kg Batteriegewicht) [6]			Werkstoffmassen ELLI-Ladesäulenbatterie (386 kg Batteriegewicht)		
Werkstoff	Masse (kg)	Wert (EURO)	Werkstoff	Masse (kg)	Wert (EURO)
Stahl	3	0,8	Stahl	62,2	17
Aluminium	129	239	Aluminium	46,6	86
Kupfer	23	138	Kupfer	26,8	161
Mangan	12	30	Sondermetalle	0,02	
Kobalt	9	549	LiFePO ₄	106,6	
Nickel	42	756	Zinkphosphat	0,43	
Lithium	8		Lack	1,01	
Graphit	73		Graphit	55,64	
Elektrolyt	38		Elektrolyt	57,6	
Polymere	22		Polymere	28,1	
Elektronik	9		Dichtstoffe	1,53	
Rest	42		Keramik	0,35	

4.2.6 Life Cycle Assessment

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, ein Life Cycle Assessment (LCA) für die mobile Ladesäule normgerecht nach ISO 14044:2006 [7] zu erstellen. Hierbei wird darauf geachtet, dass alle Emissionen über die betrachteten Lebenszyklusphasen erfasst und die gewählte Vorgehensweise transparent dargestellt wird. Des Weiteren werden die Systemgrenzen festgelegt, die Auswahl der Wirkungsabschätzung erläutert sowie der verwendete Strommix, die Datenbasis und Datenqualität als auch Annahmen und Einschränkungen der Studie diskutiert.

Die deklarierte Einheit ist ein Maß für die Leistungsfähigkeit des betrachteten Systems. Sie muss eindeutig definiert, messbar und für In- und Outputdaten gleichermaßen relevant sein. Dies ist

notwendig, damit ein Bezug geschaffen werden kann, auf den In- und Output Flüsse bezogen werden können. Das Funktionsäquivalent ist hier eine mobile Ladesäule:

Tabelle 4.6: Technische Daten des Produktes

Produktbezeichnung:	Mobile Ladesäule
Produktgewicht:	2.574,838 kg
Verpackungseinheit:	1 Stück

Da es sich bei der Ladesäule um eine mobile Einheit handelt, sind bei der Aufstellung keine aufwendigen Tiefbauarbeiten oder elektrische Anschlussarbeiten notwendig. Die Ladesäule kann auf jedem befestigten Untergrund aufgestellt und auch zusätzlich an das übliche 400V-Niederspannungsnetz angeschlossen werden. Damit bei der späteren Durchführung der Sachbilanzierung alle in das System eintretenden bzw. austretenden Stoff- und Energieströme erfasst werden können, ist die exakte Definition der Systemgrenzen des betrachteten Systems von großer Bedeutung (vgl. Abbildung 4.17). Ziel der Sachbilanzierung ist es, das zu untersuchende System möglichst so zu modellieren, dass ausschließlich Elementarflüsse über die Systemgrenzen treten. Die Modellierung des Lebenszyklus beginnt mit der Ressourcenentnahme für die Energieträger- und Werkstoffherstellung und endet mit dem Recycling des Produkts. Die Prozesse für die Materialbereitstellung werden zurück bis zu den eingesetzten Ressourcen betrachtet. Die Produktion wird durch den Verbrauch an Primärenergie und, soweit bekannt, die prozessspezifischen Emissionen in Luft, Wasser und Boden beschrieben, die bei den jeweiligen Fertigungsverfahren, wie z.B. Drehen, Fräsen, Spritzgießen, etc. entstehen oder verbraucht werden. Die Transportwege der jeweiligen Rohstoffe und Vorprodukte um Finalisieren des Produkts, sind in dieser Studie beschrieben. Am Ende des Lebensweges wird das Produkt zu 100 % einem individuellen Verwertungskonzept zugeführt, welches Wiederverwendung von Komponenten, stoffliches Recycling, thermische Verwertung und Deponierung umfasst.

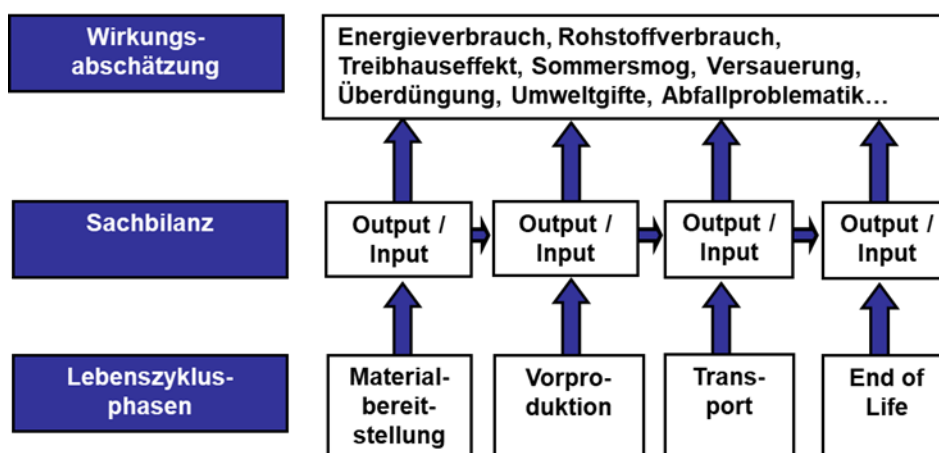


Abbildung 4.17: Systemgrenzen

Der prinzipielle Ansatz der Wirkungsabschätzung ist folgender: Für eine ausgewählte Anzahl von Umwelteffekten (Treibhauseffekt, Versauerung, etc.) werden sogenannte Leitsubstanzen definiert (CO₂, SO₂ etc.). Andere Stoffe, von denen eine Wirkung auf denselben Umwelteffekt bekannt ist, werden in Abhängigkeit ihrer potenziellen schädigenden Wirkung auf diese Leitsubstanzen bezogen.

Daraus resultieren die Indizes für die jeweilige Gesamtumweltbelastung. Eine Liste der betrachteten Wirkungskategorien und zugehörigen Bezugseinheiten befindet sich in Tabelle D.1 im Anhang.

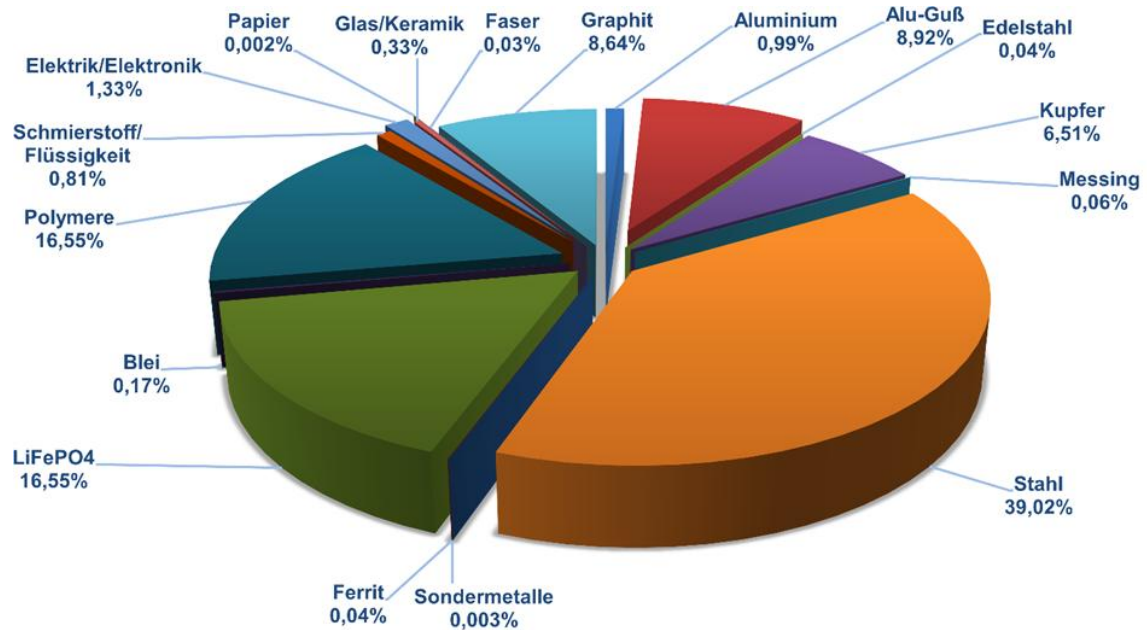


Abbildung 4.18: Materialverteilung des Produkts (abstrahiert)

Diese Modellbetrachtung strebt somit an, die ökologischen Folgen der, in der Sachbilanz ermittelten, Stoffe zu parametrisieren, indem den Stoffen jeweils eine definierte ökologische Folgewirkung zugeordnet wird. Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung umfassen in dieser Studie den gesamten Lebenszyklus. Zur Einordnung der Relevanz einzelner Wirkungen der untersuchten Systeme kann eine Normalisierung und/oder Bewertung vorgenommen werden. Dabei werden die betrachteten Wirkungskategorien gewichtet, in Bezug zu einem übergeordneten Emittenten, wie z. B. Europa gestellt. Für diese Studie wurde keine Normalisierung und/oder Bewertung durchgeführt. Die in der Tabelle aufgeführten Äquivalente werden in dieser Studie nach CML 2001 Stand August 2016 ausgewertet.

Um die Emissionen des Produktes in Luft, Wasser und Boden über den Lebensweg zu ermitteln, werden insgesamt vier Lebenszyklusphasen betrachtet. In der Sachbilanz werden alle notwendigen Daten erhoben, die für die genaue Beschreibung des Lebenszyklus des Produkts notwendig sind. Die Daten zur Materialverteilung des Produkts entstammen der zuvor beschriebenen Demontage- und Zerlegeanalyse. Den detailliert aufgelisteten Materialien (vgl. Abbildung 4.18) werden Hintergrunddaten aus der Software LCA for Experts [8] zugewiesen, um den Ressourcenabbau möglichst genau beschreiben und auszuwerten zu können.

Jedem Werkstoff, der durch die Demontage- und Zerlegeanalyse bestimmt wurde, wird bauteilspezifisch ein oder auch mehrere Fertigungsverfahren zugewiesen, um den Produktionsprozess möglichst genau zu beschreiben. In Tabelle 4.7 ist diese Vorgehensweise exemplarisch für einige Werkstoffe und Fertigungsverfahren dargestellt.

Tabelle 4.7: Sachbilanzdaten Fertigungsverfahren Vorproduktion (exemplarisch)

Material	Fertigungsverfahren	Material	Fertigungsverfahren
Aluminium	Stanzen	Messing	Gießen
Aluminium-Guß	Gießen, Spanen	Stahl	Schmieden, Drehen
Edelstahl	Kaltumformen, Stanzen, Biegen	Elektrik	Passives elektronisches Bauteil Produktion
Polymer	Spritzgießen	Elektronik	Leiterplattenproduktion
Polymer	Extrudieren	Ferrite	Ferritproduktion
Kupfer	Gießen, Warmwalzen	Graphit	Graphitproduktion

In dieser Lebenszyklusphase werden die Transportwege der jeweiligen Rohstoffe und Vorprodukte zum Herstellwerk, zum Finalisieren des Produkts, beschrieben. Die Daten bezüglich der Distanzen wurden vom Hersteller zur Verfügung gestellt und ausgewertet. Detaillierte Transportdaten werden zurzeit nicht veröffentlicht. Der Seetransport erfolgt durch ein Containerschiff mit 200.000 t Ladekapazität und 70 % Auslastung. Es wird ein handelsüblicher LKW, Euro 5, Auslastung 61 % und einer Standardverteilung für Autobahn (70 %), Landstraße (23 %) und Stadt (7 %) angenommen. Für die Bereitstellung des Schweröls und des Diesels wird ein europäischer Mix zu Grunde gelegt (vgl. Tabelle D.2 im Anhang). Am Ende des Lebensweges wird das Produkt zu 100 % einem individuellen Verwertungskonzept zugeführt, welches Wiederverwendung von Komponenten, stoffliches Recycling, thermische Verwertung und Deponierung umfasst. Bei der Trockenlegung des Produkts fallen Flüssigkeiten an, welche nach einer Aufbereitung stoffliche Materialgutschriften generieren. Tabelle 4.8 zeigt die relevanten Materialien und Komponenten samt Anteil im End-of-Life-Prozess.

Tabelle 4.8: Zuordnung von Flüssigkeiten und Wiederverwendung im End of Life

Material für stoffliche Verwertung	Anteil im Eol Prozess [%]
Kältemittel	100
Kühlwasser	50
Komponente für Wiederverwendung	Anteil im Eol Prozess [%]
HV-Batterie (1-4), AFC DCDC 60A Converter (1-4), AFC ACDC Conv (1-2)	100

Danach erfolgt eine Demontage ausgewählter Komponenten. Ziel dieses Prozessschrittes ist, eine Wiederverwendung zu gewährleisten. In diesem Fall erfolgt nicht nur eine stoffliche Materialgutschrift der Werkstoffe, sondern auch eine Gutschrift auf die benötigten Produktionsverfahren, da durch die Wiederverwendung eine erneute Produktion vermieden wird. Für die Zerkleinerung und das Aufschließen der einzelnen Materialien wird ein Automobilshredder angenommen (vgl. Tabelle D.3 im Anhang).

In der folgenden Tabelle 4.9 sind die Werkstoffe aus der Materialverteilung des Produkts den entsprechenden Stoffströmen zugeordnet. Nach der Zerkleinerung werden die einzelnen Materialströme separiert. Der energetische Aufwand der Separation an sich ist so gering, dass er weit

unter 5 % von dem des Zerkleinerungsprozesses liegt. Daher kann dieser verfahrenstechnische Schritt im Recyclingprozess vernachlässigt werden und fällt unter das Abschneidekriterium.

Des Weiteren werden 95 % der Metalle und ausgewählte Polymere des Produkts stofflich recycelt, woraus sich Materialgutschriften ergeben. Die restlichen Polymere des Produkts werden zu 100 % einer thermischen Verwertung zugeführt, woraus elektrische und thermische Energiegutschriften resultieren. Sonstige Stoffe wie Glas und elektronische Bauteile werden deponiert.

Tabelle 4.9: Sachbilanzdaten für Zuordnung der Materialien im End of Life

Material	Anteil EoL-Prozess [%]
Stoffliche Verwertung	
Aluminium, Edelstahl, Kupfer, Messing, Stahl, PC+ABS, PUR-E, PC, PP, PE, Blei, Batteriesäure	95
Thermische Verwertung	
Polymere, Naturfaser, Papier	100
Deponierung	
Kühlwasser (Rest), Elektrik/Elektronik, Fett/Öl, Glas, Ferrit	100

Die Ergebnisse der LCA sind zusammengefasst in Abbildung 4.19 dargestellt. Die Berechnungen zeigen, dass die Hauptursachen für die Umweltwirkungen und Indikatoren in der Lebenszyklusphase der Materialbereitstellung zu finden sind. Dies zeigt das Treibhauspotenzial für die Materialbereitstellung mit ca. 56 % bezogen auf das Gesamtergebnis. Betrachtet man die Materialbereitstellung für das

Produkt im Detail, so wird deutlich, dass fünf Rohstoffe der Ladesäule entscheidend zu den jeweiligen Umweltwirkungen und Indikatoren beitragen. Bei den dominierenden fünf der Materialbereitstellung entstehen ca. 30 % des Treibhauspotenzials vom Alu-Guss. Beim LiFePO₄ sind es ca. 28 % und bei der Elektronik 24 % der Treibhausgasemissionen. Durch das individuelle Verwertungskonzept, welches Wiederverwendung von Komponenten, stoffliches Recycling, thermische Verwertung und Deponierung umfasst, können die Gutschriften im Vergleich zu den vorangegangenen Berechnungen gesteigert werden. Besonders durch die Wiederverwendung von Komponenten, ergeben sich ca. 64 % Gutschrift des Treibhauspotenzials bei den HV-Batterien und ca. 18 % bei den AFC DCDC-Komponenten, bezogen auf die Lebenszyklusphase des End of Life. Beim stofflichen Recycling entfällt die größte Gutschrift der Treibhausgasemissionen auf den Stahl mit ca. 11 %. Emissionen aus der thermischen Verwertung, sowie der Deponierung sind mit ca. 1 % des Treibhauspotenzials zu vernachlässigen.

Die maßgeblichen Datensätze, welche zur Berechnung der Materialbereitstellung des Produkts verwendet wurden, sind von hoher Aktualität¹. Da diese Hintergrunddatensätze die Ergebnisse, wie aufgezeigt wird, stark beeinflussen, gilt dies auch für die Gesamtberechnung.

¹: GLO: market for electrolyte, for Li-ion battery, ecoinvent 3.9.1, Referenzjahr 2022; DE: RoW: market for lithium iron phosphate ecoinvent 3.9.1, Referenzjahr 2022; GLO: electronic component production, passive, unspecified ecoinvent 3.9.1, Referenzjahr 2022; RER: Aluminium ingot mix Sphera, Referenzjahr 2022



Äquivalente und Energien

Dominanzanalyse
Materialbereitstellung Top 5

Dominanzanalyse
Transport

Dominanzanalyse
End of Life

Abbildung 4.19: Umweltanalyse (LCA) der Ladesäule

4.2.7 Schlussfolgerungen

Im Hinblick auf die Baustruktur der Ladesäule können durch die Untersuchung folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Bei der Ladesäule handelt es sich um ein komplexes, nicht hierarchisches Differenzialbauteil mit einem hohen Anteil an gemischten Teilen (49 Weiterzerlegbauteile) und 22 reine Endteile. Der Verzweigungsgrad zwischen den Baugruppen ist sehr hoch. Daraus ergibt sich eine komplexe Demontage für Wartungstätigkeiten.
- Reine Endteile werden, wenn es sich um Materialien wie Metalle und thermoplastische Werkstoffe handelt, als Favoriten für ein Materialrecycling gesehen. In diesem Fall liegen die 22 reinen Endteile als Bauteile mit teilweise kleiner Masse und großer strategischer Abhängigkeit (große Demontagezeit) vor. Sie bieten damit ein geringes Potenzial für eine wirtschaftliche Demontage und damit für eine wirtschaftliche stoffliche Verwertung.
- Für die Bauteile Gehäuseabdeckung, Klimaanlage und Hauptplatine sind Demontagehilfen notwendig.
- Die Vielfalt der Kunststoffe sollte eingeschränkt werden, um eine Verbesserung der stofflichen Verwertung zu gewährleisten.
- Im Inneren des Gerätegehäuses sind die Batterien sowie die Montageplatte für elektrische und elektronische Komponenten in einer für die Demontage günstigen Einschubbauweise angeordnet. Allerdings müssen im Fall der Montageplatte Elektrik/Elektronik zahlreiche Schrauben unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Demontagerichtung gelöst werden. Eine Demontage der Hauptplatine zieht eine Vielzahl von Vorausbauten mit sich. Die Zugänglichkeit sollte verbessert werden durch eine stärkere Modularisierung der übrigen Komponenten.
- Batterien sind bezogen auf Umweltwirkungen und Zirkularität von hoher Priorität. Im Rahmen des Projekts können jedoch keine direkten Änderungen an den Batterien vorgenommen werden. Die Demontage der Batterien ist einfach möglich, aufgrund des Gewichtes aber aufwendig. Es muss eine Intensivierung der Nutzung der Batterien erfolgen, um den entstandenen Umweltwirkungen entgegenzuarbeiten.

4.3 Maßnahmen aktuelles Produkt

Auf Basis der vorangegangenen Analysen werden in diesem Abschnitt Maßnahmen untersucht, die sich mit einem geringen Änderungsaufwand unter Beibehaltung der Bauweise und Materialzusammensetzung durchführen lassen. Hierzu gehören Maßnahmen, wie die Vereinheitlichung von Verbindungselementen und die Vereinheitlichung von Kunststoffen, eine Wiederverwendung einzelner Bauteile nach Lebensende der Ladesäule, die einfachere Demontierbarkeit einzelner Module oder die modulare Anbindung der Seitenwand zur Sicherstellung der Reparatur- und Austauschfähigkeit.

4.3.1 Vereinheitlichung

In der nachfolgenden Tabelle 4.10 sind die positiven und negativen Aspekte zur vorliegenden Verbindungstechnik und der Anordnung der Fügestellen zusammengefasst. Grundsätzlich positiv ist zu vermerken, dass es sich bei den meisten Verbindungselementen um lösbare Schraubverbindungen handelt. Hinsichtlich Auffindbarkeit, Art und Zugänglichkeit werden bei der Verbindungstechnik keine Optimierungspotenziale bei der bestehenden Baustruktur gesehen. Allerdings muss die große Anzahl an Verbindungselementen hinterfragt werden. Dabei kann jedoch nicht beurteilt werden, welche























sicherheitstechnischen Aspekte für stromführende Teile zu der jeweiligen konstruktiven Lösung geführt haben. Das Optimierungspotenzial hinsichtlich der Vielfalt unterschiedlicher Verbindungselemente wird an ausgewählten Bauteilen dargestellt, die prinzipiell als wiederverwendbare Bauteile infrage kommen könnten. Eine Liste der Bauteile ist in Tabelle D.5 im Anhang dargestellt.

Tabelle 4.10: Bewertung der Verbindungstechnik und Anordnung von Fügstellen

Kriterium	Positiv	Negativ
Auffindbarkeit der Verbindungen	Auffindbarkeit der Verbindungen gegeben, sichtbar oder verdeckt, nicht versteckt	
Art der Verbindungen	Hoher Anteil lösbarer kraftschlüssiger Verbindungen	
Zugänglichkeit zu den Verbindungen	Zugänglichkeit zu den Verbindungen gegeben, aber verschiedene Raumrichtungen	
Anzahl der Verbindungselemente		760 Verbindungselemente
Vielfalt der Verbindungselemente		Große Verbindungsvielfalt (19 Verbindungsarten), 19 Werkzeuge notwendig
Werkzeugbedarf	Standardwerkzeuge einsetzbar	

Insbesondere bei Innensechskantschrauben (ISK) ist eine Vereinheitlichung und damit eine Reduzierung von Werkzeugwechseln denkbar. Es sind von diesen Maßnahmen 33 Bauteile betroffen, die jeweils bis zu drei unterschiedliche Verbindungselemente besitzen.

Die wirtschaftliche Auswirkung auf eine Reduzierung der Verbindungsvielfalt soll mit dem „Kreislaufeignungswert“ KE verdeutlicht werden (vgl. Abbildung 4.21). Der KE-Wert ist definiert als das Verhältnis aus den Kosten für das Neuteil zuzüglich der Entsorgungskosten des Altteils und den Kosten für die Aufarbeitung des Altteils. Bei einer wirtschaftlichen Wiederverwendung des Bauteils sollte $KE > 1$ sein, weil dann die Kosten für das Neuteil und die Entsorgungskosten für das Altteil größer sind als die Aufarbeitungskosten für das Altteil. Da in die Aufarbeitungskosten die Demontage- und Wiedermontagekosten (Demontagekosten) wesentlich eingehen, sollte die Verbindungsvielfalt reduziert werden. Insgesamt hat die Vereinheitlichung der Verbindungselemente einen positiven Einfluss auf die Demontageeigenschaften der Ladesäule und einen leicht positiven Einfluss auf alle Eigenschaften, bei denen eine Demontage erforderlich ist. Die Maßnahmen betreffen zwar das gesamte Produkt, der Gesamteinfluss bleibt jedoch begrenzt.

	R-Strategien					Maßnahmen/Effekte					
Vereinheitlichung Verbindungen	 Gesamteinfluss 2	 Refuse 0	 Rethink 0	 Reduce 0	 Reuse 1	 Rezyklat 0	 Umweltwirkung 0	 Demontage 3	 Austausch 1	 Trennung 0	 Lebensdauer 0
	 Repair 1	 Refurbish 1	 Remanufacturing 1	 Repurpose 1	 Recycle 1	 Modularisierung 0	 Leichtbau 0	 Individualisierung 0	 Technik 0	 Funktionserweit. 0	 Funktionstrennung 0

Definition Kreislaufeignungswert für Re use

$$KE \text{ Wert (Wiederverwendung)} = \frac{\text{Kosten Neuteil} + \text{Kosten Entsorgung Altteil}}{\text{Kosten Aufarbeitung Altteil}} > 1$$

Demontage
 Reinigung
 Prüfung
 Sortierung
 Aufarbeitung
 Remontage
 Qualitätssicherung

} Kostenoptimierung

Handlungsfelder Verbindungselemente
Auffindbarkeit
Lösbarkeit
Zugänglichkeit
Anzahl
Vielfalt
Werkzeugbedarf
Mechanisierbarkeit/ Automatisierbarkeit

Abbildung 4.21: Kreislaufeignungswert für eine Wiederverwendung eines Bauteils und seine Einflussgrößen

Thermoplastische Werkstoffe unterschiedlicher Sorte können miteinander verträglich, teilverträglich oder unverträglich sein. Im Extremfall kann es sein, dass eine Sorte im Extruder oder der Spritzgussmaschine plastisch vorliegt und die andere Sorte noch im festen Zustand ist. Ein derartiges Gemisch liefert keine chemische Verbindung, sondern einen rein mechanischen und damit minderwertigen Verbund. Um eine Aussage darüber zu bekommen, inwieweit Thermoplaste miteinander verträglich, teilverträglich oder unverträglich sind, wurde in der Vergangenheit mithilfe zahlreicher Extrusionsversuche eine „Verträglichkeitsmatrix“ erarbeitet. Hierbei werden jeweils zwei Thermoplaste gegenübergestellt und deren Verträglichkeit beurteilt (vgl. Abbildung 4.20).

Zur Herstellung eines qualitativ hochwertigen Sekundärmaterials ist also die Kenntnis über das Primärmaterial unerlässlich. Während man metallische Werkstoffe häufig durch einfache physikalische Größen wie Oberflächenglanz und -farbe, Gewicht und Magnetisierbarkeit identifizieren kann, ist das bei Thermoplasten, infolge annähernd gleicher Dichte und Oberflächenbehandlung (Lackierung), nicht möglich. Darum ist eine Kennzeichnung unerlässlich. Dabei bietet sich die normgerechte

		Zusatzwerkstoff									
		PE	PVC	PS	PP	POM	SAN	ABS	PBTP	PETP	PMMA
Matrixwerkstoff	Konstruktions-Kunststoffe										
	PE	●	○	○	●	○	○	○	○	○	○
	PVC	○	●	○	○	○	●	●	○	○	●
	PS	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○
	PP	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○
	POM	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○
	SAN	○	●	○	○	○	●	●	○	○	●
	ABS	○	○	○	○	○	○	●	○	○	●
	PBTP	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○
	PETP	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○
PMMA	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

● Verträglich

○ Beschränkt verträglich

○ In kleinen Mengen verträglich

○ nicht verträglich

Abbildung 4.20: Vereinfachte Verträglichkeitsmatrix für Thermoplaste

Kennzeichnung nach DIN ISO 1043 an. In Tabelle 4.11 sind einige Beispiele für die normgerechte Kennzeichnung von Polymerwerkstoffen dargestellt.

Tabelle 4.11: Beispiele für eine normgerechte Kennzeichnung von Kunststoffen

Werkstoff	Kennzeichnung, Beispiele
Reines Polymer	>PP< , >ABS< , >PE-HD< , >PC-HT< HD= high density , HT= high temperature
Polymer-Schaum	>PS-E< , >PUR-E<
Polymergemische (Blend)	>PC+ABS< , >EPDM+PP<
Polymer mit Inhaltsstoffen	>PP-GF30< , >PP-TD20< , EPDM+PP-TD10< , >PA66-(GF25+MD15)< GF= Glasfaser , TD= Talkum Pulver , MD= Mineralpulver
Polymer mit Weichmacher	>PVC-P (BBP)< BBP= Benzylbutylphthalat
Polymer mit Flammhemmer	>PA66-(GF25+MD15) FR(52)< FR(52)= roter Phosphor
Mehrschichtverbund	>PVC, PUR-E, ABS< Beispiel: Verkleidung Instrumententafel

Wenn man den Grundregeln für ein aufbereitungsgerechtes Produkt folgt, ist auch die Vielfalt der Materialien ein wichtiges Kriterium. Je mehr unterschiedliche thermoplastische Werkstoffe in einem Produkt sind, desto aufwendiger sind die Sortierprozesse zur Gewinnung sortenreiner Fraktionen. Eine vergleichsweise einfache Trennung ist zwischen Polypropylen oder Polyethylen und anderen Thermoplasten möglich. PP und PE haben eine Dichte unter 1 g/cm^3 und können damit in einer Schwimm-Sink-Trennung in einem Wasserbad als Schwimmfraktion separiert werden. Bei allen anderen Thermoplasten liegt die Dichte je nach Modifikation sowie Füll- und Verstärkungsstoffen bei 1 bis $1,6 \text{ g/cm}^3$. Hier ist nur eine Trennung in einer Salzlösung möglich oder mithilfe elektrostatischer Trennverfahren. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die verschiedenen Thermoplaste wegen ihrer Füll- und Verstärkungsstoffe in der Dichte überlappen und man damit kein sauberes Trennergebnis bekommt. In der Ladesäule befinden sich 20 verschiedene Polymersorten und 15 Polyamid Modifikationen. Wegen der oben genannten Trennproblematik ist zu hinterfragen, ob die Anzahl der verschiedenen Thermoplaste nicht reduziert werden könnte. Herausforderung ist hierbei, dass die Vielzahl der Werkstoffe in handelsüblichen Schaltern und elektrischen Funktionsteilen vorhanden sind. Diese Bauteile werden nach ihren Anforderungen bezüglich Stromleitungs- und Abschirmereigenschaften konstruiert. Eine Einflussnahme des Herstellers ist in diesem Fall stark eingeschränkt.

Die wirtschaftliche Auswirkung auf eine Reduzierung der Materialvielfalt soll, analog zum Kreislaufeignungswert für die Wiederverwendung mit dem „Kreislaufeignungswert“ KE für eine stoffliche Verwertung verdeutlicht werden (vgl. Abbildung 4.22). Der KE-Wert ist definiert als Summe der *Kosten für ein Neuteil* und der Entsorgungskosten für das Altteil dividiert durch die *Kosten der Aufbereitung des Altteils*. Bei einer wirtschaftlichen stofflichen Verwertung des Bauteils sollte $KE > 1$ sein, weil dann die Kosten für das Neuteil und die Entsorgungskosten für das Altteil größer sind als die Aufbereitungskosten für das Altteil. Da in die Aufbereitungskosten die Klassier- und Sortierkosten

wesentlich eingehen, sollte im vorliegenden Fall der Ladesäule einerseits die Identifizierbarkeit der Materialien gewährleistet werden und andererseits die Vielfalt der Materialien eingeschränkt werden.

Die Vereinheitlichung von Kunststoffen hat maßgeblich Einfluss auf die sortenreine Trennung von Materialien und somit die Recyclingfähigkeit. Aufgrund des begrenzten Einflusses der Materialwahl bei Zukaufteilen bleibt aber auch hier der erzielbare Einfluss begrenzt.

Vereinheitlichung Kunststoffe	R-Strategien					Maßnahmen/Effekte					
	Gesamteinfluss 2	Refuse 0	Rethink 0	Reduce 0	Reuse 0	Rezyklat 0	Umweltwirkung 0	Demontage 0	Austausch 0	Trennung 3	Lebensdauer 0
Repair 0	Refurbish 0	Remanufacturing 0	Repurpose 0	Recycle 3	Modularisierung 0	Leichtbau 0	Individualisierung 0	Technik 0	Funktionserweit. 0	Funktionstrennung 0	

Grundsätzlich gibt es zwei Recyclingstrategien, um den Einsatz von Recyclingmaterial im Wirtschaftskreislauf zu begünstigen. Die eine Möglichkeit ist, nach der Produktnutzung Methoden der mechanischen Verfahrenstechnik so einzusetzen, dass das Produkt als anthropogene Rohstoffquelle optimal ausgebeutet wird, d. h. stofflich hochwertige Sekundärmaterialien nach dem Prozess vorliegen. Diese Methoden werden als End of the Pipe-Technologien bezeichnet und wurden vorhergehend ausführlich behandelt. Eine andere Möglichkeit ist, bei der Produktentwicklung Einfluss auf das Produkt zu nehmen. Hierzu gehört auch der Einsatz von Recyclingmaterial in der Neuproduktion.

Im vorliegenden Fall würde es sich anbieten, für die thermoplastischen Bauteile „Abdeckung Werbebildschirm“ (Masse 3,133 kg, Material laut IR-Spektroskopie PC) und „Lüftungsgitter vorn und hinten“ (Masse 7,658 kg, Material laut IR-Spektroskopie PC + ABS) den Einsatz von Recyclingmaterial zu prüfen. Wie eine Recherche zeigt, steht Recyclingmaterial aktuell in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung. In einem zweiten Schritt wurde ein Life Cycle Assessment durchgeführt (siehe hierzu die Ausführungen in Abschnitt 1214.2.6), um die Umweltauswirkungen von Primär- und Sekundärmaterial miteinander zu vergleichen. In der nächsten Tabelle sind die Resultate für die Umweltwirkung „Treibhauseffekt (GWP)“ zusammengestellt. Wie aus der Tabelle 4.12 zu entnehmen ist, ist das Treibhauspotenzial für die Primärherstellung von PC bzw. PC + ABS fast zehnmal so hoch wie das Treibhauspotenzial für die Sekundärherstellung. Bei der Primärherstellung fließen alle Prozesse von der Rohölgewinnung über die chemische Synthese bis zum fertigen Produkt ein, bei der Sekundärherstellung werden alle Logistik- und Aufbereitungsprozesse bis zum fertigen Produkt

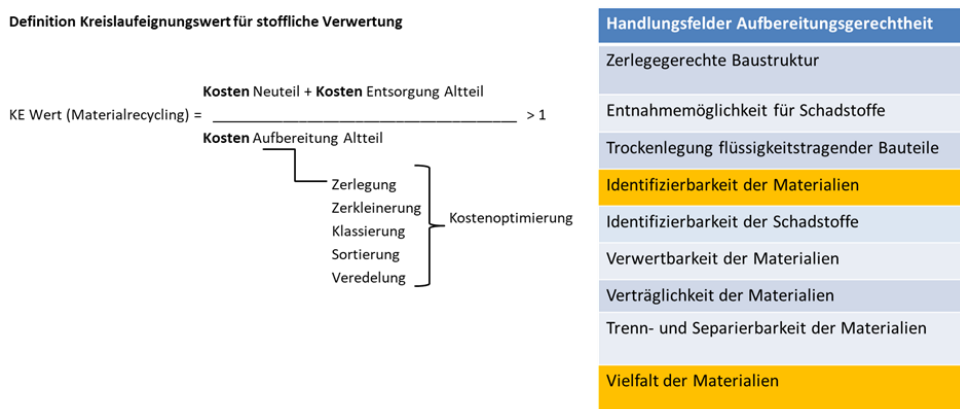


Abbildung 4.22: Kreislaufeignungswert für eine Wiederverwertung eines Bauteils und seine Einflussgrößen

berücksichtigt. Für andere Umweltkategorien ergeben sich für das Sekundärmaterial ebenfalls günstigere Werte.

Tabelle 4.12: Treibhauspotenzial für Bauteile aus Primärmaterial und Sekundärmaterial

Bauteil	Treibhauspotenzial GWP in kg CO ₂ Äq	
	Primärmaterial	Sekundärmaterial
Abdeckung Werbebildschirm	11,522	1,062
Lüftungsgitter innen vorn	5,197	0,600
Lüftungsgitter innen hinten	5,191	0,599
Lüftungsgitter außen vorn	3,734	0,431
Lüftungsgitter außen hinten	3,759	0,434

4.3.2 Re-Use von Bauteilen

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist nicht nur eine geschlossene Recyclingfähigkeit eines Produkts von entscheidender Bedeutung. Vielmehr existieren kleinere Kreise innerhalb des Produktlebenszyklus, die einen erheblichen Beitrag zur Zirkularität von Produkten beitragen (vgl. Grundlagenkapitel). Eine davon ist die Wiederverwendung von Bauteilen in gleicher Form (ReUse) oder in einer anderen Anwendung (RePurpose). Die Potenziale und Herausforderungen einer solchen Wiederverwendung werden nachfolgend anhand einer Analyse der Komponenten der Ladesäule herausgestellt. Grundlage für die Untersuchungen bildete zunächst die Unterscheidung zwischen verschiedenen Szenarien für eine Wiederverwendung von Teilen der Ladesäule. Dabei wurde für die Szenarien bzw. Zeitpunkte der Herstellung einer neuen Ladesäule, während des Betriebs, vorzeitiges Lebensende, geplantes Lebensende sowie andere Anwendung die Teileabgabe bzw. -aufnahme untersucht (siehe Tabelle 4.13).

Tabelle 4.13: Mögliche Szenarien für Wiederverwendung während des Lebenszyklus

Nr.	Szenario	Teilespender	Teileempfänger
1	Herstellung neue Ladesäule Montage und Prüfung	Defektes Teil	Einsatz Gebrauchtteil ^{1, 2, 3}
2	Während Betrieb Einzelteilaustausch	Defektes Teil oder funktionsfähiges Teil aus defektem Teileverbund	Einsatz Gebrauchtteil ^{1, 2, 3}
3	Vorzeitiges Lebensende Defekt, Vandalismus, etc.	Gebrauchtteil	-
4	Geplantes Lebensende Außerbetriebnahme	Gebrauchtteil	-
5	Andere Anwendung Gleiche/ähnliche Komponenten	Gebrauchtes Teil aus anderer Anwendung	Anwendung Gebrauchtteil aus der Ladesäule für andere Anwendung ^{1, 3}

1: repariert bzw. geprüft 2: Baustand beachten 3: Lebensdauer beachten

Unabhängig vom Szenario, bei dem Teile gespendet werden, sind diese für eine Wiederverwendung zu prüfen bzw. bei Defekten zu reparieren. Dieser Zusatzaufwand muss sich wirtschaftlich kompensieren lassen. Dabei spielt insbesondere die verbleibende Lebensdauer der Komponente eine Rolle. Zudem sollte eine Komponente, die nur noch eine geringe zu erwartende Lebensdauer hat, nicht in neue Ladesäulen mit einer längeren Lebensdauer eingebaut werden, da dies zu einem weiteren kostenintensiven Austausch führen kann. Darüber hinaus müssen etwaige Änderungen des Baustands der Ladesäule beachtet werden, die eine Wiederverwendung älterer Komponente verhindern kann.

Als Grundlage für die Beurteilung wurden Szenarien für mögliche Wiederverwendungen untersucht (siehe Tabelle 4.14). Dabei wurde unterschieden, inwiefern in dem jeweiligen Szenario wiederverwendbare Teile entnommen bzw. gebrauchte Teile wiederverwendet werden können. Um Klarheit über das Potenzial an wiederverwendbaren Bauteilen und Komponenten aus der Ladesäule zu bekommen, wurden zunächst mögliche Bauteile bzw. Komponenten identifiziert.

Tabelle 4.14: Beurteilung von Bauteilen / Komponenten für verschiedene Recyclingwege

Bezeichnung	Demontagekosten	Ökonomisches Potenzial	Wiederverwendung	Weiterverwendung	Werkstoffliche Verwertung
Batterien	3	3	2	3	1
Sichtscheibe Bildschirm	2	1	0	1	2
Werbefeldschirm	2	1	2	1	1
HMI	3	2	2	1	3
Paymentterminal	2	1	2	1	0
AC Stromzähler	2	1	2	1	0
DC Stromzähler	2	1	2	1	0
AC/DC Wandler	3	3	2	2	3
DC/DC Wandler	2	3	2	2	3
Klima-/Heizgerät	2	2	2	1	2
Ladekabel	3	1	1	1	2
Steuergerät (z.B. Energiemanagement)	3	2	2	1	3
Hauptplatine	2	2	1	0	3
Abdeckung Status-LED	1	0	1	0	1
12 V Batterie	2	1	1	1	3
Massekabel für AFC AC/DC	2	2	2	0	3
Schließmechanismus Tür	1	1	2	0	3
Halter Steuergerät KOMZ L	2	2	2	0	3
Stromschiene	0	0	1	1	3
Wasserverteiler mit Regler	0	0	1	0	0

Anschließend wurden relevante Kriterien für das Re-Use definiert. Diese sind:

- Demontagekosten (Gesamtkosten der Demontage)
- Ökonomisches Potenzial (Verhältnis des Komponentenwerts zu den Demontagekosten)
- Wiederverwendung (Einsatz für denselben Verwendungszweck)
- Weiterverwendung (Einsatz für einen anderen Verwendungszweck)
- Werkstoffliche Verwertung (günstiges Materialrecycling)

Diese Kriterien wurden im Konsortium in den vier Stufen Sehr gut (3) – eher gut (2) – eher schlecht (1) – schlecht (0) beurteilt. Das Ergebnis der Befragung ist in Tabelle 4.14 dargestellt.

Einige Komponenten besitzen eine geringe Eignung für eine Wiederverwendung (2nd Use) oder Weiterverwendung (2nd Life) aufgrund von hohen Demontagekosten oder geringem ökonomischen Potenzial. Bei mäßiger Eignung können die Kosten für eine werkstoffliche Verwertung entscheidend sein. Sind diese gering, entsteht nur ein geringer Anreiz für eine Wieder- oder Weiterverwendung. Bei hohen Verwertungskosten lohnt sich jedoch eine Wieder- oder Weiterverwendung, um den hohen Verwertungskosten eine möglichst lange Nutzungsdauer entgegenstellen zu können.

Die vier HV-Batterien der Ladesäule sind ideale Kandidaten für eine Wiederverwendung oder Weiterverwendung, z. B. als externer Energiespeicher. Die Demontagekosten sind gering (Demontagezeit 11 min pro Modul) und die Anschaffungskosten hoch. Die stoffliche Verwertung als Alternative zur Verwendung ist problematisch, weil hohe Prozesskosten einem niedrigen Wert der Sekundärmaterialien gegenüberstehen. Von einer stofflichen Verwertung nach dem 1st Life sollte abgesehen werden. Die Weiterverwendung ist trotz des hohen Prüfaufwandes und der notwendigen Dokumentation des Batterie- und Zellstatus gut. Einer Wiederverwendung in neuen Ladesäulen spricht der notwendigen Gewährleistung entgegen. Eine Einsatzmöglichkeit wäre eine zeitwertgerechte Reparatur. Die beste Option der Wiederverwendung wäre der Einsatz in Energiespeichern ohne Ladefunktion für Elektrofahrzeuge.

Der Demontageaufwand des Klima-Heizgeräts ist durch den Staplereinsatz und die zweite Person, für Handling und Demontage, recht hoch. Die Demontagezeit beträgt 38 Minuten mit zwei Personen und einem Gabelstapler. Allerdings wird es durch die hohen Anschaffungskosten wieder relativiert. Somit ist das ökonomische Potenzial relativ gut zu bewerten. Die Wieder- und Weiterverwendung wird allerdings stark eingeschränkt, da das Klimaaggregat eine sehr spezifische Entwicklung ist. Der Prüfaufwand in Bezug auf der Dichtigkeit und Funktion ist als relativ hoch zu bewerten. Ein Einsatz als Komponente einer zeitwertgerechten Reparatur ist in Bezug auch die Gewährleistung zu prüfen. Durch den hohen Metallanteil ist eine stoffliche Verwertung gut möglich.

Mit 17 Minuten Demontagezeit sind die AC/DC und DC/DC Wandler im mittleren Aufwandsbereich anzusehen. Aus den hohen Anschaffungskosten resultiert ein gutes ökonomisches Potenzial. Aufgrund des recht hohen Metallanteils, sowie hochwertiger Leichtmetalllegierung, ist die Möglichkeit einer stofflichen Verwertung sehr gut. Eine stoffliche Verwertung nach dem 1st Life sollte nur bei defekten Geräten angestrebt werden. Durch den höheren Prüfaufwand der gerätespezifischen Werte sowie die Dichtigkeit, ist eine Weiter- und Wiederverwendung noch mit gut zu bewerten. In der folgenden Abbildung 4.23 ist der Vergleich der drei Komponenten grafisch dargestellt.

Das Recycling auf höchstem Niveau ist die Wiederverwendung von Bauteilen mit oder ohne Aufarbeitung. In einem ersten Schritt wurden die in Tabelle 4.15 (links) dargestellten Bauteile als potentiell wiederverwendbare Bauteile identifiziert. Danach ist eine Masse von 1.800 kg aus der Ladesäule wiederverwendbar. Die zu den Bauteilen erforderlichen Demontagezeiten ergeben sich aus den strategischen Abhängigkeiten im Demontagefließbild. In Tabelle 4.15 (rechts) ist die Ermittlung der Demontagezeit am Beispiel des Werbebildschirms dargestellt. Als kumulierte Demontagezeit ergibt sich 3,2 min (195 s). Die Zeit für die Vorbehandlung/Trockenlegung ist ein grundsätzlich

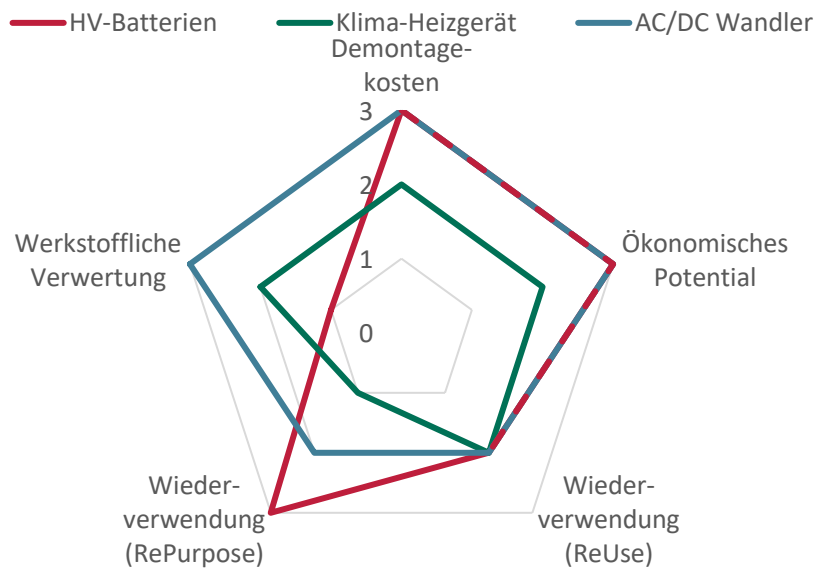


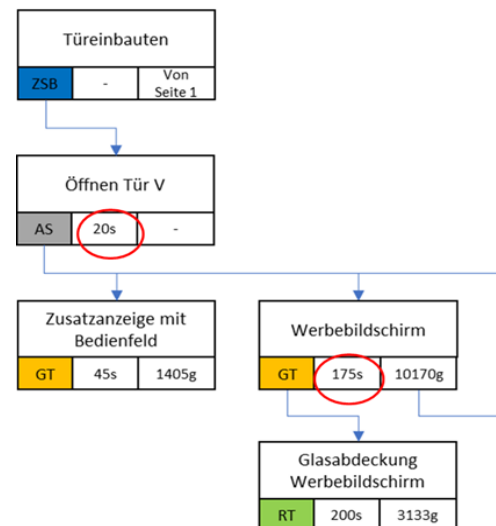
Abbildung 4.23: Vergleichende Darstellung der Baugruppen mit höchstem Potenzial

durchzuführender Aufwand. Dieser muss immer mit bewertet werden. Eine generelle Verteilung auf potentielle Bauteile führt zu einer hohen Wertverzerrung.

Durch die Wiederverwendung einzelner Bauteile werden die entsprechenden R-Strategien positiv beeinflusst. Zudem können als sekundäre Effekte positive Einflüsse auf die Reparatur- und Austauschfähigkeit erzielt werden. Durch die Wieder- bzw. Weiterverwendung der Bauteile ergibt sich ebenfalls ein positiver Einfluss auf die Umweltwirkung. Zwar ist die Wiederverwendbarkeit von Bauteilen in diesem Anwendungsbeispiel begrenzt, durch die Wiederverwendbarkeit von Bauteilen mit einem großen Impact, wie den Batterien, ergibt sich dennoch ein signifikanter Einfluss.

Tabelle 4.15: Potenzial zur Wiederverwendung von Bauteilen (links) und Demontagezeiten am Beispiel des Werbebildschirms (rechts)

Bauteil	Masse	Demontagezeit
Vorbehandlung	Basiszeit	65,0 min
HV-Batterie (4 Stück)	1.600 kg	44,0 min
Klima-Heizgerät	77,5 kg	(15,0 min)
AC/DC Konverter (2 Stück)	36 kg	24,6 min
DC/DC Konverter (4 Stück)	50 kg	15,6 min
Ladekabel (2 Stück)	25 kg	9,0 min
Werbebildschirm	10 kg	3,2 min
Bedienfeld	1,4 kg	1,1 min
Gesamt	1.800 kg	

























	R-Strategien							Maßnahmen/Effekte				
Wiederverwendung Bauteile	Gesamteinfluss 3	Refuse 0	Rethink 0	Reduce 0	Reuse 3	Rezyklat 0	Umweltwirkung 3	Demontage 0	Austausch 1	Trennung 0	Lebensdauer 0	
	Repair 1	Refurbish 3	Remanufacturing 3	Repurpose 3	Recycle 0	Modularisierung 0	Leichtbau 0	Individualisierung 0	Technik 0	Funktionserweit. 0	Funktionstrennung 0	

In der Ladesäule sind 22 reine Endteile vorhanden, die aber teilweise eine kleine Masse und eine große strategische Abhängigkeit von anderen Bauteilen haben. Für eine stoffliche Verwertung kommen jedoch nur Bauteile infrage, die eine große Masse bei kleiner Demontagezeit aufweisen. Dazu wurden zunächst die massereichsten Bauteile aus thermoplastischem Werkstoff identifiziert (vgl. Tabelle 4.16). Einige der Bauteile erfordern jedoch eine unwirtschaftlich hohe Zeit, um als reines Endteil vorzuliegen.

Tabelle 4.16: Massereiche, thermoplastische Bauteile der Ladesäule

Bauteil	Status	Masse (g)	Kunststoff	Demontagezeit (min)	Sekundärrohstoffwert (€)
Glasabdeckung Werbebildschirm	Ausbau	3.132,5	PC	6,5	3,10
Wanne Klimagerät Eb10	Weiterzerlegung	1.871,0	PVC		
Lüftungsgitter innen V	Ausbau	1.769,0	PC+ABS	0,8	1,90
Lüftungsgitter außen V	Ausbau	1.271,0	PC+ABS		
Lüfterrahmen (3 Stk)	Weiterzerlegung	1.737,3	PA6		
Abdeckung / Trennschicht HV	Weiterzerlegung	1.608,0	PC+ABS		
Lüftungsgitter innen H	Ausbau	1.767,0	PC+ABS	0,8	1,90
Lüftungsgitter außen H	Ausbau	1.279,5	PC+ABS		
Abdeckung I / Trennschicht HV	Weiterzerlegung	1.083,5	PC+ABS		
Luftführung (3 Stk)	Weiterzerlegung	1.033,5	PP-TD40		
Lüfterräder (3 Stk)	Weiterzerlegung	998,9	PA66		

Damit kommen die thermoplastischen Bauteile *Abdeckung Werbebildschirm*, *Lüftungsgitter vorn* und *Lüftungsgitter hinten* für eine stoffliche Verwertung infrage. Die Wiederverwertung von großen Kunststoffbauteilen führt zu einer Verbesserung der Recyclingfähigkeit und durch entsprechende Maßnahmen auch zu einer verbesserten Trennbarkeit der Materialien bzw. Demontage der Komponenten. Es ergibt sich insgesamt ein moderater Gesamteinfluss.

	R-Strategien						Maßnahmen/Effekte				
Wiederverwertung	 Gesamteinfluss 2	 Refuse 0	 Rethink 0	 Reduce 0	 Reuse 0	 Rezyklat 0	 Umweltwirkung 0	 Demontage 1	 Austausch 0	 Trennung 3	 Lebensdauer 0
	 Repair 0	 Refurbish 0	 Remanufacturing 0	 Repurpose 0	 Recycle 3	 Modularisierung 0	 Leichtbau 0	 Individualisierung 0	 Technik 0	 Funktionserweit. 0	 Funktionstrennung 0

4.3.3 Modulare Seitenwand

Eine Teilmodularisierung der Ladesäule bietet sowohl in Hinblick auf die Zirkularität als auch auf technische und wirtschaftliche Eigenschaften zahlreiche Potenziale. Nachfolgend werden diese Potenziale anhand der Modularisierung der Seitenwand erarbeitet. In der Referenzladesäule ist die Seitenwand ein Teil der Schweißbaugruppe des Gehäuses und somit unlösbar angebunden. Da das gesamte Gehäuse aus Stahl besteht, führt dies zu keinen Herausforderungen in Bezug auf die Recyclingfähigkeit, jedoch hinsichtlich einer Reparaturfähigkeit und Individualisierbarkeit. Die bestehende Außenverkleidung der mobilen Ladesäule bringt erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der Wartungszugänglichkeit mit sich. Insbesondere die fest verschweißte Bepunktung des Grundgestells erschwert den direkten Zugriff auf zentrale Komponenten wie die Batteriemodule. Diese bauliche Konfiguration führt zu umständlichen Wartungsprozessen, verlängerten Instandhaltungszeiten und folglich zu erhöhten Betriebskosten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, ein alternatives Verkleidungskonzept zu entwickeln, das eine effizientere und anwenderfreundlichere Wartungsstrategie ermöglicht.

Die Entwicklung einer modularen Seitenwand verfolgte daher mehrere übergeordnete Ziele. Im Vordergrund stand die Optimierung der Wartungszugänglichkeit. Durch die Einführung einer modularen Bauweise wird ein direkter Zugang zu den internen Komponenten ermöglicht, wobei sich der Aufwand für Montage und Demontage erheblich reduziert. Darüber hinaus eröffnet die modulare Struktur die Möglichkeit zur funktionalen Erweiterung: So kann bspw. eine Dämmung integriert werden, die je nach klimatischer Umgebung variiert werden kann. Zusätzlich besteht Potenzial zur Anbindung von digitalen oder werbetechnischen Elementen wie Displays, LED-Flächen oder individuell gestalteten Fronten. Ein weiteres Ziel war die Erhöhung der Variabilität und Individualisierbarkeit. Die modulare Struktur erlaubt es, das äußere Erscheinungsbild der Ladesäule flexibel an verschiedene Nutzungsszenarien anzupassen. Denkbar sind unter anderem Designlösungen im Stil von Markenbotschaften, Veranstaltungsmotiven oder Werbeflächen. Auch funktionale Aspekte wie schwenkbare oder voll abnehmbare Verkleidungen konnten in der Entwicklung berücksichtigt werden. Abbildung 4.24 zeigt das Grundkonzept einer solchen modularen Seitenwand.

Die entwickelte modulare Seitenwand basiert auf einem mehrschichtigen, logisch gegliederten Aufbau, der sich durch Wartungsfreundlichkeit, strukturelle Stabilität, Anpassungsfähigkeit und Kosteneffizienz auszeichnet. Das Konzept überwindet die Defizite der bestehenden fest verschweißten Bepunktung, indem es die flexible Demontage und den gezielten Austausch einzelner Bauteile ermöglicht. Zentraler Bestandteil der Konstruktion ist ein modulares Rahmensystem, das die funktionale Trennung und technische Gliederung der Verkleidungskomponenten erlaubt. Die modulare Struktur bietet darüber hinaus einen klaren Mehrwert hinsichtlich der Wartungseffizienz. So können die Seitenwände ohne speziellen Werkzeugeinsatz geöffnet werden, wodurch Wartungszeiten verkürzt und technische Eingriffe erleichtert werden. Gleichzeitig erlaubt die Konstruktion eine hohe Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Umgebungsanforderungen: Materialien, Dämmoptionen und Designs lassen sich flexibel austauschen oder kombinieren. Der modulare Aufbau wird zudem durch

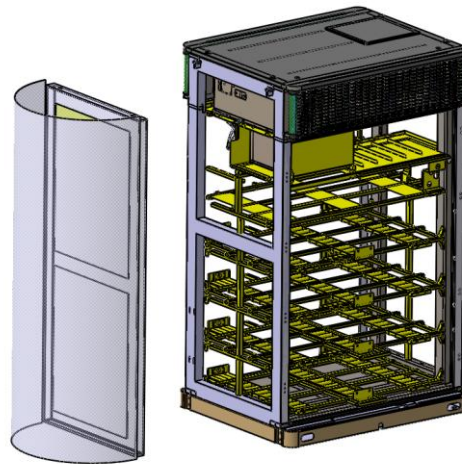


Abbildung 4.24: Grundkonzept einer modularen Seitenwand

eine speziell entwickelte Abdichtung ergänzt, die die internen Komponenten zuverlässig vor äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit, Staub oder Temperaturdifferenzen schützt. Die gesamte Konstruktion ist so ausgelegt, dass auch Einzelpersonen ohne Hilfsmittel oder Spezialwerkzeuge Wartungsarbeiten sicher und effizient durchführen können. Die modulare Seitenwand setzt sich aus vier Hauptkomponenten zusammen (vgl. Abbildung 4.25), die eine flexible Anpassung und eine hohe strukturelle Stabilität gewährleisten:

1. Grundgestell (tragende Struktur)

Die modulare Seitenwand besteht aus vier Hauptkomponenten, die eine flexible Anpassung und hohe strukturelle Stabilität gewährleisten: das Grundgestell, der Montagerahmen, das Dämmmaterial und die Beplankung. Das Grundgestell stellt die tragende Struktur dar und bildet das statische Fundament der Ladesäule. Es besteht aus einem hochbelastbaren Metallrahmen, der eine gleichmäßige Verteilung mechanischer Lasten sicherstellt, als stabile Trägerstruktur für die Beplankung fungiert und mit

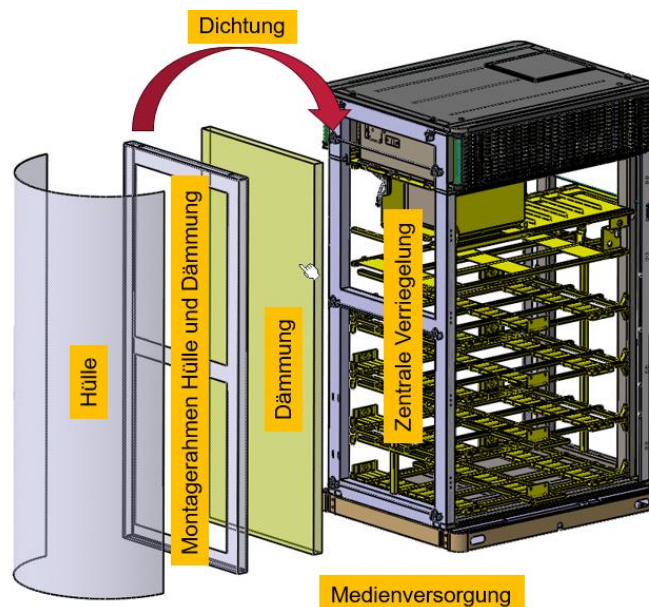


Abbildung 4.25: Struktur des modularen Montagerahmens mit Dämmoptionen

verschiedenen Montagesystemen kompatibel ist. Die Anpassung erfolgte so, dass eine optimale Verteilung der Schnellverschlüsse gewährleistet ist. Dadurch werden ungleichmäßige Spannungen vermieden und Materialermüdung an kritischen Befestigungspunkten reduziert.

2. Montagerahmen (Schnittstelle zwischen Grundgestell und Verkleidung)

Der Montagerahmen fungiert als Schnittstelle zwischen dem Grundgestell und der äußeren Beplankung und ist das zentrale Element der Modularität. Er erfüllt mehrere Schlüsselfunktionen. Erstens ermöglicht er durch standardisierte Befestigungspunkte die Verwendung unterschiedlichster Beplankungsmaterialien – etwa Aluminium, glasfaserverstärkte Kunststoffe oder Verbundmaterialien –, ohne dass bauliche Änderungen am Grundgestell erforderlich sind. Zweitens ist der Rahmen mit einem integrierten Schnellwechselsystem ausgestattet, das aus verstärkten Schnellverschlüssen besteht. Diese erlauben eine werkzeuglose Demontage und bieten gleichzeitig eine hohe strukturelle Integrität und mechanische Festigkeit. Drittens bleibt die Geometrie des Rahmens konstant, unabhängig von der verwendeten Beplankung oder den klimatischen Anforderungen am Einsatzort. Dadurch wird eine modulare und zugleich serielle Fertigung unterstützt, bei der mit wenigen standardisierten Komponenten eine Vielzahl funktionaler und gestalterischer Varianten realisierbar ist. Der Montagerahmen reduziert auf diese Weise sowohl die Fertigungs- als auch die Wartungskosten und trägt entscheidend zur Flexibilität und Skalierbarkeit des Gesamtsystems bei.

3. Dämmmaterial (optionale thermische und akustische Isolierung)

Die dritte Komponente im Aufbau der modularen Seitenwand ist das Dämmmaterial, das optional integriert werden kann. Die Möglichkeit zur Aufnahme thermischer und akustischer Dämmstoffe stellt einen wesentlichen funktionalen Mehrwert dar, da sie eine gezielte Anpassung an die jeweilige Einsatzumgebung erlaubt. Im Bereich der thermischen Dämmung können durch die Integration spezieller Isoliermaterialien die Betriebstemperaturen im Inneren der Ladesäule stabilisiert und damit die Lebensdauer temperaturempfindlicher Komponenten wie etwa der Batteriemodule erhöht werden. Insbesondere bei extremen klimatischen Bedingungen – sowohl in sehr kalten als auch sehr heißen Regionen – ist dieser Effekt entscheidend für die Funktionssicherheit des Systems. Ergänzend zur thermischen Dämmung ermöglicht der modulare Aufbau auch die Umsetzung akustischer Isolierungen. Diese kommen vor allem in lärmsensiblen Bereichen, etwa in Wohngebieten oder an Orten mit hoher Aufenthaltsqualität, zum Einsatz. Dort kann durch gezielte Schalldämpfung die akustische Emission der Ladesäule reduziert werden. Die Dämmung ist flexibel kombinierbar und kann bei Bedarf entfallen, wenn die Seitenwand ausschließlich als tragendes Element ohne zusätzliche Isolation dient. Daraus ergibt sich ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit, wobei sowohl energetische als auch akustische Anforderungen berücksichtigt werden können.

4. Beplankung (modulare Außenverkleidung)

Die vierte Komponente der modularen Seitenwand bildet die Beplankung, also die äußere Verkleidung. Diese erfüllt nicht nur eine schützende, sondern auch eine gestalterische und funktionale Aufgabe. Abhängig vom Einsatzszenario kann sie entweder schwenkbar oder vollständig abnehmbar ausgeführt werden. In der Materialwahl stehen verschiedene witterungsbeständige Werkstoffe zur Verfügung, darunter unter anderem Aluminium oder glasfaserverstärkter Kunststoff. Die Beplankung kann individuell gestaltet und durch funktionale Erweiterungen ergänzt werden. Dazu zählen beispielsweise Displays, LED-Elemente oder interaktive Flächen, die je nach Nutzungskontext unterschiedliche Aufgaben übernehmen können – von Informationsanzeigen über Werbeflächen bis hin zu digital vernetzten Interfaces. Um den mechanischen Anforderungen in öffentlichen oder exponierten Bereichen gerecht zu werden, ist die Beplankung mit verstärkten Schnellverschlüssen ausgestattet, die

einen erhöhten Schutz vor Vandalismus gewährleisten. Gleichzeitig lassen sich beschädigte Elemente durch das modulare System gezielt und mit geringem Aufwand austauschen. Dadurch wird nicht nur die Reparaturfreundlichkeit gesteigert, sondern auch die Möglichkeit geschaffen, das Design je nach Einsatzort oder Branding-Anforderung zu variieren.

Mechanische Befestigung und Schnellverschlüsse

Ein zentraler Bestandteil der modularen Seitenwand ist das mechanische Befestigungssystem, das die sichere Verbindung zwischen Montagerahmen und Beplankung gewährleistet. Herzstück dieser Lösung sind verstärkte Schnellverschlüsse, die für eine schnelle und werkzeuglose Montage und Demontage entwickelt wurden. Die Verkleidungselemente können innerhalb weniger Sekunden gelöst oder befestigt werden, was eine signifikante Zeitersparnis bei Wartungsarbeiten mit sich bringt. Die Schnellverschlüsse sind so gestaltet, dass sie mit minimalem Kraftaufwand von einer einzelnen Person bedient werden können. Sie bestehen aus hochfestem Material, das auch bei starker Beanspruchung eine dauerhafte mechanische Verbindung sicherstellt. Für den Schutz der internen Komponenten wird zusätzlich eine elastische Schlauchdichtung eingesetzt. Diese dient als Barriere gegen Feuchtigkeit, schützt vor Kondensation und Korrosion und verhindert das Eindringen von Staub, Schmutz oder anderen Partikeln. Gerade in industriellen Umgebungen sowie bei stark schwankenden Außentemperaturen trägt dieses Abdichtungssystem entscheidend zur Betriebssicherheit bei. Im Rahmen der Entwicklung wurden zwei Konstruktionskonzepte validiert, die unterschiedliche Anforderungen an Wartungszugänglichkeit, Flexibilität und Funktionserweiterung adressieren.

Konzeptvariante 1: Schwenkbare Seitenwand

Die schwenkbare Seitenwand (vgl. Abbildung 4.26) stellt eine besonders wartungsfreundliche Konstruktionsvariante dar, die gezielt für eine schnelle und unkomplizierte Zugänglichkeit zu den internen Komponenten der mobilen Ladesäule entwickelt wurde. Im Gegensatz zur vollständig entnehmbaren Ausführung erlaubt sie das seitliche Öffnen der Verkleidung durch einen integrierten Drehmechanismus, ohne dass eine komplette Demontage erforderlich ist. Die konstruktive Umsetzung basiert auf einem robusten Scharnierprinzip: Die Seitenwand ist über drei hochbelastbare Drehgelenke mit dem Montagerahmen verbunden. Diese Hochlast-Scharniere gewährleisten nicht nur eine gleichmäßige Lastverteilung beim Öffnungs- und Schließvorgang, sondern sichern auch die mechanische Langlebigkeit der beweglichen Verbindung. Durch die Mehrpunktlagerung wird eine Verformung der Seitenwand bei wiederholter Nutzung effektiv vermieden.

Zur mechanischen Begrenzung des Öffnungswinkels wurden zusätzlich definierte Anschläge in die Konstruktion integriert. Diese verhindern, dass die Seitenwand über ein bestimmtes Maß hinaus geöffnet wird, was insbesondere bei Windlasten oder unsachgemäßer Bedienung das Risiko von Schäden deutlich reduziert. Der Öffnungsvorgang erfolgt manuell und ohne den Einsatz zusätzlicher Werkzeuge. Dabei wurde gezielt auf eine intuitive Handhabung geachtet, sodass Wartungspersonal die Seitenwand auch unter eingeschränkten Platzverhältnissen sicher bedienen kann.

Ein zentrales Element der Sicherheit ist das Verriegelungssystem, das in Form einer selbstsichernden Bajonettverriegelung ausgeführt ist. Diese gewährleistet eine stabile Arretierung im geschlossenen Zustand und verhindert ein unbeabsichtigtes Öffnen, etwa durch Vibrationen, äußere Einwirkungen oder Windlasten. Die Bajonettmechanik erlaubt zudem eine schnelle Entriegelung durch eine einfache Drehbewegung, wobei der Verriegelungsvorgang durch eine definierte Rastung mechanisch gesichert wird. Das System ist wartungsarm und für eine hohe Zahl von Zyklen ausgelegt, was es für den häufigen Einsatz im Betrieb prädestiniert.

Zusammenfassend bietet die schwenkbare Seitenwand eine besonders nutzerfreundliche Lösung für Wartungseingriffe, da sie einen direkten Zugriff auf die innenliegenden Komponenten erlaubt, ohne dass einzelne Elemente vollständig entfernt werden müssen. Die Kombination aus langlebiger Scharniermechanik, kontrollierter Bewegungsbegrenzung und sicherer Verriegelung stellt ein ausgewogenes Verhältnis zwischen technischer Funktionalität, Bedienkomfort und Betriebssicherheit dar.

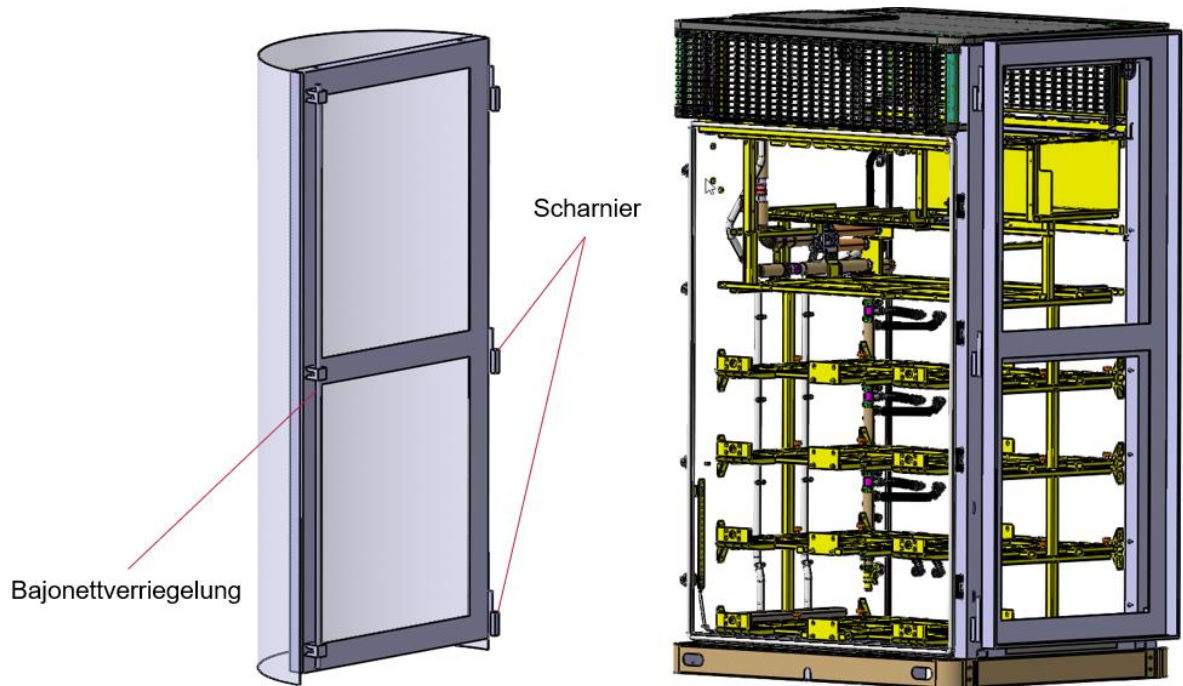


Abbildung 4.26: Schwenkmechanismus der Seitenwand

Konzeptvariante 2: Wechselbare Seitenwand

Die zweite Variante sieht eine vollständig entnehmbare Seitenwand vor, die über ein Die zweite entwickelte Konstruktionsvariante der modularen Seitenwand ist als vollständig wechselbare Ausführung konzipiert und stellt eine hochflexible und besonders wartungsfreundliche Lösung dar (vgl. Abbildung 4.27). Im Gegensatz zur schwenkbaren Variante ist die Verkleidung hierbei nicht dauerhaft mechanisch verbunden, sondern lässt sich bei Bedarf vollständig vom Montagerahmen abnehmen. Dies ermöglicht einen uneingeschränkten Zugang zu den innenliegenden Komponenten der Ladesäule und eignet sich insbesondere für Szenarien, in denen ein kompletter Austausch der Außenhülle oder der Einbau von Sondermodulen erforderlich ist.

Die mechanische Kopplung der Seitenwand erfolgt über ein speziell entwickeltes Einhängesystem mit oberer Fixierleiste, in das die Wandmodule zunächst kraftfrei eingehängt werden. Durch ihr Eigengewicht liegen die Module stabil am Montagerahmen an, bevor die endgültige Verriegelung erfolgt. Die Fixierung wird über einen robusten Exzentermechanismus sichergestellt, der zentral hinter der Frontplatte positioniert ist und über einen leicht zugänglichen Hebel bedient werden kann. Durch eine einfache Drehbewegung wird der Exzenter aktiviert, wodurch ein hoher Anpressdruck erzeugt wird, der die Seitenwand kraftschlüssig mit dem Montagerahmen verbindet. Die mechanische Hebelwirkung des Exzenters erlaubt dabei eine gleichmäßige Kraftverteilung bei minimalem Bedienungsaufwand. Gleichzeitig wirkt die Konstruktion selbsthemmend. Nach dem Verriegelungsvorgang

verbleibt die Seitenwand in ihrer Position, ohne dass zusätzliche Sicherungsmaßnahmen notwendig sind.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Bauweise liegt in der hohen Austauschbarkeit der Verkleidungselemente. Das modulare Design erlaubt es, Seitenwände mit unterschiedlichen Eigenschaften – etwa mit integrierten LED-Modulen, Displays oder spezifischen Dämmaufbauten – bei Bedarf rasch gegeneinander auszutauschen. So können verschiedene Ausführungen je nach Einsatzort oder Nutzungskonzept flexibel kombiniert werden. Die Konstruktion ist so ausgelegt, dass dieser Wechsel ohne Spezialwerkzeug und durch nur eine Person durchgeführt werden kann. Dadurch reduziert sich der Zeitaufwand für Montage, Reparatur oder Aufrüstung auf ein Minimum.

Der Exzentermechanismus erfüllt darüber hinaus eine zentrale Funktion in Bezug auf die Abdichtung. Durch den gezielten Anpressdruck wird eine formschlüssige Verbindung zur elastischen Schlauchdichtung aufgebaut, die das System zuverlässig gegen Feuchtigkeit, Staub und Temperaturschwankungen schützt. Dies ist besonders relevant für Einsätze in Außenbereichen oder in industriellen Umgebungen, in denen hohe Anforderungen an die Robustheit und Dichtheit der Konstruktion bestehen. Bei Bedarf kann auch in dieser Variante eine zusätzliche thermische oder akustische Dämmung zwischen Montagerahmen und Beplankung integriert werden. Der modulare Aufbau der Wand erlaubt eine flexible Anpassung an verschiedene Anforderungen hinsichtlich Energieeffizienz und Schallschutz.

Zusammenfassend bietet die wechselbare Seitenwand maximale Wartungsfreundlichkeit und gestalterische Freiheit. Sie stellt eine ideale Lösung für Anwendungen dar, bei denen häufige Modifikationen, individuelle Konfigurationen oder vollständige Tauschprozesse gefordert sind. Das Zusammenspiel aus werkzeugloser Bedienung, hoher mechanischer Stabilität, optimierter Abdichtung und modularer Erweiterbarkeit macht sie zu einem zentralen Baustein für zukunftsfähige, industriell vorgefertigte Ladeinfrastruktursysteme.

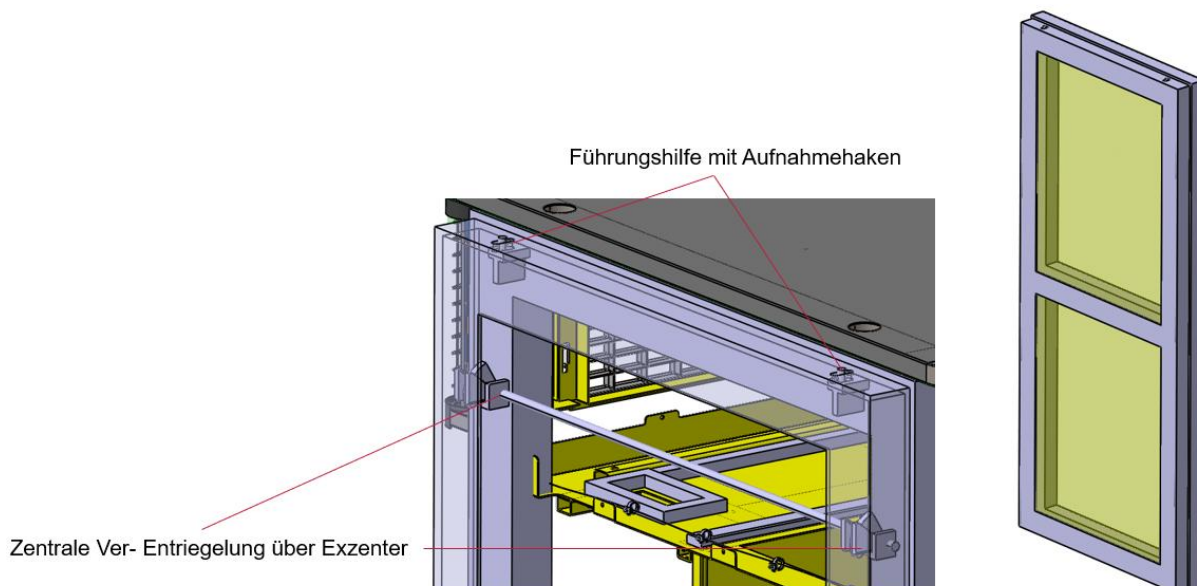


Abbildung 4.27: Wechselbare Seitenwand mit Exzentermechanismus

Exzenterverriegelung

Die Exzenterverriegelung (vgl. Abbildung 4.28) stellt die primäre Lösung für die mechanische Fixierung der modularen Seitenwand dar. Sie wurde speziell für eine schnelle, werkzeuglose Bedienung entwickelt und gewährleistet eine sichere, kraftvolle und gleichmäßige Arretierung der Seitenwand am Montagerahmen. Sie ist einfach als Schweißkonstruktion aufgebaut und bietet eine zentrale Verriegelungsmöglichkeit direkt hinter der Fronttür.

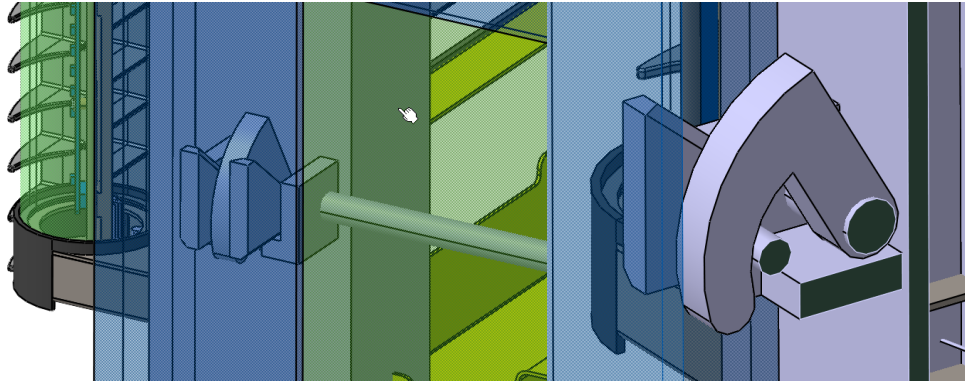


Abbildung 4.28: Exzenterverriegelung in geschlossener und geöffneter Position

Der Verriegelungsvorgang beginnt mit dem Einsetzen der Seitenwand. Diese wird zunächst in eine obere Führungsschiene am Montagerahmen eingehängt. Die Wand hängt anschließend durch ihr Eigengewicht stabil in Position, liegt jedoch noch ohne Anpressdruck am Rahmen an. In dieser Position können kleinere Korrekturen an der Ausrichtung vorgenommen werden, bevor der eigentliche Verriegelungsvorgang gestartet wird. Im nächsten Schritt erfolgt die Aktivierung des Exzenters. Dies geschieht durch eine manuelle Drehbewegung an einem außenliegenden Hebel oder Griff, der direkt mit dem Exzenterkörper verbunden ist (vgl. Abbildung 4.29). Durch die exzentrische Geometrie dieses Bauteils wird mit zunehmender Drehung ein wachsender Andruck erzeugt, der die Seitenwand fest gegen den Montagerahmen presst. Die entstehende Hebelwirkung erlaubt es, eine hohe Anpresskraft aufzubauen, ohne dass dafür ein übermäßiger Kraftaufwand durch den Bediener erforderlich ist. Der Exzenter funktioniert dabei rein mechanisch und benötigt keinerlei zusätzliche Energiezufuhr. Seine

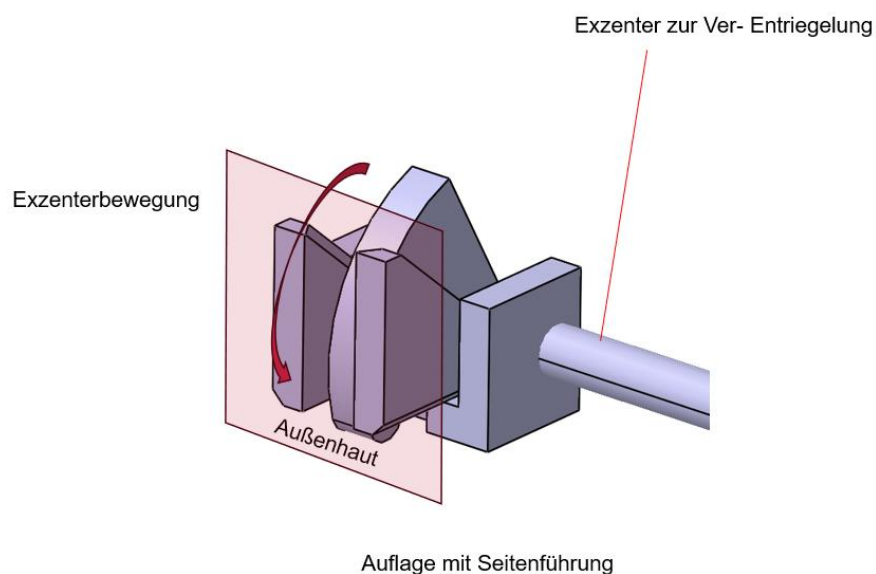


Abbildung 4.29: Exzenterbewegung im Detail

Konstruktion ist bewusst einfach gehalten, um eine hohe Betriebssicherheit und geringe Störanfälligkeit zu gewährleisten. Durch die Bewegung des Exzenters wird nicht nur die mechanische Fixierung realisiert, sondern gleichzeitig auch die elastische Schlauchdichtung zwischen Wand und Rahmen gleichmäßig komprimiert. Die resultierende flächige Dichtung schützt zuverlässig vor dem Eindringen von Feuchtigkeit, Staub, Schmutz und anderen Umwelteinflüssen. Aufgrund der kontrollierten Kompression bleibt die Dichtung auch bei wiederholtem Gebrauch in ihrer Funktion erhalten und unterliegt nur einer geringen Setzneigung.

Ein zentrales Merkmal der Exzenterverriegelung ist ihre selbsthemmende Konstruktion. Sobald die Verriegelungsposition erreicht ist, bleibt die Mechanik sicher in dieser Stellung fixiert – selbst unter Erschütterung, Vibration oder wechselnder Belastung im laufenden Betrieb. Eine unbeabsichtigte Öffnung der Seitenwand ist dadurch ausgeschlossen. Diese Eigenschaft erhöht die Betriebssicherheit erheblich, insbesondere bei Anwendungen im öffentlichen Raum oder an hochfrequentierten Standorten. Für die Entriegelung wird die Drehbewegung am Exzenter einfach in umgekehrter Richtung ausgeführt. Dabei wird der Anpressdruck gezielt reduziert, bis der Exzenter in seine Ausgangsposition zurückkehrt. Die Seitenwand kann nun ohne Widerstand aus der oberen Führung herausgehoben und vollständig entfernt werden. Der gesamte Vorgang – vom Lösen der Arretierung bis zur vollständigen Demontage – kann von einer Person innerhalb weniger Sekunden durchgeführt werden, ohne dass Werkzeuge oder Spezialkenntnisse erforderlich sind.

Die Exzenterverriegelung zeichnet sich durch ihre Langlebigkeit aus. Sämtliche Komponenten sind auf eine hohe Zyklenzahl ausgelegt und widerstandsfähig gegenüber mechanischem Verschleiß. Dies macht sie besonders geeignet für Anwendungen, bei denen häufige Wartungsmaßnahmen, modulare Konfigurationswechsel oder eine intensive Nutzung zu erwarten sind.

Alternative Verriegelung: Raste

Neben der Exzenterverriegelung wurde im Rahmen der Entwicklung eine alternative mechanische Lösung konzipiert, die auf einem Rastmechanismus basiert (vgl. Abbildung 4.30). Diese sogenannte Rastverriegelung dient entweder als eigenständige Verriegelungslösung für weniger sicherheitskritische Anwendungen oder kann ergänzend zur Exzentermechanik eingesetzt werden, etwa als sekundäre Sicherung. Ihr Konstruktionsprinzip ist bewusst einfach gehalten, um eine

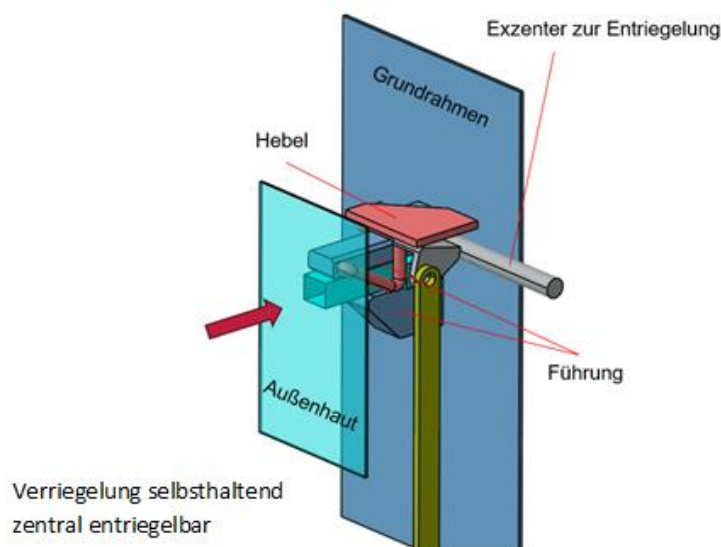


Abbildung 4.30: Übersicht über die Rastverriegelung

kostengünstige, funktional robuste und leicht bedienbare Lösung für modulare Seitenwandsysteme zu schaffen.

Die Funktionsweise der Rastverriegelung gliedert sich in drei aufeinanderfolgende Schritte: Einsetzen, Einrasten und Entriegeln (vgl. Abbildung 4.31). Im ersten Schritt wird die Seitenwand analog zur Exzentervariante in eine vorgesehene obere Führung im Montagerahmen eingehängt. Durch das Absenken in die vertikale Position bewegt sich ein federbelasteter Riegelmechanismus im unteren Bereich des Rahmens, wobei sich der Verriegelungshebel automatisch anhebt. Die Bewegung der Wand beim Einsetzen bewirkt dabei, dass der Mechanismus vorgespannt wird und in die Position zur Arretierung übergeht. Anschließend erfolgt das eigentliche Einrasten. Sobald die Seitenwand vollständig in Position gebracht ist, wird durch einen leichten Druck auf das Bauteil die Rastmechanik ausgelöst. Der Riegel oder Bolzen fällt aufgrund der Schwerkraft oder Federkraft in die dafür vorgesehene Aufnahme im Rahmen und arretiert die Seitenwand hörbar. Dieses akustische Feedback („Klicken“) signalisiert dem Bediener eindeutig, dass die Verriegelung korrekt erfolgt ist. Die Rückmeldung ist insbesondere im Arbeitsalltag von Vorteil, da sie die visuelle Kontrolle überflüssig macht und den Vorgang intuitiv nutzbar gestaltet. Zur Entriegelung der Seitenwand wird der Rastmechanismus manuell gelöst. Dies geschieht über einen zentralen Hebel, der mit einem Exzentermechanismus verbunden ist. Durch eine einfache Drehbewegung wird der Rastbolzen aus seiner Position gehoben und der Weg für die Demontage freigegeben. Anschließend kann die Seitenwand aus der oberen Führung herausgehoben und entfernt werden. Auch dieser Vorgang lässt sich ohne Werkzeuge und von einer einzelnen Person durchführen.

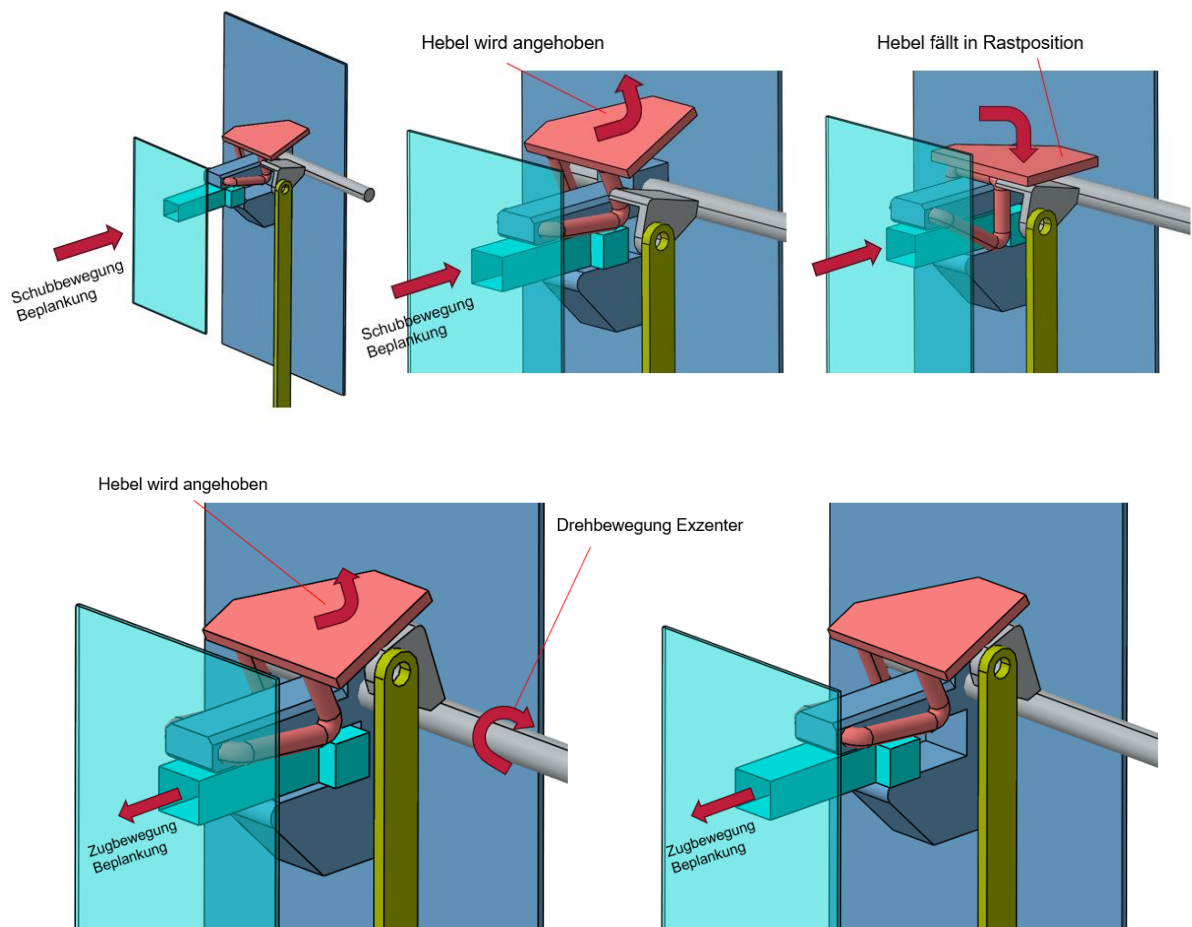


Abbildung 4.31: Funktionsweise der Rastverriegelung (Ver- und Entriegelung)

Die Rastverriegelung zeichnet sich durch ihre mechanische Einfachheit und Robustheit aus. Sie verzichtet auf komplexe drehbare Elemente und ist damit weitgehend unempfindlich gegenüber mechanischem Verschleiß. Durch den Verzicht auf bewegliche Exzenterkomponenten reduziert sich zudem die Störanfälligkeit, was die Lösung besonders wartungsarm macht. Die verwendeten Materialien und Bauteile sind auf hohe Stabilität bei gleichzeitig geringem Platzbedarf ausgelegt, was eine kompakte Integration in die Wandstruktur erlaubt. Ein weiterer Vorteil liegt in der Kosteneffizienz. Aufgrund ihrer einfachen Bauweise und geringen Teileanzahl ist die Rastverriegelung deutlich günstiger in der Herstellung als komplexere Verriegelungssysteme. Sie stellt somit eine wirtschaftlich attraktive Alternative dar, vor allem für Seitenwände, die seltener geöffnet werden müssen oder in modularen Systemen als passive Verkleidungselemente dienen.

In Kombination mit der Exzenterverriegelung kann die Rastmechanik als zusätzliche Sicherheitsverriegelung verwendet werden. Diese doppelte Absicherung erhöht die Betriebssicherheit, insbesondere bei mobilen Anwendungen oder im Außenbereich, wo das Risiko unbeabsichtigter Öffnungen durch Windlasten, Vibrationen oder Vandalismuseinwirkung erhöht ist.

Die beiden entwickelten Verriegelungssysteme – Exzenterverriegelung und Rastverriegelung – unterscheiden sich hinsichtlich Aufbau, Funktionalität und Anwendungsschwerpunkt (vgl. Tabelle 4.17). Die Exzenterverriegelung überzeugt durch eine hohe und gleichmäßig verteilte Anpresskraft, eine exzellente Dichtwirkung sowie ihre Eignung für häufige Wartungseinsätze. Sie lässt sich schnell, werkzeuglos und zuverlässig bedienen und gewährleistet eine hohe Stabilität auch unter Vibration und mechanischer Belastung. Die Rastverriegelung hingegen bietet eine mechanisch einfachere und kostengünstigere Alternative. Sie ermöglicht eine intuitive Verriegelung mit hörbarem Feedback und eignet sich besonders für weniger häufig genutzte Seitenwände oder als zusätzliche Sicherung in Kombination mit dem Exzentermechanismus. Ihre punktuelle Anpressung und geringere Dichtwirkung machen sie jedoch weniger geeignet für hoch beanspruchte Einsatzbereiche. Beide Systeme lassen sich werkzeuglos bedienen und ermöglichen kurze Montagezeiten. Die Wahl des geeigneten Systems richtet sich nach den Anforderungen an Dichtigkeit, Wartungsfrequenz und mechanische Belastbarkeit.

Tabelle 4.17: Vergleich beider Verriegelungssysteme

Eigenschaft	Exzenterverriegelung	Rastverriegelung
Montagezeit	Sehr kurz (wenige Sekunden)	Kurz (Sekunden bis wenige Minuten)
Werkzeuglose Bedienung	Ja	Ja
Anpresskraft	Sehr hoch, gleichmäßig verteilt	Mittel, punktuell
Dichtwirkung	Sehr gut durch gezielte Kompression	Gut, aber nicht so präzise wie Exzenter
Stabilität gegen Vibrationen	Sehr hoch	Hoch
Wartungsfreundlichkeit	Sehr hoch	Mittel bis hoch
Kosteneffizienz	Höherer Aufwand durch komplexere Mechanik	Günstiger durch einfachere Mechanik

Zusammenfassung des Verriegelungsprozesses

Der Verriegelungsmechanismus der modularen Seitenwand wurde mit Blick auf eine prozesssichere, schnelle und anwenderfreundliche Handhabung ausgelegt. Im Mittelpunkt steht ein montageoptimierter Ablauf, der das Einhängen, Arretieren und Lösen der Verkleidung ohne Werkzeuge durch eine Person ermöglicht. Die Konstruktion erlaubt kurze Zugriffszeiten bei gleichbleibend hoher mechanischer Stabilität und Dichtwirkung. Je nach funktionalem Anspruch und Nutzungshäufigkeit kann zwischen Exzenter- und Rastverriegelung gewählt oder eine Kombination beider Systeme eingesetzt werden. Der Verriegelungsprozess fügt sich in den modularen Aufbau ein und trägt maßgeblich zur Gesamtfunktionalität und Wartungseffizienz der Seitenwand bei.

Dichtungskonzept der modularen Seitenwand

Die Abdichtung der modularen Seitenwand erfolgt über ein speziell ausgelegtes Konzept, das sich durch einfache Montage, hohe Fertigungstoleranz und Wartungsfreundlichkeit auszeichnet. In der Entwicklungsphase wurden verschiedene Profilgeometrien untersucht. Aufgrund der konstruktiven Randbedingungen wurde der Einsatzbereich gezielt auf Flächendichtungen eingegrenzt. Als besonders geeignet hat sich die Kombination aus Flächendichtung und Exzenterverriegelung erwiesen (vgl. Abbildung 4.32). Diese Verbindung erlaubt eine kraftschlüssige Fügung der Wandmodule, wobei sich Abweichungen in den Anzugsmomenten nicht zwangsläufig negativ auf die Dichtwirkung auswirken. Das gewählte Dichtsystem basiert auf Hohlkammerflachdichtungen aus synthetischem Kautschuk (z. B. EPDM), die sich durch ein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis, hohe Medienbeständigkeit sowie geringe Setzneigung auszeichnen. Die Hohlkammergeometrie der Dichtung ermöglicht eine zuverlässige Abdichtung auch bei Positionsabweichungen, wie sie im Montageprozess auftreten können. Die definierte elastische Verformung stellt sicher, dass eine ausreichende Kompression erreicht wird, ohne die Dichtung zu überbeanspruchen. Der modulare Aufbau sowie die Exzenterverriegelung begünstigen zudem eine einfache, reproduzierbare Montage. Ein weiterer Vorteil des Konzepts liegt in der Wartungsfreundlichkeit: Die Dichtelemente sind austauschbar und können bei Bedarf mit minimalem Eingriff ersetzt werden. Insgesamt bietet das System eine wirtschaftliche, robuste und langzeitstabile Lösung für die Abdichtung der modularen Seitenwand.

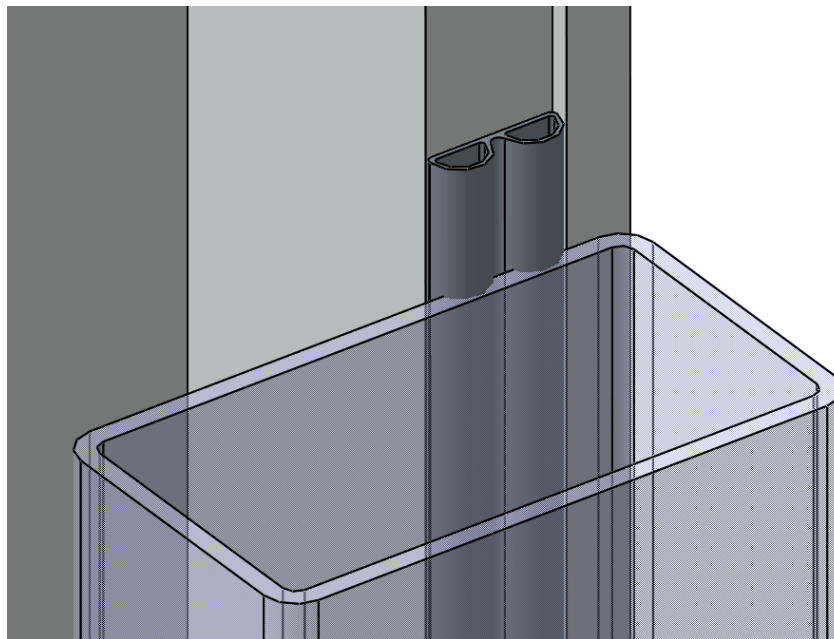
























Abbildung 4.32: Dichtungskonzept der modularen Seitenwand

Eine Modularisierung der Seitenwand hat ein breites Ergebnisspektrum. Dies gilt insbesondere für den Austausch und Reparatur bzw. Modularisierung. Es ergibt sich zwar auch ein deutlicher Vorteil in Bezug auf die Demontagefähigkeit, diese ist jedoch im ursprünglichen Produkt aufgrund des einheitlich verwendeten Stahls nicht erforderlich. Eine Wiederverwendung ist jedoch aufgrund der Produktspezifikation nur begrenzt möglich. Jedoch ergeben sich deutlich verbesserte Möglichkeiten hinsichtlich einer Produktindividualisierung. Trotz der deutlich positiven Effekte betrifft die Maßnahme lediglich zwei Komponenten und hat somit einen moderaten Gesamteinfluss.

	R-Strategien						Maßnahmen/Effekte				
Modulare Seitenwand	 Gesamteinfluss 3	 Refuse 0	 Rethink 0	 Reduce 0	 Reuse 2	 Rezyklat 0	 Umweltwirkung 1	 Demontage 1	 Austausch 4	 Trennung 3	 Lebensdauer 1
	 Repair 5	 Refurbish 1	 Remanufacturing 2	 Repurpose 1	 Recycle 1	 Modularisierung 5	 Leichtbau 1	 Individualisierung 5	 Technik 2	 Funktionserweit. 1	 Funktionsstrennung 3

4.3.4 HV-Board


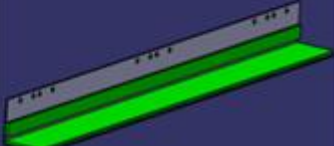
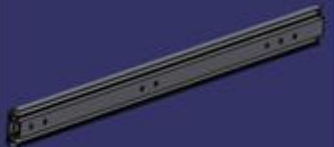

Die bestehende Konstruktion des HV-Boards innerhalb der mobilen Ladesäule weist gravierende Mängel in Bezug auf Zugänglichkeit, Modularität und Wartbarkeit auf. In der aktuellen Ausführung ist das HV-Board fest im Innenraum der Ladesäule installiert und durch zusätzliche Module an Front- und Rückseite nahezu vollständig verbaut. Dies führt dazu, dass eine Demontage oder Reparatur nur mit erheblichem Aufwand möglich ist. Aufgrund der komplexen Verkabelung an zahlreichen Anschlusspunkten und der fehlenden strukturellen Trennung einzelner Funktionsbereiche kann im Störfall nicht gezielt gearbeitet werden. Aufgrund der Komplexität des Systems macht eine Wartung in vielen Fällen eine nahezu vollständige Demontage erforderlich, was zu langen Ausfallzeiten und erhöhten Servicekosten führen kann. Ziel der Konzeptphase war es, eine neue, modulare Lösung für das HV-Board zu entwickeln, die den beschriebenen Problemen gezielt entgegenwirkt. Im Mittelpunkt stand dabei die Idee, das HV-Board so umzugestalten, dass es aus mehreren funktional getrennten, mechanisch entkoppelten Baugruppen besteht. Jede dieser Baugruppen sollte einzeln demontierbar und einfach zugänglich sein, ohne dass andere Module oder Tragsysteme entfernt werden müssen.

Zentraler Bestandteil der Vision war eine vollständige Umstellung auf ein Auszugsprinzip. Das HV-Board sollte künftig aus der Frontseite der Ladesäule herausgezogen werden können – vergleichbar mit einer Schublade. Dadurch ergibt sich eine grundlegend neue Wartungslogik: Die Rückseite der Baugruppe – auf der sich sämtliche elektrischen Anschlüsse befinden – wird damit technisch erreichbar gemacht, ohne dass von außen eingegriffen werden muss. Für die Anbindung der Leitungen werden Kombisteckverbinder verwendet, die beim Einschieben automatisch über fest installierte Verteilerleisten im hinteren Teil der Ladesäule kontaktiert werden. Dadurch wird eine werkzeuglose Verbindung von HV- und Steuerleitungen sowie Kühlung ermöglicht. Verschraubte Kabelverbindungen an beweglichen Komponenten werden konsequent vermieden. Die gesamte Verkabelung wird auf ein Stecksystem umgestellt. Zudem wird vorgeschlagen, die Frontmodule um ein schwenkbares Steuerboard zu ergänzen, auf dem Bedien- und Steuereinheiten platziert sind. Dieses Element lässt sich unabhängig von den HV-Leistungskomponenten bewegen und ermöglicht den frontseitigen Zugriff auf Diagnose-, Kommunikations- oder Konfigurationseinheiten. Die Vision mündet somit in ein vollständig wartbares, modulares HV-System mit hoher Flexibilität im Aufbau und minimalem Serviceaufwand im Betrieb.

Zur Realisierung des modularen Prinzips wurden verschiedene Auszugssysteme analysiert und hinsichtlich ihrer technischen Eignung, Kostenstruktur und mechanischen Stabilität bewertet. Der

Schubladenauszug bildet das zentrale Basiskonzept für die Neugestaltung. Ziel ist es, die einzelnen HV-Module über Auszüge an der Vorderseite zugänglich zu machen und mit geringem Kraftaufwand aus dem Gehäuse der Ladesäule herauszuziehen. Im Rahmen der Bewertung wurden 4 technische Varianten geprüft: Rollenleisten, Gleitleisten sowie Teleskopauszüge. Jede dieser Lösungen wurde in Hinblick auf Belastbarkeit, Bauraumkompatibilität, Präzision, Kosten und Montageaufwand betrachtet. Tabelle 4.18 zeigt eine zusammenfassende Einschätzung der untersuchten Systeme.

Tabelle 4.18: Vergleich der Auszugssysteme

Auszugssysteme			
		Pro	Kontra
Rollenleisten		Einfache Montage ohne besondere Anforderung an die Auszugsbox (nur plane Fläche erforderlich);	Platzbedarf in der Höhe; Zusätzliche Abkippsicherung beim Ausziehen erforderlich;
Gleitleisten POM, PTFE o.ä.		Günstig; wenig Platzbedarf;	Zusätzliche Abkippsicherung beim Ausziehen erforderlich;
Teleskopauszüge		Können stehend (seitlich) oder legend (unter den Boards) montiert werden; Sicherer Auszug ohne Abkippfahr;	erhöhter Platzbedarf; Montage und Demontage, des Boards in die Ladesäule, erfordert eine 2. Person oder einen Hubtisch;
Teleskopauszüge teilbar		Sicherer Auszug ohne Abkippfahr;	Teuer; erhöhter Platzbedarf; nur seitliche Montage möglich; Montage und Demontage, des Boards in die Ladesäule, erfordert eine 2. Person oder einen Hubtisch;

Die Analyse zeigte, dass Teleskopauszüge die beste Lösung im Hinblick auf mechanische Präzision und Tragfähigkeit bieten, jedoch mit vergleichsweise hohen Kosten und baulichen Anpassungen einhergehen. Rollenleisten stellen eine robuste und kostengünstige Lösung dar, erfordern aber eine sorgfältige Justierung und bieten nur begrenzte Führungssicherheit. Gleitleisten bieten einen ausgewogenen Kompromiss, insbesondere bei mittleren Lasten und geringem Einbauraum. Letztlich muss die Auswahl des Auszugssystems abhängig vom Gewicht der Module, der gewünschten Servicefrequenz sowie dem verfügbaren Platz in der Ladesäule getroffen werden.

Ein spezieller Lösungsansatz innerhalb der Schubladenlogik ist das Konzept der Rollenbahn, bei dem die HV-Module auf Rollen gelagert und auf einer festen Führung innerhalb des Gehäuses bewegt werden (vgl. Abbildung 4.33). Der Vorteil liegt in der sehr einfachen linearen Bewegung der Module, die sich mit minimalem Kraftaufwand herausziehen lassen. Durch die Verwendung von Rollen ist keine aufwändige Schienenkonstruktion notwendig, was Montagezeit und Komplexität reduziert.

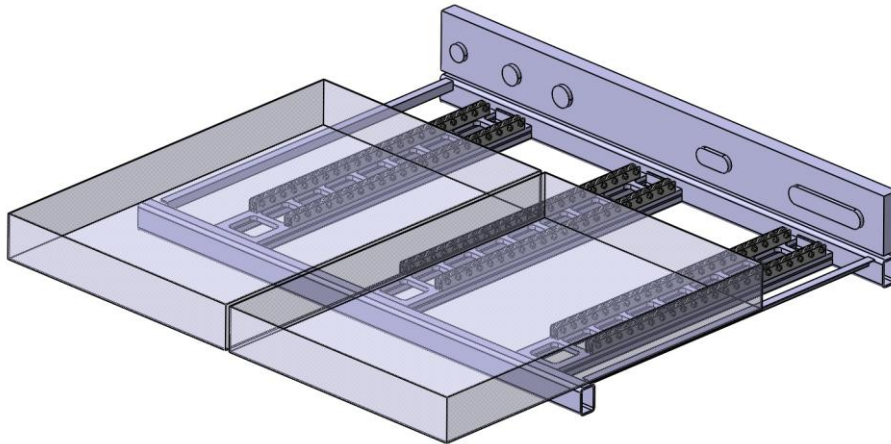


Abbildung 4.33: Darstellung des Rollenbahn-Konzepts

Ein zentrales Ziel der Neugestaltung des HV-Boards war es, eine feingliedrige Modularisierung zu erreichen, die gezielte Wartungseingriffe auf Teilbereiche ermöglicht. Aus diesem Anspruch heraus wurde das Konzept einer Schublade mit funktionaler Unterteilung entwickelt. Es basiert auf zwei voneinander getrennten, ausziehbaren Modulen, die unabhängig voneinander bedient und gewartet werden können. Die Trennung erfolgt entlang funktionaler Zuständigkeiten, beispielsweise zwischen Hochvoltelektronik und Steuerungstechnik (vgl. Abbildung 4.34, oben). Jedes dieser Module wird über eine eigene mechanische Auszugseinheit – etwa Teleskopschienen – zur Frontseite der Ladesäule geführt und dort bedienbar gemacht. Die Kontaktierung sämtlicher elektrischer Anschlüsse erfolgt an der Rückseite der HV-Einheit über fest verbaute Verteilerleisten, in die beim Einschieben Kombisteckverbinder automatisch einrasten. Die Verteilerleisten übernehmen dabei die gesamte Kontaktierung für Hochvolt-, Steuer- und gegebenenfalls Kühlanschlüsse.

Die klare Trennung der Anschlusschnittstellen auf der Rückseite schafft eine saubere mechanisch-elektrische Entkopplung. Dies ermöglicht nicht nur die parallele Wartung einzelner Module, sondern auch die gezielte Erweiterung oder den Tausch einzelner Funktionsbereiche ohne Eingriff in das Gesamtsystem. Durch die Kombination mit dem modularen Batteriekonzept kann das gleiche Prinzip auch auf die bereits ausziehbaren Battery-Packs angewendet werden. Auch diese werden über Kombisteckverbinder und Kupplungen an Rückseiten-Verteilerleisten angeschlossen (vgl. Abbildung 4.34, unten). Dadurch entsteht ein durchgängiges Kontaktierungskonzept für sämtliche Systemkomponenten.

Für die Umsetzung dieses Konzepts müssen verschiedene technische Bedingungen berücksichtigt werden. Zunächst ist die Neuordnung der Komponenten erforderlich, um ausreichend Platz für die Bewegungszonen der Auszüge zu schaffen. Die Auslegung der Kabelbaumstruktur muss gezielt auf steckbare Verbindungen abgestimmt und von verschraubten Schnittstellen entkoppelt werden. Darüber hinaus ist sicherzustellen, dass auch die Kühlverbindungen modular und zugänglich gestaltet werden. Die angrenzenden Module im Umfeld des HV-Boards – etwa Steuerelektronik oder Energieverteilung – sind so zu positionieren, dass sie die Bewegungsfreiheit und Kontaktierbarkeit der HV-Module nicht beeinträchtigen. Zur Bedienung wird eine mechanische Verriegelung vorgesehen, die über frontseitige Hebel oder Drehgriffe aktiviert werden kann. Diese Lösung ermöglicht eine sichere, werkzeuglose Arretierung und ein ebenso einfaches Lösen der Module durch eine einzelne Person. Auf diese Weise wird die Vision eines vollständig modularen, wartungsoptimierten HV-Bereichs

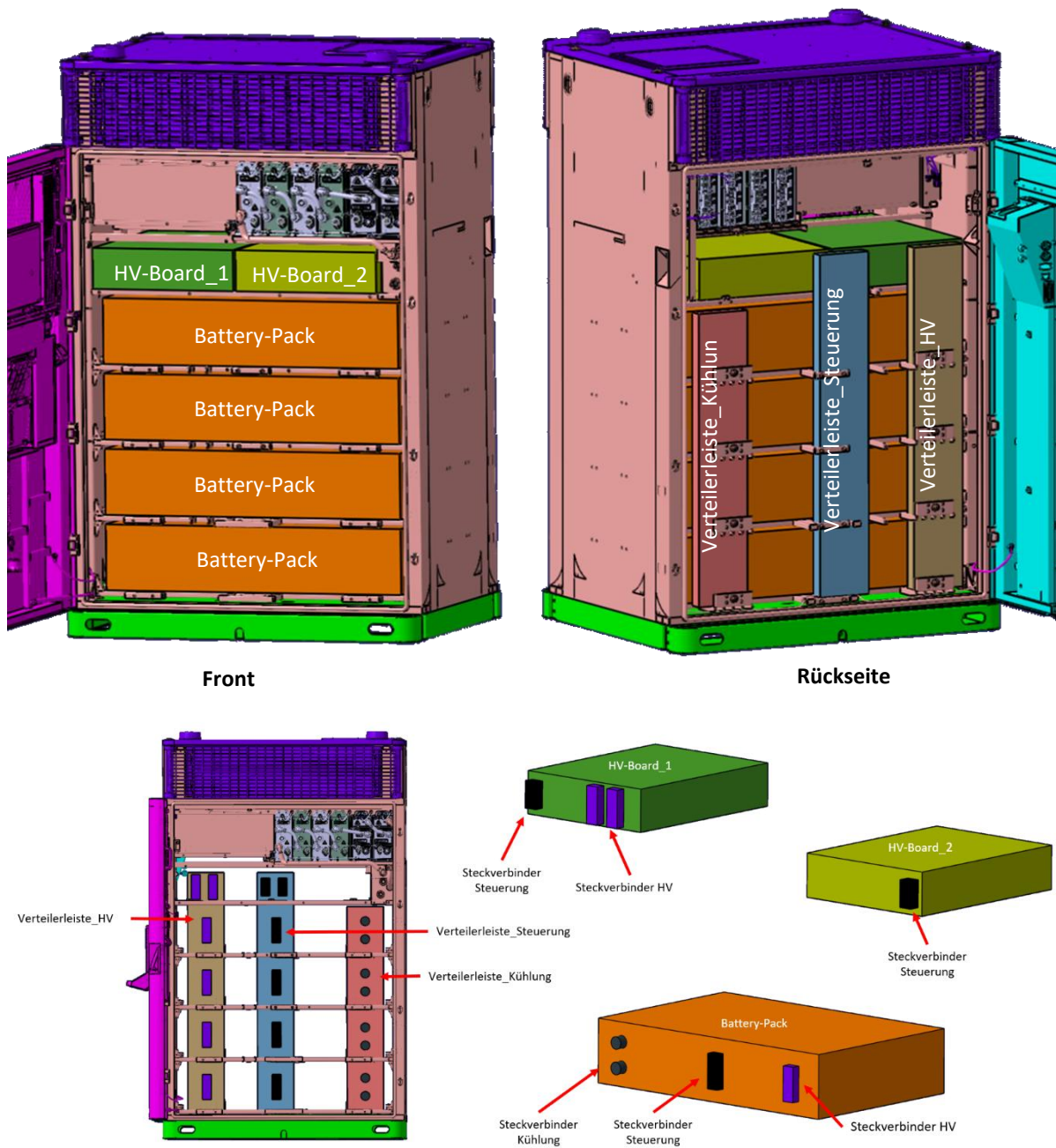


Abbildung 4.34: Konzeptgrafik „geteiltes HV-Board“ mit Verteilerleisten an der Rückseite

konsequent umgesetzt – in technischer, funktionaler und ergonomischer Hinsicht.

Die Modularisierung des HV-Boards wirkt sich positiv auf die Demontage- und Austauschfähigkeit aus, da das Gewicht der als Ganzes zu demontierenden Komponenten halbiert werden konnte. Aufgrund der Anwendung auf nur eine Komponente ist der Einfluss begrenzt, lässt sich aber ggf. auf weitere Komponenten ausweiten.

	R-Strategien						Maßnahmen/Effekte					
Modularisierung HV-Board	Gesamteinfluss 2	Refuse 0	Rethink 0	Reduce 0	Reuse 0	Rezyklat 0	Umweltwirkung 0	Demontage 3	Austausch 3	Trennung 0	Lebensdauer 0	
Modularisierung HV-Board	Repair 1	Refurbish 0	Remanufacturing 0	Repurpose 0	Recycle 0	Modularisierung 3	Leichtbau 0	Individualisierung 0	Technik 0	Funktionserweit. 0	Funktionstrennung 0	

4.3.5 Auswirkungen der Maßnahmen

Die Maßnahmen unter Beibehaltung der aktuellen Bauweise und Materialauswahl zeigt einige Möglichkeiten für Verbesserungen. Diese betreffen jedoch häufig nur einzelne Punkte und sind aufgrund des geringen Änderungsumfangs in ihren Effekten begrenzt. Auch führen die gezeigten Maßnahmen selten zu Verbesserungen der technischen Eigenschaften oder Funktionen, sodass kein zusätzlicher Anreiz zur Umsetzung der Maßnahmen entsteht.

	Gesamteinfluss	R-Strategien								Maßnahmen/Effekte													
		Refuse	Rethink	Reduce	Reuse	Repair	Refurbish	Remanufacture	Repurpose	Recycle	Rezyklat/biobasiert	Umweltwirkungen	Demontierbarkeit	Austauschbarkeit	Sortenreine Trennbarkeit	Lebensdauerverlängerung	Modularisierung	Gewichtsreduzierung	Individualisierbarkeit	technische Verbesserung	Funktionserweiterung	Funktionstrennung	
Aktuelle Bauweise	Vereinheitlichung Verbindungen																						
	Vereinheitlichung Kunststoffe																						
	Wiederverwertung																						
	Wiederverwendung Bauteile																						
	Materialreduzierung																						
	Modulare Seitenwand																						
	Modularisierung HV-Board																						

4.4 Materialkonzepte

Die Zirkularität der Grundstruktur der Ladesäule lässt sich aufgrund des dominierenden Einsatzes von Stahl als sehr gut beschreiben. Aus technischer und teilweise auch aus wirtschaftlicher Sicht ist jedoch der Einsatz anderer Werkstoffe unter Umständen zielführender. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle die Anwendbarkeit alternativer Materialien hinsichtlich einer Beibehaltung der Zirkularität und Nachhaltigkeit untersucht. Im Rahmen der Untersuchung von technisch oder wirtschaftlich getriebener Materialänderungen und deren Auswirkungen auf Nachhaltigkeit und Zirkularität werden in diesem Abschnitt eine Substitution von Stahl durch Kunststoff anhand eines exemplarischen Bauteils, dem Einsatz biobasierter faserverstärkter Materialien am Beispiel der Seitenwand, ein Einsatz nachhaltigerer Dämmstoffe untersucht am Beispiel der Dämmung des Ladesäulengehäuses sowie die Reduzierung der Gehäusemasse untersucht.

4.4.1 Substitution von Stahl durch Kunststoff

Auch wenn Stahl durch etablierte Recyclingrouten grundsätzlich als sehr gut recyclingfähig beschrieben werden kann, bietet der Einsatz von Kunststoffen je nach Anwendungsfall aus technischer oder wirtschaftlicher Sicht Vorteile gegenüber den in der Ladesäule hauptsächlich eingesetzten

Stahlschweißbaugruppen. Beispiele hierfür sind eine geringere Korrosionsanfälligkeit, die Möglichkeit einer integraleren Produktgestaltung oder einer größeren Formfreiheit. Diesen potenziellen Vorteilen stehen jedoch auch Herausforderungen gegenüber, die auch die Zirkularität des Produkts beeinflussen können. Zudem muss bei der Substitution von Stahl durch Kunststoff sowohl der Einsatz von Kunststoffzyklaten als auch die sortenreine Trennung und Recyclingfähigkeit der eingesetzten Kunststoffe gewährleistet sein. Bei Kunststoffen handelt es sich um eine vielfältige Kategorie von Materialien, die sich erheblich in ihren Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten unterscheiden können. Entsprechend verfügen Kunststoffe über eine große Bandbreite an Eigenschaften, die durch den Einsatz von Additiven oder Faserverstärkungen an den spezifischen Anwendungsfall angepasst werden können. Kunststoffe lassen sich übergeordnet in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere einteilen. Während sich Duroplaste und Thermoplaste als Strukturwerkstoffe einsetzen lassen, werden Elastomere aufgrund ihrer hohen Flexibilität bspw. als Dichtungen oder Dämpfungselemente eingesetzt. Aufgrund ihrer vernetzten Molekülketten lassen sich Duroplaste und Elastomere nicht aufschmelzen und sind somit nur sehr begrenzt recyclingfähig. Aus diesem Grund konzentriert sich die nachfolgende Betrachtung ausschließlich auf Thermoplaste.

Bei einer Substitution von Stahl (in diesem Fall Baustahl) durch Kunststoff sind einige große Unterschiede im Materialverhalten bzw. der Anwendbarkeit zu beachten. So besitzen Kunststoffe grundsätzlich eine deutlich geringere Steifigkeit und Festigkeit im Vergleich zu Stahl. Auch wenn sich die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen durch eine Faserverstärkung deutlich steigern lassen (an dieser Stelle wird maßgeblich eine Verstärkung aus Kurzglasfasern betrachtet), bleibt der Unterschied signifikant, sodass für die gleichen mechanischen Eigenschaften des resultierenden Bauteils deutlich größere Wandstärken erforderlich sind. Dieser Umstand lässt sich aus Sicht des Gewichts durch die ebenfalls deutlich geringere Dichte ggf. kompensieren, jedoch ist dies von dem verwendeten Kunststoff (inklusive Verstärkung) sowie dem Belastungsfall abhängig. Zudem können Kunststoffe im Gegensatz zu Stahl je nach Orientierung der Molekülketten oder Verstärkungsfasern eine starke Anisotropie aufweisen. Tabelle 4.19 zeigt exemplarisch drei verschiedene Kunststoffe und deren mechanischer Vergleich zu Stahl. Dabei wird das Leichtbaupotenzial in Bezug auf Zugsteifigkeit (E/ρ), Zugfestigkeit (σ_m/ρ) und Biegesteifigkeit (${}^3\sqrt{E/\rho}$) normiert auf Stahl dargestellt. Es zeigt sich, dass auch bei einer erheblichen Faserverstärkung von 50 %vol (vgl. PA66 GF50) eine deutlich geringere Zugsteifigkeit einstellt. Im Falle einer Biegebelastung lassen sich aufgrund der deutlich größeren Wandstärke bei gleichem Bauteilgewicht höhere Biegesteifigkeiten erzielen. Auch im Bereich der Festigkeit sind die dargestellten Kunststoffe konkurrenzfähig. Hierbei ist jedoch die Anisotropie zu beachten.

Tabelle 4.19: Vergleich des Leichtbaupotenzials von Kunststoff gegenüber Stahl

Material	E (GPa)	σ_m (N/mm ²)	ρ (g/cm ³)	E/ρ	${}^3\sqrt{E/\rho}$	σ_m/ρ
Stahl	210	400	7,85	1,0	1,0	1,0
PA66 ¹	1,1	50	1,14	0,04	1,2	0,9
PA66 GF30 ^{1,2}	7,2	130	1,36	0,20	1,9	1,9
PA66 GF50 ^{1,2}	12,5	180	1,56	0,30	2,0	2,3

1: konditioniert, 2: in Faserorientierung (starke Anisotropie)

Ein weiterer wichtiger Faktor, der beim Einsatz von Kunststoffen zu berücksichtigen ist, ist ihre erhöhte Anfälligkeit gegenüber UV-Strahlung. Dies macht Kunststoffe potenziell anfällig in Anwendungen, in denen sie direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind. Allerdings kann diese Herausforderung durch den Einsatz von UV-stabilisierenden Additiven gemildert werden, die die Widerstandsfähigkeit von Kunststoffen gegen UV-Schäden erhöhen. Einer der größten Vorteile von Kunststoffen gegenüber Stahl ist die deutlich größere Formfreiheit. Während traditionelle Blechverarbeitungstechniken oft auf einfache Formen beschränkt sind, ermöglicht eine Anwendung von Kunststoffspritzguss deutlich komplexere Formgebungen. Darüber hinaus können zusätzliche Maßnahmen zur Versteifung, wie bspw. Verstärkungsrippen, in Bauteile integriert werden, die mit Blech nur schwer oder gar nicht zu realisieren wären. Darüber hinaus lassen sich Produkte durch die Zusammenfassung verschiedener Bauteile integraler gestalten, was sich wiederum positiv auf Gewicht oder Montage auswirken kann. Herausforderung beim Einsatz von Rezyklaten ist die Degradation von Kunststoffen aufgrund äußerer Einflüsse (bspw. Verkürzung der Molekülketten) oder die Aufnahme von Verunreinigungen, was die Lebenszeit von Kunststoffen begrenzen und die Rezyklatqualität verschlechtern kann. Als Resultat von Verunreinigungen kann Kunststoffrezyklat bspw. eine qualitativ minderwertigere Optik oder einen unangenehmen Geruch aufweisen. Letzteres ist insbesondere bei Post Consumer Rezyklat aus der privaten Wertstoffverwertung (Gelbe Tonne), wie Lebensmittelverpackungen, der Fall. Durch gezieltes Sortieren unterschiedlicher Kunststoffe bei der Demontage komplexerer Produkte, wie der Ladesäule, lässt sich die Rezyklatqualität deutlich verbessern. Aufgrund der Herausforderungen, insbesondere in Hinblick auf die Zirkularität, wird die Substitution von Stahl durch Kunststoff nachfolgend anhand einer Beispielanwendung an der flexiblen Ladesäule untersucht und kritisch analysiert.

Beim Einsatz in der Ladesäule bestehen für unterschiedliche Einsatzzwecke stark unterschiedliche Anforderungen an die Rezyklatqualität. *Abbildung 4.35* zeigt exemplarisch unterschiedliche Möglichkeiten für den Einsatz von Kunststoffen am Beispiel der Ladesäule mit den dazugehörigen Anforderungen an das Kunststoffrezyklat für die Herstellung sowie das Recycling am Lebensende des Bauteils. Die Anforderungen an das Rezyklat beziehen sich auf die Optik, die Haptik und den Geruch (OHG), die geforderten Struktureigenschaften sowie weitere funktionale Eigenschaften. Die Optik wird dabei maßgeblich durch Oberflächenqualitäten und eine mögliche Farbgebung bzw. Beschichtung bestimmt. Die Haptik wird hauptsächlich durch die Oberflächenstruktur bestimmt. Der Geruch bezieht sich hauptsächlich auf Gerüche, die durch Verunreinigungen des Kunststoffs aus vorherigen Einsätzen resultieren. Die strukturellen Eigenschaften werden durch das sich ändernde Materialverhalten bspw. in Bezug auf Schlagzähigkeit oder Festigkeit bestimmt. Diese resultieren unter anderem aus der Verkürzung der Molekülketten, Verunreinigungen oder der Schädigung von Verstärkungselemente. Maßgeblicher Faktor für die Qualitätsanforderungen der OHG-Eigenschaften besteht in der Sichtbarkeit der Bereiche. So besitzen nicht sichtbare Bereiche, wie das Dach der Ladesäule, sehr niedrige OHG-Anforderungen. Mit zunehmender Sichtbarkeit, wie dem Lüftungsgitter, erhöhen sich die Anforderungen bis zum sichtbaren Bereich, wie der Außenhaut. Die höchsten Anforderungen bestehen im direkten Interaktionsbereich, wie dem Bedienpanel. Diese Anforderungen können durch eine Verdeckung, wie einer Folierung, stark reduziert werden. Externe Zusatzelemente sind hinsichtlich der Qualitätsanforderungen individuell zu bewerten. Ein vor der Säule platzierter Anfahrerschutz in Form einer Barriere besitzt bspw. trotz der guten Sichtbarkeit keine hohen OHG-Anforderungen. Den geringsten Anforderungen unterliegen innerhalb der Ladesäule liegende Komponenten, da der Kunde nicht in Kontakt mit diesen gerät. In allen Fällen müssen jedoch die strukturellen und zusätzliche Anforderungen an den Kunststoff berücksichtigt werden. So unterscheiden sich bspw. das akustische Verhalten oder die Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffkomponenten stark von Bauteilen aus Stahlblech.



Abbildung 4.35: Mögliche Einsatzszenarien für Kunststoffe an der Ladesäule

Neben den zuvor dargestellten Kriterien existieren zahlreiche weitere für den zirkulären Einsatz von Kunststoffen. Diese sind unterteilt in ökologische, technische und wirtschaftliche Kriterien. Für eine Untersuchung der zirkulärerechten Anwendbarkeit von Kunststoffen als Ersatz für Stahl wurden verschiedene Bauteile der Ladesäule, wie die Seitenwand oder das Dach untersucht. Aufgrund der hohen Materialansprüche hinsichtlich der Anmutung und moderaten mechanischen Beanspruchungen wird nachfolgend die Analyse eines Konzepts für ein Bedienpanel aus Kunststoff als Vertreter des Interaktionsbereichs dargestellt. Die aktuelle Ausführung des Bedienpanels ist in Abbildung 4.36 dargestellt.

Das Bedienpanel befindet sich auf der Vorderseite der Ladesäule und ist in die Tür integriert. Unterhalb des Werbebildschirms befinden sich ein Infoscreen, der auch zur Bedienung der Säule dient, ein Helligkeitssensor zur Steuerung der Displayhelligkeit, ein Bezahlterminal sowie ein Notausknopf zum Abbrechen des Ladevorgangs. Um diese Komponenten insbesondere vor Regen zu schützen und das Interface besser zum Nutzer auszurichten, ist das Bedienpanel auf der oberen Seite in die Säule eingelassen. Auf der Innenseite befinden sich zusätzlich Lautsprecher sowie ein Steuergerät für das Bezahlterminal. Rechts und links neben dem Bedienpanel befinden sich die Gunholder, in denen die Ladepistolen eingehängt werden. Auf gleicher Höhe befindet sich auf der Außenseite das Schließsystem der Tür. Unterhalb des Infoscreens befindet sich eine transparente Kunststoffplatte, um die dahinterliegenden Energiemessanzeigen sichtbar zu machen. türseitig besteht der Bedienbereich, wie die gesamte Struktur der Ladesäule, aus einer Stahlschweißgruppe. Eine Kunststoffausführung des Bedienpanels und ggf. zusätzlicher Bereiche bietet die Möglichkeit einer deutlich integraleren Gestaltung bspw. durch die Integration der Gunholder oder der Halter für die gesamten Komponenten. Darüber hinaus bietet eine Kunststoffausführung auch aus Korrosionsgründen Vorteile. Grundsätzlich dient die Konzeptentwicklung jedoch einer Überprüfung der Auswirkungen von Substitution von Stahl durch Kunststoff.

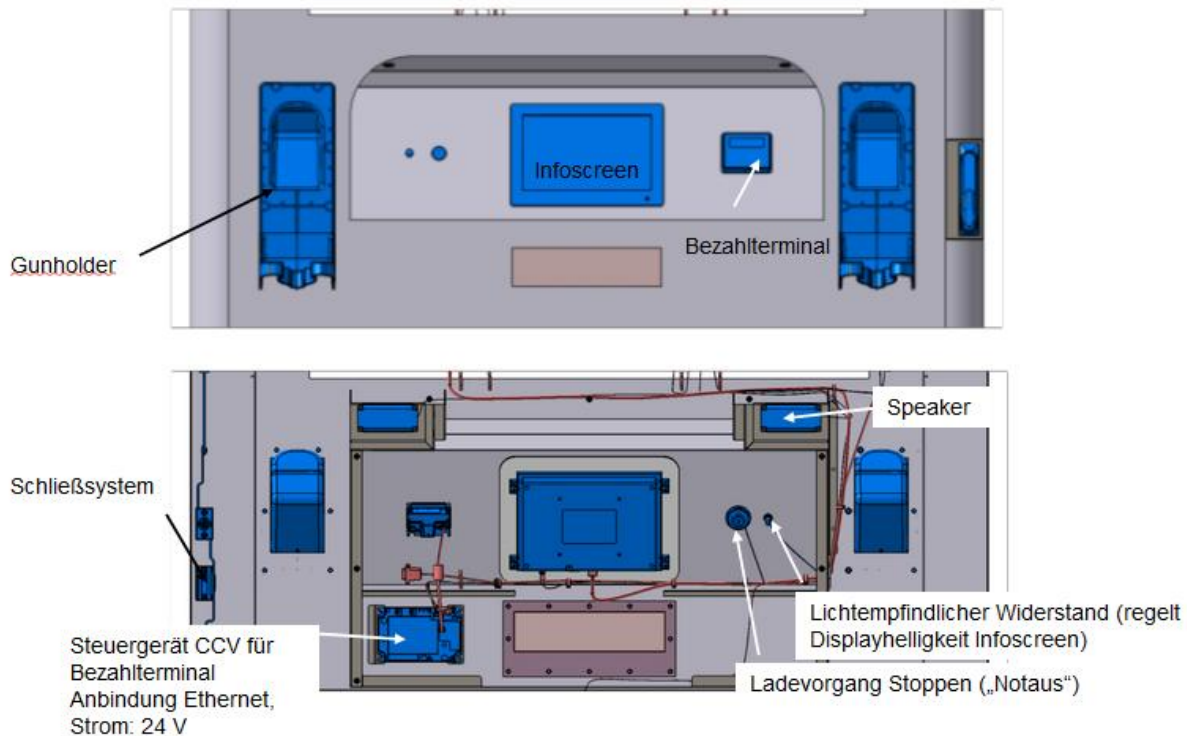


Abbildung 4.36: Darstellung des Bedienpanels

Für die Entwicklung eines Kunststoffkonzepts wurden unterschiedliche Systemgrenzen untersucht, die jeweils verschiedene Vor- und Nachteile in Bezug auf den exemplarischen Einsatz in der Ladesäule haben (vgl. Abbildung 4.37). Variante 1 setzt lediglich den hinter der Öffnung Außenblechs liegenden Komponentenhalter in Kunststoff um. Eine Montage erfolgt von der Türinnenseite. Variante 2 erweitert die Systemgrenze um einen Teil des Außenblechs, sodass das resultierende Kunststoffteil von außen auf das Außenblech aufgesetzt wird. In den weiterführenden Varianten wird die Systemgrenze weiter ausgedehnt, sodass das in der Tür integrierte Sichtfenster (Variante 3), die Gunholder (Variante 4) oder Sichtfenster und Gunholder (Variante 5) integriert werden. Variante 6 ersetzt im mittleren Bereich die Stahlausenhaut komplett und integriert auch Teile des Schließmechanismus der Tür. Oberes und unteres Stahlteil sind dabei weiterhin über zwei Träger verbunden.

Alle Varianten besitzen spezifische Vor- und Nachteile. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass mit zunehmender Anzahl der Varianten das Potenzial der Kunststoffsubstitution hinsichtlich wirtschaftlicher Eigenschaften steigt. Auf technischer Seite entstehen jedoch durch die notwendige Erfüllung von immer mehr Funktionen Herausforderungen, die insbesondere in Konflikt mit der geforderten Zirkularität des Bauteils stehen. Beispiele hierfür sind erforderliche Dichtungen, die Oberflächenqualität oder die Alterungsbeständigkeit durch äußere Einflüsse, wie bspw. UV-Strahlung. Bei der Auswahl weiter zu verfolgender Variante spielen neben den zu untersuchenden Aspekten auch die verhältnismäßige Umsetzbarkeit innerhalb des Projekts eine entscheidende Rolle. Ziel dieser Untersuchung war es, die Potenziale einer Substitution von Stahl durch Kunststoff anhand eines exemplarischen Anwendungsbeispiels und nicht die Entwicklung eines Bauteils durchzuführen. Variante 6 verspricht zwar die meisten Erkenntnisse hinsichtlich Herausforderungen einer Werkstoffsubstitution, die komplexere strukturelle Auslegung steht jedoch nicht im Verhältnis zum Mehrwert. Aus diesem Grund wurde die Variante 5 für die weiteren Betrachtungen als erfolgversprechendste Variante ausgewählt.

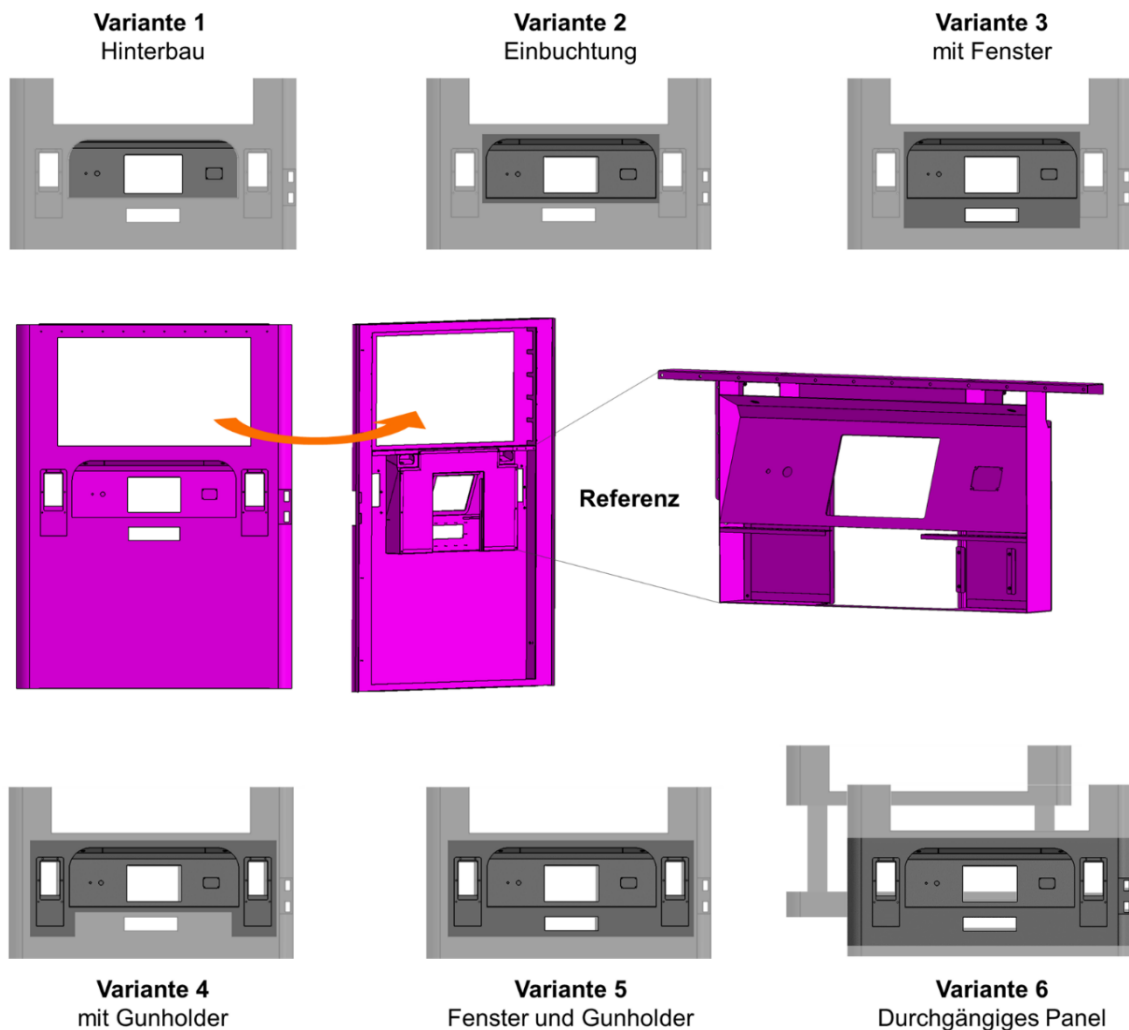


Abbildung 4.37: Grundkonzepte für die Substitution von Stahl durch Kunststoff am Nutzerinterface

Neben der Wahl der Systemgrenze spielt auch die Gestaltung des Konzepts eine entscheidende Rolle bei der Zirkularität des späteren Bauteils. Diese können dabei sehr anwendungsfallspezifisch sein. Es lassen sich jedoch auch allgemeingültige Teillösungen definieren, die sich auch für andere Anwendungsfälle heranziehen lassen. Hierfür wurden in Tabelle 4.20 allgemeine Teillösungen für unterschiedliche Teilfunktionen des Interfaces abgeleitet, bewertet und zu Gesamtlösungen kombiniert. Allein aus dieser begrenzten Anzahl an Teillösungen je Funktion lässt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten mit stark unterschiedlichen Eigenschaften auch in Bezug auf die Zirkularität ableiten. Aus diesem Grund ist es für eine zielgerichtete Entwicklung entscheidend, die einzelnen Teillösungen hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu bewerten und nur die erfolgversprechenden Lösungen in die Konzeptionierung miteinzubeziehen. Hierbei ist jedoch immer darauf zu achten, welche Eigenschaften aus Zusammenhängen zwischen einzelnen Teillösungen entstehen. So spielt bei der Kombination zweier Materialien mit begrenzter Recyclingfähigkeit die Trennbarkeit der beiden Materialien in der Regel eine untergeordnete Rolle – auch wenn solche Lösungen grundsätzlich zu vermeiden sind.

Für die Bewertung der Teillösungen können die bereits zuvor dargestellten Kriterien (vgl. Tabelle 4.20) herangezogen werden. Aufgrund der Fokussierung auf bestimmte Aspekte lassen sich dabei nicht alle Kriterien auf alle Teillösungen anwenden. Andere Kriterien lassen sich hingegen weiter präzisieren und

damit besser bewerten. Die jeweilige Bewertung der einzelnen Teillösungen bezogen auf den Anwendungsfall ist unter der Darstellung bzw. Bezeichnung in Form von drei Feldern in der Reihenfolge ökologisch, technisch und wirtschaftlich angegeben. Dabei wurde eine Bewertungsskala von 0 bis 4 verwendet. Bei den mit *Kunststoff* bezeichneten Lösungen handelt es sich um Thermoplaste. Die Bewertung zeigt, dass wenige Teillösungen in allen Bereichen sehr gut oder zumindest gut abschneiden. Häufig ist ein Kompromiss zwischen ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften notwendig.

Tabelle 4.20: Teillösungen für unterschiedlichen Funktionen

Nr.	Funktion	Teillösung A	Teillösung B	Teillösung C	Teillösung D	Teillösung E	Teillösung F	Teillösung G
		Kunststoff					Metall	
1	Material	 Kunststoff (unverstärkt) 4 3 3	 Kunststoff (Partikel) 3 3 3	 Kunststoff (Kurzfasern) 3 4 3	 Kunststoff (Langfasern, Matten) 1 3 2	 Kunststoff (Endlosfasern) 1 4 1	 Stahl 4 3 4	 Aluminium 3 4 2
		Einteilig			Mehrteilig			
2	Baustruktur	 Monomaterial 4 3 4	 Hybrid 2 4 2	 Kunststoff+Kunststoff 4 3 3	 Kunststoff+Metall/FKV 3 4 3	 Metall/Metall 4 3 3		
		 Grundmaterial UTB 4 1 4	 Grundmaterial Class A 4 3 3	 Beschichtung Material 2 4 2				
3	Oberflächenqualität							
4	Farbvarianz/einstellbarkeit	 Farbe des Grundmaterials 4 1 4	 Grundmaterial einfärben 3 3 3	 Beschichtung Material 2 4 2				
5	(UV-) Beständigkeit	 Grundmaterial 4 1 4	 Additiv 2 2 4	 Beschichtung Material 2 4 3	 "Abdeckung" 3 4 2			
6	Steifigkeit	 Metalleinleger 3 3 3	 Schaum(-spritzguss) 4 2 3	 Kunststoff anspritzen 3 3 3	 Hohraum 4 3 3	 FKV Patch 2 3 2		
7 (1A-C)	Festigkeit	 Metalleinleger 3 3 3	 FKV-Einleger 1 3 2	 FKV Patch 2 3 2				
8	Anbindung an Metall	 Schrauben 3 3 3	 Klipsen 4 2 4	 Kleben 1 4 2	 Intrinsisch 4 3 3			
9	Dichtung	 Elastomerdichtung 3 4 2	 Dichtmittel 1 4 3	 Schaumdichtung 4 1 3	 Dichtvlies 3 2 3			
10	Brandschutz	 Grundmaterial 4 2 4	 Additiv 3 4 4	 Beschichtung 2 3 2				
11 (4C)	Beschichtung Material	 Folierung 3 3 3	 Lackierung 1 4 4	 2K Spritzguss/ Coextrusion 3 3 2	 Kaschierung 4 3 1			
11A	Folierung	Material		Farbe				
		 Grundmaterial 4 2 2	 Zweimaterial 1 4 3	 gleiche Farbe 4 2 2	 andere Farbe 3 4 3			
11B	Lackierung	 Anderes Material 1 3 3						

Ö: Ökologisch, T: Technisch, W: Wirtschaftlich **Bewertungsskala:** 0 (sehr schlecht) - 4 (sehr gut)

Abbildung 4.38 zeigt ein übersichtlich ausgelegtes Konzept für ein Kunststoffbedienpanel mit den Abmessungen von 1.212 x 488 mm und einer durchschnittlichen Wandstärke von 5 mm. Lokal ist das Panel durch Verrippungen versteift. Zusätzlich zum Bedienpanel sind auch die Gunholder und diverse Halter in das Kunststoffkonzept integriert. Die Sichtscheibe wird aufgrund der Recyclinganforderungen nicht integriert, sondern weiterhin montiert. Eine Integration wäre bspw. durch Zweikomponenten-Spritzguss möglich. Das Panel lässt sich von innen mit der Stahltür verschrauben und besitzt eine umlaufende Dichtung. Vorteilhaft für die Türfertigung ist, dass sich die Ausschnitte in der Tür stark reduzieren. Für jedes Anzeigeelement, Bedienelement sowie die Gunholder der Ladepistole ist die Herausarbeitung separater Aussparungen notwendig sowie eine separate Befestigung und Abdichtung notwendig. Durch die Ausführung als Kunststoffspritzgussteil lässt sich die Anordnung der Geräte

ergonomisch optimieren und das Formteil optisch und haptisch individualisieren. Da die Komponenten des Türeinsatzteiles leichter vormontiert werden können, wird auch die Endfertigung vereinfacht. Das resultierende Kunststoffkonzept hat bei Einsatz von PA66 GF30 (vgl. Tabelle 4.19) eine Masse von 5,85 kg und ersetzt dabei 12,1 kg Stahl und 0,64 kg PA55 GF30 (Gunholder). Somit kann aufgrund der höheren spezifischen Festigkeit von PA66 GF30 im Vergleich zu Stahl eine ähnliche Festigkeit bei einer gleichzeitigen Gewichtsreduzierung von 6,89 kg im Vergleich zur reinen Stahlvariante erzielt werden.

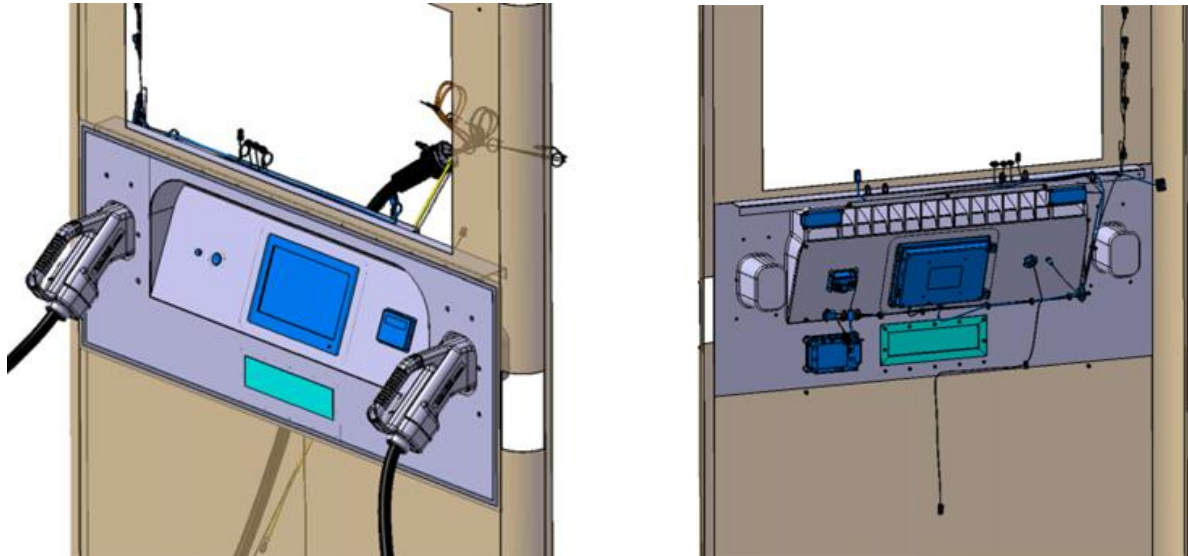


Abbildung 4.38: Darstellung des eingebauten Konzepts

Neben der Zirkularität spielt auch die Umweltwirkung der Konzepte eine entscheidende Rolle beim Vergleich mit der Referenz.

Tabelle 4.21 zeigt den Vergleich der Umweltwirkungen unterschiedlicher Varianten durch eine Umweltbilanz. An dieser Stelle wird dabei vereinfacht nur das Treibhauspotenzial als Vergleichsgröße dargestellt. Für den Kunststoff werden PA66 und PA66 GF30 untersucht. Dabei kommen jeweils Primärmaterial, Rezyklat sowie eine Mischung aus 1/3 Primärmaterial und 2/3 Rezyklat zum Einsatz. Beim Einsatz von Primärmaterial lässt sich aus umwelttechnischer Sicht ein Nachteil gegenüber der Stahlvariante erkennen. Durch den Einsatz von Rezyklat sinken die Umweltwirkungen des Kunststoffs jedoch drastisch. Auch bei Zumischung von Primärmaterial bleibt der GWP deutlich unter dem der Stahlvariante. Die Zumischung von Primärmaterial ist aufgrund der mit der Zeit abbauenden Eigenschaften der Kunststoffe notwendig, um bei jedem Recyclingdurchgang eine gleichbleibende Rezyklatqualität zu erhalten.

- Szenario 1: 12,1 kg Stahlblech mit 0,64 kg PA6-GF30 (aktuell vergleichbarer Ausschnitt)
- Szenario 2.1: 4,95 kg PA66 Rezyklat
- Szenario 2.2: 4,95 kg PA66
- Szenario 2.3: 1,65 kg PA66 (1/3) und 3,3 kg PA66 Rezyklat (2/3)
- Szenario 2.4: 4,95 kg PA66-GF30 Rezyklat (5,85)
- Szenario 2.5: 4,95 kg PA66-GF30 (5,85)

- Szenario 2.6: 1,65 kg PA66-GF30 (1/3) und 3,3 kg PA66-GF30 Rezyklat (2/3) (1,95/3,9)

Tabelle 4.21: Werkstoffeinfluss auf Türeinsatz

Environmental impact category	Stahl	PA66			PA66 GF30		
	Referenz	primär	Rezyklat	Mischung	primär	Rezyklat	Mischung
Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre) [kg CO2-Äq.]	29,520	35,992	1,678	13,116	32,444	4,058	13,52

Durch den Einsatz eines Kunststoffinterfaces ergeben sich insbesondere Vorteile bei technischen Eigenschaften und einer Gewichtsreduzierung. Da das Interface in dieser Ausführung als eigenständiges Teil realisiert wurde, entstehen auch neue Möglichkeiten hinsichtlich einer Individualisierung sowie eines verbesserten Austauschs bzw. einer verbesserten Reparaturfähigkeit. Durch den Einsatz von Kunststoffrezyklat können sich jedoch auch positive Einflüsse auf die Umweltwirkungen ergeben. Aufgrund der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Ladesäulenbereiche ergibt sich insgesamt ein moderater Gesamteinfluss.

	R-Strategien					Maßnahmen/Effekte					
Interface											
	Gesamteinfluss 3	Refuse 0	Rethink 1	Reduce 3	Reuse 0	Rezyklat 3	Umweltwirkung 3	Demontage 0	Austausch 4	Trennung 0	Lebensdauer 0
	Reparatur 3	Refurbish 0	Remanufacturing 0	Repurpose 0	Recycle 0	Modularisierung 1	Leichtbau 4	Individualisierung 3	Technik 5	Funktionserweit. 0	Funktionsstrennung 0

4.4.2 Alternative Außenwand

Im Rahmen von TechnHyb konnten auch größere Formwerkzeuge hergestellt werden. Dies bietet wiederum die Möglichkeit, auch größere Strukturen mithilfe der additiv gefertigten Formwerkzeuge herzustellen. Daher wurden weitere Konzepte für den Einsatz der additiven Werkzeuge entwickelt. So

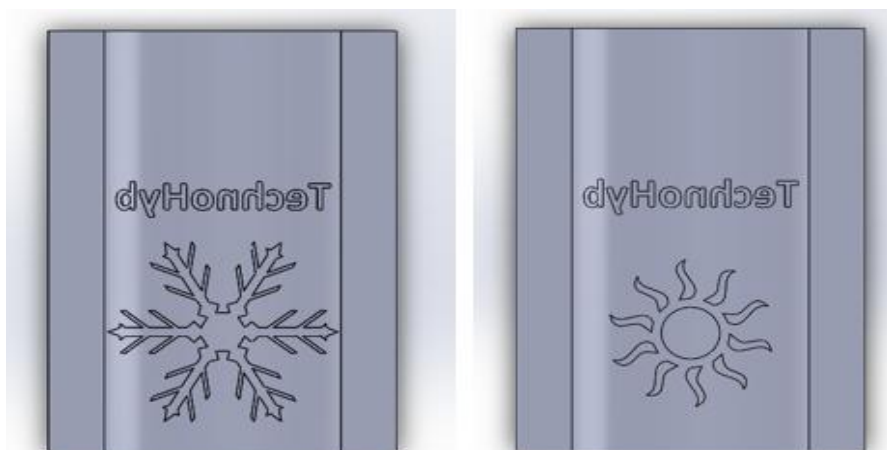


Abbildung 4.39: Werkzeuge für die Saisonale Außenverkleidung.

wurde beispielsweise die Prototypen- und Kleinstserienfertigung der Außenverkleidung der mobilen Ladesäule betrachtet. Durch die additive Fertigung ist eine schnelle Bereitstellung individualisierter Außenverkleidungen denkbar. Ein Beispiel solcher saisonal angepassten Werkzeuge ist in Abbildung 4.39 zu sehen.

Wichtige Bewertungen wie die Validierung der Oberflächenschädigung am Werkzeug durch die Endformung sowie die Betrachtung von Größenlimitierungen konnten bereits in dem Projekt durchgeführt werden. Allerdings bleibt fraglich, ob andere Fertigungsverfahren neben dem Autoklav-Prozess für die additiven Werkzeuge geeignet sind. Ein limitierender Faktor der Fertigungsverfahren wird der Kunststoff sein. So werden Thermoplasten bei der Verarbeitung aufgeschmolzen [9, 10]. Da allerdings auch verschiedene Thermoplasten miteinander kompatibel sind, könnte somit bei der Verarbeitung dieser Kunststoffe im additiv gefertigten Werkzeug eine Verbindung zwischen thermoplastischem Werkzeug und thermoplastischem Bauteil entstehen [11]. Was eine Entformung des Bauteils erschweren oder unmöglich machen könnte.

Des Weiteren müssen bei vielen Verarbeitungsverfahren von Thermoplasten hohe Drücke und Temperaturen aufgebracht werden, die dann wiederum auf das Formwerkzeug wirken [12, 10]. Besagte Belastungen können zu einem Versagen des Formwerkzeugs führen. Somit kann festgehalten werden, dass der Einsatz der additiven Werkzeuge zunächst auf die Duromer-Verarbeitung limitiert ist und weitere Untersuchungen durchgeführt werden müssen, um zu prüfen, ob auch die Verarbeitung von Thermoplasten realisiert werden kann.

Neben dem Autoklav-Verfahren könnten die additiven Werkzeuge auch im Vakuuminfusionsverfahren und im Resin-Transfer-Moulding (RTM)-Verfahren eingesetzt werden [10, 13]. Wobei das RTM-Verfahren den Vorzug hat, dass keine Vakuumfolien eingesetzt werden müssen, woraus wiederum eine Verringerung von Abfall resultiert [10, 13]. Allerdings können bei dem RTM-Verfahren Drücke von bis zu 8 bar wirken [10]. Dies kann zu einer Verformung des Werkzeugs und damit zu einer Verringerung der Maßgenauigkeit des Bauteils führen. Dennoch könnte sich ein zukünftiges Projekt mit der Untersuchung des Einsatzes der additiven Werkzeuge im Rahmen des RTM-Verfahrens beschäftigen.

Allerdings ist das Vakuuminfusionsverfahren für die Fertigung von großen und komplexen Bauteilen geeignet und somit wohl am ehesten für die Herstellung der Außenverkleidung prädestiniert. Dabei lassen sich mit diesem Verfahren Stückzahlen von etwa 2000 Stück pro Jahr erzielen. [13]

Auch wenn das Werkzeug vor allem für die Duromer-Verarbeitung geeignet ist, so weisen Duromere den Nachteil auf, dass sie nicht aufgeschmolzen werden können [11]. Dies kann nachteilig für den Recyclingprozess sein. Somit sind Maßnahmen wichtig, um die Nachhaltigkeit der Außenverkleidung zu verbessern. Daher kann die Verwendung von Naturfasern und Biopolymeren sinnvoll sein [9, 11]. Vor allem der Einsatz von Naturfasern kommt der Ökobilanzierung zugute [9]. So sind Naturfasern ein nachwachsender Rohstoff sowie biologisch abbaubar [14, 9]. Zusätzlich weisen Naturfasern gute Schalldämmungseigenschaften auf, was ebenfalls für die mobile Ladesäule relevant ist [9]. Allerdings ist ein Hauptproblem bei dem Einsatz von Naturfasern die Feuchtigkeitsaufnahme, wobei diese die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes negativ beeinflussen kann [15].

Dennoch gibt es bereits viele Projekte, die sich mit der Verwendung von Naturfasern im Außenbereich auseinandersetzen. So hat die Verwendung von Naturfasern bereits Einzug in die Automobilindustrie gefunden [16, 17]. Unter anderem wurde von Seiten der BMWs in Kooperation mit Bcomp an der Herstellung von Teilen der Innen- und Außerverkleidung des BMW M4 GT4 gearbeitet [18].

Es kann also zusammengefasst werden, dass bereits Bestrebungen existieren, Naturfasern in eine breite Anwendung zu bringen. Somit könnten bestehende Probleme wie die Feuchtigkeitsaufnahme der Naturfasern und die damit einhergehende Reduktion der mechanischen Eigenschaften in naher Zukunft beherrschbar sein. Dies könnte dazu beitragen, die Nachhaltigkeit der Prototypen- und Kleinstserienfertigung unter Verwendung der additiven Werkzeuge weiter zu optimieren.

Für die Fertigung der Verkleidung des Batteriemoduls wurde ein Konzept eines Vakuuminfusionswerkzeugs entwickelt. Ein Bild des Werkzeugkonzeptes ist in Abbildung 4.40 zu sehen. Das Werkzeug maß eine Größe von 1700 x 1300 x 800 mm. Es wurde mit 3° Entformungsschrägen versehen, um die Entformung der Verkleidung zu ermöglichen. Des Weiteren wurden die Ecken abgerundet, um das Einlegen der Fasergelege zu erleichtern.

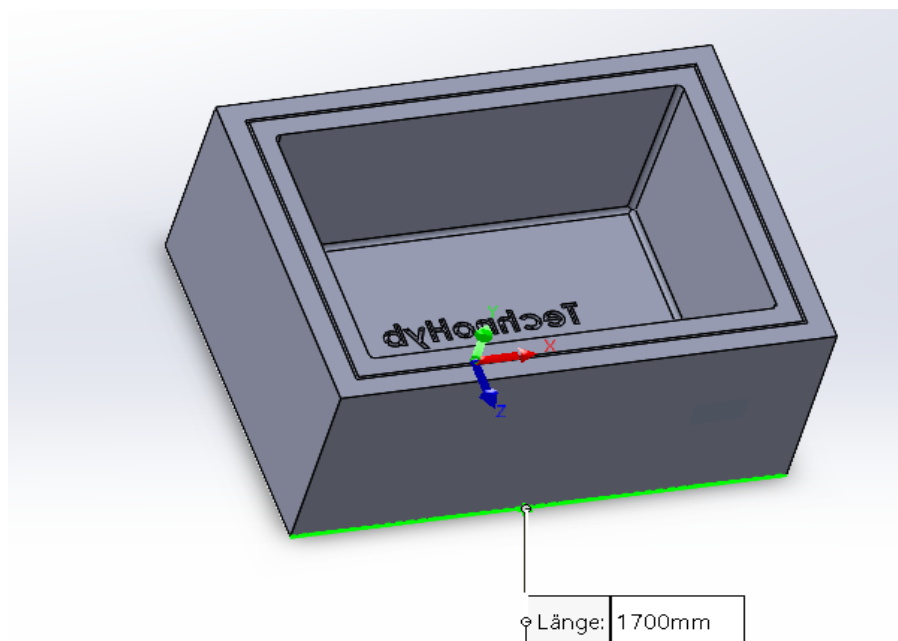


Abbildung 4.40: Werkzeugkonzept für die Verkleidung des Batterie-Moduls.

Für die Fertigung wurden verschiedene Hersteller von Faser- und Bioharzsystemen ermittelt. Exemplarisch sind in Tabelle 4.22 einige zusammengefasst.

Tabelle 4.22: Mögliche Faser und Matrixsysteme [19, 20, 21, 22, 23, 24]

Material	Handelsname	Hersteller
Naturfaser	Fuse Woven (Hanf)	Fuse
	ampliTex™-PP 350, bi-axial +/-45° (Flax)	Bcomp
Biobasierte Matrix	SR GreenPoxy 56	Sicomín Epoxy System
	BIO SCIENCE EPOXY SYSTEMS	Resin Research
	Epilox T 19-38/500G	Leuna harz
	CPM – CPS Slow	ENTROPY RESINS

Der Lagenaufbau für die Fertigung der Verkleidung ist in Abbildung 4.41 abgebildet. Grau sind hierbei die Naturfasern. Rot sind hier die Hilfsstoffe wie Abreißgewebe und Fließhilfe. Um zu verhindern, dass eine Schwachstelle an den Ecken der Verkleidung erzeugt wird, wurde ein anderer Zuschnitt für die mittlere Textillage gewählt. Ziel ist es hierbei, durch das Umklappen die Ecken der Kiste mit Fasern zu verschließen und so die Stabilität zu gewährleisten. Nach der Fertigung könnten Funktionselemente integriert werden, alternativ könnten auch schon während der Fertigung Inserts zwischen den Faserlagen eingelegt werden, um Verschraubungen zu realisieren.

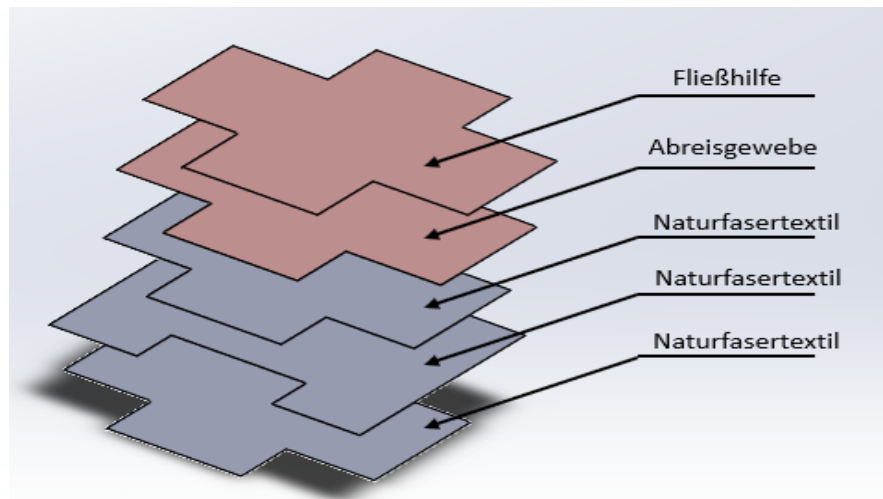


Abbildung 4.41: Lagenaufbau für die Fertigung der Verkleidung.

Das dargestellte Konzept zur Realisierung einer alternativen Außenhaut hat einen stark positiven Einfluss auf die Anwendbarkeit biobasierter Materialien. Zudem ergeben sich durch die flexible Fertigung auch Möglichkeiten für eine Individualisierung der Außenhaut. Im Vergleich zur Stahlausenhaut ist zudem mit einer deutlichen Gewichtsreduzierung zu rechnen. Aufgrund der Übertragbarkeit ergibt sich ein moderater Gesamteinfluss

	R-Strategien						Maßnahmen/Effekte				
Alternative Außenwand	Gesamteinfluss 3	Refuse 0	Rethink 1	Reduce 3	Reuse 0	Rezyklat 5	Umweltwirkung 3	Demontage 0	Austausch 0	Trennung 0	Lebensdauer 0
	Repair 0	Refurbish 0	Remanufacturing 0	Repurpose 0	Recycle 3	Modularisierung 0	Leichtbau 3	Individualisierung 4	Technik 2	Funktionserweit. 0	Funktionstrennung 3

4.4.3 Dämmstoffe

Im Kontext der Entwicklung modularer Wandbauteile kommt der Auswahl geeigneter Dämmstoffe eine zentrale Bedeutung zu. Neben der thermischen Dämmwirkung stehen insbesondere die strukturelle Eignung, die Verfügbarkeit in verarbeitungsgerechter Form sowie ökologische und bauphysikalische Anforderungen im Fokus. Ziel war es, Materialien zu identifizieren, die einerseits eine hohe Dämmleistung bei minimalem Materialeinsatz bieten und andererseits kompatibel mit dem modularen Aufbauprinzip der Seitenwand sind.

Die Dämmstoffe werden in drei Hauptgruppen kategorisiert: mineralische, synthetische (petrochemisch basierte) und organische (nachwachsende) Materialien. Diese Einteilung basiert auf der Herkunft, der chemischen Zusammensetzung sowie den stofflichen Eigenschaften. Für das Projekt

wurden sämtliche Gruppen systematisch analysiert und hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit, Brandschutzverhalten, Feuchteresistenz, Verarbeitbarkeit und Nachhaltigkeit vergleichend bewertet. Abbildung 4.42 zeigt einen Vergleich der Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Dämmstoffe. Ein zentrales Ausschlusskriterium war dabei die Verarbeitbarkeit im modularen, vorgefertigten Wandaufbau. Materialien in Schüttform oder mit unzureichender Formstabilität wurden ausgeschlossen, sodass ausschließlich Plattenmaterialien zum Einsatz kommen konnten, die entweder gepresst oder gewalzt sind. Diese zeichnen sich durch Montagefreundlichkeit, Maßhaltigkeit und ausreichende mechanische Belastbarkeit aus, was für die geplante serielle Fertigung essenziell ist.

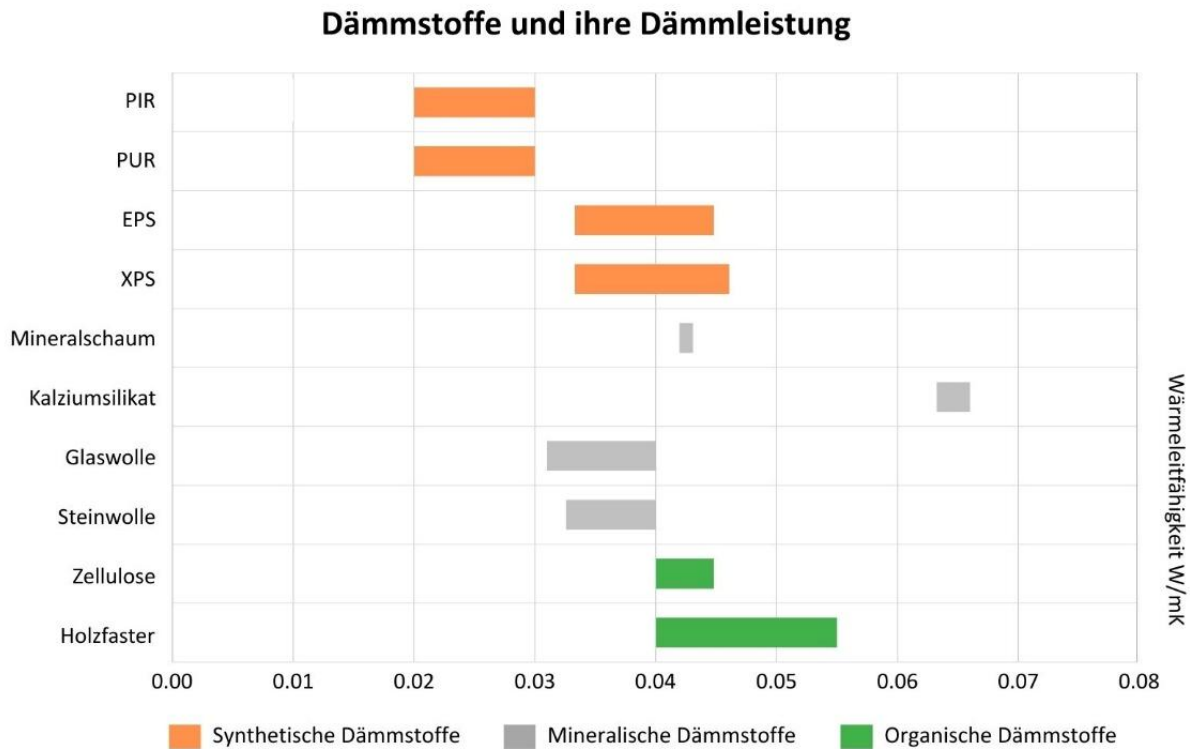


Abbildung 4.42: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe

Mineralische Dämmstoffe (vgl. Abbildung 4.43, links) umfassen eine Vielzahl anorganischer Materialien, die entweder natürlichen Ursprungs sind oder aus mineralischen Rohstoffen industriell gefertigt werden. Sie gelten als besonders robust, nicht brennbar sowie resistent gegenüber Schimmel, Ungeziefer und Verrottung. Im Hinblick auf den Brandschutz sowie die Fähigkeit zur temporären Pufferspeicherung von Luftfeuchtigkeit – wie etwa bei Calciumsilikat – bieten sie klare Vorteile. Dennoch ist ihre Dämmwirkung oft nur mittelmäßig und ihre Verarbeitung im modularen Maßstab durch hohes Gewicht und eingeschränkte Formbarkeit limitiert. Zu den untersuchten mineralischen Dämmstoffen zählten unter anderem Calciumsilikat, Glas- und Steinwolle, Mineralschaum, Schaumglas sowie Perlit. Während Calciumsilikat durch seine hohe Alkalität das mikrobiologische Wachstum hemmt, zeigen Glas- und Steinwolle gute Wärmedämmwerte bei gleichzeitig hoher Formbarkeit und Nichtbrennbarkeit. Mineralschaum überzeugt durch seine Druckfestigkeit, leidet jedoch unter eingeschränkter Formbarkeit, und Perlit bietet zwar Wasserresistenz, aber nur moderate Dämmleistung.



Abbildung 4.43: Beispiel für mineralische (links), organische (mittig) und synthetische (rechts) Dämmstoffe

Die mineralischen Stoffe wurden insbesondere im Hinblick auf ihre Stabilität und Nichtbrennbarkeit positiv bewertet. Einschränkungen bestehen vor allem in Bezug auf das Gewicht und die mitunter schwierige Bearbeitbarkeit im modularen Maßstab.

Organische Dämmstoffe (vgl. Abbildung 4.43, mittig) basieren auf pflanzlichen oder tierischen, nachwachsenden Rohstoffen und zeichnen sich durch eine günstige ökologische Bilanz aus. Besonders hervorzuheben sind ihre hygroskopischen Eigenschaften sowie die meist niedrige Wärmeleitfähigkeit. Allerdings erfordern sie oftmals eine geeignete Vorbehandlung, um Schädlings- und Schimmelresistenz zu gewährleisten. Holzfaser und Zellulose stellten sich im Rahmen der praktischen Erprobung als besonders interessante Kandidaten für modulare Anwendungen heraus, insbesondere in Kombination mit mehrschichtigen Wandaufbauten. Weitere untersuchte Materialien wie Hanf, Flachs, Jute, Kork, Schilf, Seegras, Stroh und Schafwolle zeigten teils hervorragende Dämmwerte. Die Verfügbarkeit, Verarbeitungseigenschaften und brandschutztechnischen Voraussetzungen variierten jedoch erheblich. Holzfaser überzeugte durch gutes Feuchtmanagement, während Zellulose eine hohe Dämmleistung aufweist, jedoch beim Brandschutz Defizite zeigte. Andere Materialien wie Jute oder Stroh konnten ebenfalls mit guten Dämmwerten punkten, stellten aber in Hinblick auf baurechtliche Zulassungen und Verarbeitung gewisse Herausforderungen dar.

Synthetische Dämmstoffe (vgl. Abbildung 4.43, rechts) werden auf Basis petrochemischer Rohstoffe hergestellt und zeichnen sich durch eine Vielzahl technischer Vorteile aus, die sie besonders attraktiv für den industriellen Bau und modulare Systeme machen. Ihre wichtigste Eigenschaft ist die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, die bereits mit geringer Materialstärke eine hohe Dämmleistung ermöglicht. Mit Werten zwischen 0,020 und 0,029 W/m·K erreichen sie die besten Dämmwerte im Vergleich aller Dämmstoffgruppen. Diese hohe Effizienz macht sie ideal für Anwendungen, bei denen der verfügbare Bauraum begrenzt ist – wie es bei der modularen Seitenwand mit integrierter Ladesäule der Fall ist. Ein weiterer entscheidender Vorteil ist die hohe Verarbeitungsfreundlichkeit: Synthetische Dämmstoffe sind maßstabstabil, druckfest und in industriell genormten Plattenformaten verfügbar. Dadurch lassen sie sich gut in automatisierte Fertigungsprozesse integrieren. Zudem sind sie wasserabweisend, verrotten nicht und sind weitgehend resistent gegen Schimmel und Ungeziefer. Ihre lange Lebensdauer erhöht zusätzlich die Wirtschaftlichkeit im Betrieb. Auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bieten sie Vorteile: Die Materialien sind in der Anschaffung vergleichsweise kostengünstig und am Markt gut verfügbar. Besonders XPS und EPS werden häufig eingesetzt, da sie in großen Mengen produziert und standardisiert vertrieben werden. Dem gegenüber stehen jedoch

erhebliche ökologische Nachteile. Die Herstellung synthetischer Dämmstoffe ist energieintensiv, auf fossile Ressourcen angewiesen und führt zu einem hohen CO₂-Fußabdruck. Zudem stellt die Entsorgung am Ende des Lebenszyklus eine Herausforderung dar, da eine sortenreine Trennung im Bauteilverbund schwierig ist und viele Materialien als Sondermüll gelten oder nur thermisch verwertet werden können.

Neben der Dämmleistung sind weitere materialspezifische Kenngrößen entscheidend für die Eignungsprüfung im Rahmen des TechnoHyb-Systems. Die dynamische Steifigkeit ist insbesondere relevant für die akustische Trennung sowie zur Vermeidung von Vibrationseinträgen durch das integrierte Ladesystem. Hinsichtlich der Lieferform wurden nur Plattenformate in definierten Abmessungen berücksichtigt, während Rollen- oder Schüttgutformate ausgeschlossen wurden. Auch die Rohdichte spielt eine wichtige Rolle, da sie Einfluss auf den Wandaufbau hat: Je höher die Dichte, desto größer ist die notwendige Materialstärke zur Erreichung des gewünschten U-Werts. Die Wasseraufnahmefähigkeit stellt ein kritisches Kriterium zur Vermeidung von Schimmelbildung dar. Materialien mit hoher kapillarer Saugfähigkeit oder geringer Dampfdiffusionsfähigkeit wurden daher ausgeschlossen.

Im technischen Vergleich der Dämmstoffgruppen – mineralisch, organisch und synthetisch – zeigen sich deutliche Vorteile synthetischer Dämmstoffe für den Einsatz im modularen Seitenwandsystem mit integrierter Ladeinfrastruktur. Während mineralische und organische Materialien, insbesondere durch ökologische und feuchtetechnische Eigenschaften überzeugen können, bieten synthetische Dämmstoffe eine in Summe überlegene technische Eignung für das spezifische Anwendungsszenario. Ausschlaggebend hierfür sind die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig geringer Materialdicke, die hohe Maßhaltigkeit und Formstabilität, die ausgeprägte Druckfestigkeit und Feuchteresistenz sowie die einfache Verarbeitung in standardisierten Lieferformaten. Auch die günstigen Beschaffungskosten und lange Lebensdauer wirken sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit und Instandhaltung aus. Im Gegensatz dazu erfordern organische Dämmstoffe umfangreiche Maßnahmen zur Feuchtesicherung und zum Brandschutz, während mineralische Dämmstoffe häufig schwerer, weniger flexibel in der Verarbeitung und mechanisch weniger robust sind. Auch wenn ökologische Aspekte bei synthetischen Materialien kritisch bewertet werden müssen, überwiegen im technischen Gesamturteil die Vorteile hinsichtlich Funktionalität, Integrationsfähigkeit und prozesssicherer Umsetzung. Aus diesem Grund sind synthetische Dämmstoffe aus ingenieurtechnischer Perspektive die bevorzugte Materialgruppe für die spezifischen Anforderungen des Projekts. Tabelle 4.23 gibt einen Überblick über die Bewertung spezifischer Dämmstoffe hinsichtlich technischer und ökologischer Kriterien. Eine genauere Beschreibung der einzelnen Dämmstoffe findet sich in Tabelle D.4 im Anhang























		R-Strategien							Maßnahmen/Effekte			
Dämmstoffe	 Gesamteinfluss 2	 Refuse 0	 Rethink 0	 Reduce 0	 Reuse 1	 Rezyklat 3	 Umweltwirkung 3	 Demontage 0	 Austausch 0	 Trennung 2	 Lebensdauer 0	
	 Repair 0	 Refurbish 1	 Remanufacturing 1	 Repurpose 1	 Recycle 3	 Modularisierung 0	 Leichtbau 0	 Individualisierung 3	 Technik 1	 Funktionserweit. 1	 Funktionstrennung 0	

Tabelle 4.23: Technische Bewertung spezifischer Dämmstoffe

Typ	Dämmstoff	Besonderheiten	Wärme- dämmung	Demontage- fähigkeit	Recycling- fähigkeit	Kreislauf- fähigkeit
Mineralisch	Calciumsilikat	Höchste Brandschutzklasse, Resistenz gegenüber Schimmel	■	■	■	■
	Glaswolle (Matte)	Nicht brennbar, Resistenz gegen Schimmel und Ungeziefer	■	■	■	■
	Mineralschaum	Formstabil, druckfest, nicht brennbar	■	■	■	■
	Perlit	Wasserabweisend, ungezieferbeständig, verrottet nicht	■	■	■	■
	Schaumglas	Schlechter Schallschutz, keine Formbarkeit	■	■	■	■
	Steinwolle (Matte, weich)	Nicht brennbar, Resistenz gegen Schimmel und Ungeziefer	■	■	■	■
Synthetisch	Extrudiertes Polystyrol (XPS)	Unempfindlich gegenüber Wasser, trittfest, leicht entflammbar	■	■	■	■
	Expandiertes Polystyrol (EPS)	Hohe Feuchtigkeitsbeständigkeit	■	■	■	■
	Polyurethan (PUR)	Elastisch	■	■	■	■
	Polyisocyanurat-Hartschaum (PIR)	Witterungsbeständig, wasserabweisend, druckbeständig	■	■	■	■
Ökologisch	Holzfaser	Guter Feuchtigkeitsausgleich, mäßig entflammbar	■	■	■	■
	Schafwolle	Feuchtigkeitsausgleich sehr gut, anfällig für Ungeziefer, leicht entflammbar	■	■	■	■
	Hanf	Feuchtigkeitsausgleich ausreichend, leicht entflammbar	■	■	■	■
	Flachs	Feuchtigkeitsausgleich ausreichend, leicht entflammbar	■	■	■	■
	Kork	Feuchtigkeitsausgleich gut, guter Brandschutz	■	■	■	■
	Schilf	Feuchtigkeitsausgleich sehr gut, leicht entflammbar	■	■	■	■
	Seegras	Feuchtigkeitsausgleich sehr gut, Brandschutz mittelmäßig	■	■	■	■
	Zellulose	Brandschutz mäßig, Feuchtigkeitsausgleich gut	■	■	■	■
	Holzwohle	Brandschutz gut, Feuchtigkeitsausgleich mäßig	■	■	■	■
	Jute	Brandschutz mäßig, Feuchtigkeitsausgleich gut	■	■	■	■
	Stroh	Brandschutz mittelmäßig, Feuchtigkeitsausgleich mäßig	■	■	■	■

4.4.4 Reduzierung des Materialeinsatzes

Die Reduktion des Materialeinsatzes bildet einen wesentlichen Hebel zur Effizienzsteigerung bei modular vorgefertigten Systemen. Insbesondere bei transportablen Einheiten, wie der modularen Seitenwand mit integrierter Ladesäule, ist das Systemgewicht ein relevanter Faktor für Transport, Montage und strukturelle Auslegung. Die Zielsetzung besteht darin, das Gewicht durch intelligente Materialwahl und konstruktive Optimierungen zu reduzieren – ohne dabei die funktionalen Anforderungen oder die strukturelle Stabilität zu kompromittieren. Ein zentraler Ansatz zur Reduktion des Materialeinsatzes betrifft die Außenbeplankung der modularen Seitenwand. Diese wird in der konventionellen Ausführung aus 1,5 mm starkem Stahlblech gefertigt. Um das Gewicht zu verringern, wurden verschiedene Alternativen mit geringeren Blechstärken untersucht und miteinander verglichen.





Seitenteil	Ausführung Stahl 1,5mm Blechstärke	Ausführung Stahl 1,0mm Blechstärke	Ausführung Stahl 0,7mm Blechstärke
			
	ca.27kg	ca.18kg	ca. 12kg



Abbildung 4.44: Gewichtseinsparung durch reduzierte Blechstärken (links) und Grundgerüst der Ladesäule (rechts)

Abbildung 4.44 (links) zeigt exemplarisch die Auswirkungen der Reduktion auf das Einzelgewicht je Seitenwand:























- Stahl 1,5 mm: ca. 27 kg
- Stahl 1,0 mm: ca. 18 kg
- Stahl 0,7 mm: ca. 12 kg

Durch die Reduktion der Blechstärke von 1,5 mm auf 0,7 mm ergibt sich somit eine potenzielle Einsparung von über 50 % des Materialgewichts je Beplankungselement. Dies erleichtert insbesondere die Handhabung während der Montage sowie die Verladung im Serienprozess. Gleichzeitig ermöglicht die Materialreduktion kürzere Taktzeiten bei Zuschnitt, Handling und Einbringung in das Modulsystem. Allerdings führt die Verringerung der Materialdicke zu verringerter Eigensteifigkeit der Beplankung. Diese konstruktive Schwächung muss durch gezielte Versteifungsmaßnahmen, z. B. in Form von Sicken, Falzen oder unterstützenden Rahmenprofilen, kompensiert werden. Andernfalls besteht die Gefahr von Verformungen, Vibrationseinträgen oder Instabilitäten im Betrieb.

Ein weiteres Optimierungspotenzial liegt in der Tragstruktur der modularen Einheit, welche im Referenzdesign vollständig aus Stahl gefertigt ist (vgl. Abbildung 4.44, rechts). Das Stahlgestell bringt allein ein Gewicht von ca. 322 kg auf – und stellt damit einen der größten Einzelbeiträge zur Gesamtmasse der modularen Seitenwand dar. Zur Gewichtsreduktion wurde die Möglichkeit einer Substitution durch hochfestes Aluminium untersucht. Aluminiumlegierungen besitzen nur etwa ein Drittel der Dichte von Stahl, wodurch sich bei vergleichbarer Bauweise erhebliche Einsparpotenziale ergeben. Demnach kann das Grundgestell bei Aluminiumkonstruktion auf rund 110 kg reduziert werden – ein Gewichtsersparnis von etwa 66 % gegenüber der Stahlausführung. Diese Reduktion verbessert theoretisch die Transportierbarkeit, senkt den Kran- und Hebeeinsatz und ermöglicht unter Umständen auch eine leichtere manuelle Handhabung. Jedoch ist die Umsetzung nicht ohne konstruktive Kompromisse möglich: Aluminium weist geringere Steifigkeit und Festigkeit auf als Stahl, was in tragenden Konstruktionen zu größeren Querschnitten oder verstärkten Knotenpunkten führen muss. Zudem sind Schweißverbindungen, Korrosionsschutz, thermische Längenausdehnung und das mechanische Langzeitverhalten in der Planung kritisch zu bewerten. Auch wirtschaftlich ist Aluminium bei identischer Funktion deutlich teurer als Stahl – was eine Substitution nur bei sehr hohen Gewichtsvorgaben rechtfertigt.

Auch wenn sich durch gezielte Materialreduktionen – etwa durch dünnere Blechstärken oder den Einsatz leichterer Werkstoffe im Tragwerk – rechnerisch relevante Gewichtseinsparungen erzielen lassen, bleibt ihr Einfluss auf das Gesamtgewicht der modularen Ladesäule in der Praxis begrenzt. Hauptgrund dafür ist das hohe Eigengewicht der integrierten Ladebatterien, die einen Großteil der Masse ausmachen und konstruktionsbedingt nicht substituiert oder gewichtsreduziert werden konnte. Vor diesem Hintergrund entfalten Maßnahmen zur Gewichtsoptimierung bei Beplankung und Tragstruktur keine unmittelbare Hebelwirkung auf die Gesamtmasse der Einheit. Dennoch sollten diese Potenziale nicht vernachlässigt werden, denn sie bieten – insbesondere aus ökologischer Sicht – einen wichtigen Ansatzpunkt für eine nachhaltigere Gestaltung der modularen Bauweise. Die Reduktion des Materialeinsatzes kann etwa zur Rohstoffschonung, zur Energieeinsparung bei Transport und Montage sowie zur Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks beitragen. Auch aus wirtschaftlicher Perspektive ergeben sich Vorteile, etwa durch geringere Materialkosten oder effizientere Fertigungsprozesse. Daher ist es sinnvoll, die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Materialreduktion auch unabhängig vom reinen Massebezug zu bewerten – und als festen Bestandteil in die langfristige Weiterentwicklung des modularen Systemdesigns einzubeziehen.

Insgesamt besteht durch die Maßnahmen ein großes Potenzial zur Gewichtsreduzierung. Aufgrund der geringen Umweltwirkungen und guten Recyclingfähigkeit von Stahl sind die Auswirkungen auf die Umweltwirkungen begrenzt. Durch die im Vergleich zu Stahl hohen Umweltwirkungen von Aluminium wird zudem ein großer Teil der positiven Auswirkungen kompensiert. Der Gesamteinfluss der Maßnahme ist jedoch hoch, da sie sich auf die gesamte Struktur der Ladesäule übertragen lässt.

	R-Strategien						Maßnahmen/Effekte					
Gewichtsreduzierung	 Gesamteinfluss 4	 Refuse 0	 Rethink 0	 Reduce 2	 Reuse 0	 Rezyklat 0	 Umweltwirkung 1	 Demontage 0	 Austausch 0	 Trennung 0	 Lebensdauer 0	
	 Repair 0	 Refurbish 0	 Remanufacturing 0	 Repurpose 0	 Recycle 0	 Modularisierung 0	 Leichtbau 4	 Individualisierung 0	 Technik 0	 Funktionserweit. 0	 Funktionsstrennung 0	

4.4.5 Ergebnisdiskussion Materialkonzepte

Die Änderung der grundlegenden Materialkonzepte besitzt aufgrund der breiten Übertragbarkeit auf das gesamte Produkt einen deutlich höheren Gesamteinfluss, als dies bei den davor betrachteten Maßnahmen unter Beibehaltung der Materialien der Fall war. Die Verbesserungen betreffen insbesondere die technischen Eigenschaften der Konzepte. Es lässt sich jedoch zeigen, dass durch den konsequenten Einsatz von Rezyklat auch beim Einsatz von Kunststoffen unter gewissen Voraussetzungen eine Verbesserung der Umweltwirkungen erzielen lässt.

		Gesamteinfluss	R-Strategien										Maßnahmen/Effekte											
			Refuse	Rethink	Reduce	Reuse	Repair	Refurbish	Remanufacture	Repurpose	Recycle	Rezyklat/biobasiert	Umweltwirkungen	Demontierbarkeit	Austauschbarkeit	Sortenreine Trennbarkeit	Lebensdauerverlängerung	Modularisierung	Gewichtsreduzierung	Individualisierbarkeit	technische Verbesserung	Funktionserweiterung	Funktionstrennung	
Materialkonzepte	Alternative Außenwand	■		■	■							■	■	■					■	■	■			■
	Interface			■		■								■			■		■	■				
	Dämmstoffe				■		■					■	■			■			■	■			■	
	Gewichtsreduzierung	■		■															■					

4.5 Design for Circular Economy

Maßnahmen, wie eine Vereinheitlichung oder der Einsatz von Rezyklaten, stellen nur einen Teil der Maßnahmenvielfalt dar, die die Nachhaltigkeit und Zirkularität von Produkten verbessern können. Spezifische Randbedingungen der Produkte stellen häufig eine Herausforderung für die Umsetzung dieser Maßnahmen dar, weil entscheidende Aspekte, wie bspw. die Demontagefähigkeit oder Wiederverwendbarkeit, bei der ursprünglichen Produktentwicklung nicht berücksichtigt wurden. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt basierend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Untersuchungen tiefgreifendere Änderungen der Produktarchitektur vorgenommen und ein modulares Konzept einer Ladesäule mit Batteriespeicher untersucht. Zudem wird als Erweiterung der zuvor betrachteten Wiederverwendbarkeit einzelner Bauteile der Ladesäule die Nutzung der Ladesäule als stationärer Batteriespeicher in einem 2nd Use untersucht. Dabei werden die Möglichkeiten der konventionellen Bauweise sowie der modularen Bauweise hinsichtlich eines 2nd Use miteinander verglichen.

4.5.1 2nd Use als lokaler Energiespeicher

Die Erhöhung der Effizienz eines Produkts bzw. eine Intensivierung des Produktnutzens stellt einen wichtigen Baustein in der Zirkularitätsbewertung von Produkten dar (vgl. Abbildung 4.45). Eine Effizienzerhöhung lässt sich zum Beispiel durch eine Verlängerung der Lebensdauer erreichen. So lassen sich die eingesetzte Energie und die Materialien für die Herstellung über einen längeren Nutzungszeitraum verteilen bzw. es muss kein neues Produkt hergestellt werden.

Die Möglichkeiten zur Verlängerung der Lebensdauer ist bei der Ladesäule begrenzt, da diese maßgeblich von der mit der Zeit abnehmenden Batteriekapazität abhängt (vgl. Abbildung 4.46). Eine Weiternutzung der Ladesäule mit geringerer Kapazität an Standorten mit geringeren Anforderungen (2nd Life) scheint zumindest aktuell keine erfolgversprechende Option zu sein. Auch die Weiternutzung einzelner Komponenten ist durch die aufwändigen Aus- bzw. Umbaumaßnahmen nur begrenzt zielführend. Die Nutzung der gesamten Ladesäule für eine andere Anwendung (2nd Use) scheint jedoch

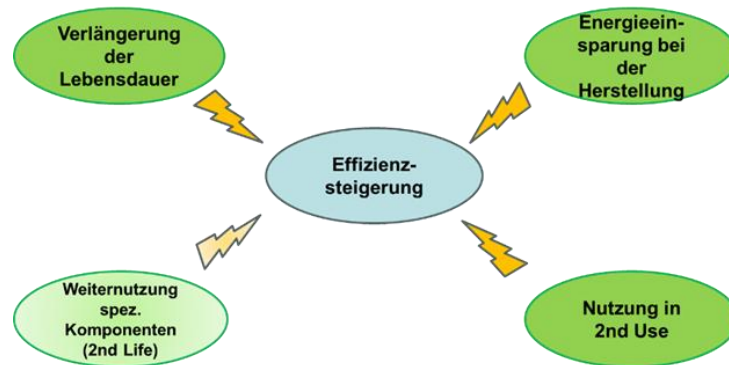


Abbildung 4.45: Möglichkeiten der Effizienzsteigerung

ein zielführender Ansatz zur Verlängerung der Einsatzzeit zu sein. Hierfür bietet sich bspw. die Nutzung als lokaler Energiespeicher zur Versorgung mehrerer privater Haushalte an. Dabei könnte der Großteil der Ladesäule unter geringem Änderungsaufwand weiterverwendet werden. Des Weiteren ist es möglich, die Batterien in größeren, stationären, Energiespeichersystemen (Energiefarmen) zu nutzen.

Diese können zur Stabilisierung des Stromnetzes genutzt werden, da diese Systeme kurze Reaktionszeiten aufweisen. Da hierfür nur die Batterien notwendig sind, wäre dies ein Einsatz von Komponenten als 2nd Life.

Für den Einsatz als lokaler Energiespeicher lassen sich verschiedene Szenarien unterscheiden, die einen Einfluss auf die Anwendbarkeit und notwendigen Umbauten haben. Abbildung 4.47 zeigt eine Auswahl möglicher Szenarien bezüglich der Anwendung, der genauen Nutzung sowie möglichen Eingängen für Energie. Bei einer Nutzung der Ladesäule als lokaler Energiespeicher bietet sich eine zusätzliche Weiternutzung als Ladesäule an. Bei einer Nutzung für Privathaushalte könnten so bspw. Fahrzeuge der Anwohner geladen werden. Hierbei ist jedoch die mit der Zeit sinkende Batteriekapazität zu beachten. Aus diesem Grund wurden innerhalb des Projekts nur Untersuchungen für die Anwendung

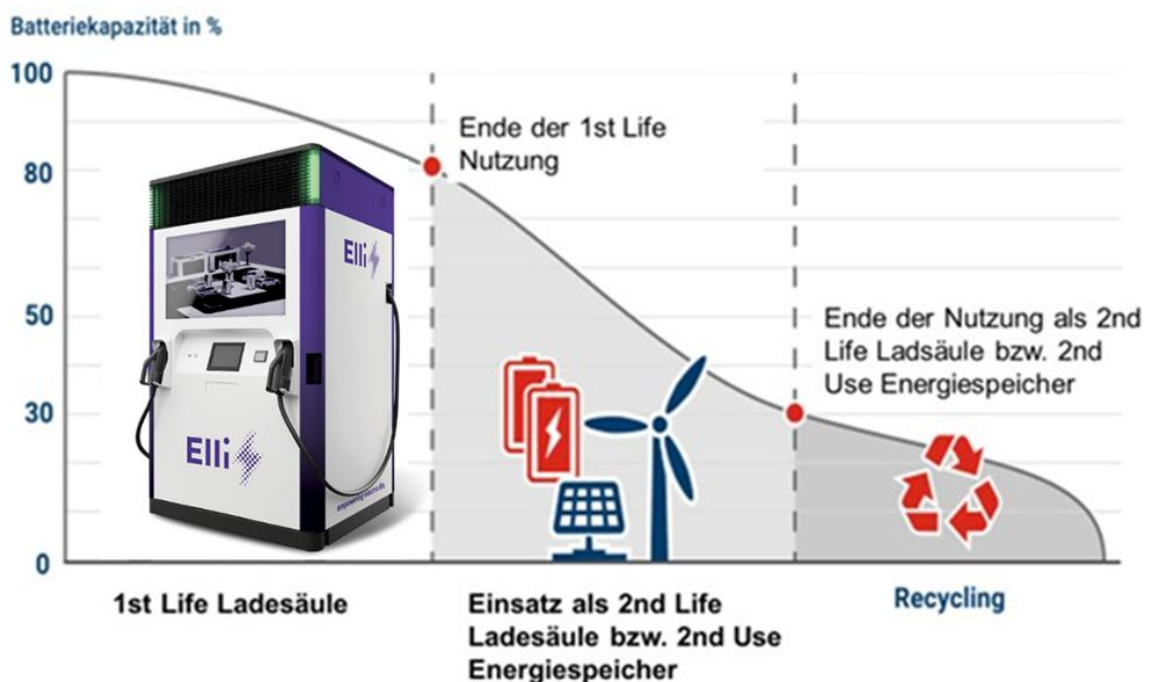


Abbildung 4.46: Second Life und Second Use Modell der Ladesäule

als reiner Energiespeicher durchgeführt. Für die Nutzung ist die Nutzung als privater Heimspeicher für einen Haushalt oder für mehrere Haushalte auch unter Nutzung mehrerer Speicher möglich. Als Industriespeicher bietet sich bspw. die Nutzung als Zwischenspeicher für industrielle Anwendungen oder als mobiler Baustellenspeicher an. Für die weiteren Betrachtungen wird hauptsächlich von einer Nutzung als privater Heimspeicher für mehrere Haushalte ausgegangen. Eine Nutzung für die genannten industriellen Anwendung wird jedoch parallel mitberücksichtigt. Als Eingang ist ein direkter zentraler Input von lokal erzeugtem erneuerbarem Strom, wie bspw. durch einen Solarpark, Windkraft, Biogas oder eine Flugwindkraftanlage, möglich. Ebenso ist ein dezentraler Input durch mehrere Photovoltaikanlagen auf den zu versorgenden Privathaushalten möglich. So lässt sich bspw. die Eigennutzungsrate deutlich steigern. Darüber hinaus ist die Nutzung als Netzpuffer möglich. In diesem Fall kann der Stromspeicher zu günstigen Zeitpunkten befüllt und entweder durch die Abnehmer verbraucht oder zu besseren Konditionen wieder in das Netz eingespeist werden.

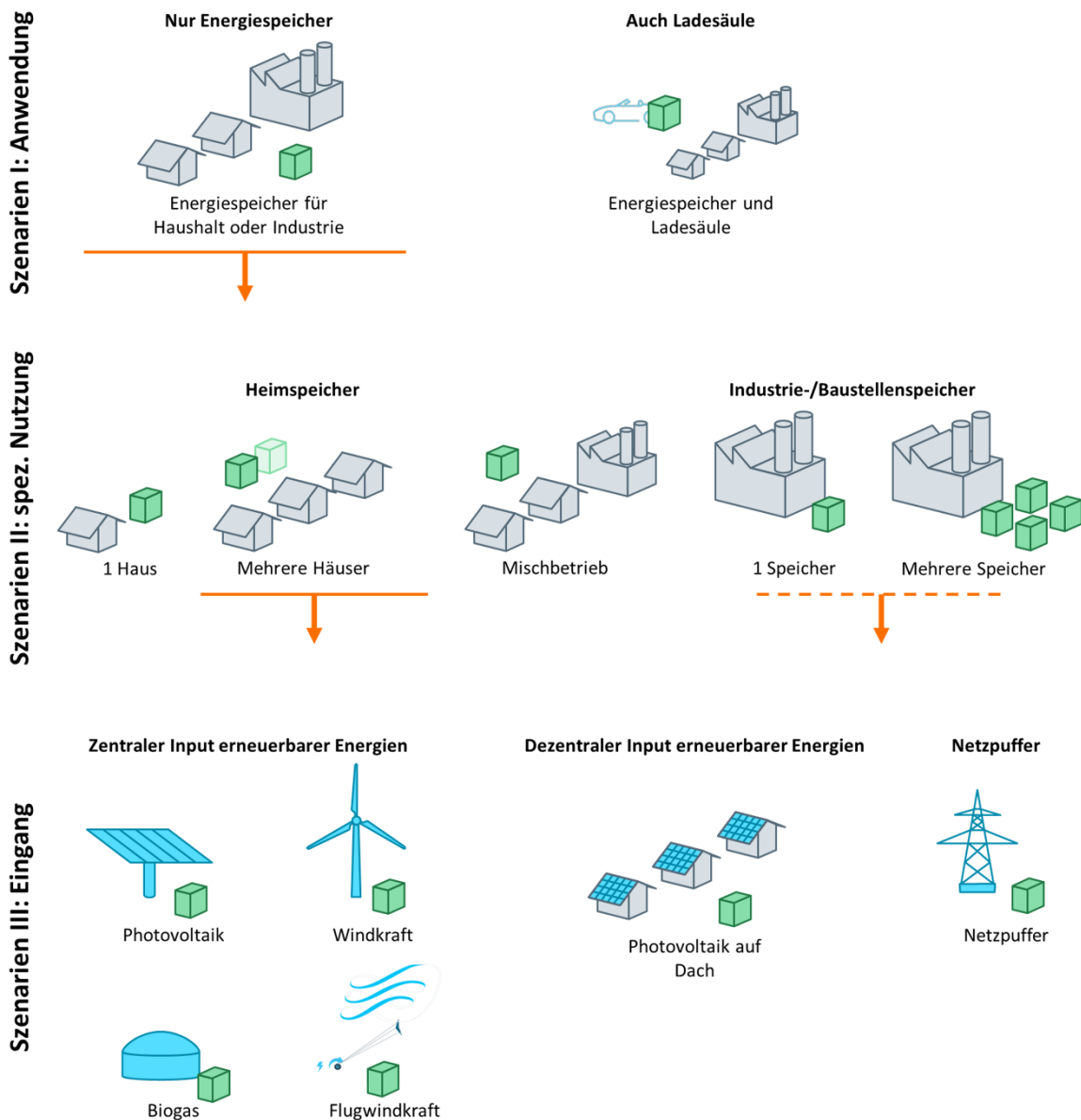


Abbildung 4.47: Szenarien für den Einsatz als lokaler Energiespeicher

Für die Nutzung als lokaler Energiespeicher lassen sich die meisten Komponenten der Ladesäule weaternutzen. Einige Komponenten sind jedoch für den neuen Einsatz nicht geeignet bzw. notwendig oder müssen erneuert werden, sodass diese ausgebaut werden sollten. Dies betrifft alle für das Laden zuständigen Komponenten, wie die Ladestecker und Kabel oder die Status LEDs sowie alle Kommunikationseinheiten zwischen Fahrzeug und Ladesäule, wie die Car Communication Unit (CCU) und die Standard European Car Communication Unit (SECC) und die DC-Meter. Die Vordertür besitzt zahlreiche Komponenten zur Außenweltkommunikation, die teilweise nicht mehr notwendig sind. Die betrifft bspw. das Paymentterminal oder den Webebildschirm. Das Bedienterminal könnte weiterhin zur Steuerung genutzt werden oder kann ebenfalls entfallen. Nach Ausbau können die entsprechenden Öffnungen mit Abdeckungen verschlossen werden. Alternativ ist auch der Einbau einer neuen, deutlich vereinfachten Fronttür möglich. Die vier integrierten Batterien werden für den Einsatz als lokaler Stromspeicher in Reihe geschaltet.

Im Gegenzug müssen neue Komponenten für die Nutzung als lokaler Stromspeicher verbaut werden. Dies betrifft eine Telematik Box, eine Battery Management Unit (BMU), eine Cell Management Unit (CMU) sowie ein neuer Satz DC-Meter. Darüber hinaus sind Anpassungen am DC-Board sowie der Software notwendig. Um die zuvor beschriebenen Einsatzszenarien abdecken zu können, besitzt der lokale Stromspeicher zusätzlich zum Anschluss an die Verbraucherhaushalte einen bidirektionalen Wechselstromanschluss an das Stromnetz. Hiermit lässt sich der Stromspeicher nach Umbau als Netzpuffer nutzen. Zusätzlich ermöglicht ein Gleichstromanschluss die Speicherung von Solarstrom.

Bei größerem Speicherbedarf lassen sich mehrere Ladesäulen zu einer Primary-Secondary-Kaskade zusammenschließen. Dabei können für die Sekundärspeicher die meisten Komponenten der Hochvoltelektronik entfallen. Auf diese Weise lässt sich die Speicherkapazität an die einsatzspezifischen Randbedingungen anpassen.

Um die Auswirkungen des 2nd Use Konzepts durch ein Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung) berechnen zu können, bedarf es einer Reihe gesicherter Daten. Da diese nicht vollumfänglich zur Verfügung stehen, wird eine vereinfachte Darstellung verwendet. Zu Beginn ist die Nutzungsdauer der ursprünglichen Ladesäule entscheidend. Diese wird seitens des Herstellers für einen Zeitraum von maximal 3 Jahren bzw. für eine maximale Leistungsabgabe von 126.000 kWh [2] garantiert. Aus einer Nutzungsanalyse lässt sich eine tägliche Anzahl von vier Ladungen à 25 Minuten [2] annehmen. Eine durchschnittliche Ladeleistung pro Ladung lässt sich mit 30,5 kWh angeben [25]. Somit berechnet sich die tägliche Ladeleistung einer Säule zu 122 kWh. Die Nutzungsdauer beträgt auf Grundlage dieser Daten 1033 Tage (2,83 Jahre). Nach dieser Leistungsdauer hat die Ladesäule eine Restkapazität von etwa 70 %. Auf der Internetseite Ladefragen.de [26] ist eine Grafik der Ladeverluste beim Laden einer HV-Batterie abgebildet. Diese Daten werden zur Berechnung der Brutto-Aufnahmeleistung benötigt (vgl. Tabelle 4.24). Berechnungsdaten für Szenario „Use“:

- Ladeleistung, netto / Tag: 122 kWh / 439,2 MJ
- Ladeleistung, brutto / Tag: 158 kWh / 569,5 MJ
- Lebensdauer: 1032,8 Tage / 2,83 Jahre
- Input elektr. Energie: 588.172 MJ / Nutzungsdauer
- Output elektr. Energie: 453.600 MJ / Nutzungsdauer
- Verluste elektr. Energie: 134.572 MJ
- Grundlage: Europäischer Strommix

Tabelle 4.24 Übersicht der Ladeverluste Szenario „Use“

Verluste	Verlust in der Ladesäule (%)	Nettoladung (%)	Verluste (%)
Laden der Säule			
Scheinenergie (Blindleistung)	5		
Wandlungsverlust AC/DC	4,8		
Verlust Bordnetz DC/DC	2,3		
Wandlung Bordnetz DC/DC	2,1		
Chemische Energie, Batterieverlust	4,3	81,5	18,5
Ladevorgang Fahrzeug (säulenseitige Verluste)			
Wandlung Bordnetz DC/DC	2,1		
Verlust Bordnetz DC/DC	2,3	77,1	22,9

Zusätzlich zur ursprünglichen Nutzung sind auch für die Berechnung der Umweltwirkungen des 2nd Use eine Vielzahl an Daten. Da auch diese aufgrund des Konzeptstadiums und fehlenden Langzeitvergleichsdaten nicht vollständig und gesichert erfassbar sind, werden auch in diesem Fall vereinfachte Annahmen getroffen. Nach der garantierten Nutzungsdauer in der originären Anwendung wird eine Leistungskapazität von mindestens 70 % des Neugerätes erwartet. Bei der Recherche anderer 2nd Life Projekte mit gebrauchten Batterien wird häufig eine Lebensdauer von fünf bis sechs Jahren angegeben. Die Lebenszeit der geprüften, gebrauchten, Batterien wird mit weiteren 8-10 Jahren im 2nd Life angesetzt. Dies würde eine Nutzungsverlängerung vom 1,67-fachen der Lebensdauer der Ladesäule entsprechen. Somit wird von einer Lebenszeit im 2nd Use Dauer von fünf Jahre ausgegangen. Um einen systemschonenden Betrieb im 2nd Use zu gewährleisten, sollte der Akku im Ladezustand lediglich zwischen 20 % und 80 % der Kapazität belastet werden. Der Arbeitsbereich liegt somit bei einer Gesamtrestkapazität von 70 % bei 42 % der Nennleistung. Bei einer Ausgangskapazität von 150 kWh ergibt sich eine nutzbare Kapazität von 63 kWh zu Beginn des 2nd Use. Auf dieser Grundlage lassen sich die notwendigen Arbeitsparameter für eine Nutzung als privater Stromspeicher bestimmen.

Die Ladesäule hat eine Nennleistung von 200 kWh. Somit liegt der maximale tägliche Ladeumsatz einer Säule bei 84 kWh. Statistisch betrachtet verbraucht ein Haushalt durchschnittlich ca. 9,5 kWh [27] am Tag. Mit einem Sicherheitspuffer von einem Viertel des verbliebenen Ladeumsatzes lassen sich somit sechs Haushalte versorgen. Tabelle 4.25 stellt die Verluste des Stromspeichers unter den zuvor getroffenen Annahmen dar. Berechnungsdaten für Szenario „2nd use“:

- Ladeleistung, netto / Tag: 60 kWh / 216 MJ
- Ladeleistung, brutto / Tag: 83 kWh / 299 MJ
- Lebensdauer: 1825 Tage / 5 Jahre
- Input elektr. Energie: 545.675 MJ / Nutzungsdauer
- Output elektr. Energie: 394.200 MJ / Nutzungsdauer
- Verluste elektr. Energie: 151.475 MJ
- Grundlage: Europäischer Strommix

Tabelle 4.25: Übersicht der Ladeverluste Szenario „2nd Use“

Verluste	Verlust in der Ladesäule (%)	Nettoladung (%)	Verluste (%)
Laden der Säule			
Scheinenergie (Blindleistung)	5		
Wandlungsverlust AC/DC	4,8		
Verlust Bordnetz DC/DC	2,3		
Wandlung Bordnetz DC/DC	2,1		
Chemische Energie, Batterieverlust	4,3	81,5	18,5
Stromentnahme (säulenseitige Verluste)			
Wandlung Bordnetz DC/DC	2,1		
Verlust Bordnetz DC/DC	2,3		
Wandlungsverlust DC/AC	4,8	72,3	27,7

Auf Basis der vorherigen Untersuchungen und Festlegungen, lassen sich die resultierenden Umweltwirkungen bestimmen. Zur einfacheren Darstellung werden die CO₂ Äquivalente (kg CO₂eq) als Vergleichsbasis verwendet. Die Werte entsprechen der Ergebnisse aus Abschnitt XY und sind nochmals in Tabelle 4.26 dargestellt.

Tabelle 4.26: GWP Ladesäule

Wirkungskategorie	Gesamt	Mat.-Bereitst.	Vorproduktion	Transport	End of Life
GWP [kg CO ₂ eq.]	5218,539	15051,000	1565,800	640,420	-12038,681

In den nachfolgenden Berechnungen wird der Betrieb der Ladesäule betrachtet. Aus diesem Grund wird der Wert des End of Life nicht betrachtet. Der relevante Wert des GWP beläuft sich auf 17.257 kg CO₂eq (ohne End of Life). Wie in den Berechnungsdaten festgelegt wurde, wird der Europäische Strommix (RER: Residual grid mix) mit 0,499 kg CO₂-eq./MJ zugrunde gelegt. Die Residuallast ist der Anteil am gesamteuropäischen Stromverbrauch, der unabhängig von den volatilen Energieträgern Wind und Sonne ist. Es handelt sich also um den Restbedarf an Strom, der mehrheitlich aus konventionellen Quellen gedeckt wird. In der folgenden Tabelle werden die Energieaufwände der ermittelten Einzelpositionen berechnet.

Tabelle 4.27: GWP Berechnung Use stages

	Ladesäule	Use	2 nd Use
Input elektr. Energie [MJ]		588.172	545.675
Output elektr. Energie [MJ]		453.600	394.200
Verluste elektr. Energie [MJ]		134.572	151.475
GWP Input [kg CO ₂ eq]		293.498	272.292
GWP Output [kg CO ₂ eq]		226.346	196.706
GWP Verluste [kg CO ₂ eq]		67.151	75.586
GWP gesamt [kg CO ₂ eq]	17.257	293.498	272.292

Die Energieeffizienz ist das Verhältnis von Energieertrag (Output) zur zugeführten Energie (Input), inkl. Produktion.

Der Energieeffizienzindex für die Nutzungsphase Use wird folgendermaßen berechnet:

$$EEI_{use} = \frac{\text{GWP Output Use}}{\text{GWP gesamt Ladesäule} + \text{GWP Input Use}} * 100\%$$

$$EEI_{use} = \frac{226.346 \text{ kg CO}_2\text{eq}}{17.257 \text{ kg CO}_2\text{eq} + 293.498 \text{ kg CO}_2\text{eq}} * 100\%$$

$$EEI_{use} = 72,8 \%$$

Effizienzberechnung für die Nutzungsphase 2nd Use (Erhöhung des EEI)

Die Erhöhung des Energieeffizienzindex für die Nutzungsphase 2nd Use wird folgendermaßen berechnet:

$$\Delta EEI_{2nd\ use} = \frac{\text{GWP Output 2nd Use}}{\text{GWP gesamt Ladesäule} + \text{GWP Input Use} + \text{GWP Input 2nd Use}} * 100\%$$

$$\Delta EEI_{2nd\ use} = \frac{196.706 \text{ kg CO}_2\text{eq}}{17.257 \text{ kg CO}_2\text{eq} + 293.498 \text{ kg CO}_2\text{eq} + 272.292 \text{ kg CO}_2\text{eq}} * 100\%$$

$$\Delta EEI_{2nd\ use} = 33,7 \%$$

Die Steigerung der Energieeffizienz fällt sehr deutlich aus. Somit werden auch die Ressourcen, die für den Bau der Ladesäule genutzt wurden, effektiver genutzt. Die Wertverluste werden durch eine längere Weiternutzung deutlich verringert.

- Nutzbarkeit diskutieren
- großer Stellhebel zur Verlängerung des Lebens der Ladesäule und auch insbesondere der Batterien
- Nutzung des bestehenden Gehäuses mit geringen Umbaumaßnahmen etc. kann Wirtschaftlichkeit stark verbessern
- Allerdings durch die feste Bauform wenig Flexibilität in der Anwendung; Es kann zwar die Anzahl der später verwendeten Batterien reduziert werden, das Gehäuse wird deshalb jedoch nicht kleiner
- Ungenutzter Bauraum im Inneren --> hier könnte vorgesehen werden, zusätzliche Batterien im 2nd Use zu integrieren. Allerdings müsste dies durch intensive Umbaumaßnahmen (Schweißbaugruppe) oder im Konstruktions-/Herstellungsprozess berücksichtigt werden. Da nicht klar ist, welche/wie viele Ladesäulen einen 2nd Use erfahren, bedeutet dies eher einen nicht sinnvollen Zusatzaufwand.
 - ➔ Flexibilität muss verbessert werden
- Modularisierung der Ladesäule als Maßnahme

Der Einsatz der Ladesäule in einem 2nd Use als lokaler Energiespeicher nach dem Ende ihres ersten Lebens als Ladesäule hat massive Auswirkungen auf die Umweltwirkungen, da sich die Umweltpotenziale der Herstellung auf einen deutlich längeren Nutzungszeitraum verteilen lassen. Darüber hinaus entstehen durch die verlängerte Nutzungsdauer auch ein zusätzlicher Anreiz für eine verbesserte Reparaturfähigkeit und auch eine verbesserte Modularisierung. Nachteilig ist jedoch, dass

		R-Strategien					Maßnahmen/Effekte				
2 nd Use											
	Gesamteinfluss 4	Refuse 1	Rethink 2	Reduce 5	Reuse 1	Rezyklat 0	Umweltwirkung 5	Demontage 0	Austausch 0	Trennung 0	Lebensdauer 5
	Repair 2	Refurbish 1	Remanufacturing 1	Repurpose 5	Recycle 0	Modularisierung 2	Leichtbau 0	Individualisierung 0	Technik 0	Funktionserweit. 0	Funktionsstrennung 2

trotz Umbau auch nicht benötigte Bestandteile der Ladesäule in den 2nd Use gehen. Insbesondere eine intensivierte Modularisierung könnte hier deutliche Vorteile bringen.

4.5.2 Modulares Konzept Ladesäule

Eine Modularisierung der Ladesäule bietet einen großen Stellhebel bzgl. technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Fragestellungen. Dies betrifft auch zahlreiche der aus den vorherigen Maßnahmen verbleibenden Herausforderungen, wie bspw. dem 2nd Use. Darüber hinaus bieten sich Möglichkeiten für eine deutlich gesteigerte Flexibilität bzw. Individualisierbarkeit in der Konfiguration der Ladesäule. Durch die Anpassung der verwendeten Batteriemodule kann die Ladesäule bspw. an die individuellen Anforderungen bestimmter Standorte angepasst werden. Darüber hinaus existieren zahlreiche weitere allgemeingültige Anforderungen, die Einfluss auf die Aufteilung in bestimmte Module hat. Ein Beispiel hierfür sind die Modultreiber nach im Rahmen des Modular Function Deployment (MFD) nach Erixon [28, 29]. Aus diesen Anforderungen lassen sich erste Konzepte für eine Modulkonfiguration ermitteln. So müssen das Dach und der Unterboden als separate Module ausgeführt sein. Durch die geforderte Anwendung als reiner Ladepunkt ohne Batteriespeicher sowie als reiner Energiespeicher ohne Ladepunkt müssen Batterien und Ladepерipherie als separates Modul ausgeführt werden. Darüber hinaus bestehen jedoch noch zahlreiche Umsetzungsmöglichkeiten. Dies betrifft unter anderem die Konfiguration von Batterien, Kühlung sowie Elektrik/Elektronik.

Abbildung 4.48 (oben) zeigt exemplarische Beispiele für die Modulkonfiguration dieser drei Komponenten sowie darunter die resultierende Bauform für die Ladesäule. Die erste Variante bildet die Aufteilung innerhalb der aktuellen Ladesäule wieder. Die Batterien, jeweils zu zweit zusammengefasst, die Elektronik und die Kühlung sind als Module ausgeführt. Für diese Konfiguration ließe sich der Bildschirm weiterhin vorne im oberen Modul unterbringen. Allerdings resultiert aus der Trennung des Gehäuses zwischen Kühlung und Elektronik eine nach oben versetzte Positionierung sowie eine Verringerung der Bildschirmgröße, sodass schon bei dieser Konfiguration eine alternative Positionierung eines Bildschirms erforderlich wäre. Weitere Konfigurationsmöglichkeiten sind die Integration der Kühlung in ein 2er Batteriemodul oder in ein Modul mit nur einer Batterie sowie jeweils weiterhin separater Elektronik sowie quasiautarke Batteriemodule mit einer Batterie und eigener Kühlung und Elektronik. Mit zunehmender Unterteilung erhöht sich voraussichtlich der erforderliche Platzbedarf, dass die resultierende Ladesäule höher aufbaut. Aufgrund der möglichen unterschiedlichen Randbedingungen späterer Einsatzszenarien werden im Rahmen der weiteren Untersuchungen die Elektronik sowie die Kühlung als separate Module ausgeführt. So kann bei geringer (Ent-)Ladeleistung die Kühlung kleiner ausfallen oder sogar ganz entfallen. Das Elektronikmodul kann wiederum an den jeweiligen Einsatz als Ladepunkt oder Energiespeicher ausgeführt werden. Hierfür ist die interne Unterteilung in weitere Submodule zielführend.

Die Integration der Ladefunktion samt notwendiger Peripherie, wie Ladekabel oder Bedienterminal, kann entweder als zusätzliche Ebene oder als externes Modul realisiert werden. Als Ebene lässt sich das Modul besser in die Baustruktur integrieren. Als externes Modul bietet sich hingegen eine größere Flexibilität bzgl. der Anzahl an Ladepunkten oder auch der örtlichen Trennung von Ladepunkt und Batteriespeicher. Unabhängig von dieser Ausführung lässt sich das modulare einfach und beliebig erweitern bzw. reduzieren und so an die notwendigen Randbedingungen anpassen, sodass keine unnötigen Komponenten produziert bzw. rezykliert werden müssen.

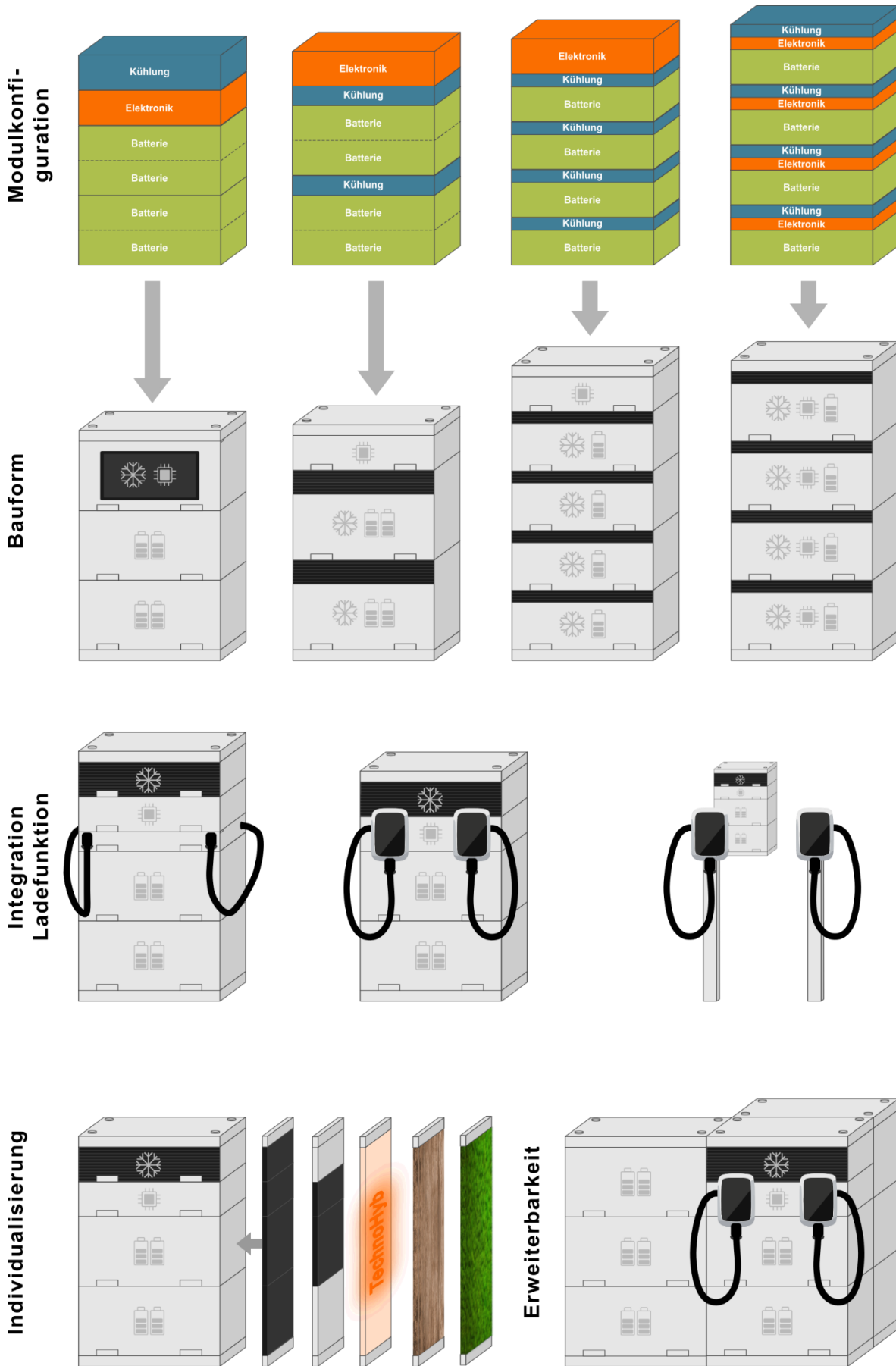


Abbildung 4.48: Grundkonzepte und Potenziale einer modularen Ladesäule

Durch eine abnehmbare Seitenverkleidung (vgl. Abschnitt 4.3.3) lassen sich neben individueller Bildschirmbestückung auch alternative Designs realisieren.

Für die Integration in eine mobile Ladesäule stellt das Batteriemodul spezifische Anforderungen an Flexibilität, Modularität und Wartungsfreundlichkeit. Bisherige Lösungen mit fest verschraubten Zellträgern und einer starren Hochvoltanbindung bieten kaum Möglichkeiten, unterschiedliche Zellformate oder Anschlusskonzepte zu integrieren. Diese Limitierung wirkt sich negativ auf Skalierbarkeit, Servicefreundlichkeit und Variantenvielfalt aus – zentrale Anforderungen für mobile Energiespeicherlösungen mit wechselnden Einsatzbedingungen. Ziel des Konzepts ist die Entwicklung eines modularen Batteriemoduls, das den spezifischen Anforderungen mobiler Ladesäulen gerecht wird und gleichzeitig eine hohe Wiederverwendbarkeit für ein 2nd-Life-Szenario bietet. Im Zentrum steht ein standardisiertes Grundmodul mit stabiler Rohrrahmen-Trägerstruktur, das sich sowohl mechanisch als auch elektrisch flexibel konfigurieren lässt. Die Konstruktion erlaubt es, verschiedene Zellformate aufzunehmen und zu kontaktieren, wobei stromführende Elemente, Kühlstrukturen und Sensorik innerhalb des Rahmens integriert oder optional nachgerüstet werden können.

Ein wesentliches Merkmal des Konzepts ist die Stapelbarkeit des Moduls. Durch eine mechanische Schnittstelle mit definierter Vorzentrierung ist es möglich, mehrere Module sicher vertikal zu kombinieren. Diese Zentrierung ist so gestaltet, dass sie eine kompatible Aufnahme über handelsübliche Gabelstapler ermöglicht. Dies erleichtert sowohl die manuelle Handhabung beim Einbau in die mobile Ladesäule als auch die logistische Handhabung im Lager oder beim Transport. Darüber hinaus ist das System für ein automatisches Docking ausgelegt. Kühlmittleitungen, Energieanschlüsse sowie Datenleitungen können über zentrale, mechanisch geführte Schnittstellen beim Einsetzen des Moduls automatisch verbunden werden. Dies minimiert Fehlerquellen beim manuellen Anschluss, beschleunigt den Austausch und erhöht die Betriebssicherheit. Die gewählte Modularchitektur ist nicht nur auf Batteriemodule beschränkt. Sie lässt sich auf weitere Funktionsbaugruppen wie Ladepunkte oder Kühlaggregate übertragen, die nach demselben strukturellen Prinzip aufgebaut sind. Damit entsteht ein ganzheitlich standardisiertes System, das sich je nach Anwendung flexibel zusammensetzen lässt.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist das 2nd-Life-Szenario: Das Batteriemodul ist so ausgelegt, dass es nach seiner Nutzung in der mobilen Ladesäule ohne tiefgreifende Umbaumaßnahmen als stationärer Pufferspeicher – bspw. zur Speicherung von Solarstrom aus einer PV-Anlage im privaten Bereich – weiterverwendet werden kann. Die modulare Anbindung, das robuste mechanische Design und die standardisierten Schnittstellen tragen dazu bei, dass die Umrüstung mit minimalem Aufwand realisierbar ist.

Das entwickelte Batteriemodulkonzept verfolgt einen systemischen Designansatz, der mechanische Robustheit, elektrische Funktionalität und logistische Modularität in einer kompakten Einheit vereint. Der Aufbau basiert auf einer geschweißten Rohrrahmen-Trägerstruktur, die sowohl die mechanische Stabilität als auch die Schnittstellenaufnahme sicherstellt. In diese Struktur sind zwei voneinander getrennte Batteriepacks integriert, die jeweils auf einem Rollenschienensystem gelagert sind. Diese Auslegung ermöglicht eine einfache Entnahme der Packs zur Wartung oder zum Tausch, ohne das komplette Modul demontieren zu müssen. Die Energieversorgung, die Datenübertragung sowie die Kühlmittelzufuhr erfolgen über eine zentrale Multikupplung, die an der Rückseite des Moduls positioniert ist und sich beim Einschieben automatisch verbindet. Für die Handhabung sind an der Unterseite sogenannte Staplerschuhe angebracht, die das sichere Verfahren mit einem Hubwagen ermöglichen. Die vertikale Skalierbarkeit wird über eine zentrierende Verbindungstechnik sichergestellt: Eingelassene Zentrierbolzen ermöglichen die präzise Stapelung von bis zu drei Modulen übereinander und stellen gleichzeitig die reproduzierbare Ausrichtung der Kupplungen sicher. Die Übersicht in Abbildung 4.49 zeigt das vollständige CAD-Modell des modularen Batteriemoduls mit allen relevanten Struktur- und Funktionselementen.

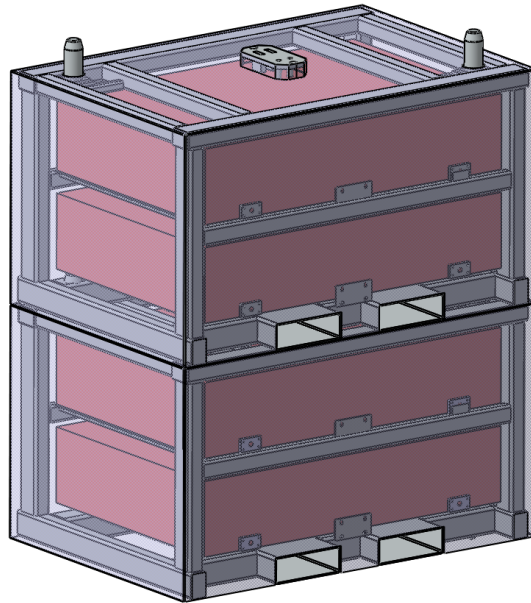


Abbildung 4.49: Darstellung des Grundaufbaus für die Unterbringung der Batterien

Die technischen Parameter des Moduls orientieren sich an den Anforderungen an mobile Energiespeicherlösungen. Abbildung 4.50 stellt die geometrischen Proportionen sowie die Materialverteilung innerhalb des Systems dar. Das kompakte Außenmaß gewährleistet die Transportfähigkeit auf standardisierten Logistikwegen und ermöglicht gleichzeitig eine hohe Packungsdichte im Systemverbund. Das Gesamtgewicht des Moduls beträgt ca. 920 kg, was im Hinblick auf Stabilität, Transportfähigkeit und Traglastreserven der mobilen Ladesäule als optimal gewichtet wurde. Die Materialwahl des tragenden Rahmens zielt auf eine möglichst hohe mechanische Belastbarkeit bei gleichzeitig reduziertem Eigengewicht. Dabei kommt ein strukturoptimierter Rohrrahmen aus Aluminium oder Stahlleichtbau zum Einsatz. Die umlaufende Abdeckung besitzt keine statische Funktion und kann daher aus Leichtbauverbundmaterialien wie CFK, GFK oder Kunststoff gefertigt werden. Dies reduziert nicht nur das Gewicht, sondern erlaubt auch eine einfache Demontage und Wiederverwendung einzelner Komponenten.

Ein zentraler Vorteil des Konzepts liegt in der einfachen Wartung. Wie in Abbildung 4.51 ersichtlich, lassen sich die beiden Batteriepacks unabhängig voneinander entlang von Rollenschienen nach vorn

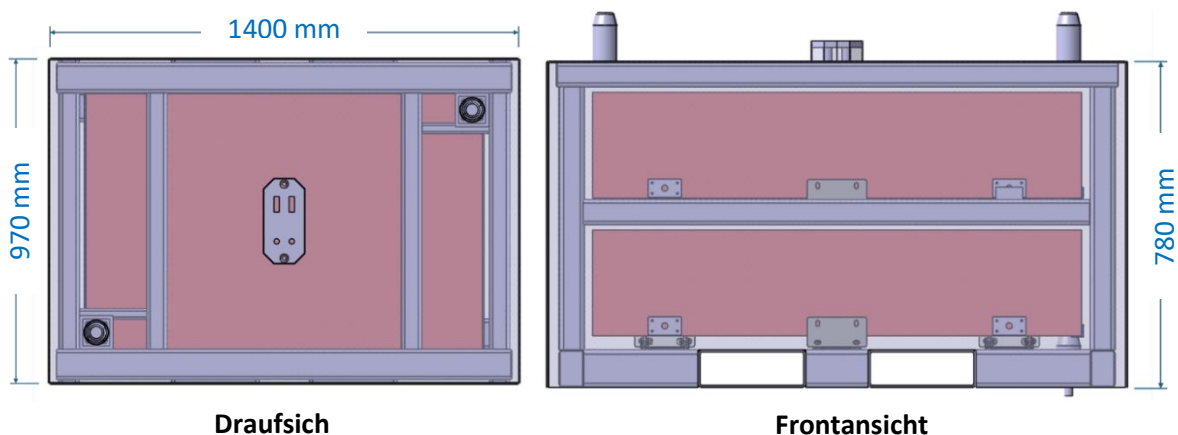


Abbildung 4.50: Darstellung der Größenverhältnisse des Batteriemoduls

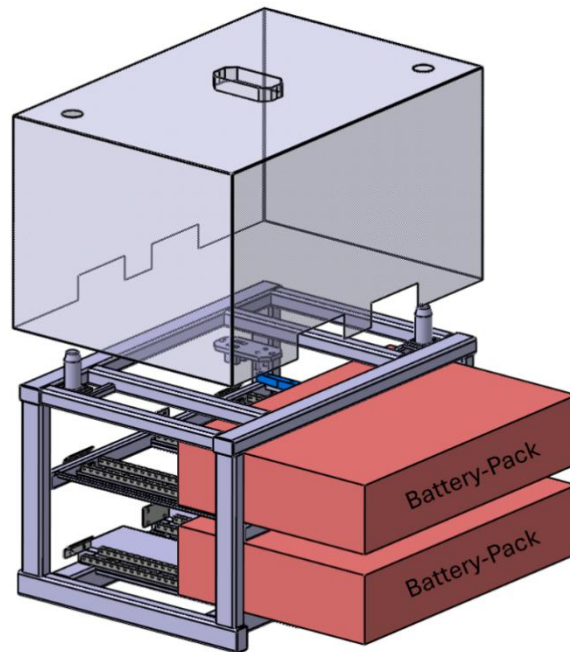


Abbildung 4.51: Entnahme eines Batteriepacks über das integrierte Rollenschienensystem zur Wartung

aus dem Gehäuse ziehen. Die Schienenführung ist so gestaltet, dass der Zugriff auf Anschlusspunkte und Modulbefestigungen ohne Werkzeug möglich ist. Durch diese Konstruktion kann der Austausch eines Batteriepacks innerhalb weniger Minuten durchgeführt werden, ohne dass benachbarte Komponenten beeinträchtigt werden. Die Wartungsfreundlichkeit ist insbesondere für mobile Anwendungen mit hoher Systemverfügbarkeit von zentraler Bedeutung.

Die elektrische, thermische und kommunikative Anbindung erfolgt über eine zentral positionierte Multikupplung (vgl. Abbildung 4.52). Die Multikupplung verbindet beim Einsetzen des Moduls alle relevanten Medienführungen automatisch mit der Infrastruktur der Ladesäule. Dies umfasst die Hochvoltleitung für die Energieübertragung, die Kühlmittelleitungen für die thermische Stabilisierung sowie Datenleitungen zur Systemüberwachung und Kommunikation mit übergeordneten Steuerungseinheiten. Die Multikupplung ist nach Schutzart IP67 selbstdichtend ausgelegt, sodass keine zusätzliche Abdichtung über das Modulgehäuse notwendig ist. Diese Konstruktion stellt sicher, dass alle elektrischen und hydraulischen Übergänge vor Feuchtigkeit und Staub geschützt sind – auch bei häufigem Kuppeln und Entkuppeln. Zudem kommen tropffreie Schnellwechsellkupplungen zum Einsatz, die ein unbeabsichtigtes Austreten von Kühlflüssigkeit zuverlässig verhindern. Damit wird

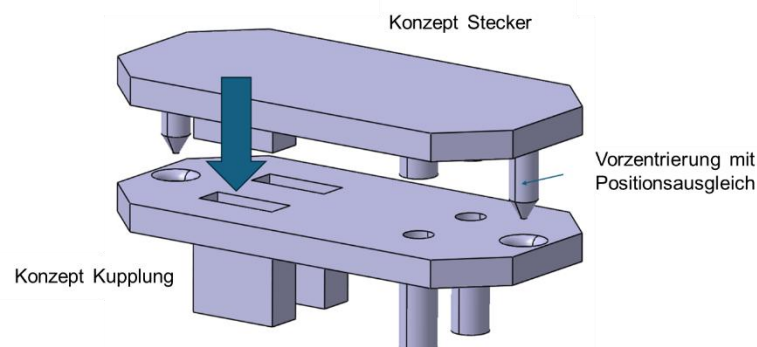


Abbildung 4.52: Konzeptdarstellung der Multikupplung

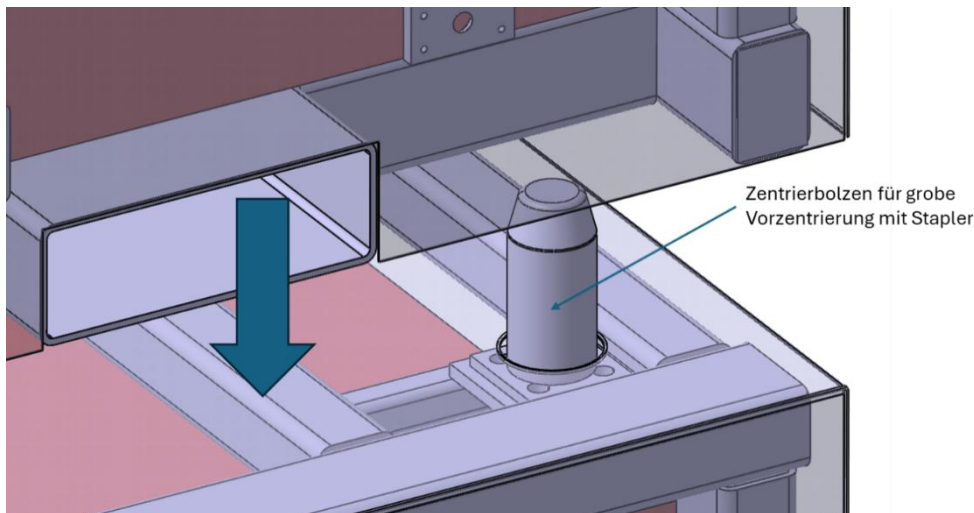


Abbildung 4.53: Vorzentrierung über Zentrierbolzen

sowohl die Gefahr von Kurzschlüssen als auch von Kontamination des Bauraums ausgeschlossen. Das automatisierte Andocken reduziert nicht nur Montagezeiten, sondern verhindert auch potenzielle Fehlverbindungen, was insbesondere in modular aufgebauten Systemlandschaften einen erheblichen Mehrwert bietet.

Die vertikale Stapelbarkeit der Module wird über ein zweistufiges Zentriersystem realisiert. Die erste Zentrierstufe erfolgt mechanisch über integrierte Zentrierbolzen, welche beim Absetzen des Moduls mit einem Stapler automatisch in die vorgesehenen Führungsöffnungen des darunterliegenden Moduls eingreifen. Diese Bolzen ermöglichen eine grobe Vorzentrierung der Gehäusestrukturen und gewährleisten eine sichere, lagestabile Positionierung – auch ohne zusätzliche Verriegelung. Im weiteren Fügevorgang übernimmt die Multikupplung selbst die Feinausrichtung. Ihre Geometrie ist so gestaltet, dass sie beim Einsinken des Moduls in die Endposition automatisch in die korrekte Lage geführt wird und eine passgenaue Verbindung aller elektrischen, thermischen und datenbasierten Schnittstellen ermöglicht. Da die mechanische Vorzentrierung über die Bolzen und die finale Ausrichtung über die Kupplung erfolgt, ist keine zusätzliche Verriegelung erforderlich. Dies vereinfacht sowohl den Montageprozess als auch die Wartung und trägt zur hohen Modularität des Systems bei.

Ein zentrales Entwicklungsziel war die Fähigkeit zur Nachnutzung des Moduls außerhalb des primären Einsatzbereichs. Das System ist so konzipiert, dass es nach dem Einsatz in einer mobilen Ladesäule ohne strukturelle Änderungen als stationärer Pufferspeicher – bspw. zur Zwischenspeicherung von PV-Energie – eingesetzt werden kann (vgl. Abschnitt 4.5.1). Die Entkopplung der Batteriepacks, die werkzeuglose Anschlusslösung sowie die logische Trennung der Energie- und Datenpfade ermöglichen eine flexible Wiederverwendung in unterschiedlichen Anwendungsumgebungen. Der modulare Charakter reduziert darüber hinaus den Integrationsaufwand in bestehende Gebäudestrukturen oder Versorgungssysteme.

Das entwickelte Konzept eines modularen Batteriemoduls erfüllt zentrale Anforderungen an Flexibilität, Skalierbarkeit, Wartungsfreundlichkeit und Nachhaltigkeit im mobilen Ladebetrieb. Die durchdachte Kombination aus Rohrrahmenstruktur, Rollenschienensystem, Multikupplung, Staplerschuhen und Vorzentrierung erlaubt eine präzise Integration in komplexe Ladesysteme sowie eine einfache Nachnutzung im stationären Kontext. Damit stellt das System eine robuste, zukunftsfähige Lösung für modulare Energiespeicher dar, die über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg wirtschaftlich und ökologisch überzeugt.

Neben den zuvor genannten Potenzialen zeigen die Analysen des modularen Konzepts neue Möglichkeiten hinsichtlich einer Reduzierung der Wandstärken oder dem Einsatz alternativer Materialien. Dies ist in der verkleinerten Aufspannfläche der Außenhaut im Vergleich zur Referenz begründet. Daraus resultieren geringe Anforderungen hinsichtlich Beulsteifigkeit, Schwingverhalten und Intrusion. Zudem lassen sich aufgrund der geringeren Abmessungen auch Materialien anwenden, die zuvor bspw. aus fertigungstechnischen Gründen nicht einsetzbar waren. Zur Abschätzung der Auswirkungen wurden die Umweltwirkungen unterschiedlicher Wandstärken für Stahl und alternativer Werkstoffe im Vergleich zur Referenz von 1,5 mm Stahl untersucht. Die Ergebnisse dieses Materialvergleichs sind in Tabelle 4.28 als relative Werte im Vergleich zur Referenzwandstärke angegeben.

Tabelle 4.28: Umweltwirkungen unterschiedlicher Materialien und Wandstärken























Material	Stahl			Aluminium		PA66		PA66 GF30		PA66 GF20		CFK				PA66 Rezyklat		PA66 25% Primär 75% Rezyklat		
	1,5	1	0,7	1,5	1	2,5	2	2,5	2	2,5	2	1,5	1	0,7	0,5	2,5	2	2,5	2	
Kategorie Umweltwirkung	GWP 100 Jahre	100%	67%	47%	125%	83%	78%	62%	61%	49%	55%	51%	150%	100%	70%	50%	3%	3%	22%	18%
	ODP, katalytisches	100%	67%	47%	105%	70%	87%	70%	147%	118%	131%	98%	1311%	874%	612%	437%	32%	26%	46%	37%
	AP	100%	67%	47%	306%	204%	43%	34%	68%	54%	61%	46%	106%	71%	50%	35%	3%	2%	13%	10%
	EP	100%	67%	47%	235%	157%	91%	72%	79%	63%	70%	64%	206%	137%	96%	69%	4%	3%	26%	21%
	POCP	100%	67%	47%	161%	107%	86%	69%	73%	58%	65%	59%	110%	73%	51%	37%	1%	1%	23%	18%
	ADPE	100%	67%	47%	8%	5%	2%	1%	87%	70%	78%	46%	4%	3%	2%	1%	0%	0%	1%	0%
	ADPF	100%	67%	47%	137%	91%	153%	122%	115%	92%	103%	98%	262%	175%	122%	87%	3%	3%	40%	32%
	PENRT	100%	67%	47%	156%	104%	152%	121%	116%	93%	103%	98%	276%	184%	129%	92%	5%	4%	42%	33%
	PERT	100%	67%	47%	1121%	747%	68%	55%	113%	90%	100%	76%	979%	653%	457%	326%	34%	27%	43%	34%
	Wasserverbrauch	100%	67%	47%	2438%	1625%	238%	190%	205%	164%	183%	166%	542%	361%	253%	181%	30%	24%	82%	66%
	Luftverschmutzung	100%	67%	47%	119%	80%	52%	42%	51%	41%	46%	40%	100%	67%	47%	33%	2%	2%	15%	12%
	Wasserverschmutzung	100%	67%	47%	163%	109%	279%	223%	223%	179%	199%	185%	669%	446%	312%	223%	17%	14%	83%	66%
	Gefährlicher Abfall (Deponie)	100%	67%	47%	2%	2%	2%	1%	2%	2%	2%	2%	20%	14%	10%	7%	0%	0%	0%	0%
	Entsorgter nicht gefährlicher Abfall	100%	67%	47%	2666%	1777%	29%	23%	85%	68%	76%	52%	64%	43%	30%	21%	59%	47%	52%	41%
	Esorgter radioaktiver Abfall	100%	67%	47%	1007%	671%	106%	85%	133%	106%	118%	96%	931%	621%	434%	310%	94%	75%	97%	78%

Durch eine Reduzierung der Stahlwandstärke lassen sie alle Umweltwirkungen gleichermaßen äquivalent reduzieren. Beim Einsatz von Aluminium in Form von 1,5 mm und 1 mm Wandstärke ergibt sich ein gemischtes Bild mit deutlichen Ausschlägen bei gewissen Kategorien. Insgesamt kann hier bezogen auf die Umweltwirkung nicht von einem Vorteil ausgegangen werden. Bei der Anwendung von 2,5 bzw. 2 mm Kunststoff (primär) ist hingegen in den meisten Kategorien ein kleiner Vorteil erkennbar. Aufgrund der geringeren Umweltwirkung der Glasfasern für die meisten Kategorien im Vergleich zu dem hier angewendeten PA66 sinken die Umweltwirkungen mit zunehmendem Glasfasergehalt. Im Vergleich zu Stahl ist bei einer Kunststoffvariante mit einer geringeren Festigkeit der Außenhaut zu rechnen. Beim Einsatz von CFK ist erst bei Wandstärken deutlich unter 1 mm mit einer Verringerung der Umweltwirkungen zu rechnen (abgesehen von Ausreißen bestimmter Kategorien). Diese Wandstärken bieten ggf. In Bezug auf die Festigkeit einen adäquaten Vergleich zu Stahl, nicht jedoch in Bezug auf Biege und Beulsteifigkeit. Mit dem Einsatz von Kunststoffrezyklat lassen sich die Umweltwirkungen jedoch über alle Kategorien hinweg deutlich reduzieren. Dies gilt ebenfalls für eine Beimischung von 25 % Primärmaterial aufgrund der Degradierung des Kunststoffes. Somit

bietet Kunststoffzyklat auch in diesem Anwendungsfall (vgl. Abschnitt 4.4.1) eine gute Alternative zu Stahl. Voraussetzung hierfür ist jedoch weiterhin eine genügende Rezyklatqualität und -verfügbarkeit.

Da es sich bei den vorherigen Betrachtungen allein um einen Materialvergleich handelt, müssen für einen Vergleich des modularen Konzepts und der Referenzladesäule noch weitere Aspekte betrachtet werden. So bedarf es für jedes Modul einer Abdeckung auf der Unter- und Oberseite. Diese dient dabei maßgeblich der Abdichtung und muss somit keinen großen mechanischen Ansprüchen genügen. Jedoch lassen sich diese Bereiche auch für eine Versteifung der Gesamtstruktur nutzen, sodass das Innengestell weniger Lasten aufnehmen muss. Durch überschlägige Analysen lässt sich somit die zusätzliche Außenhaut kompensieren, sodass das modulare Konzept voraussichtlich ein geringeres Gewicht aufweist als die Referenzladesäule. Darüber hinaus ermöglicht das modulare Konzept eine deutlich einfachere Individualisierbarkeit und somit ein breiteres Anwendungsspektrum. Die Modularisierung ermöglicht aber insbesondere auch Verbesserungen in Hinblick auf die Nachhaltigkeit und Zirkulargerechtigkeit der Ladesäule.

Insgesamt zeigt die Modularisierung der Ladesäule ein hohes Potenzial in nahezu allen Kategorien. Insbesondere die Wiederverwendung einzelner Module in gleicher oder auch anderer Anwendung kann durch die Modularisierung stark verbessert werden. Dies führt auch zu einer deutlichen Verbesserung der Eignung für einen 2nd Use (vgl. Abschnitt 4.5.1). Durch die verringerten strukturellen Anforderungen lassen sich auch die Umweltwirkungen reduzieren. Der Gesamteinfluss ist aufgrund der Auswirkungen auf das gesamte Produkt sehr hoch und die Modularisierung besitzt somit ein enormes Potenzial.

	R-Strategien					Maßnahmen/Effekte					
Modulares Konzept	 Gesamteinfluss 5	 Refuse 2	 Rethink 3	 Reduce 2	 Reuse 3	 Rezyklat 0	 Umweltwirkung 3	 Demontage 3	 Austausch 2	 Trennung 0	 Lebensdauer 1
	 Repair 2	 Refurbish 1	 Remanufacturing 1	 Repurpose 3	 Recycle 0	 Modularisierung 5	 Leichtbau 1	 Individualisierung 5	 Technik 3	 Funktionserweit. 1	 Funktionstrennung 3

4.6 Schlussbetrachtung

Abschließend lässt sich feststellen, dass das Potenzial für eine Verbesserung der Zirkulargerechtigkeit und Umweltwirkungen ansteigt, je tiefergreifender die Änderungen am Produkt sind. Dies ist auch damit begründet, dass bestimmte Maßnahmen in der Praxis aufgrund von bestehenden Randbedingungen nicht umsetzbar sind. Ein Beispiel hierfür ist die Vereinheitlichung von Kunststoffen in der Ladesäule. Da es sich bei vielen der Teile um standardisierte Teile handelt, ist eine Vereinheitlichung nicht möglich, sodass das Potenzial dieser Maßnahme nur theoretisch existiert. Auf der anderen Seite sind die hier unter Beibehaltung der Bauweise und des Materials gezeigten Maßnahmen vergleichsweise einfach umsetzbar. Tiefgreifendere Maßnahmen an der Produktarchitektur haben hingegen einen deutlich höheren Aufwand und müssen deshalb mit sehr viel mehr Vorlauf geplant werden. Deshalb ist es für eine nachhaltige Produktentwicklung notwendig, zukünftige Entwicklung früh in der Produktentwicklung zu berücksichtigen.

Literatur

- [1] J. Kirchherr, D. Reike and M. Hekkert, "Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions," *SSRN Electronic Journal*, 2017.
- [2] Experte, Interviewee, *Projektinterne BEsprechung*. [Interview]. 7 November 2024.
- [3] Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), "VDA 231-106: Werkstoff-Klassifizierung im Kraftfahrzeugbau: Aufbau und Nomenklatur / Material classification in motor vehicle construction: Structure and nomenclature (Version 10/2021)," 2021.
- [4] International Organisation for Standardisation (IOS), "ISO 22628:2002-02: Straßenfahrzeuge - Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit - Berechnungsverfahren," 2002.
- [5] C. o. t. E. U. European Parliament, "Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge," *Amtsblatt Nr. L 269 vom 21/10/2000 S. 0034 - 0043*, 2000.
- [6] Volkswagen AG, "Aus alt macht neu - Batterierecycling in Salzgitter," 2021. [Online]. Available: <https://www.volkswagen-newsroom.com/de/stories/aus-alt-mach-neu-batterierecycling-in-salzgitter-6782>. [Accessed 07 03 2023].
- [7] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), "DIN EN ISO 14044:2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen," 2006.
- [8] Sphera Solutions GmbH (Hrsg.), *LCA for Experts: Ganzheitliche Bilanzierung*, Leinfelden-Echterdingen, 2024.
- [9] M.-p. Ho, H. Wang, J.-H. Lee, C.-k. Ho, K.-t. Lau, J. Leng and D. Hui, "Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, p. 3549–3562, December 2012.
- [10] C. Hopmann, Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 8., aktualisierte Auflage ed., W. Michaeli, Ed., München: Hanser, 2017.
- [11] G. Abts, Kunststoff-Wissen für Einsteiger, 3., aktualisierte und erweiterte Auflage ed., [s.l.]: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2016.
- [12] W. Michaeli, Ed., Technologie des Spritzgießens, 3. Aufl. ed., München: Hanser, 2009.
- [13] M. Neitzel, P. Mitschang and U. P. Breuer, Eds., Handbuch Verbundwerkstoffe, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage ed., München: Hanser, 2014.
- [14] H. Ku, H. Wang, N. Pattarachaiyakoop and M. Trada, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, p. 856–873, June 2011.

- [15] M. Ramesh, K. Palanikumar and K. H. Reddy, "Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, p. 558–584, November 2017.
- [16] M. Carus and A. Partanen, *Bioverbundwerkstoffe Zum Ende der Bildergalerie springen Zum Anfang der Bildergalerie springen Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Polymerwerkstoffe (WPC)*, 2019.
- [17] R. A. Ilyas, S. Sapuan, M. N. Norizan, A. Mahamud, M. H. Mohd Roslim, A. M. Radzi, M. Ishak, E. S. Zainudin, I. Izwan, N. Murat, R. Jumaidin, A. Z. Mohamed, R. M. O. Syafiq, N. Asmawi and A. Atiqah, "POTENTIAL OF NATURAL FIBRE COMPOSITES FOR TRANSPORT INDUSTRY: A REVIEW," in *Seminar Enau Kebangsaan*, 2019.
- [18] BMW, "New Lightweight Construction," 2022.
- [19] Bcomp Ltd., "ampliTex - Reinforcement fabrics for high performance." <https://www.bcomp.com/products/amplitex/>.
- [20] FUSE, "FUSE TAPES".
- [21] Sicomin Epoxy Systems, "SR Greenpoxy 56".
- [22] Resin Research, "BIO SCIENCE EPOXY SYSTEMS".
- [23] leuna-harze, "Biobasierte Epoxidharze und Reaktivverdünner".
- [24] ENTROPY RESINS, "Compression Molding Epoxy".
- [25] Ben Impey, "statista," 22 02 2024. [Online]. Available: <https://de.statista.com/themen/8348/ladeinfrastruktur-fuer-elektroautos/>.
- [26] M. Dalheimer, "Ladefragen.de," 11 12 2021. [Online]. Available: <https://ladefragen.de/44/>. [Accessed 10 11 2023].
- [27] GASAG, "GasAG," 20 08 2024. [Online]. Available: <https://www.gasag.de/magazin/energiesparen/stromverbrauch-pro-tag/#:~:text=Ein%20Zwei-Personen-Haushalt%20verbraucht%20pro%20Tag%208%2C2,zahlen%20dafur%203%2C96%20Euro..>
- [28] G. Erixon, "Modular Function Development (MFD), Support for Good Product Structure Creation," in *Proceedings of the 2nd WDK Workshop on Product Structuring*, M. Tichem, T. Storm, M. M. Andreassen and K. J. MacCallum, Eds., Delft, 1996.
- [29] A. Ericsson and G. Erixon, *Controlling design variants*, New, York: ASME Press, 1999.

Anhang

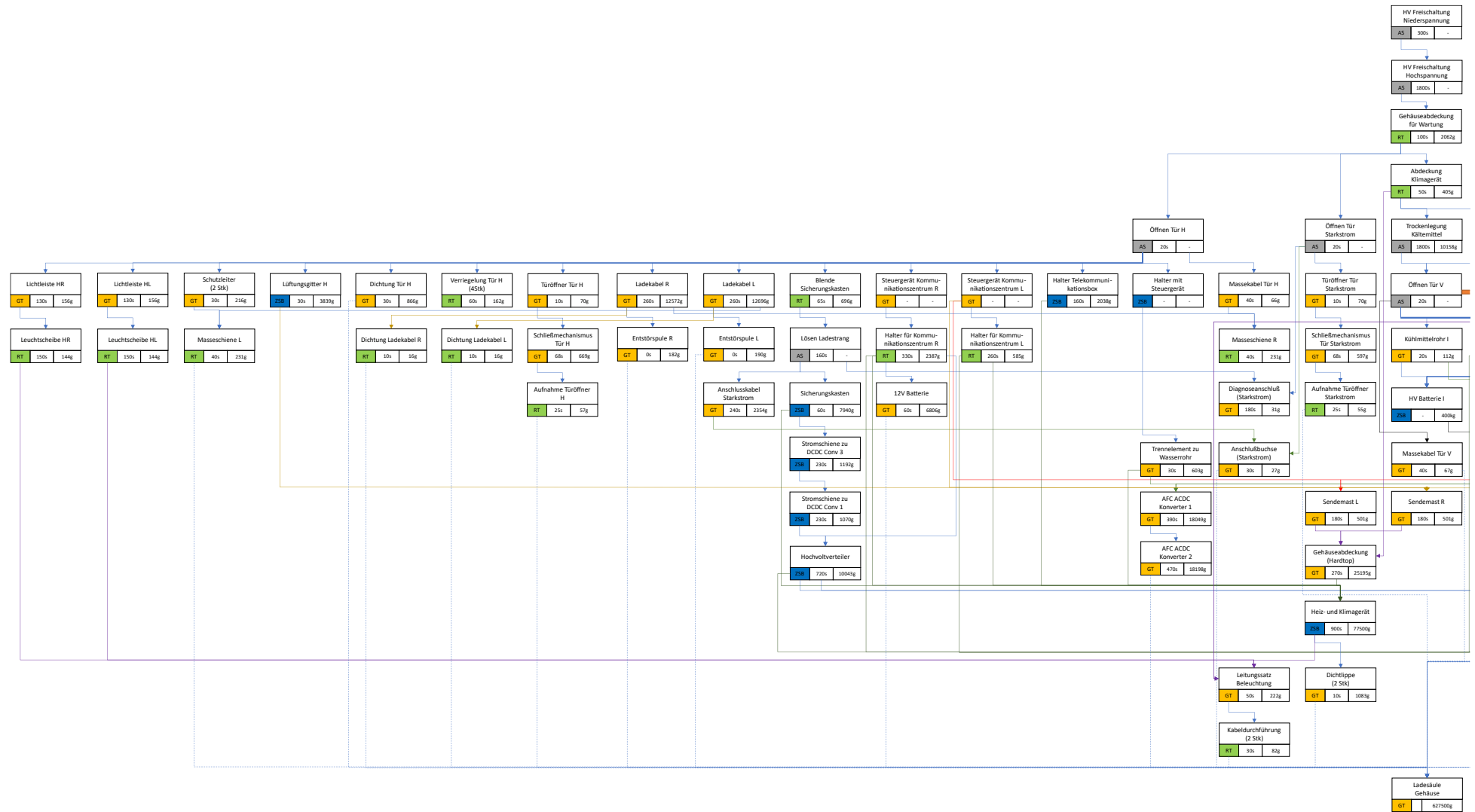


Abbildung D.1: Demontagefließbild der Ladesäule (Teil 1)

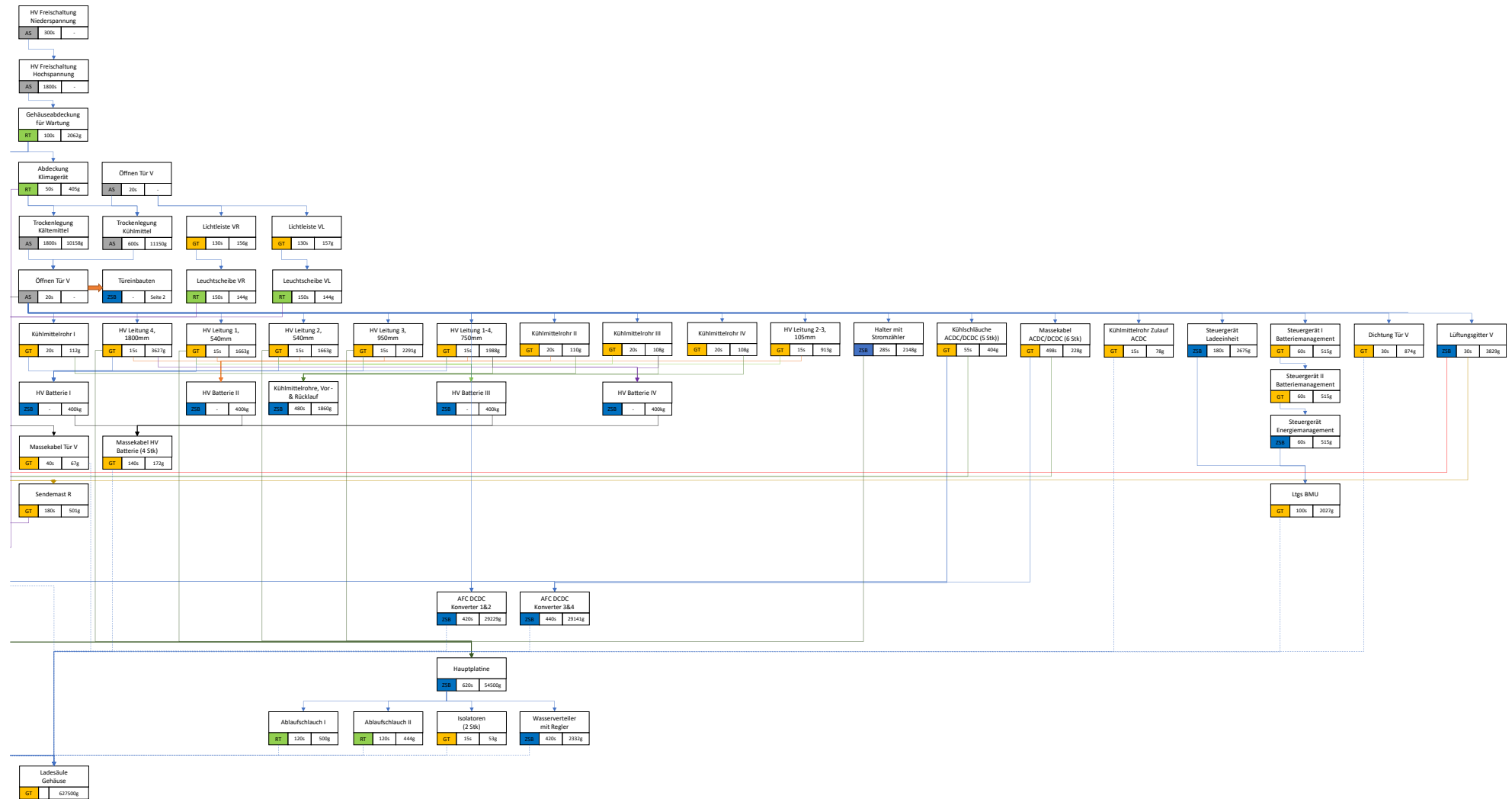


Abbildung D.2: Demontagefließbild der Ladesäule (Teil 2)

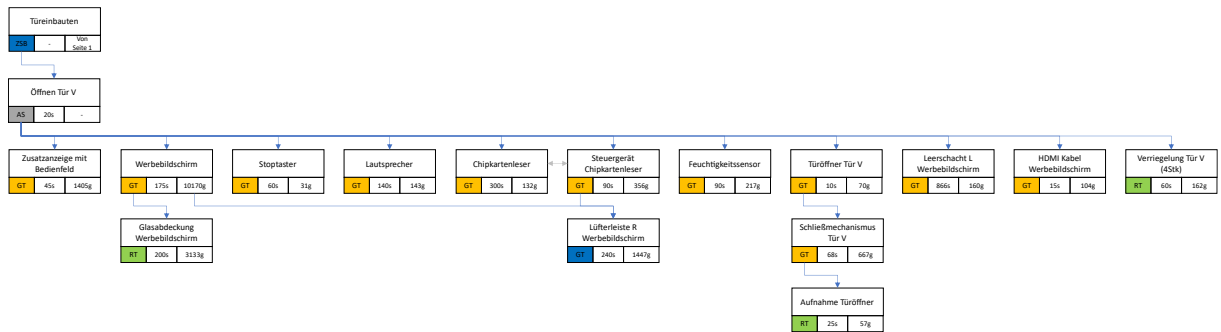


Abbildung D.3: Demontagefließbild der Ladesäule (Teil 3)

Tabelle D.1: Betrachtete Wirkungskategorien

Wirkungskategorie	Bezugseinheit
Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre)	kg CO ₂ -Äq.
Ozonabbaupotenzial (ODP, katalytisches)	kg R11-Äq.
Versauerungspotenzial (AP)	kg SO ₂ -Äq.
Eutrophierungspotenzial (EP)	kg Phosphat-Äq.
Photochem. Oxidantienbildungsprozess (POCP)	kg Ethen-Äq.
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADPE)	kg Sb-Äq.
Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADPF)	MJ
Primärenergiebedarf aus nicht reg. Ressourcen (unterer Heizwert) (PENRT)	MJ
Primärenergiebedarf aus reg. Ressourcen (unterer Heizwert) (PERT)	MJ
Wasserverbrauch	kg
Luftverschmutzung	m ³
Wasserverschmutzung	m ³
Gefährlicher Abfall zur Deponie	kg
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall	kg
Entsorgter radioaktiver Abfall	kg

Tabelle D.2: Hintergrunddaten Transport

Prozess	Referenzjahr	Land	Datenherkunft / Annahmen / Bemerkungen
Diesel mix at filling station (100 % fossil)	2020	RER	Sphera
Heavy fuel oil at refinery (1.0 wt.% S)	2020	RER	Sphera
Truck-trailer, Euro 5, 34 - 40t gross weight / 27 t payload capacity	2023	GLO	Sphera / Auslastung 61 %
Container ship, 5,000 to 200,000 dwt payload capacity, ocean going	2023	GLO	Sphera / Auslastung 70 %

Tabelle D.3: Hintergrunddaten Zerkleinerungsprozess

Prozess	Referenzjahr	Land	Datenherkunft / Annahmen / Bemerkungen
Zerkleinerung			
Car shredder	2023	DE	Sphera

Tabelle D.4: Bewertungsmatrix von Dämmstoffen

Typ	Dämmstoff	Brandschutz	Wärmedämmwirkung	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Demontierbarkeit	Recyclingfähigkeit	Kreislaufbarkeit	Bemerkungen
Mineralisch	Calciumsilikat	sehr gut	mittel	0,05 - 0,065	gut	schlecht	schlecht	Bauschutt, Betonstraßenbau, Sortenrein als Schüttung verwendbar
	Glaswolle (Matte)	sehr gut	gut	0,035 - 0,048	schlecht	schlecht	schlecht	Die krebserzeugenden Fasern sind seit dem 1. Juni 2000 verboten.
	Mineralschaum	sehr gut	gut	0,040 - 0,047	gut	mittel	mittel	Eine Wiederverwertung als Dämmstoff ist bislang nur für unverschmutzte Produktionsreste möglich, eine Verwertung zu Recyclingbaustoffen ist jedoch denkbar.
	Perfit	sehr gut	mittel	0,040 - 0,070	mittel	mittel	mittel	Begrenzte Ressource : Perfit ist eine nicht erneuerbare Ressource. Obwohl die weltweiten Reserven riesig sind, wird diese endliche Ressource durch den fortgesetzten Bergbau erschöpft.
	Schaumglas	sehr gut	mittel	0,036 - 0,060	gut	mittel	mittel	Er kann dann als Füllmaterial im Landschaftsbau oder als wärmedämmendes Granulat im Strassenbau wiederverwendet werden.
	Steinwolle (Matte, weich)	sehr gut	gut	0,030 - 0,045	gut	gut	gut	Reste und alte Steinwolle werden zu Steinen recycelt, die dann wiederum zu Steinwolle eingeschmolzen werden.
Synthetisch	Extrudiertes Polystyrol (XPS)	schlecht	sehr gut	0,020 - 0,040	gut	mittel	schlecht	Da vor allem Dämmmaterialien für den Bau bestimmte Brandschutzvorgaben erfüllen müssen, sind sie mitunter mit Flammschutzmitteln versetzt. Daher gilt: Styropor, das bei der Renovierung anfällt, also als Isoliermaterial verwendet worden ist, gehört in den Restmüll.
	Expandiertes Polystyrol (EPS, Styropor)	schlecht	sehr gut	0,020 - 0,040	gut	mittel	schlecht	Da vor allem Dämmmaterialien für den Bau bestimmte Brandschutzvorgaben erfüllen müssen, sind sie mitunter mit Flammschutzmitteln versetzt. Daher gilt: Styropor, das bei der Renovierung anfällt, also als Isoliermaterial verwendet worden ist, gehört in den Restmüll.
	Polyurethan (PUR)	mittel	sehr gut	0,023 - 0,029	gut	gut	gut	Es gibt insgesamt drei Verfahren für Polyurethan Recycling, um alten Polyurethanschaum zu nutzen und gegebenenfalls wiederverwenden zu können: thermische, mechanische und chemische Recycling-Verfahren, geringer Wirkungsgrad
	Polyisocyanurat-Hartschaum (PIR)	mittel	sehr gut	0,023 - 0,029	gut	gut	gut	Ist eine PIR-Dämmung recycelbar? Polyisocyanurat-Hartschaum (PIR) lässt sich zu hochwertigen Funktionswerkstoffen recyceln, wie beispielsweise zu Attikaelementen, Lichtkuppelbohlen oder Dämmzangen für Fenster.
Organisch	Holzfasern	mittel	gut	0,038 - 0,040	gut	sehr gut	mittel	Mineralfaser hat eine bessere Brandschutzklasse als Holzfaserdämmstoffe, aber das Brandverhalten von Holzfaserdämmstoffen ist gut und kontrollierbar (so gibt es wenig Rauch und auch kein gefährliches Tropfen wie bei Polystyrol-Dämmstoffen). Ein klarer Vorteil von Holzfaserdämmplatten ist der Hitzeschutz im Sommer.
	Schafwolle	mittel	sehr gut	0,036	gut	sehr gut	sehr gut	Dämmwolle, die im Bauwesen häufig verwendet wird, ist eines der am besten recycelbaren Materialien
	Hanf	mittel	sehr gut	0,043 - 0,045	gut	gut	gut	Hanf kann entweder wiederverwendet oder in Abfallverbrennungsanlagen thermisch verwertet werden.
	Flachs	mittel	sehr gut	0,039	gut	gut	schlecht	Als Entsorgungsweg bietet sich die thermische Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen an, ein Logistikaufbau für das Flachrecycling ist aufgrund der mittelfristig anfallenden Kleinmengen nicht rentabel, von der Kompostierung muss aufgrund der Zusätze abgesehen werden
	Kork	gut	mittel	0,04	gut	gut	gut	Shreddern und Verarbeitung zu Dämmmaterialien möglich. Problem bei wiederholtem Shreddern könnte in der Partikelgröße sein
	Schiff	mittel	mittel	0,065	gut	gut	mittel	gut geeignet zur energetischen Verwertung
	Seegras	mittel	gut	0,045	gut	sehr gut	sehr gut	relativ verrottungsbeständig. Sollte das Material einmal ausgebaut werden, so kann es trocken gelagert und ohne Probleme oder Einschränkungen für ein weiteres Bauvorhaben wiederverwendet werden.
	Zellulose	mittel	sehr gut	0,039 - 0,042	mittel	sehr gut	sehr gut	geeignet für Papierkreislauf, Flammschwermetalle und Pilzschimmelpilze können Probleme bereiten
	Holzwole	gut	sehr gut	0,09	gut	sehr gut	sehr gut	geeignet für Papierkreislauf, Flammschwermetalle und Pilzschimmelpilze können Probleme bereiten
	Jute	mittel	sehr gut	0,037 - 0,040	gut	gut	gut	Dämmstoff aus Recycling-Jute-Säcken in Baubranche zur Dachsanierung geeignet
Siroh	mittel	gut	0,043 - 0,052	gut	mittel	schlecht	unbehandeltes Stroh kann als Dünger eingesetzt werden, weiterhin in der thermischen Energiegewinnung. Ansonsten Entsorgung über Restmüll	

Tabelle D.5: Liste Potentiell wiederverwendbarer Bauteile

Potentiell wiederverwendbarer Bauteile
HV Batterien (4 Stk): jeweils 4 x ISK 5 Schrauben und 2 x SKM 13
Massekabel für AFC ACDC (6 Stk): Jeweils 1x ISK 3 und 1 x ISK 4
Schließmechanismus Tür V, H: jeweils 2 x Kreuzschlitz und 4 x SKM 8
Steuergerät Energiemanagement: 5 x ISK 2.5 und 2 ISK 4
Halter Steuergerät KOMZ L: 5 x ISK 2.5 und 1 x ISK 4
Stromschiene zu DCDC Converter3: 1 x ISK 3, 1 x ISK 4 und 4 x ISK 5
Hauptplatine: 2 x ISK 2, 7 x ISK 2.5 und 8 x ISK 3
12V Batterie: 4 x ISK 3 und 2 x SKM 8
Wasserverteiler m. Regler: 2 x ISK 3, 2 x ISK 4 und 4 x SKM 32
Leuchtscheibe (4 Stk): jeweils 2 x ISK 2.5 und 2 x SKM 6
Stromschiene zu DCDC Conv1: 1 x ISK 3, 1 x ISK 4 und 4 x ISK 5
HV Verteiler: 6 x ISK 2.5, 2 x ISK 4 und 12 x ISK 5
AFC DCDC 1+2: 9 x ISK 3 und 2 x ISK 5
AFC DCDC 3+4: 9 x ISK 3 und 2 x ISK 5
AFC ACDC Converter 1: 9 x ISK 3 und 1 x ISK 6
Ladekabel L: 2 x ISK 4, 4 x ISK 5 und 2 x TX 10
Ladekabel L: 2 x ISK 4 und 2 x TX 10
Starkstromanschluss: 4 x ISK 3 und 1 x ISK 4
Schließmechanismus Starkstromanschluss: 2 x Kreuzschlitz und 4 x SKM 8

5 Autarke Mobile Ladeinfrastruktur

Nicole Allgaier ✉, Stefan Skutnik

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202507110652-0>

Die beiden innerhalb des Projekts untersuchten Anwendungsbeispiele sind nicht nur für sich allein innovative Produkte. Das Konzept einer autarken mobilen Ladeinfrastruktur (AML) als Kombination von Flugwindkraftanlage und flexibler Ladesäule besitzen das Potenzial zu einem wichtigen Baustein in der flächendeckenden Nutzung elektrischer Mobilität zu werden. Dies zeigt sich insbesondere in der deutlich ressourcenschonenderen Produktion erneuerbarer Energien im Vergleich zu konventionellen Windkraftanlagen (vgl. Abschnitt 5.1). Um das Potenzial einer AML zu spezifizieren, werden in diesem Arbeitsschwerpunkt unterschiedliche Szenarien für den Einsatz einer autarken mobilen Ladeinfrastruktur erarbeitet (vgl. Abschnitt 5.2) und deren Umsetzbarkeit untersucht (vgl. Abschnitt 5.3).



5.1 Flugwindkraft aus Umweltperspektive

Für die LCA-Analyse mussten seitens EnerKite Massen erfasst werden. Für den Flügel mussten seitens EnerKite maßgeblich die Winglets und die Steuerklappen vermessen werden. Die restlichen Flügelkomponenten wurden durch INVENT erfasst.

Die Arbeiten bezüglich der Bodenstation waren stark durch den aktuellen Stand der Technik seitens EnerKite beeinflusst. Ziel des Arbeitspaketes war die LCA des 100kW-Serienproduktes, „EK100-10“ welches noch nicht vorhanden war. Der EK100/30-Prototyp befand sich in Teilen in Montage und in Teilen in Spezifikation und Konstruktion. Durch Lieferschwierigkeiten der Lieferanten kam es teilweise zu Verzögerungen. Nach Rücksprache mit den beteiligten Projektpartnern wurden für die Gewichtsermittlung anstelle einer tatsächlichen Erfassung fundierte Annahmen unter Beteiligung von Maschinenbau-, Elektrotechnik- und Luft- und Raumfahrtingenieur:innen, um die Sinnhaftigkeit der Annahmen zu gewährleisten.

In einem ersten Schritt wurden alle Komponenten und die grundlegenden technischen Daten des späteren Produktes erfasst. Die Auslegung des Produkts im Detail war noch nicht abgeschlossen,

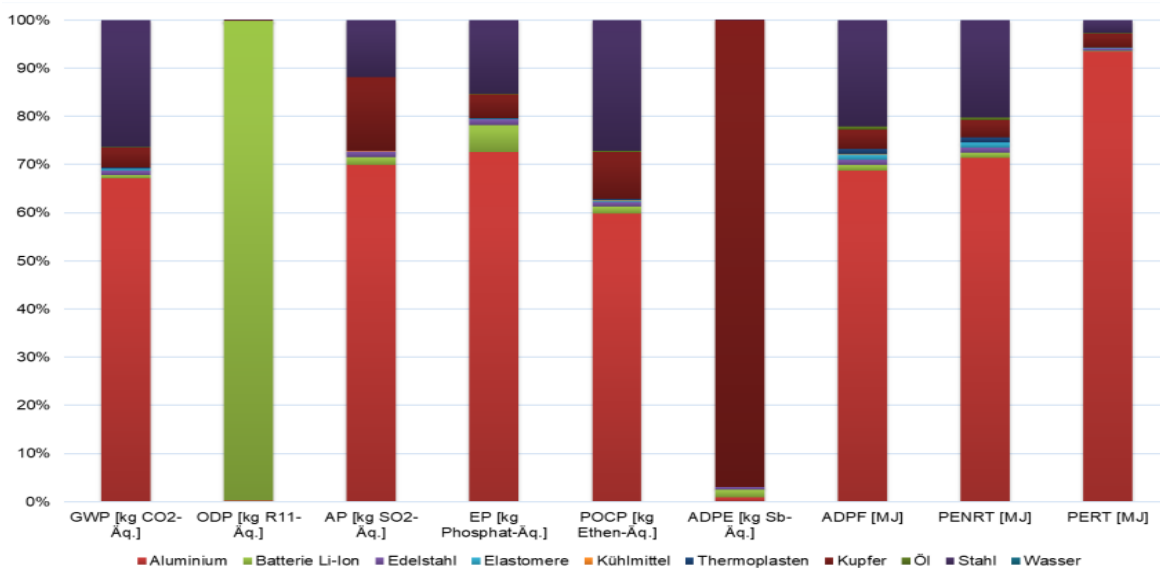
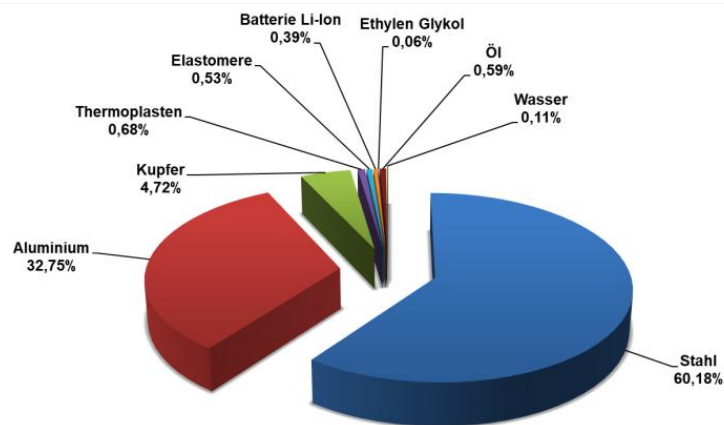


Abbildung 5.1: Materialverteilung und Dominanzanalyse Bodenstation

weshalb bestehende Dokumente mit verschiedenen Auslegungen im Hinblick auf die LCA gesichtet wurden. Es wurde eine passende Auslegung bzw. ein Anlagendesign gewählt.

Im Anschluss wurden die Massen der bestehenden EK30-Anlage geschätzt, im Falle einfach zu demontierender Bauteile gewogen oder den Datenblättern der einzelnen Komponenten entnommen. Weiterhin wurden die Materialien jeder Komponente erfasst und deren Massenanteile angenommen. Es wurden die für die späteren Produktkomponenten zu erwartenden Lebensdauern angenommen. Anschließend wurden drei Skalierungsfaktoren ermittelt, mit welchen die Massen der 30 kW-Anlage auf das 100 kW-Serienprodukt skaliert werden konnten. Schließlich wurden die Massen je Material und Komponente mittels der gegebenen Massen und Massenanteile ermittelt. Mit fortschreitender Konstruktion und Lieferung einzelner Komponenten des 100 kW-Prototyps wurden die entsprechenden Werte aktualisiert. Für die Erstellung eines Grundgerüsts der LCA wurden alle Daten zur Berechnung übermittelt. Die Berechnung durch FIT sowie eine Auswertung der Ergebnisse, auch im Hinblick auf die Ermittlung umweltschädlicher Komponenten ist erfolgt.

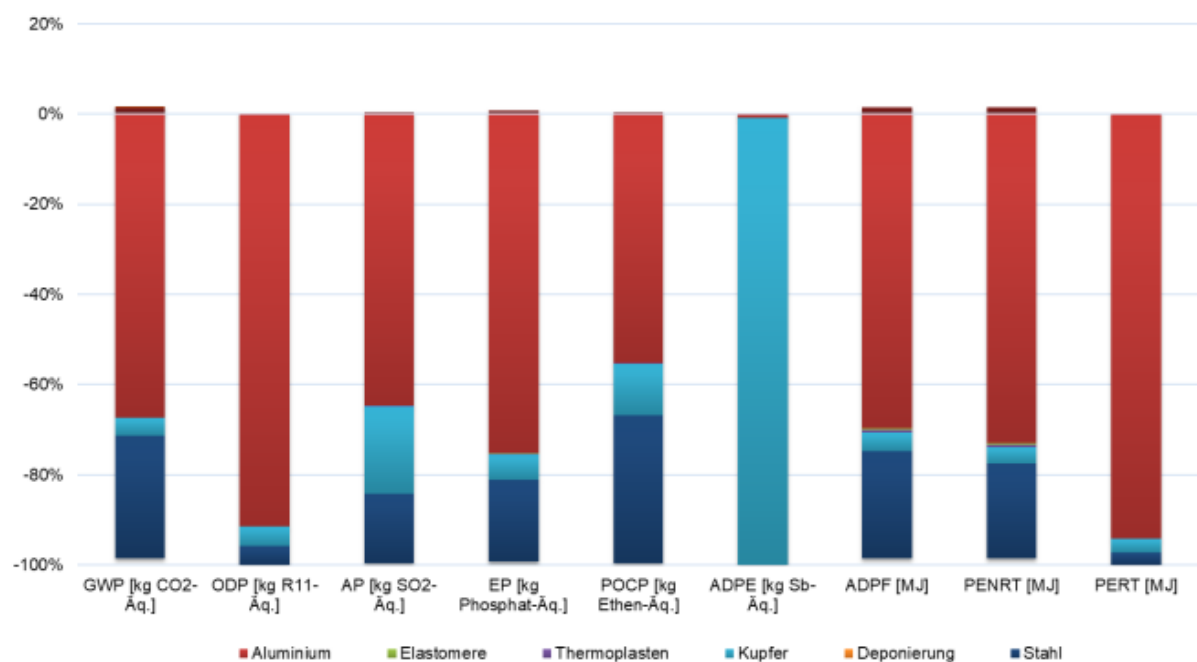


Abbildung 5.2: Dominanzanalyse End of Life

Die Umweltkennzahlen in der Materialbereitstellung sollten durch eine Substitution von Werkstoffen, Verringerung von Gewicht und weitere Maßnahmen verbessert werden. Ein Beispiel wäre der Ersatz von Stahl und Aluminium. Hierbei muss aber die Bedeutung des Gewichts für die Anlage sowie der Preis im Blick behalten werden. Ferner sollte die stoffliche Verwertungsquote im End of Life durch Wiederverwendung von Komponenten erhöht werden. Für die LCA sollte eine Ergänzung der Lebenszyklusphasen, wie Produktion, Betrieb etc. ergänzt werden. Ferner müssen in einer derartigen Analyse auch die regionalen Einflüsse betrachtet werden.

Im nächsten Schritt wurde eine LCA für das Szenario von 20 Jahren Laufzeit der Flugwindkraftanlage simuliert. Die Ergebnisse sind Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 zu entnehmen.

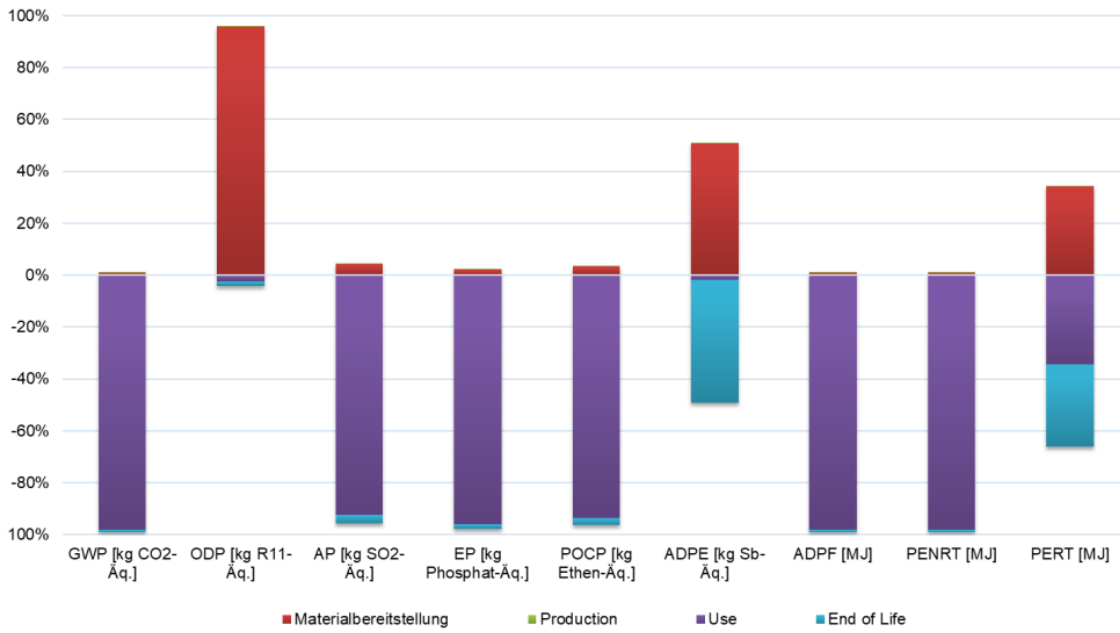


Abbildung 5.3: Ergebnisse Life Cycle Assessment – Äquivalente und Energien

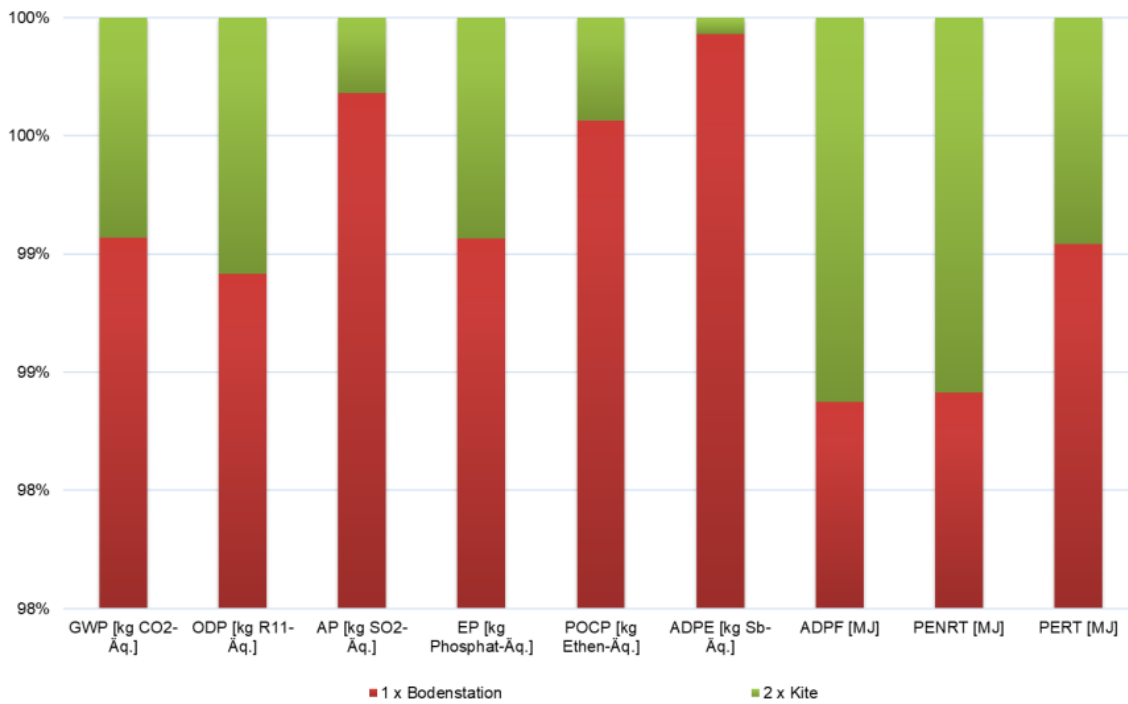


Abbildung 5.4: Dominanzanalyse Materialbereitstellung

Zentrales Ergebnis der langjährigen Betrachtung ist, dass die Herstellungsphase die Hauptquelle der Umweltwirkungen darstellt – insbesondere aufgrund der Bodenstation mit Komponenten wie Batterie, Mast, Strukturteilen, Transformator und Verkabelung des „Balance of Plant“ (BOP). Die interne Batterie weist dabei den höchsten Umwelteinfluss auf. Daher wird empfohlen, alternative Batterietypen mit geringerer Umweltbelastung hinsichtlich Energiedichte, Lebensdauer und Kosten zu evaluieren. Zusätzliche Potenziale zur Verbesserung liegen im Verzicht auf bestimmte Komponenten, wie den Haupttransformator sowie im Ersatz von Aluminium durch Stahl bei tragenden Elementen. Mehrere kleinere Optimierungen über verschiedene Bereiche hinweg könnten in ihrer Gesamtheit einen signifikanten Umweltnutzen bewirken, wobei technologische und wirtschaftliche Machbarkeit stets mitgedacht werden muss. Ein Vergleich mit konventionellen Stromerzeugungstechnologien (u. a. Braunkohle, Windkraft onshore, Kernenergie, Steinkohle, Erdgas und Biogas) zeigt, dass das EK100-10 über nahezu alle Umweltkategorien hinweg günstiger abschneidet als fossile Alternativen und als wettbewerbsfähige Ergänzung im Portfolio erneuerbarer Energien zu sehen ist. Zwar sind solche Vergleiche aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen nur bedingt belastbar, sie unterstreichen aber das ökologische Potenzial des Systems.

Szenarien- und Sensitivitätsanalysen belegen eine mögliche Schwankung der Umweltwirkungen von etwa $\pm 30\%$ gegenüber dem Basisszenario. Ausschlaggebend sind hier insbesondere der jährliche Energieertrag sowie die Lebensdauer zentraler Komponenten, wie Seil und Flügel, die bislang auf Schätzungen beruhen und künftig anhand von Langzeitdaten aus Pilotprojekten präzisiert werden sollten. Neben dem technischen Design beeinflussen auch logistische Faktoren wie Transport, Standortwahl und Lieferketten die Umweltbilanz. Durch strategische Planung und lokale Partnerschaften könnten sowohl ökologische als auch soziale Nachhaltigkeit gefördert werden. Für die Zukunft wird eine kontinuierliche Datenerfassung zu Material- und Energieeinsatz sowie eine realitätsnahe Validierung der bisherigen Annahmen empfohlen. Sobald Lieferketten etabliert sind, sollten regionale anstelle globaler Datensätze verwendet werden. Darüber hinaus bietet die modulare Bauweise des Systems Chancen für Wiederverwendung, Recycling und den vermehrten Einsatz von Sekundärmaterialien – insbesondere bei Metallen – was das Umweltprofil weiter verbessern kann.

5.2 Anforderungs- und Szenarientwicklung

Im Fokus des Arbeitspaketes stand die Machbarkeit und das Potenzial der autarken mobilen Ladesäule. Ziel des Arbeitspaketes war im ersten Schritt, Use Cases anhand von Anforderungen (vgl. Abbildung 5.5) für das kombinierte System zu erfassen. Durch die Definition allgemeiner Anforderungen wurde deutlich, wo und unter welchen Bedingungen das kombinierte System grundsätzlich sinnvoll ist.

Maßgeblich wurden Anforderungen an den Standort und an die Region definiert. Der Standort darf nicht in einem Naturschutzgebiet liegen und muss mindestens 100 m von Wohnbebauung entfernt sein. Zwischen den Flexpole's und den EnerKite-Anlagen muss 100 m Abstand bestehen. Für das EnerKite-Serienprodukt gilt weiterhin ein Abstand von 100 m zu Wohnbebauung, Oberleitungen sowie öffentlichen Straßen, Wäldern und Seen. Bei ersten Pilotanlagen sollten jedoch keine Wohnbebauung oder öffentliche Straßen überflogen werden. Die Sicherheitsabstände galten wie in Abbildung 5.6 gezeigt.

Um das Betrachtungsfenster einzugrenzen, sollten Regionen betrachtet werden, in welchen Elli-Ladesäulen in größerer Stückzahl vertrieben werden. Neben Deutschland gehören unter anderem Spanien, Norwegen, Österreich und England hierzu. Weitere einschränkende Anforderungen ergaben sich lediglich aus den länderspezifischen Bedingungen.

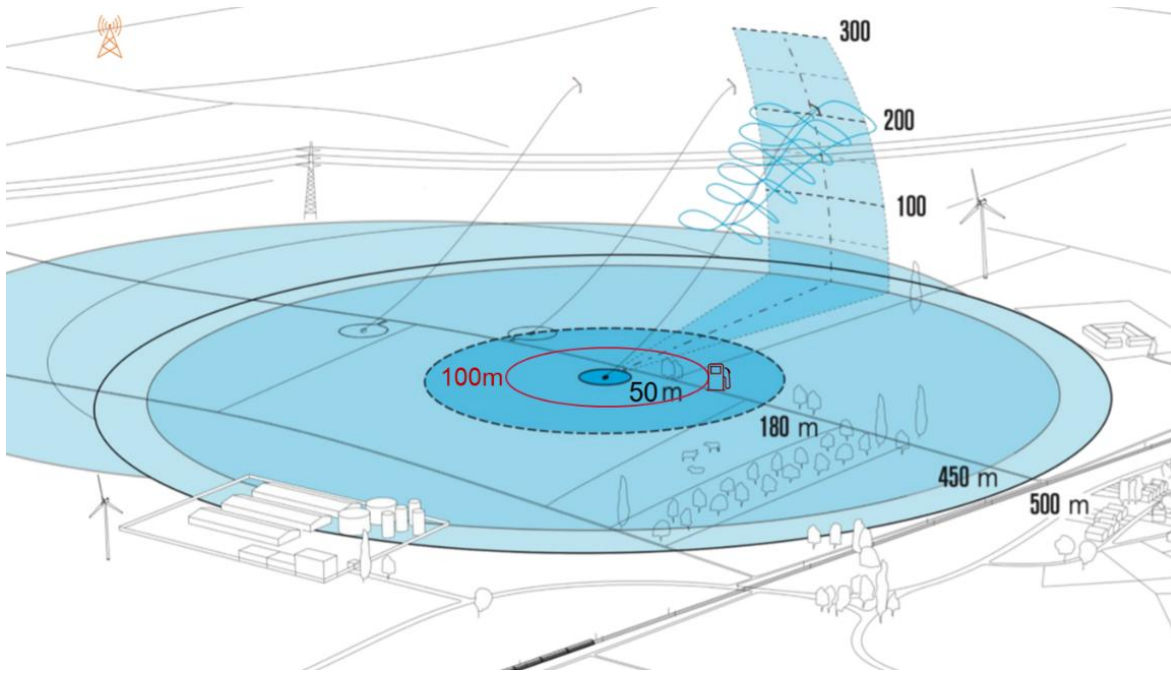


Abbildung 5.6: Sicherheitsabstände der Flugwindkraftanlage

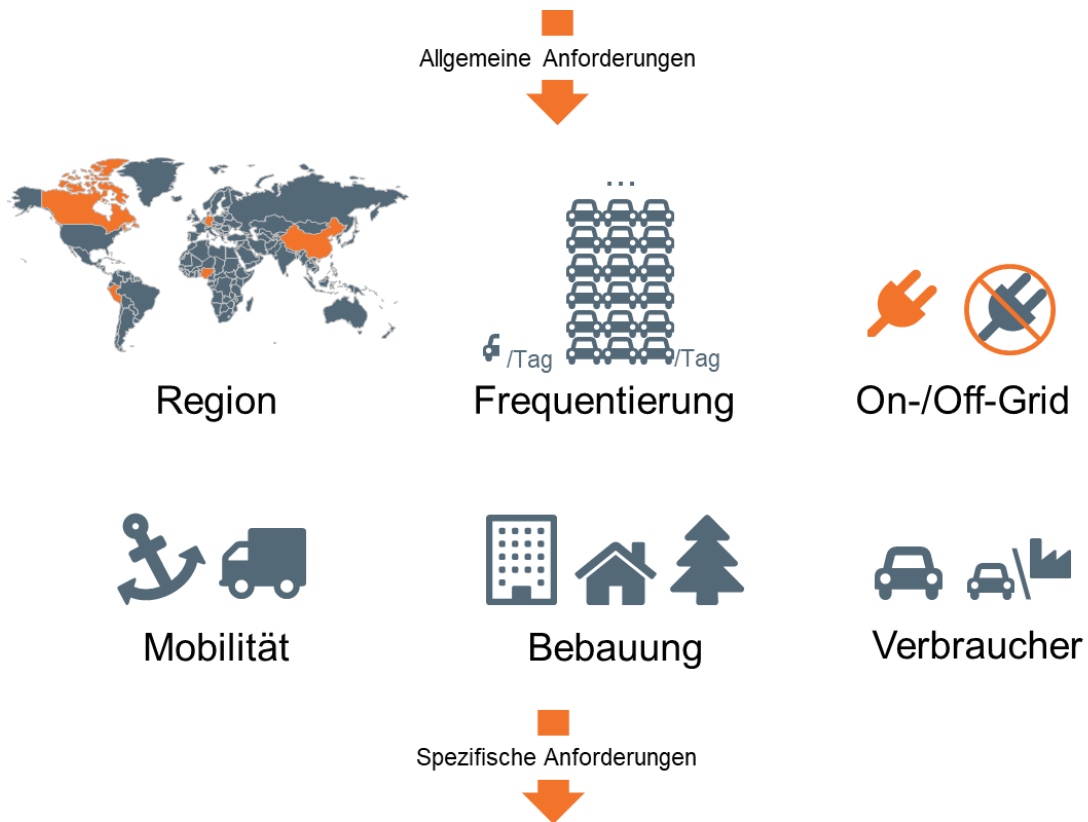


Abbildung 5.5: Anforderungserfassung für die Szenarientwicklung

Neben den Einschränkungen wurden Kriterien zur einheitlichen Beschreibung der Use Cases erfasst. Dazu gehörte eine Unterscheidung zwischen On- und Off-Grid Anwendungen, ein Beispielstandort je Case sowie dessen Eigenschaften (Windgeschwindigkeit, Bevölkerungsdichte, Nähe zu Autobahnen und Wohngebäuden, usw.) und eine detaillierte Beschreibung der Nutzung. Um hier ein besseres Verständnis zu bekommen, wurde eine Vielzahl an Ladesäulen ausgewertet. Soweit möglich wurde die Frequenz von Ladevorgängen anhand von Annahmen ermittelt. Hierfür wurden unter anderem vielbefahrene Autobahnstrecken und deren Ladepunkte ausgewertet. Die verschiedenen Anschlussmöglichkeiten (Connector) wurden erfasst und die Preise durch Auswertung der Ladesäulen Anbieter ausgewertet. Die Preise variieren meist auch im Inland.

Anhand der Frequenz konnte für jeden Use Case ein beispielhafter Lastgang mit Be- und Entladevorgängen erstellt werden. Erstellt wurde dieser je Wochentag mit anschließender Hochskalierung auf ein Jahr. In die Berechnung gingen sämtliche batterie- & ladesäulenspezifischen Parameter (Kapazität, Ladeleistung usw.) ein.

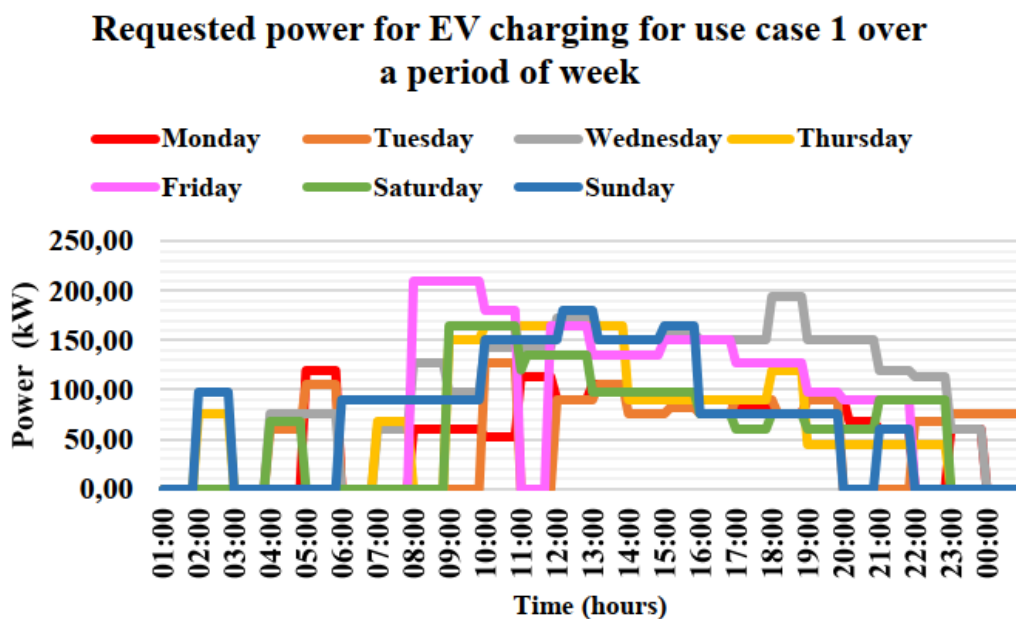


Abbildung 5.7: Beispiel Ladebedarfe

Für den sich ergeben Bedarf wurde dann festgelegt, wie viele EnerKite's und Flexpole's notwendig sind. Die Bedarfsdeckung der Ladesäule wurde für jeden Use Case anhand individueller Parameter und einer von der Windgeschwindigkeit abhängigen Ertragsrechnung, basierend auf der Leistungskurve des EnerKite-Systems identifiziert. Bei On-Grid Anwendungen wurde überschüssiger Strom exemplarisch ins Netz gespeist bzw. bei Unterdeckung aus dem Netz genommen. Bei Off-Grid-Anwendungen wurde die Batterie ausgelegt.

Auf dieser Basis wurden die Investitions- und Betriebskosten ermittelt. Dazu wurde das Wirtschaftlichkeitsmodell von EnerKite um die Use Cases und um die Ladesäule erweitert. Es entstanden insgesamt fünf Use Case Beschreibungen und Referenzwerte, welche Ertrag und Wirtschaftlichkeit beschreiben. Nutzer von Use Case (UC) 1 bis 5 sind PKW-Fahrer aus dem Privatbereich:

- UC1: Grid - urban area - private sector – high frequency
- UC2: Grid - urban area - private sector – medium frequency
- UC3: Grid- rural area - private sector – low frequency
- UC4: Off Grid - rural area - private sector – lowest frequency
- UC5: Off Grid - rural area - private sector – Electric fleet owner

Die resultierenden Referenzzahlen wurden für die Potenzial- und Machbarkeitsstudie genutzt. Mit Stromgestehungskosten von 15-20 ct/kWh sind alle Use Cases wirtschaftlich und stehen in gutem Kontrast zu den aktuellen Ladepreisen von ca. 60 ct/kWh.

Um das Nutzungsszenario Off-Grid besser zu verstehen, wurde das Rainer Lemoine Institut beauftragt, eine Studie mit dem Titel «Machbarkeitsstudie autarke mobile Ladeinfrastruktur (AML)», welche durch Flugwindenergie (FWE) gespeist werden soll, durchzuführen. Hierbei unterstützte EnerKite bei der Anforderungserfassung, Standortwahl, systemspezifischen Informationen und Charakteristika, Windanalyse und Ertragsrechnungen. Die Potenzialstudie wurde für eine Insel erstellt. Die Methodiken, Parameter und Prozesse können im Nachgang an die Studie auf beliebige andere Länder und Regionen, auch im On-Grid-Bereich, übertragen werden. Mit minimalen Anpassungen kann dies auch für andere Anwendungsfälle erfolgen.

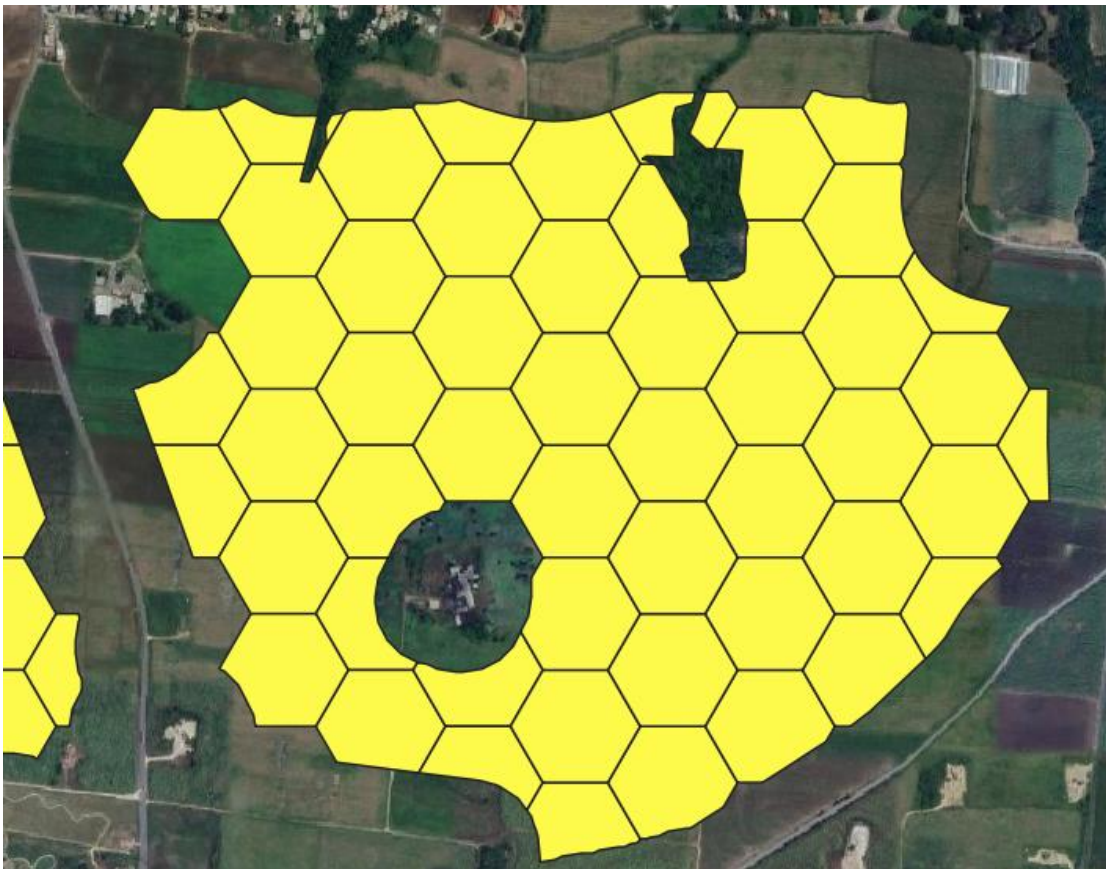


Abbildung 5.8: Auszug der Potentialstudie AML

Viele Small Island Developing States (SIDS) verfügen über unzureichende Stromnetze und sind auf teure, importierte fossile Brennstoffe angewiesen. Daher eignen sie sich besonders gut für die Betrachtung. Zunächst wurden die 39 SIDS anhand von Kriterien, wie Netzabdeckung, wirtschaftliche Rahmenbedingungen und Windressourcen analysiert, um eine Beispielregion mit hohem Potenzial für FWE-gestützte Ladeinfrastruktur auszuwählen.

Daraufhin wurde ein Inselstaat genauer untersucht. Die Insel verfügt über sehr gute Windbedingungen und hat hohe Ziele (NDC-Goals) im Bereich Ausbau von E-Mobilität, welche bereits begonnen wurden umzusetzen. Genauer betrachtet wurden Bevölkerungsstrukturen und wichtige potenzielle Ladepunkte. Die Abstands- und Ausschlusskriterien entsprachen den bereits ermittelten. Es wurde das Potenzial für drei verschiedene EnerKite-Anlagen mit unterschiedlicher Nennleistung untersucht. Die Studie ergab für alle drei sehr hohe Absatzzahlen, Off-shore und On-Shore.

5.3 Technische und planerische Auslegung

Für die technische Grobarchitektur wurde ein Einsatzszenario mit mindestens einer EK100-Anlage und mindestens 3 Flexpole's vorgesehen. Auch wurde ein etwaig vorhandener Netzanschluss (Verbundnetz oder Micro-/Inselnetz) berücksichtigt, da daraus spezifische Anforderungen an Kommunikationsschnittstellen und Anlageneigenschaften erwachsen.

Ausgehend von diesem Szenario wurden für verschiedene Systemzustände (Ladezustand der Speicher von EK und Flexpole, vorhandener Wind, Leistungsanforderung aus Netz, aktiven Ladevorgängen and den Flexpole's etc.) die Aufteilung der durch die EKs verfügbaren Leistung auf die Subsysteme erarbeitet. Die dazu von den Subsystemen benötigten Daten und mögliche Datenschnittstellen zur Kommunikation wurden ermittelt.

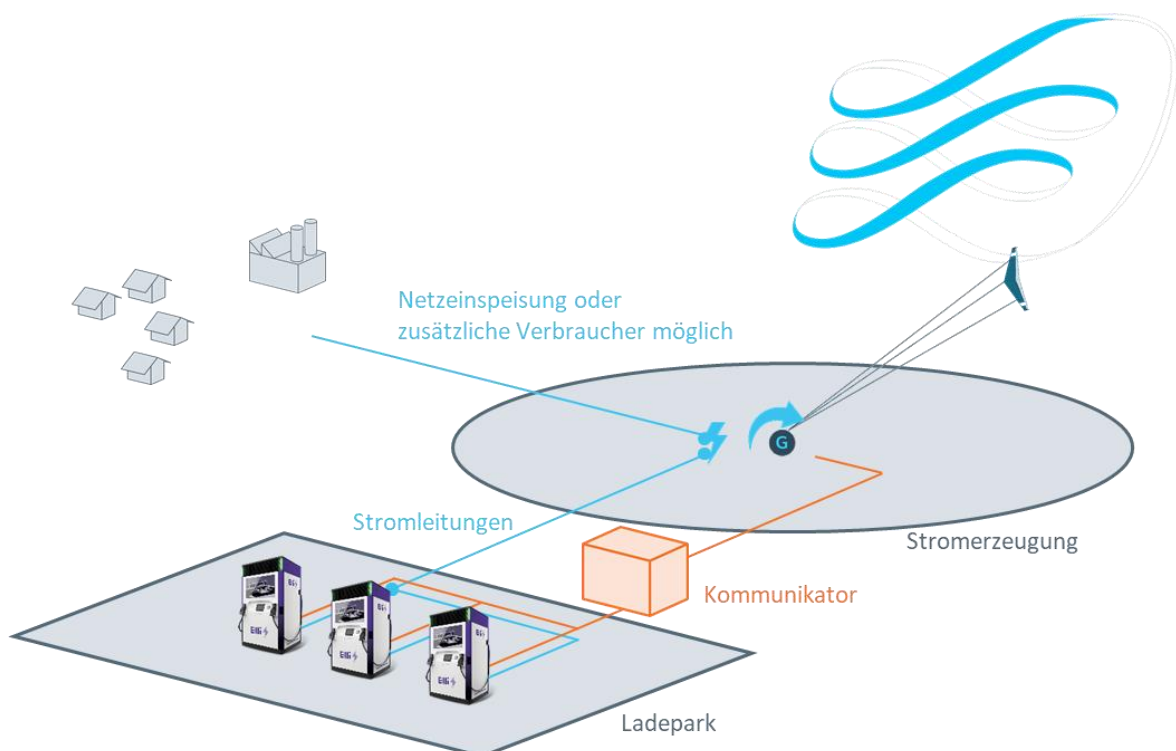


Abbildung 5.9: Auslegung kombiniertes System

Zur Steuerung der Subsysteme wurde ein Konzept eines Koordinators entwickelt. Die einzelnen Subsysteme übermitteln ihre Systemzustände an den Koordinator und dieser weist den einzelnen Verbrauchern (Flexpole's, Netz) verfügbare Leistungen zu. Auf Seite der Erzeuger (EK100) waren Ladezustand der internen Batterie und Mittelwerte der derzeitig generierten Leistungen, sowie eine Prognose der verfügbaren Leistung von besonderem Interesse. Die Flexpole's kommunizieren jeweils ihren Ladezustand und aktuelle Ladevorgänge von Fahrzeugen und - bei Verfügbarkeit der Fahrzeugdaten - eine Vorhersage über den zu erwartenden Energiebedarf. Unter Berücksichtigung der etwaigen Bedarfe oder Verfügbarkeit des Netzes ermittelt der Koordinator die interne Aufteilung des Leistungsflusses. Der Koordinator wurde im Projekt ausgearbeitet.

Fazit

Das Projekt konnte insgesamt sehr erfolgreich durchgeführt werden. Für EnerKite wurden zwei Schwerpunkte im Projekt adressiert, die beide hervorragend umgesetzt werden konnten. Zum einen wurden gemeinsam mit den Partnern Flügelkomponenten so entwickelt und ausgelegt, dass der Verschleiß minimiert und ein Austausch von Verschleißteilen vereinfacht wurde. Gleichzeitig wurde ein Sensorkonzept entwickelt, mit dem die Überwachung der Flügel möglich ist. Zum anderen wurden umfassende Untersuchungen zur Ökobilanz und zur Umsetzung eines Pilotbetriebes durchgeführt, die wichtige neue Erkenntnisse brachten. Es ist nun bekannt, wo ein Pilotbetrieb sinnvoll ist und welche Voraussetzungen gegeben sein müssen. Damit konnten alle genannten Ziele aus dem Antrag erreicht werden:

1. Entwicklung von modularen Flügelementen mit funktional integrierten Sensoren, die kostengünstig in großem Maßstab hergestellt werden können.
2. Validierung dieser Flügelemente durch Labor- und Feldversuche mit Konzeptprototypen.
3. Entwicklung eines modularen Konzepts für den Austausch von Teilen mit hohem Verschleiß an der Flügelvorderkante. Untersuchung der Nutzung der Verbindung für mehrere Funktionsaspekte, wie z. B. die Enteisung. Untersuchung geeigneter Konzepte für die Hochauftriebsvorrichtung, die ein Gleichgewicht zwischen einfacher Herstellbarkeit und Materialeinsparung herstellen.
4. Entwicklung einer funktionsintegrierten Seilanbindung, die Haltbarkeit und eingebaute Seilkraftmessung kombiniert.
5. Ökobilanz der Flugwindkraftanlage sowie Identifikation klimaschädlicher Komponenten der Flugwindkraftanlage und Prozessschritte und ableiten eines Ökodesigns der Flugwindkraftanlage.
6. Vorbereitende Arbeiten zur Umsetzung und den Pilotbetrieb einer Flugwindkraftgespeisten Ladeinfrastruktur, die in einem Zeitraum von 2025 bis 2027 erfolgt

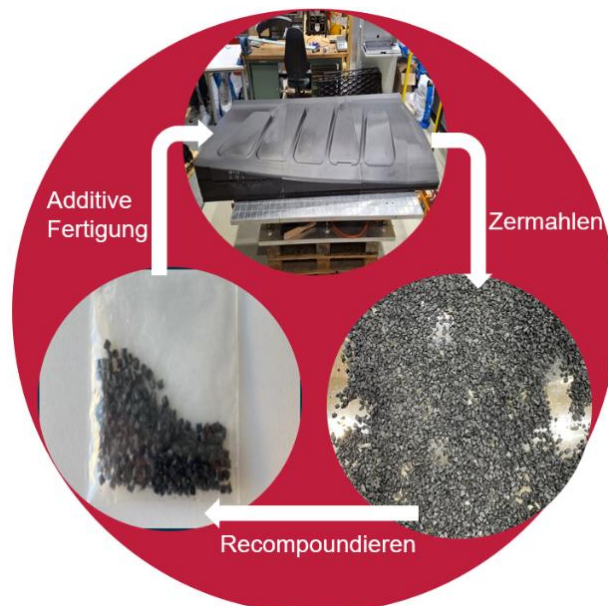
6

Additiv gefertigtes Werkzeug

Kai Kraske ✉, Dennis Backofen, Oliver Huxdorf, Daniel Nebel

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202507110653-0>

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung eines additiv gefertigten Werkzeugs, um Segmente der Flugwindkraftanlage mithilfe des Autoklav-Verfahrens herzustellen. Standardwerkzeuge aus Aluminium oder Stahl weisen hohe Fertigungskosten auf. Durch die Verarbeitung von Kunststoffen mithilfe von additiven Fertigungsverfahren können die Fertigungskosten von Formwerkzeugen stark reduziert werden [2, 1]. Bedingt durch die Kostenersparnis sowie der guten Anpassbarkeit bieten additive Formwerkzeuge ein hohes Potenzial, kleinen und mittelständischen Unternehmen die wirtschaftliche Herstellung von Prototypen zu ermöglichen [4, 57]. Allerdings ist nicht jeder Kunststoff für die Anwendung geeignet. So unterscheiden sich Kunststoffe stark in ihren Eigenschaften, wobei zusätzlich das Materialverhalten von den Verarbeitungsparametern beeinflusst wird [18, 42]. Daher muss stets geprüft werden, ob ein bestimmter Kunststoff für die jeweilige Anwendung geeignet ist (siehe Kapitel 5.1). Die Beeinflussung des Materialverhaltens durch die Verarbeitungsparameter kann dabei auf unterschiedlichen Veränderungen im Werkstoff zurückgeführt werden [28, 29, 40]. Gerade in Hinblick auf die Qualitätssicherung sowie die Prognose der Materialeigenschaften ist ein tieferes Verständnis des Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehungen unabdingbar (siehe Kapitel 5.2). Zusätzlich sind viele Kunststoffe Kreislauffähig (siehe Abbildung 5.1). Allerdings kann es beim Recycling zu einer Beeinflussung der Eigenschaften kommen [41]. Daraus folgt, dass bei der Wahl eines Kunststoffes auch die Veränderung des Materialverhaltens durch die Kreislaufführung berücksichtigt und bewertet werden sollte (siehe Kapitel 5.4). Alles in allem kann mithilfe der Materialcharakterisierung eine sinnvolle Werkstoffauswahl getroffen werden. Dennoch ist eine umfangreiche Untersuchung der additiv gefertigten Formwerkzeuge sinnvoll, um Grenzen sowie Möglichkeiten des Einsatzes zu validieren (siehe Kapitel 5.3).



6.1 Werkstoffwahl

6.1.1 Identifikation geeigneter Werkstoffe

Es wird prognostiziert, dass die Verwendung von additiven Fertigungsprozessen bis 2030 massiv zunehmen wird [43]. Dies gründet vor allem auf der hohen Flexibilität, der schnellen Fertigung sowie einer hohen Kosteneffizienz der Prozesse [7]. Dabei werden vor allem Kunststoffe verarbeitet [7]. So werden im Rahmen der additiven Fertigung u. a. Polyamide (PA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) und Polycarbonate (PC) verarbeitet [7]. Reine Kunststoffe weisen jedoch signifikante Nachteile bei der Fertigung von Bauteilen auf. So müssen an dieser Stelle die geringen Festigkeiten, Warmfestigkeiten und Bauteilsteifigkeiten benannt werden [31]. Eine Möglichkeit, die thermomechanischen Eigenschaften von Kunststoffen zu erhöhen, ist die Verwendung von Verstärkungsfasern. So kann je nach verwendeten Verstärkungsfasern eine Steigerung der Festigkeit sowie der Warmformbeständigkeit erzielt werden [26].

Als Verstärkungsfasern kommen hier vor allem Glas- und Kohlenstofffasern in Frage. Insbesondere Kohlenstofffasern zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit aus. Allerdings muss bei der Konstruktion auf die Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften der Fasern geachtet werden. Diese Richtungsabhängigkeit wird Anisotropie genannt. Diese Anisotropie macht sich u.a. bei der Wärmedehnung bemerkbar. So weisen Standard-Kohlenstofffasern in Faserrichtung mit $-0,455 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ einen negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf. In Querrichtung zur Faser ist dieser hingegen mit beispielsweise $12,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ positiv. Auch die Festigkeiten werden von der besagten Anisotropie geprägt. Auch Glasfasern weisen eine Anisotropie der Festigkeit auf. Wobei diese Anisotropie weniger stark ausgeprägt ist als bei Kohlenstofffasern. [19]

Die Verstärkung von Kunststoffen durch Fasern kann dazu beitragen, die mechanischen und thermomechanischen Eigenschaften der Kunststoffe zu verbessern. Dabei werden mit Glasfasern bereits Kennwerte erreicht, die mit den metallischen Werkstoffen vergleichbar sind. Durch die Verwendung von Kohlenstofffasern lassen sich die Kennwerte sogar noch weiter optimieren. [38]

Allerdings muss bei der Auslegung und Prüfung der Faserverbundwerkstoffe die Anisotropie stets mitbedacht werden [14, 48].

Die bereits bestehenden Ergebnisse der Literatur lassen somit den Schluss zu, dass Verbundwerkstoffe wie CFK und GFK als Werkstoff für ein Formwerkzeug besser geeignet sind als unverstärkte Kunststoffe. Eine Herausforderung ist jedoch die Prognose der Anisotropie speziell für die thermische Ausdehnung des Formwerkzeuges.

Zugleich muss das Matrixmaterial für das additiv gefertigte Autoklav-Werkzeug ausgewählt werden, das die Verarbeitungstemperaturen von 130°C sowie 190°C erfüllt. Viele Kunststoffe weisen eine Warmformbeständigkeit von weniger als 130°C auf [47].

Laut der Literaturrecherche weisen verschiedene Kunststoffe eine ausreichend hohe Einsatztemperatur auf. So wären beispielsweise PA, Polyhydroxybutyrate (PHB) sowie Polyethylenterephthalat (PET) als Matrixwerkstoff geeignet. PHB wurde ausgeschlossen, da dieser Werkstoff bisher nur unzureichend für die additive Fertigung genutzt werden kann [47]. PA weist gemeinhin sehr gute Eigenschaften auf und ist bereits für additive Fertigungsverfahren etabliert [7, 30]. Allerdings weist dieser Kunststoff eine hohe Feuchtigkeitsaufnahme auf. Woraus wiederum ein Verzug des Formwerks resultieren kann [30]. PET weist ebenfalls für Formwerkzeuge günstige Eigenschaften auf. So kann an dieser Stelle die guten mechanischen Eigenschaften sowie die gute Formbeständigkeit angeführt werden [17]. Allerdings musste dies kritisch betrachtet werden. So weist

PET eine Glasübergangstemperatur von 75°C beim Überschreiten dieser Temperatur würde es zum Einbruch der mechanischen Eigenschaften kommen [17]. Somit ist die Einsatztemperatur von PET stark limitiert. Daher kommt das PET für die Autoklav-Anwendung nicht in Betracht.

Durch eine weiterführende Recherche wurde PC als möglicher Matrixwerkstoff identifiziert. PC weist eine Glasübergangstemperatur von 145 °C auf [15]. Zusätzlich ist der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient von PC kleiner als der von PET [30, 17]. Simultan weist PC unter den gängigen Werkstoffen für die additive Fertigung hohe Festigkeiten und Warmformbeständigkeiten auf. Wobei eine Verstärkung von PC mit Fasern üblich ist [30]. Somit ist auch die Kompatibilität zwischen Kunststoff und Fasermaterialien garantiert. Diese Eigenschaften prädestinierten den Werkstoff somit dazu, als Matrixwerkstoff für das Formwerkzeug genutzt zu werden. Allerdings konnten noch weitere geeignete Kunststoffe, die für die Herstellung des Formwerkzeuges, ermittelt werden. Hierbei ist Polyetherimid (PEI) zu nennen. PEI zeichnet sich durch eine Warmformbeständigkeit und eine Festigkeit aus, die die Eigenschaften von PC noch übertrifft [30, 15, 25]. Somit könnte auch die Nutzung von PEI sinnvoll sein, um Formwerkzeuge für Hochtemperaturanwendungen herzustellen. Des Weiteren konnte der Kunststoff Polyarylamid (PARA) als potenziell geeignet betrachtet werden [1].

Auf Grundlage der erworbenen Erkenntnisse wurde nach kommerziell erhältlichen Materialien gesucht. Dabei wurden vier Werkstoffe identifiziert. So wurden ein Polycarbonat verstärkt mit Kohlenstofffasern sowie Glasfasern ausgewählt. Außerdem wurde ein Polyetherimid sowie ein Polyarylamid verstärkt mit Kohlenstofffasern erworben. Die Eigenschaften laut den jeweiligen Datenblättern sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Eigenschaften der ausgewählten Werkstoffe

Bezeichnung	PC-G	PC-C	PEI-C	PARA-C
Handelsname	C-250GF	C-250CF	I-350CF	Para ICF 40 Black
Matrix	PC	PC	PEI	Para
Verstärkungsfaser	Glas	Kohlenstoff	Kohlenstoff	Kohlenstoff
Faseranteil [%]	20	20	20	40
Zugfestigkeit in Druck-Richtung [MPa]	84,8	112,4	126	280
Zug Modul in Druck-Richtung [MPa]	5,24	11	11,7	39
Warmformbeständigkeit HDT/A [°C]	139	144	212	230
Preis [€/Kg]	18,05	26,99	57,05	13

Nach der Identifikation verschiedener Werkstoffe war es notwendig, Prüfungen zu wählen, die für die anwendungsspezifische Materialcharakterisierung geeignet wären. Da die angedachten Werkzeuge für die Faserverbundherstellung im Autoklav-Prozess genutzt werden sollten, war vor allem das thermische Verhalten der Materialien von elementarer Bedeutung. Weshalb hierauf der Fokus der Bewertung gelegt wurde. Die gewählten Prüfungen sind in Tabelle F.1 im Anhang zusammengefasst.

Für die aufgeführten Prüfungen wurden mithilfe des Screw Extrusion Additive Manufacturing (SEAM) zunächst Grundkörper gefertigt. Dabei mussten in einem iterativen Prozess zunächst geeignete Prozessfenster erarbeitet und die Temperatur des Extruders, des Tisches sowie die Schneckendrehzahl und Tischgeschwindigkeit variiert werden, bis ein geeignetes Parameterset erarbeitet wurde. Die Fertigungsparameter sind in Tabelle F.1: Übersicht der Prüfungen sowie der zu ermittelnde Parameter.

Prüfung	E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur	Festigkeit	Glasübergangstemperatur	Einfluss Anisotropie	Warmform-beständigkeit	Oberflächenqualität (Rauigkeit, Schäden)	Wärmekapazität	Anwendungsnahe
Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)			x				x	
Dynamisch-mechanische-thermische Analyse Zug (DMTA-Zug)	x			x				
Dynamisch-mechanische-thermische Analyse Biegung (DTMA-Biegung)	x			x				x
Thermomechanische Analyse (TMA)				x	x			
Optische Messung (Konvokal Mikroskop)						x		
Zugprüfung		x		x				

Tabelle F.2 im Anhang zusammengefasst.

Anschließend wurden aus dem Grundkörper Platten und abschließend die Prüfkörper hergestellt. Eine Darstellung des Grundkörpers zeigt Abbildung 6.1 a). Abbildung 6.1 b) zeigt die Platten, die aus dem Grundkörper gefertigt wurden, sowie die Position der Prüfkörper auf den Platten. Abbildung 6.1 c) zeigt exemplarisch eine Platte für die Bestimmung der Oberflächenqualität. Dabei sind in der Abbildung die Messpunkte zu sehen.

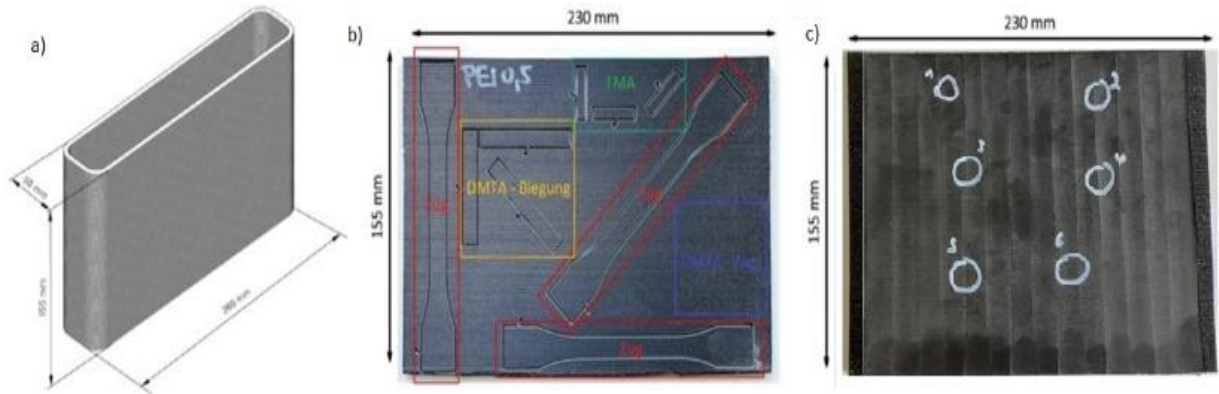


Abbildung 6.1: a) Gedruckter Grundkörper für die Fertigung. b) Platte, welche aus dem Grundkörper gefertigt wurde, sowie die Position der Prüfkörper auf der Platte. c) Exemplarisch: Prüfkörper für die Bestimmung der Oberflächenqualität

Bestimmung der Glasübergangstemperatur

Um den Glasübergang und damit die maximale Einsatztemperatur der Materialien zu bestimmen, wurde die dynamische Differenzkalometrie (DSC) genutzt. Die Parameter für die Messung sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Tabelle 6.2: Prüfparameter der DSC

Bezeichnung	PC-G	PC-C	PEI-C	PARA-C
Heizrate [°C/Min]	10			
Starttemperatur [°C]	23			
Endtemperatur [°C]	190		250	

In der Abbildung 6.2 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der gemessenen Glasübergänge zusammengefasst. Zu erkennen ist, dass das PC-G und PC-C einen Glasübergang bei ca. 150°C aufweisen. Bei den PEI-C hingegen kann der Glasübergang bei 220 °C verzeichnet werden. Auffällig ist jedoch das Ergebnis des PARA-C. Hier kann bis zum Schmelzen des Materials bei ca. 230°C keine Glasübergangstemperatur verzeichnet werden.

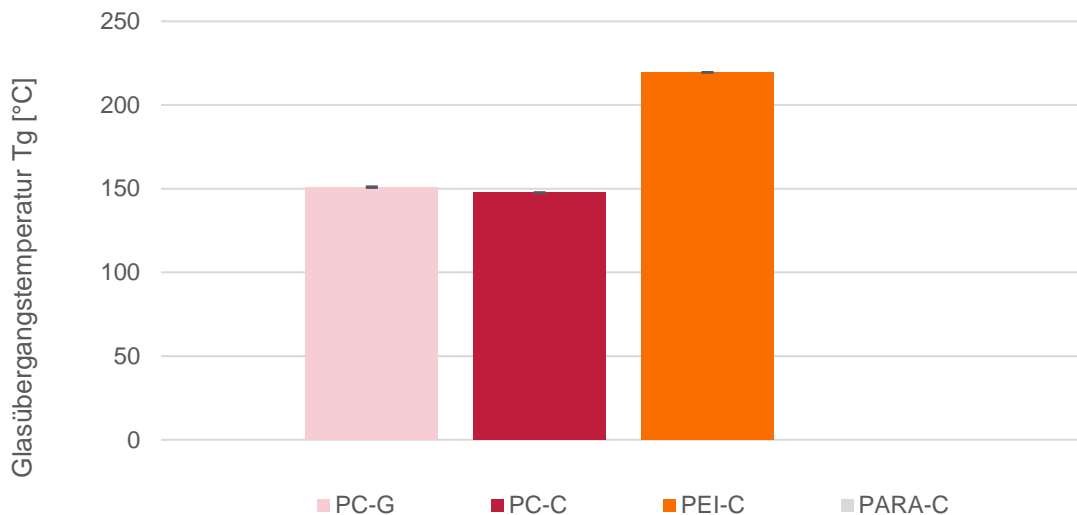


Abbildung 6.2: Mittelwert und Standardabweichung des Glasübergangs für PC-G, PC-C, PEI-C und PARA-C.

Im Hinblick auf den Anwendungsfall konnte anhand der DSC festgehalten werden, dass das PC-C und PC-G lediglich für die Verarbeitungstemperatur von 130°C geeignet sind. Das PARA-C und das PEI-C hingegen können auch für die Verarbeitungstemperatur von 190°C eingesetzt werden. Die genannten maximalen Temperaturen wurden nun für die nachfolgenden Versuche als Endtemperatur definiert.

Bestimmung des temperaturabhängigen Zug- und Biegemoduls

Weiter wurde die dynamisch-mechanisch-thermische Analyse (DMTA) als Zug- und Biegeprüfung durchgeführt. Dabei wurden für die Biegeprüfung Prüfkörper in 0°, 45° und 90° Richtung zur Strangrichtung ausgeschnitten. Für die Zugprüfung wurden 0° und 90° -Proben gefertigt.

Durch die Wahl einer Prüffrequenz von 0,1 Hz konnte eine quasi-statische Prüfung realisiert werden. Die Prüftemperaturen wurden analog den Ergebnissen der DSC gewählt. Die Prüfparameter der DMTA-Zug und -Biegung können der Tabelle 6.3 entnommen werden. Dabei wurde sich an der DIN EN ISO 6721 orientiert.

Tabelle 6.3: Prüfparameter DMTA.

Bezeichnung	PC-G	PC-C	PEI-C	PARA-C
Prüffrequenz [Hz]	0,1			
Heizrate [°C/Min]	2			
Starttemperatur [°C]	23			
Endtemperatur [°C]	130		190	

In Abbildung 6.4 und Abbildung 6.3 ist das temperaturabhängige Zugmodul der verschiedenen Materialien abgebildet. In den Abbildungen wird nach der Prüfrichtung unterschieden. So zeigt Abbildung 6.4 das Zugmodul in 0° zur Druckrichtung. Abbildung 6.3 zeigt das Zugmodul 90° zur Druckrichtung. Zu erkennen ist, dass das PARA-C bei Raumtemperatur das höchste Zugmodul aller

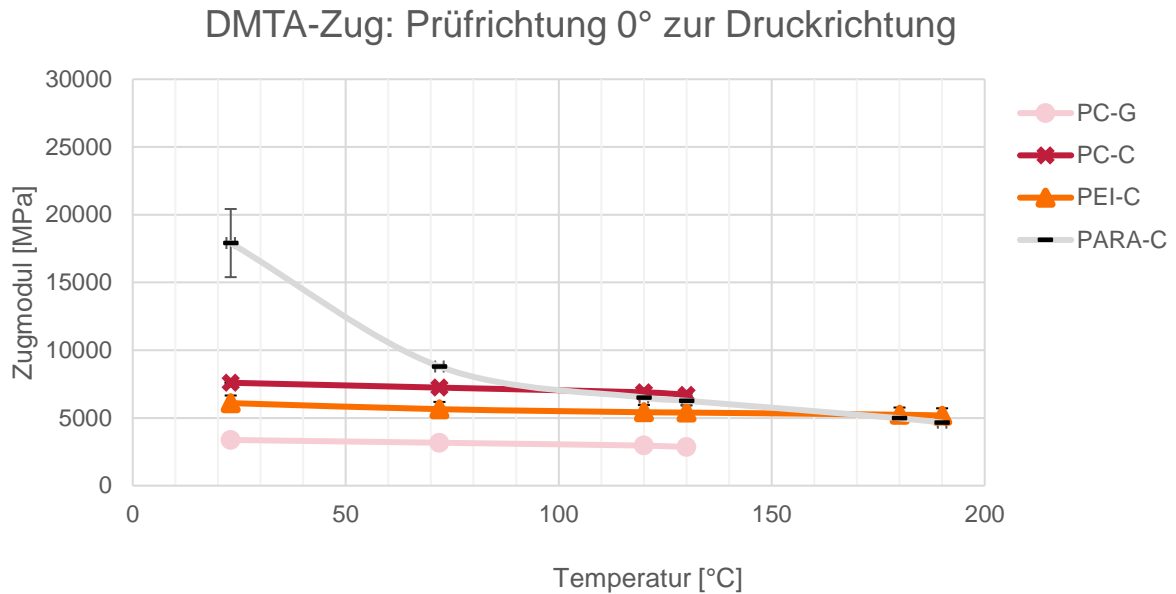


Abbildung 6.4: Zugmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 0° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-G; PC-C; PEI-C; PARA-C.

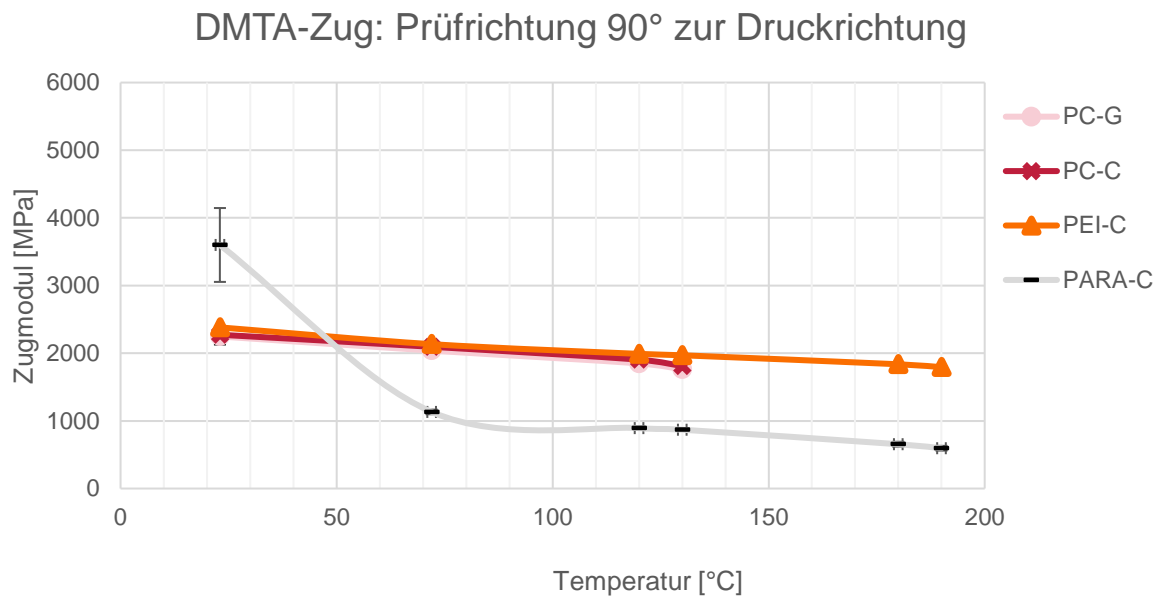


Abbildung 6.3: Zugmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 90° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-G; PC-C; PEI-C; PARA-C.

geprüften Werkstoffe aufweist. Dies gilt sowohl für die 0° als auch 90°-Richtung. Allerdings lässt sich beim PARA-C auch eine erhebliche Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften ausmachen. So ist erkennbar, dass das Zugmodul des PARA-C bis zu einer Temperatur von 190°C signifikant abnimmt und dabei teilweise die Kennwerte der anderen Werkstoffe unterschreitet.

Das PC-G, PC-C und PEI-C weisen im Vergleich dazu sehr stabile mechanische Eigenschaften auf. Dabei ist über den gemessenen Bereich hinweg keine signifikante Änderung des Zugmoduls zu verzeichnen. Auffallend ist, dass bei den drei genannten Werkstoffen das PC-C das höchste Zugmodul in 0°-Richtung

aufweist, gefolgt vom PEI-C. Beim PC-G kann das geringste Zugmodul in 0°-Richtung verzeichnet werden. Zwischen dem PC-C und PEI-C besteht über das Temperaturintervall hinweg im Mittel eine Differenz zwischen den Zugmodulen von 20 %. Zwischen dem PC-C und PC-G ist die Differenz der temperaturabhängigen Zugmoduls mit 56 % noch größer. In 90°-Richtung hingegen weisen die drei Werkstoffe ähnliche Zugmodule auf. Dabei ist das temperaturabhängige Zugmodul des PEI-C im Mittel etwa 5 % größer als das Zugmodul des PC-C. Das Zugmodul des PC-G ist über das Temperaturintervall hinweg etwa 2 % kleiner als das Zugmodul des PC-C.

Die Werkstoffe haben in 0°-Richtung allgemein ein höheres Zugmodul als in 90°-Richtung. Dies wird aus dem Vergleich zwischen Abbildung 6.4 und Abbildung 6.3 deutlich. In Abbildung 6.5 wird das temperaturabhängige Biegemodul der geprüften Werkstoffe in Abhängigkeit von der Prüfrichtung gezeigt. So veranschaulicht das obere Diagramm das Biegemodul in 0°-Richtung zur Druckrichtung. Das mittlere Diagramm visualisiert das Biegemodul in 45°-Richtung zur Druckrichtung und das untere Diagramm veranschaulicht das temperaturabhängige Biegemodul der Werkstoffe in 90°-Richtung.

Wie bei den Ergebnissen des temperaturabhängigen Zugmoduls, so lässt sich auch beim Biegemodul erkennen, dass das PARA-C eine erhebliche Temperaturabhängigkeit aufweist. Auch wenn das PARA-C das höchste Biegemodul bei Raumtemperatur aller geprüften Werkstoffe aufweist. So ist dennoch auch hier eine Abnahme des Moduls mit steigender Temperatur festzustellen. Wobei die Module der anderen Werkstoffe teilweise unterschritten werden. Im Vergleich zum PARA-C zeichnen sich die übrigen Werkstoffe durch ein konstantes Biegemodul aus. Dabei weist das PC-C in 0°-Richtung das höchste Biegemodul dieser drei Werkstoffe auf. Die Differenz zwischen PC-C und PEI-C beträgt dabei im Mittel lediglich ca. 8 %. Zwischen PC-C und PC-G ist die Differenz größer und beträgt über das Temperaturintervall hinweg ca. 51 %.

Zwischen den drei Werkstoffen PC-G, PC-C und PEI-C lässt sich in der Prüfrichtung 45° und 90° ein anderes Verhältnis feststellen. So wird bei der Betrachtung von Abbildung 6.5 (mittig) ersichtlich, dass das PEI-C die höchsten Werte aufweist. Die Differenz zum PC-C beträgt dabei im Mittel 18 %. Das PC-G weist dabei eine Nichtlinearität auf und schneidet die Gerade des PC-C, wobei sie im Temperaturintervall von 120 °C bis 130 °C unterhalb der Werte des PC-C liegt.

Wie im unteren Diagramm zu erkennen ist, kann auch in der Prüfrichtung 90° eine Linearität des Biegemoduls beim PC-G, PC-C und PEI-C festgestellt werden. Wobei hier das PC-G von den drei genannten Werkstoffen das höchste Biegemodul aufweist. Zwischen PC-C und PC-G kann im Mittel eine Differenz des Biegemoduls von 30 % festgehalten werden. Zwischen PC-C und PEI-C beträgt die Differenz des Biegemoduls im Mittel lediglich 2 %.

Analog dem Zugmodul kann auch beim Biegemodul eine Abnahme mit steigender Prüfrichtung verzeichnet werden. Zusammenfassend konnten beim PARA-C an den diversen DMTA-Prüfungen festgestellt werden, dass dieses Material ein sehr instabiles Zug- und Biegemodul aufweist.

Der Vergleich der Zug- und Biegemodule der Materialien zeigt, dass in 0°-Richtung die höchsten Kennwerte erreicht werden. Es ist anzunehmen, dass die 0°-Richtung primär von den Fasern geprägt wird. Die 90°-Richtung wird entsprechend von den Matrix-Eigenschaften beeinflusst. Somit geben die Ergebnisse Rückschlüsse auf die Faserorientierung der Werkstoffe und die meisten Fasern können in Strangrichtung orientiert sein. Dies entspricht auch Ergebnissen aus der Literatur und ist somit plausibel [64, 21]. Die Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass das PARA-C für die Werkzeuganwendung ungeeignet ist. Um dies zu verifizieren, wurde im Folgenden eine thermomechanische Analyse durchgeführt.

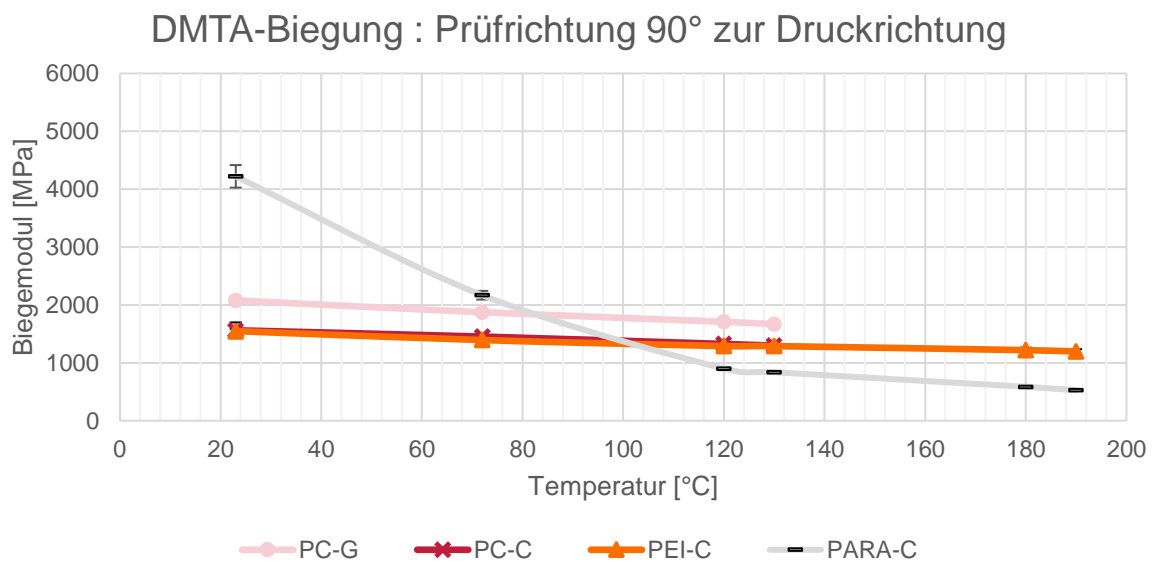
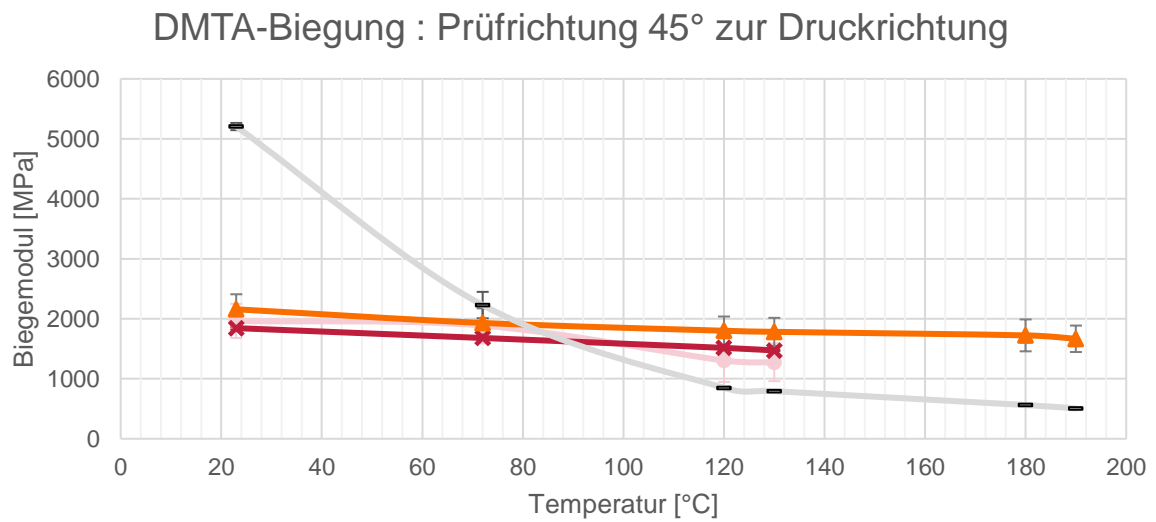
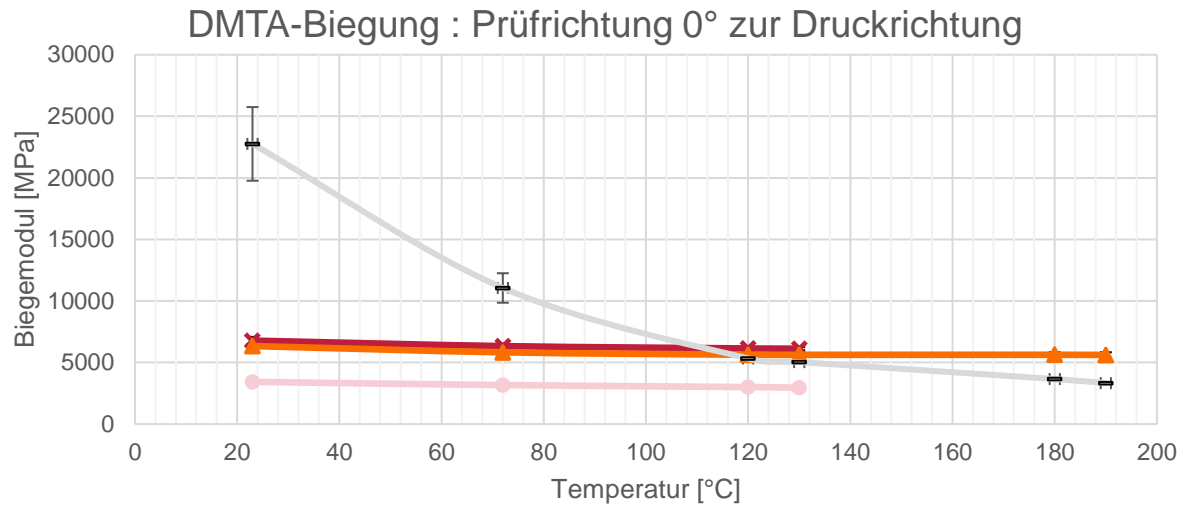


Abbildung 6.5: Biegemodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 0°, 45° und 90° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-G; PC-C; PEI-C; PARA-C.

Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten

Mithilfe der thermomechanischen Analyse (TMA) wurde der Wärmeausdehnungskoeffizient der Materialien bestimmt. Der Wärmeausdehnungskoeffizient war von Bedeutung, da dieser maßgeblich die Maßhaltigkeit der Werkzeuge und somit der Bauteile über den Fertigungsprozess hinweg beeinflusst. Dabei wurde auch die Anisotropie des Materials berücksichtigt, indem in 0°, 45° und 90° Richtung zur Strangrichtung Proben ausgeschnitten wurden. Analog zur DMTA wurde auch bei der TMA die Endtemperatur entsprechend der DSC ausgewählt. Die Prüfparameter sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst. Für die Prüfungen wurde sich an der ISO 11359 orientiert. Um die Fehlereinflüsse zu minimieren, wurde eine Kalibrierungsmessung durchgeführt.

Tabelle 6.4: Prüfparameter TMA.

Bezeichnung	PC-G	PC-C	PEI-C	PARA-C
Heizrate [°C/Min]	2			
Starttemperatur [°C]	23			
Endtemperatur [°C]	130		190	

In Abbildung 6.6 sind die Ergebnisse der TMA für das PC-G, PC-C, PEI-C und PARA-C zusammengefasst. Dabei wird in der Abbildung der Wärmeausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit des Prüfwinkels dargestellt. Zu erkennen ist, dass das PARA-C in 0°-Richtung mit ca. $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ den geringsten Wärmeausdehnungskoeffizienten aller geprüften Werkstoffe aufweist. Die Wärmedehnung von PC-C und PEI-C ist mit ca. 12 bzw. $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ etwa 60 % größer. In 0°-Richtung weist das PC-G den höchsten Koeffizienten mit $38 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ auf.

Ein anderes Ergebnis lässt sich in 45° und 90° -Richtung erkennen. So werden die Koeffizienten mit steigendem Winkel größer. In 45° weist das PEI-C den geringsten Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Der Koeffizient des PEI-C beträgt bei einem Winkel von 45° etwa $37 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Das PC-C weist bei 45° einen Koeffizienten von $52 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ und das PC-G weist bei besagtem Winkel einen Koeffizienten

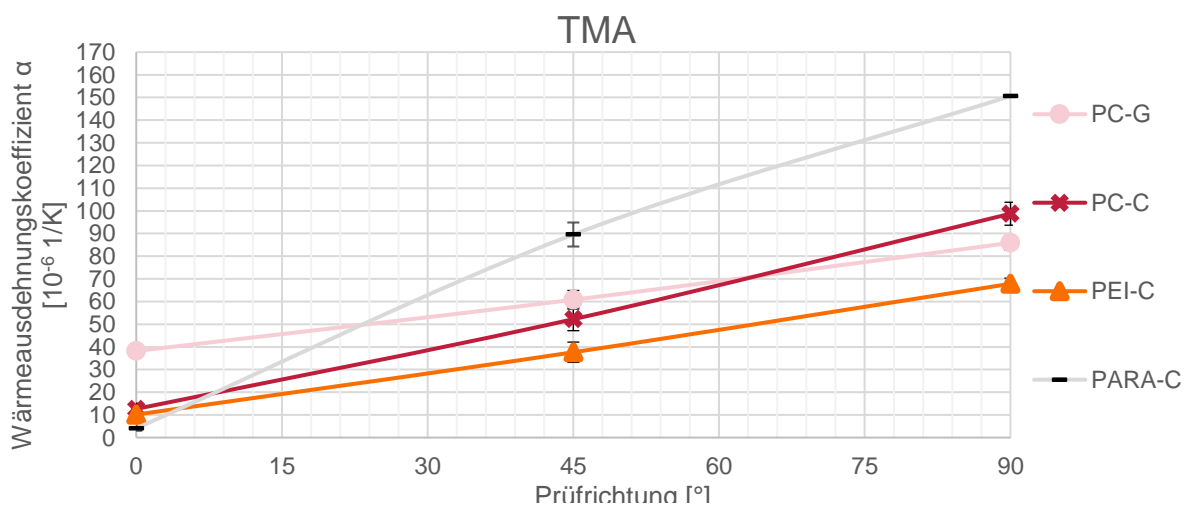


Abbildung 6.6: Wärmeausdehnungskoeffizient α für PC-G, PC-C, PEI-C und PARA-C in Abhängigkeit des Prüfwinkels.

von $60 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ auf. Den höchsten Koeffizienten kann bei 45° beim PARA-C mit $90 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ verzeichnet werden.

Auch in 90° -Richtung weist das PEI-C den geringsten Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Hier ist ein Wert von $67 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ zu verzeichnen. Dagegen weist auch hier das PARA-C den höchsten Wert auf. Dieser beträgt hier $150 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. In 90° -Richtung ist außerdem festzustellen, dass das PC-C eine höhere Wärmeausdehnung als das PC-G aufweist.

Bei allen Proben kann ein linearer Zusammenhang des Wärmeausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit der Raumrichtungen festgestellt werden. Mithilfe der TMA konnten weitere Schwierigkeiten des PARA-C herausgearbeitet werden. Auch wenn das PARA-C einen sehr geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten in 0° -Richtung vorzuweisen hat. So ist allerdings in 45° und 90° Prüfrichtung ein vergleichsweise hoher Koeffizient gemessen worden. Dies wiederum kann zu einem erheblichen Verzug des späteren Werkzeugs beitragen. Die gemessenen Resultate des PARA-C sollten vor allem auf der Semi-Kristallinität des Kunststoffes beruhen [15]. Somit könnte das PARA-C durch seinen teilkristallinen Zustand ungeeignet für die Werkzeugherstellung sein.

Das PEI-C hingegen weist einen geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten auf. Wobei das Materialverhalten von den Kohlenstofffasern geprägt sein wird [15, 28]. Dies wird auch beim Vergleich des Wärmeausdehnungskoeffizienten von PC-C und PC-G deutlich. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das PARA-C aufgrund des semi-kristallinen Verhaltens ungeeignet ist, da die mechanischen Eigenschaften über das geprüfte Temperaturintervall hinweg eine signifikante Verringerung erfahren. Außerdem ist durch den hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten ein starker Verzug bei dem angedachten Formwerkzeug zu erwarten. Daher wird das PARA-C im Folgenden nicht weiter berücksichtigt und nun das PC-G, das PC-C sowie das PEI-C weiter bewertet.

Bestimmung der Oberflächenqualität

Nach der Bewertung der thermomechanischen Eigenschaften wurde eine Oberflächencharakterisierung mithilfe eines Konvokal-Mikroskops durchgeführt. Die Verwendung eines Konvokal-Mikroskops ermöglichte die kontaktlose Beurteilung der Oberflächenrauigkeit (R_z). Für die Prüfung wurde das konfokale Weißlichtmikroskop „Nanofocus μ surf“ genutzt. Zu diesem Zweck wurden je eine Platten mit den Maßen 230mm x 155mm gefertigt und die zu prüfenden Oberflächen plan gefräst. Dies sollte die Oberflächenbearbeitung der späteren Werkzeuge im kleinen Maßstab nachbilden.

Die Abbildung 6.7 zeigt die Ergebnisse des Mittenrauwerths R_z . Das PC-C weist eine R_z von $5 \mu\text{m}$ auf. Das PC-G hingegen weist eine Rauheit von $7 \mu\text{m}$ und das PEI-C eine Rauheit von ca. $9 \mu\text{m}$ auf. Wobei die Mittelwerte in der Streubreite des jeweils anderen liegen. Die Ergebnisse zeigen, dass das PC-C die geringsten Rauigkeiten aufweist. Da jedoch die Mittelwerte des PC-G und des PEI-C in der Streubreite, der jeweils anderen liegen, besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Materialien.

Die unterschiedlichen Rauigkeiten der Werkstoffe könnten aus einer Überlagerung zweier Effekte resultieren. So kann hier einerseits das Bruchverhalten der Matrix und das der Fasern angeführt werden. Bei der Matrix gilt, dass verschiedene Kunststoffe beim Fräsen unterschiedliche Oberflächenqualitäten erzielen. Dies gründet vor allem auf den unterschiedlichen Glasübergang, aber auch auf die unterschiedlichen Temperaturen, die bei der Bearbeitung verschiedener Kunststoffes entstehen [50]. Des Weiteren weisen Glas- und Kohlenstofffasern eine unterschiedlich stark ausgeprägte Anisotropie auf. Was die Bruchmechanik beeinflusst und wiederum zu einer Variation der Oberflächenqualität führt [49].

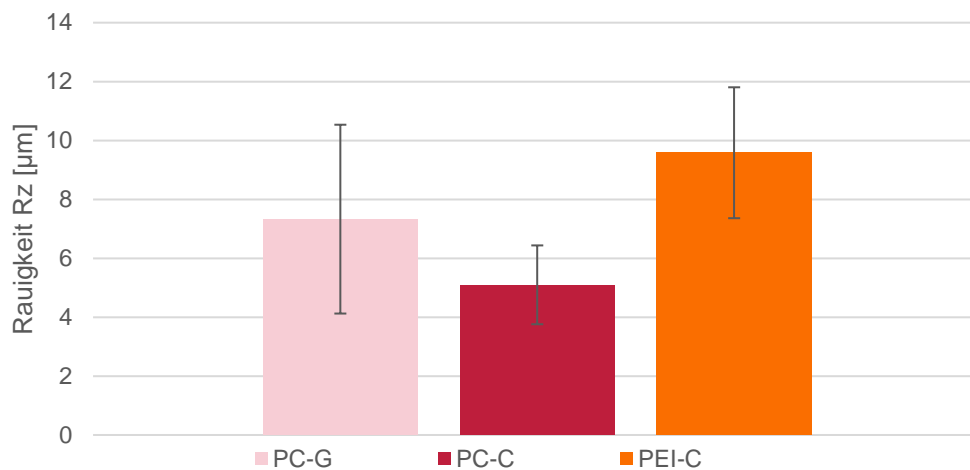


Abbildung 6.7: Vergleich der Mittenrauwerte Rz.

Bestimmung der Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit

Die Ergebnisse zeigen das vor allem das PC-C für die Anwendungen geeignet ist. Neben der Oberflächenqualität spielt in Hinblick auf die Werkzeuganwendung die Temperierbarkeit eine wichtige Rolle. In diesem Kontext sind die Wärmekapazität sowie die Wärmeleitfähigkeit bedeutende Materialeigenschaften. Die Wärmekapazität soll anhand einer DSC gemessen und die Wärmeleitfähigkeit mithilfe von Berechnungen bewertet werden.

Anhand von Literaturkenndaten wird die zu erwartende Wärmeleitfähigkeit der Werkstoffe berechnet. Hierzu wurde die Mischungsregel herangezogen, um vorab eine Abschätzung treffen zu können. Mithilfe der Wärmeleitfähigkeit der Fasern und der Matrix lässt sich über eine Gewichtung mit dem Faservolumengehalt nach Formel 6.1 die Wärmeleitfähigkeit des Verbundes in Faserrichtung bestimmen. Analog zu Formel 6.1 kann quer zur Faser über die Mischungsregel in Formel 6.2 der Wert berechnet werden. Für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit kann allerdings eine Umrechnung des Fasermassenanteils in das Faservolumen nötig sein. Die Berechnung des Faservolumens ist mithilfe der Formel 6.3 möglich.

Wärmeleitfähigkeit des Verbundes in Faserrichtung [W/mK]

Formel 6.1

$$\lambda_{II} = \lambda_{fII} * \rho + \lambda_m * (1 - \rho)$$

[19]

λ_{fII} - Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung [W/mK]

λ_m - Wärmeleitfähigkeit der Matrix [W/mK]

ρ - Faservolumengehalt [-]

Wärmeleitfähigkeit des Verbundes quer zur Faserrichtung [W/mK]

Formel 6.2

$$\frac{1}{\lambda_L} = \frac{1}{\lambda_{fL}} * \rho + \frac{1}{\lambda_m} * (1 - \rho)$$

[19]

λ_{fL} - Wärmeleitfähigkeit quer zur Faserrichtung [W/mK]

Faservolumen [-]

Formel 6.3

$$\rho = \frac{1}{1 + \frac{1-\psi}{\psi} * \frac{\varphi_f}{\varphi_m}} \quad [19]$$

 ψ – Faser-Massenanteil [-] φ_f – Dichte der Fasern φ_m – Dichte der Matrix

Die Parameter für die Berechnung sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit sollte dazu dienen die Werkstoffe auf ihren Wärmetransport zu charakterisieren.

Tabelle 6.5: Kenndaten aus der Literatur für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit [19, 13].

Parameter	PC	PEI	Glas	Kohlenstoff
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	0,21	0,22	1,21	1,7
Dichte [g/cm ³]	1,2	1,27	2,25	1,74
Faser-Massenanteil [-]	0,2			

Die Abbildung 6.8 (oben) zeigt die in der DSC gemessene Wärmekapazität der verschiedenen Werkstoffe. Abbildung 6.8 (unten) zeigt die berechneten Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Materialien sowie die Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. In 90° Richtung ist kein signifikanter Unterschied bei den Materialien zu erkennen. Allerdings kann in 0° Richtung bei den kohlenstofffaserverstärkten Werkstoffen eine Wärmeleitfähigkeit festgestellt werden, die mehr als 3-

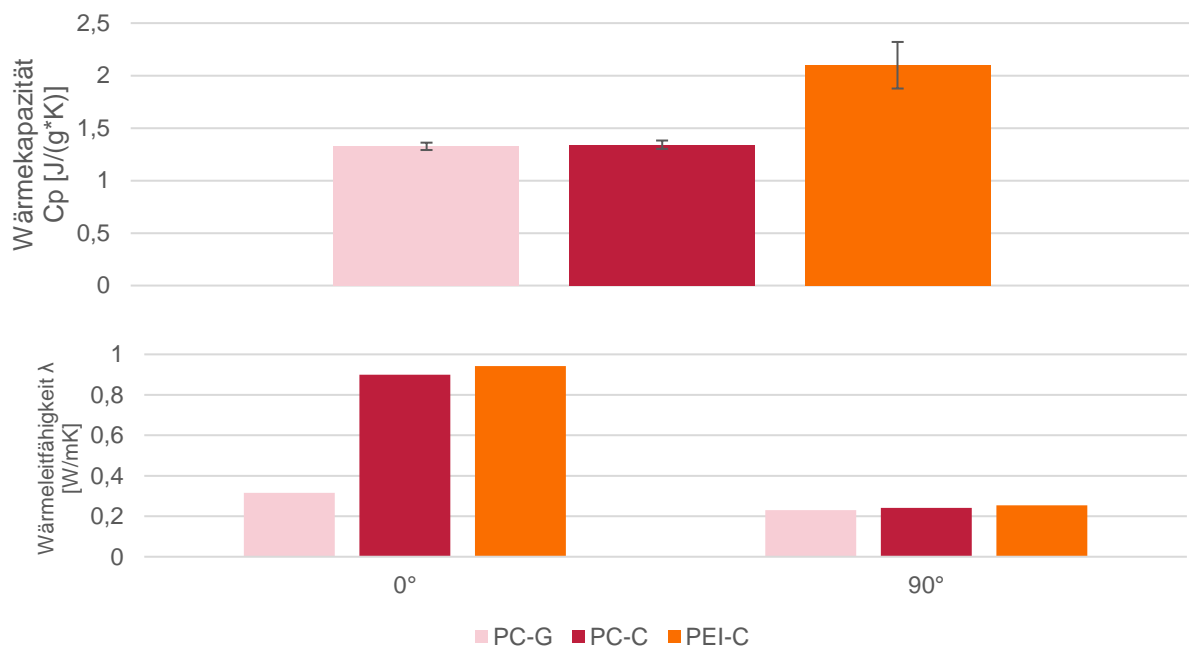


Abbildung 6.8: Gegenüberstellung der gemessenen Wärmekapazität (oben) sowie Gegenüberstellung der berechneten Wärmeleitfähigkeit (unten)

mal so groß ist wie beim PC-G. Die Ergebnisse der Wärmekapazität deuten darauf hin, dass vor allem die Matrix diesen Kennwert prägt. Dies war laut der Literatur nicht zu erwarten. Hiernach hätte die Kohlenstoffaser zu einer Verringerung der Wärmekapazität führen müssen [28]. Allerdings könnte der Fasermassenanteil in den Proben zu gering gewesen sein, um die Wärmekapazität zu beeinflussen. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit allerdings deckt sich mit der Literatur. So wird in der Literatur die Verwendung von Kohlenstoffasern empfohlen, um die Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffes zu verbessern [34]. Die Ergebnisse zeigen, dass Kohlenstoffasern eine gleichmäßige Temperierung ermöglichen [35]. Deshalb werden im Folgenden die kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffe PEI-C und PC-C in den Fokus der Untersuchung gerückt.

6.1.2 Variation der Verarbeitungsparameter

Während des Herstellungsprozesses ist eine Änderung der Fertigungsparameter notwendig, die zu einer Schwankung der Faserlängenverteilung und der Faserwinkelverteilung führen kann [22, 9]. Dies könnte wiederum eine Variation der Materialeigenschaften zur Folge haben [41]. Um den Einfluss der Parametervariation zu bewerten, wurden die Schichthöhe sowie die Schneckendrehzahl angepasst. Dabei wurde die Schichthöhe von 1 mm auf 0,5 mm reduziert sowie die Schneckendrehzahl von 30,4 U/Min. auf 45 U/Min. erhöht. Die veränderten Parameter sind in Tabelle 6.6 zusammengefasst.

Analog zu dem bisher beschriebenen vorgehen wurden DMTA-Zug-Proben, DMTA-Biege-Proben sowie TMA-Proben gefertigt. Mithilfe der Prüfungen konnten wie zuvor auch das temperaturabhängige Zugmodul, Biegemodul sowie der Wärmeausdehnungskoeffizient bestimmt werden. Außerdem wurden zusätzlich Zugprüfungen durchgeführt, um die Zugfestigkeit der Werkstoffe bei Raumtemperatur zu bestimmen. Dabei wurde sich an der DIN EN ISO 527-2 orientiert.

Tabelle 6.6: Anpassung der Parameter für die Prüfung des Einflusses der Parametervariation.

Kennung	Material	Schneckendrehzahl [U/min]	Schichthöhe [mm]
PC-C_30,4_1	PC-C	30,4	1
PC-C_30,4_0,5		30,4	0,5
PC-C_45_1		45	1
PEI-C_30,4_1	PEI-C	30,4	1
PEI-C_30,4_0,5		30,4	0,5
PEI-C_45_1		45	1

Bestimmung des Temperaturabhängigen Zug- und Biegemoduls

Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse der DMTA-Zugprüfung in 0°-Prüfrichtung für das PC-C mit verschiedenen Parametersets. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Veränderung der Fertigungsparameter eine Schwankung der Eigenschaften entstanden ist. So hat die Erhöhung der Drehzahl auf 45 U/min zu einer Reduzierung des Zugmoduls in 0°-Richtung um ca. 11 % geführt. Die

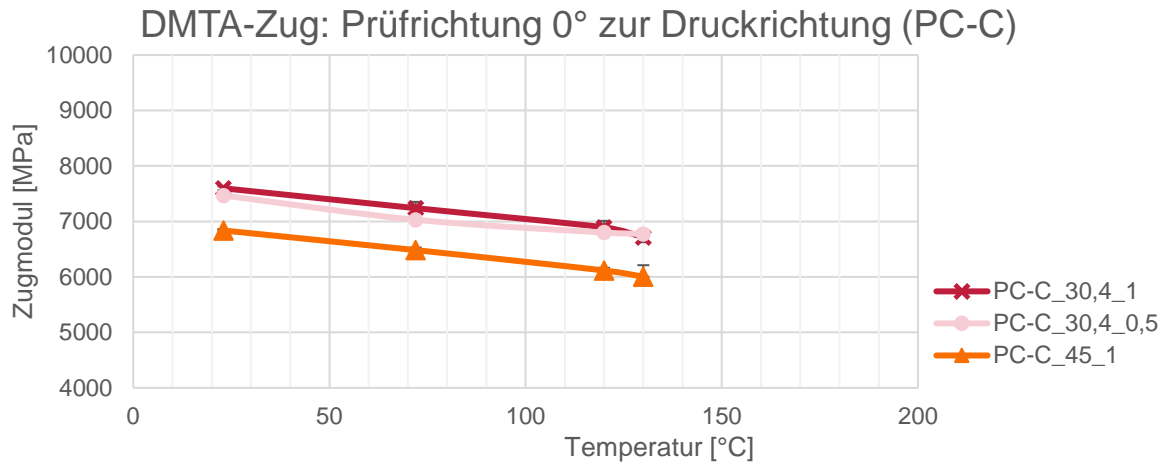


Abbildung 6.9: Zugmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 0° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-C_30,4_1, PC-C_30,4_0,5 und PC-C_45_1.

Verringerung der Schichthöhe hat in 0°-Richtung ebenfalls zu einer Verringerung des Zugmoduls geführt. Dabei kann eine Verringerung um ca. 2 % festgestellt werden.

Abbildung 6.10 zeigt die Ergebnisse der DMTA-Zugprüfung für die 90°-Prüfrichtung. Dadurch wird deutlich, dass sich durch die Verringerung der Schichthöhe auf 0,5 mm das Zugmodul ebenfalls reduziert. Bei der Erhöhung der Drehzahl auf 45 U/min kann ein solcher Einfluss nicht festgestellt werden. Hier ist eine Abweichung von +1 % zu verzeichnen.

Abbildung 6.11 zeigt die Ergebnisse der DMTA-Zugprüfung für die 0°-Prüfrichtung. Die Ergebnisse belegen, dass beim PEI-C eine Verringerung der Schichthöhe zu einer Erhöhung des Zugmoduls in 0°-Richtung geführt hat. Dabei kann ein Unterschied zwischen den Zugmodulen von ca. 29 % festgestellt werden. Der Vergleich zwischen PEI-C_30,4_1 und PEI-C_45_1 zeigt, dass die Erhöhung der Drehzahl keine signifikante Änderung des Zugmoduls in 0°-Richtung bewirkt. Hier kann lediglich eine Differenz von ca. 4 % detektiert werden.

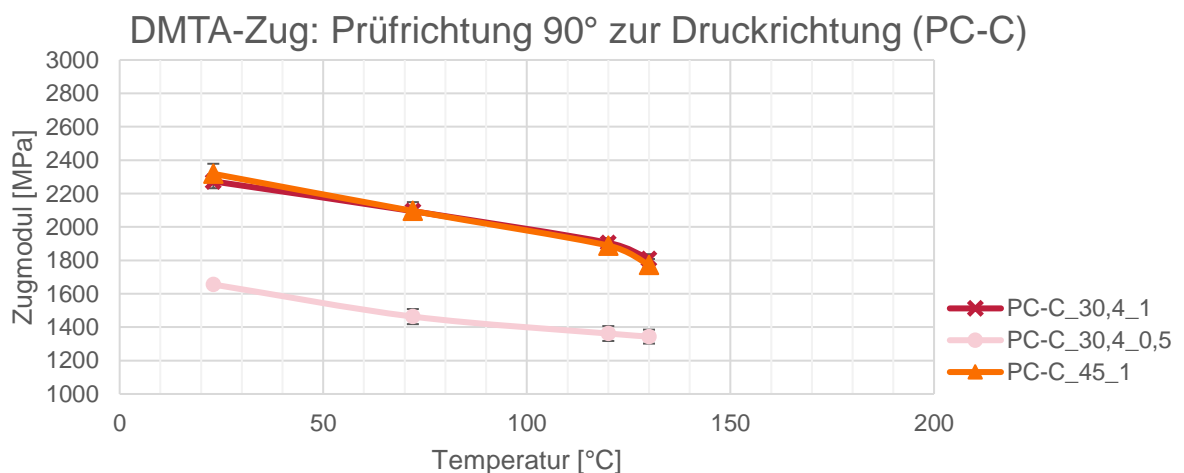


Abbildung 6.10: Zugmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 90° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-C_30,4_1, PC-C_30,4_0,5 und PC-C_45_1.

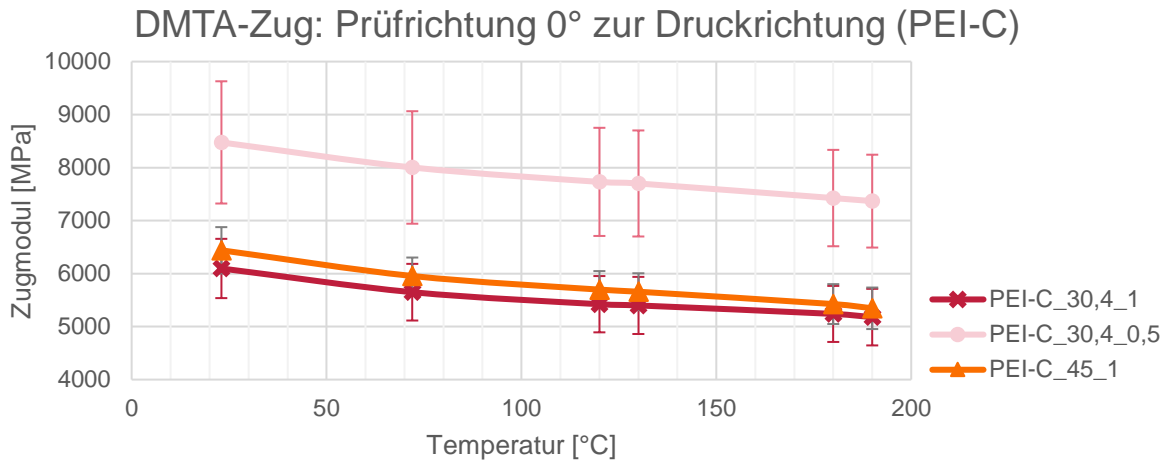


Abbildung 6.11: Zugmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 0° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PEI-C_30,4_1, PEI-C_30,4_0,5 und PEI-C_45_1.

Abbildung 6.12 zeigt die Zugmodule in 90°-Richtung. Anhand der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass sowohl die Erhöhung der Drehzahl auf 45 U/min als auch die Verringerung der Schichthöhe auf 0,5 mm zu einer Reduzierung des Zugmoduls geführt haben. Die Ergebnisse der DMTA-Zugprüfung zeigen, dass das Zugmodul von den Verarbeitungsparametern beeinflusst wird. Das beim PC-C die Erhöhung der Drehzahl in 0° Richtung zu einer Verringerung des Zugmoduls führen, könnten darauf zurückgeführt werden, dass es durch die Erhöhung der Drehzahl zu einer Erhöhung der Scherkräfte kommt, was in einer Verkürzung der Fasern mündet [9, 38]. Auch die Verringerung der des Zugmoduls

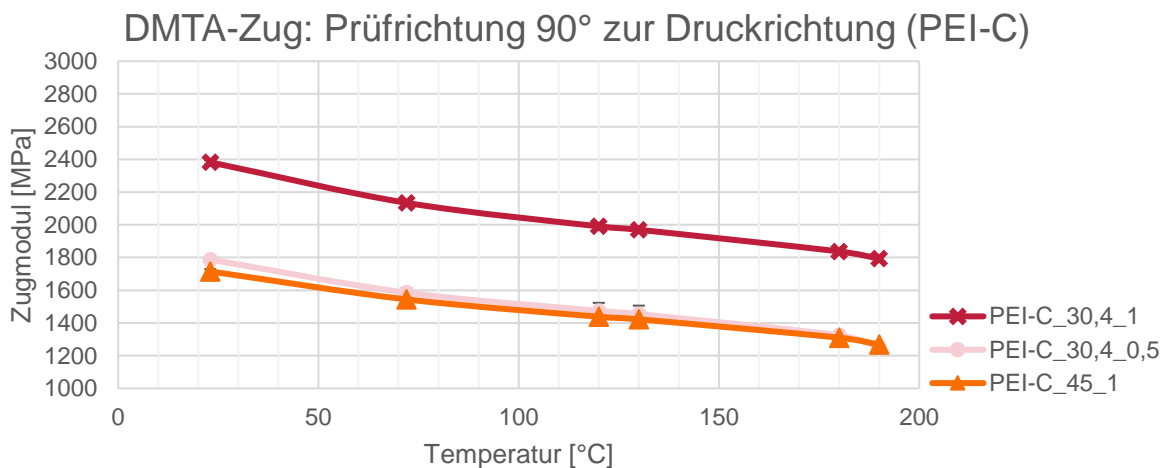


Abbildung 6.12: Zugmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 90° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PEI-C_30,4_1, PEI-C_30,4_0,5 und PEI-C_45_1.

in 90° Richtung scheint plausibel, so scheint die Verringerung der Schichthöhe bei dem PC-C zu einer Reduzierung der Eigenschaften beigetragen zu haben. Diese Verringerung könnte auf eine Wechselwirkung zwischen den Schichten gründen [4, 44]. So kann es hier zu einer negativen Beeinflussung der Schichtanbindung gekommen zu sein, wobei der Anbindungsmechanismus materialabhängig ist und von der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität beeinflusst wird [5]. Dennoch lässt sich auch beim PEI-C in 90° Richtung erkennen, dass die Verringerung der Schichthöhe

zu einer Reduzierung der mechanischen Eigenschaften beigetragen hat. Allerdings lässt sich beim PEI-C in 90°-Richtung auch eine Verringerung des Zugmoduls bei Erhöhung der Drehzahl detektieren, was beim PC-C nicht zu erkennen ist. Dies könnte aber auf den unterschiedlichen Materialien und den damit einhergehenden unterschiedlichen Sinterprozess zurückgeführt werden [5].

Gemeinhin lässt sich bei allen Proben eine Veränderung des Zugmoduls durch die Variation der Verarbeitungsparameter feststellen, wobei die Ergebnisse vermuten lassen, dass vor allem das PEI-C empfindlich auf die Parameteränderung reagiert. Dies bestätigt auch die hohen Standardabweichungen beim PEI-C. Somit kann vor allem bei den PEI-C Werkzeugen vor einer starken Schwankung der Materialeigenschaften ausgegangen werden.

Ergänzend wurden auch die DMTA-Biegeprüfungen für die Raumrichtungen 0°, 45° und 90° durchgeführt, allerdings konnte hier eine hohe Standardabweichung festgestellt werden. Abbildung 6.13 zeigt die Ergebnisse für das PC-C in 0°-Prüfrichtung. Aufgrund der hohen Standardabweichung weisen die Proben vergleichbare Absolutwerte auf und lassen sich kaum voneinander unterscheiden.

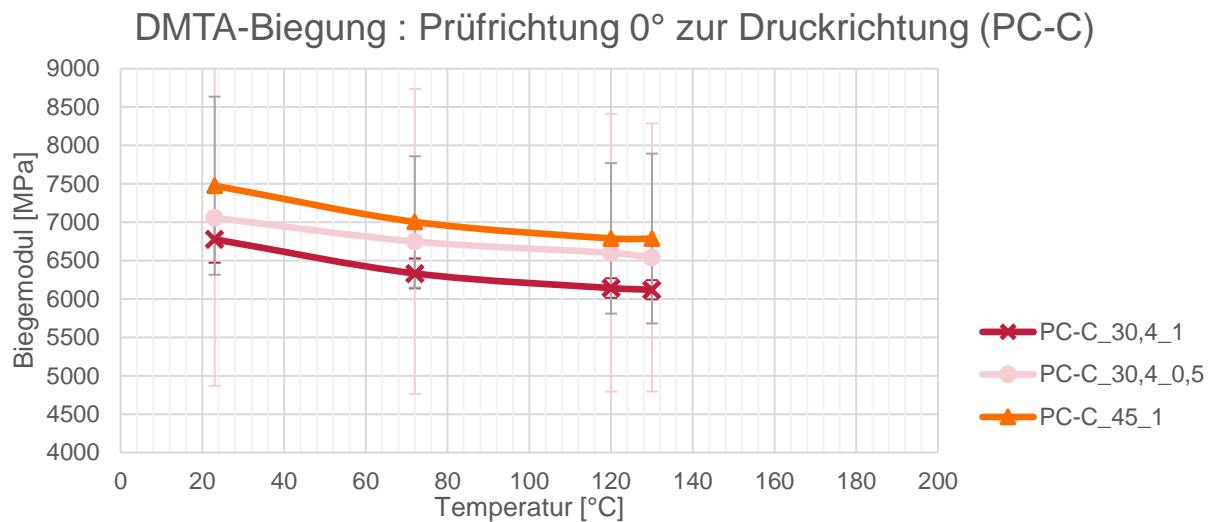


Abbildung 6.13: Biegemodul in Abhängigkeit der Temperatur für 0° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-C_30,4_1, PC-C_30,4_0,5 und PC-C_45_1.

Abbildung 6.14 zeigt die Ergebnisse des Biegemoduls in Abhängigkeit der Temperatur für das PEI-C. Auch hier ist eine hohe Standardabweichung zu erkennen, wodurch die Ergebnisse ineinander übergehen. Aufgrund der hohen Standardabweichung wurde in diesem Zusammenhang ein Abgleiten der Schichten vermutet. Da allerdings nicht final die Ursache für die hohen Standardabweichungen ermittelt werden konnte, wird darauf verzichtet, die Ergebnisse für die 45°-Prüfrichtung und 90°-Prüfrichtung zu diskutieren.

Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten

Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16 zeigen die Wärmeausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit des Prüfwinkels der PEI-C und PC-C-Proben. In Abbildung 6.15 sind die Ergebnisse der PC-C-Proben zu sehen. Dabei kann festgestellt werden, dass die Proben in der jeweiligen Prüfrichtung vergleichbare Wärmeausdehnungen aufweisen. Abbildung 6.16 zeigt die Ergebnisse für das PEI-C. Auch hier kann analog zum PC-C festgestellt werden, dass die Mittelwerte der Proben nur geringfügig voneinander abweichen. Auch hier ist keine Beeinflussung der Wärmeausdehnung durch die Variation der Verarbeitungsparameter erkennbar.

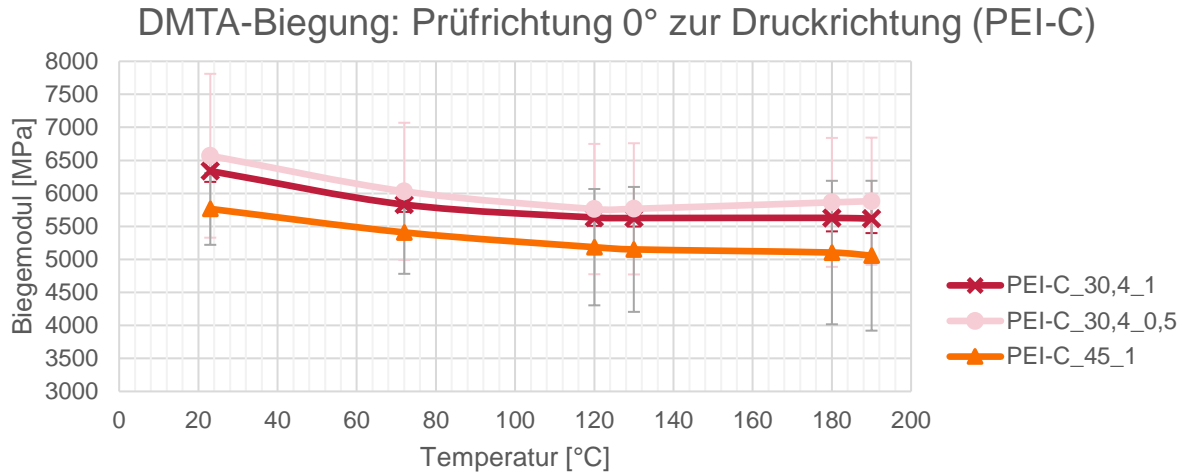


Abbildung 6.14: Biegemodul in Abhängigkeit der Temperatur für 0° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PEI-C_30,4_1, PEI-C_30,4_0,5 und PEI-C_45_1.

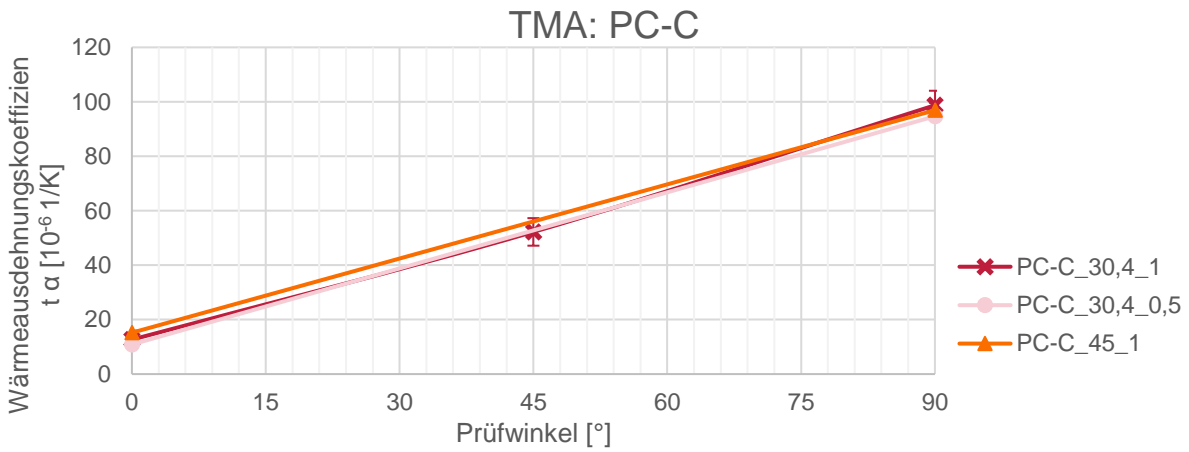


Abbildung 6.15: Wärmeausdehnungskoeffizient α für PC-C_30,4_1, PC-C_30,4_0,5 und PC-C_45_1 in Abhängigkeit des Prüfwinkels.

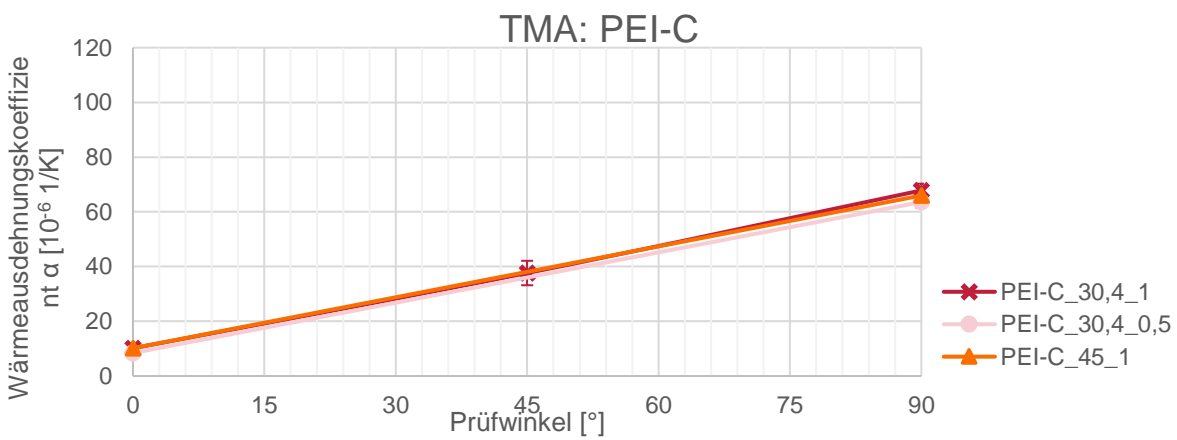


Abbildung 6.16: Wärmeausdehnungskoeffizient α für PEI-C_30,4_1, PEI-C_30,4_0,5 und PEI-C_45_1 in Abhängigkeit des Prüfwinkels.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Variation der Fertigungsparameter weder beim PC-C noch beim PEI-C zu keiner signifikanten Änderung der Wärmeausdehnung geführt hat. Somit muss bei den angedachten Werkzeugen keine Beeinflussung des Verzugs durch die Verarbeitung befürchtet werden.

Bestimmung der Zugfestigkeit

Abbildung 6.17 und Abbildung 6.18 zeigen die Ergebnisse für die Zugfestigkeit der verschiedenen Materialien. In Abbildung 6.17 sind die Ergebnisse der PC-C-Proben abgebildet. Dabei kann anhand der Proben PC-C_45_1 der Einfluss der Schneckendrehzahl und anhand der Proben PC-C_30,4_0,5 der Einfluss der Schichthöhe bewertet werden.

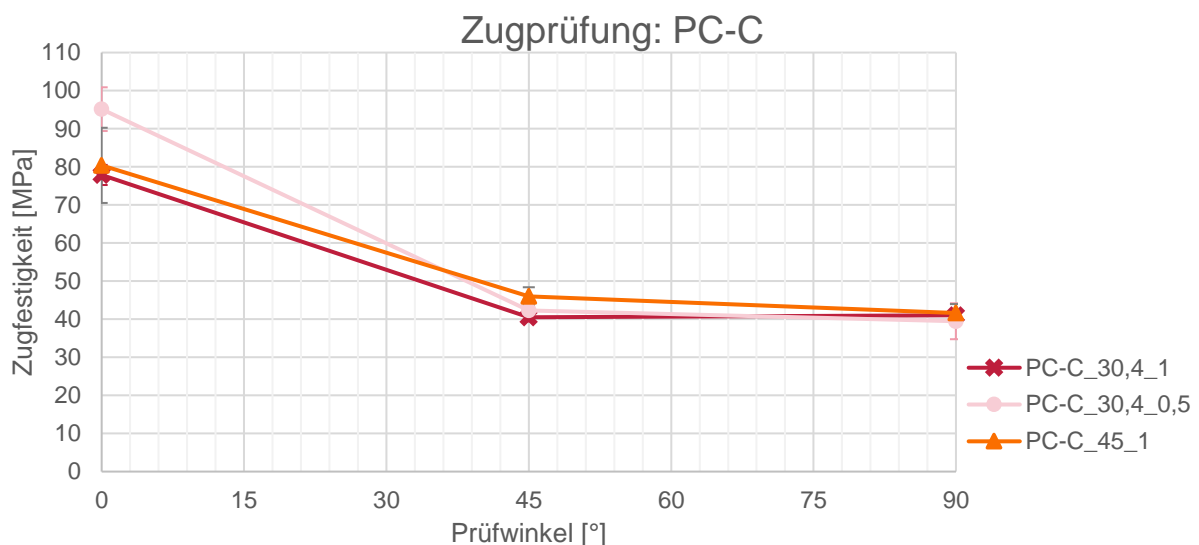


Abbildung 6.17: Zugfestigkeit für PC-C_30,4_1, PC-C_30,4_0,5 und PC-C_45_1 in Abhängigkeit von der Prüfrichtung.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Verringerung der Schichthöhe auf 0,5 mm eine Erhöhung der Zugfestigkeit in 0°-Richtung um 18 % entstanden ist. Die Schneckendrehzahl scheint bei der 0°-Prüfrichtung hingegen keine signifikante Änderung bewirkt zu haben. Dagegen scheint die Schneckendrehzahl auf die Zugfestigkeit in 45° eine Verbesserung zu bewirken. Durch den Abgleich der Ergebnisse der PC-C_30,4_1 mit den PC-C_45_1 bei der Prüfrichtung 45° wird deutlich, dass durch die höhere Schneckendrehzahl auch eine Erhöhung der Festigkeit um 11 % entstanden ist. Bei der Prüfrichtung 90° lässt sich hingegen kein signifikanter Unterschied zwischen den Proben erkennen.

Abbildung 6.18 veranschaulicht die Zugfestigkeiten der PEI-C-Proben. Bei der Betrachtung der Abbildung fällt zunächst auf, dass die PEI-C-Proben im Allgemeinen eine höhere Standardabweichung aufweisen als die zuvor beschriebenen PC-C-Proben. Dabei kann bei den PEI-C_45_1 bei einem Prüfwinkel von 45° eine Standardabweichung von 20 % verzeichnet werden. Des Weiteren weisen die PEI-C_30,4_0,5 Proben bei dem Prüfwinkel 90° mit einer Standardabweichung von 42 % die höchste Standardabweichung aller geprüften Proben auf. Auch kann bei den PEI-C_30,4_0,5 bei einem Prüfwinkel von 90° mit 24 MPa die geringste Zugfestigkeit aller geprüften Proben festgestellt werden.

Vor allem in 90°-Richtung zeigen die Ergebnisse der Proben eine starke Differenz. So hat die Erhöhung der Drehzahl zu einer Verringerung der Festigkeit um 18 % geführt. Die Verringerung der Schichthöhe hat sogar zu einer Verringerung um 63 % beigetragen.

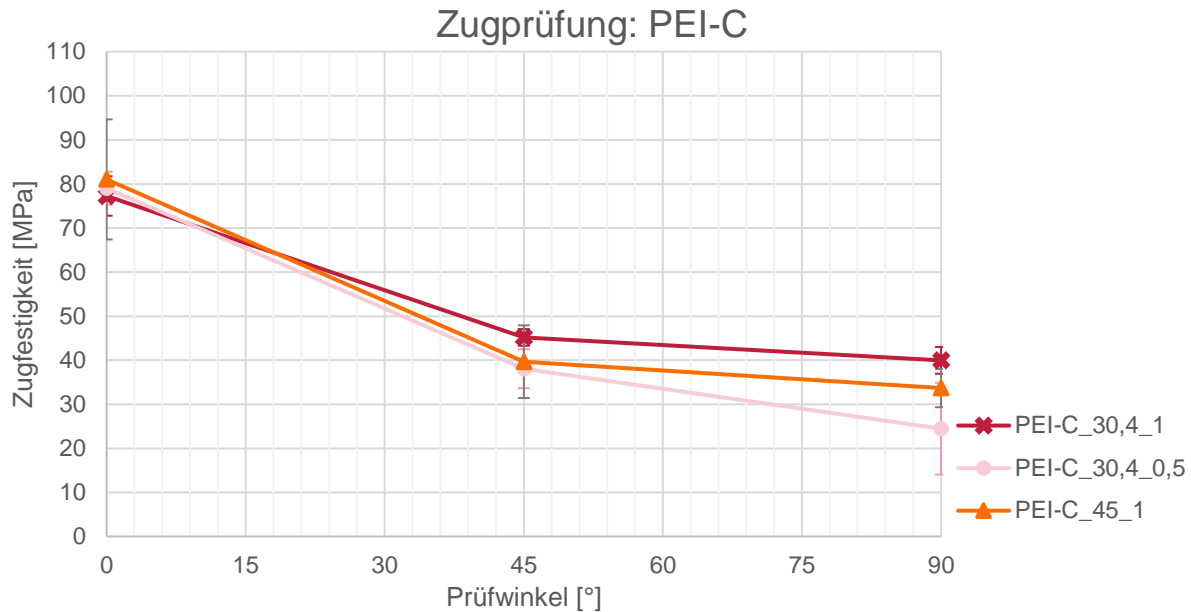


Abbildung 6.18: Zugfestigkeit für PEI-C_30,4_1, PEI-C_30,4_0,5 und PEI-C_45_1 in Abhängigkeit von der Prüfrichtung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beim PC-C die Verringerung der Schichthöhe zu einer Erhöhung der Festigkeit in 0°-Richtung geführt hat. Wobei nicht ausgeschlossen werden kann, dass dies auf einen Fehler beim Vermessen der Proben beruht, da aufgrund der Literatur nicht zu erwarten ist, dass die Schichthöhe in 0°-Richtung einen Einfluss auf die Festigkeit hat [12].

Die Ergebnisse des PEI-C scheinen hingegen eindeutiger zu sein. So deuten vor allem die Ergebnisse in 90°-Richtung darauf hin, dass die Schichtanbindung eine signifikante Schwachstelle dieses Materials darstellt [42]. Dies kann dazu führen, dass die Werkzeuge, die aus PEI-C gefertigt werden, empfindlicher auf Belastungen reagieren.

Es wird deutlich, dass die Verarbeitungsparameter einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils haben können. Eine genauere Betrachtung der Werkstoffe kann dazu beitragen ein tieferes Verständnis für die Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung aufzubauen. Dabei muss betrachtet werden wie die Änderung der Drehzahl und der Schichthöhe Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften nimmt.

6.2 Einflussfaktoren mechanischer Schwankungen

6.2.1 Betrachtung der Einflussfaktoren

Um den Ursprung der Schwankung der mechanischen Eigenschaften genauer zu bewerten, wurde das PC-C im Folgenden genauer betrachtet. Hierzu wurden vom PC-C_30,4_1; PC-C_30,4_0,5 und vom PC-C_45_1 Materialproben entnommen. Dabei sollten die Haupteinflussfaktoren, die zu einer Schwankung der Eigenschaften führen können, betrachtet werden. So wurden Porosität, Faserlänge, Faserwinkel und Faser-Matrix-Haftung berücksichtigt, da diese sich gut mithilfe der Mikroskopie bewerten lassen [22, 8, 16]. Die Schichtanbindung wurde zunächst vernachlässigt.

Für die Bestimmung der Faserlänge wurde eine Veraschung durchgeführt. Dazu wurde eine thermogravimetrische Analyse (TGA) verwendet. Für die Bestimmung des Faserwinkels sowie der

Porosität wurden Proben eingebettet und anschließend geschliffen und poliert. Für die Beurteilung der Faser-Matrix-Haftung wurden die Bruchbilder der Zugproben betrachtet und bewertet.

Bestimmung der Faserwinkelverteilung

Abbildung 6.19 veranschaulicht die Verteilungssumme der Faserwinkel der Proben PC-C_30,4_1, PC-C_30,4_0,5 und PC-C_45_1. Die Verteilungssummenkurve entsprechen dabei die einer um den Winkel 0° symmetrischen Gaußverteilung. Der Verlauf der Summenverteilung von PC-C_45_1 lässt vermuten, dass hier eine breitere Verteilung vorliegt.

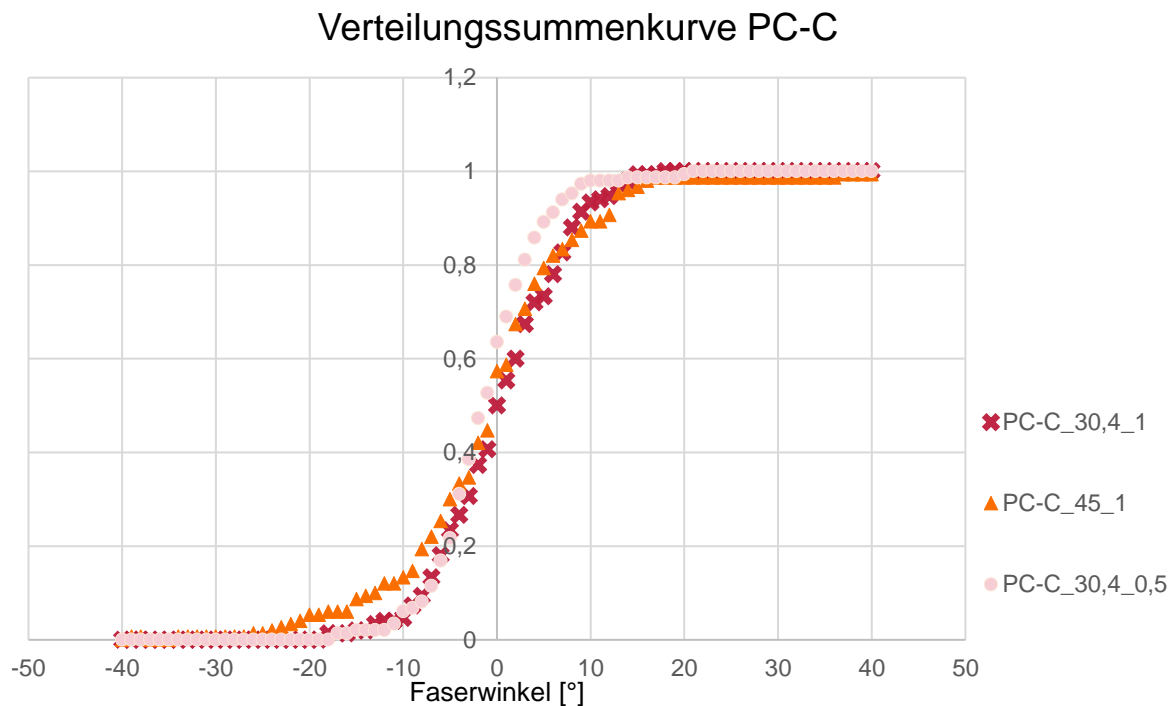


Abbildung 6.19: Verteilungssumme für PC-C_30,4_1, PC-C_45_1, PC-C_30,4_0,5.

Dass die Faserorientierungen einer um 0° symmetrischen Gaußverteilung folgen, ist plausibel und wird auch von der Literatur bestätigt [22]. Allerdings ist nach der Literatur eine Beeinflussung der Faserwinkel durch die Stranghöhe zu erwarten [22, 35]. Dies kann durch die Ergebnisse nicht eindeutig bestätigt werden. Die Abweichung zu Literatur könnte daraus folgen das die Stranghöhe in den Versuchen nicht stark genug variiert wurde.

Abbildung 6.20 zeigt den Anteil der Poren der verschiedenen Proben. Deutlich zu erkennen ist eine Erhöhung der Porosität mit steigender Drehzahl. Dies wird aus dem Vergleich der Proben PC-C_30,4_1 mit PC-C_45_1 deutlich. So hat die Erhöhung der Drehzahl zu einer Steigerung der Porosität um ca. 4 % geführt.

Bestimmung der Porenanteils

Im Vergleich dazu scheint die Verringerung der Schichthöhe keinen signifikanten Einfluss auf die Poren zu haben. So hat die Verringerung der Schichthöhe lediglich zu einer Verringerung des Porenanteils um 0,5 % geführt.

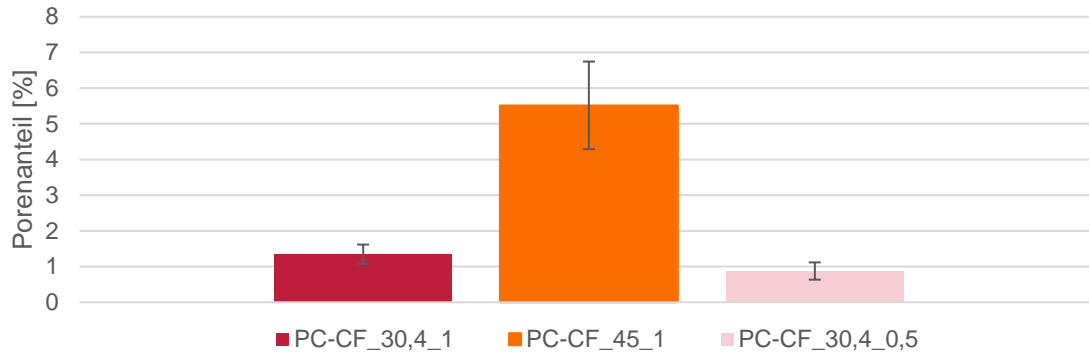


Abbildung 6.20: Porenanteil für PC-C_30,4_1, PC-C_45_1, PC-C_30,4_0,5.

Die Ergebnisse der Porosität zeigen, dass eine Abhängigkeit der Porosität von der Schneckendrehzahl besteht. Dabei kann eine Zunahme der Porosität mit der Geschwindigkeit festgestellt werden, was sich auch mit bereits bestehenden Ergebnissen deckt [23]. Für die Entstehung dieser Poren können Gasaustritt sowie Wechselwirkungen zwischen Faser und Matrix benannt werden [42, 23]. Die erzeugten Poren können dabei ebenfalls zu einer Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften beitragen, da sie zu Spannungskonzentrationen führen [42, 16].

Bestimmung der Faserlängenverteilung

In Abbildung 6.21 sind die mittleren Faserlängen der verschiedenen PC-C-Proben zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass durch die Verarbeitung des Granulats eine Faserverkürzung stattfindet. Besonders auffällig ist hierbei, dass zwischen den PC-C_30,4_1 Proben und den PC-C_30,4_0,5 Proben kein signifikanter Unterschied in der Faserlänge erkennbar ist. So kann lediglich eine Differenz zwischen den mittleren Faserlängen von 7 μm identifiziert werden.

Bei den Proben PC-C_45_1 scheint eine Faserverkürzung stattgefunden zu haben. So ist beim Vergleich zwischen PC-C_30,4_1 und PC-C_45_1 eine Differenz der mittleren Faserlänge von 33 μm erkennbar. Simultan ist bei den PC-C_45_1 Proben auch eine Verringerung der Standardabweichung um 17 μm auszumachen. Die PC-C_30,4_1 Proben und PC-C_30,4_0,5 Proben weisen hingegen eine Standardabweichung von 38 μm und 34 μm auf.

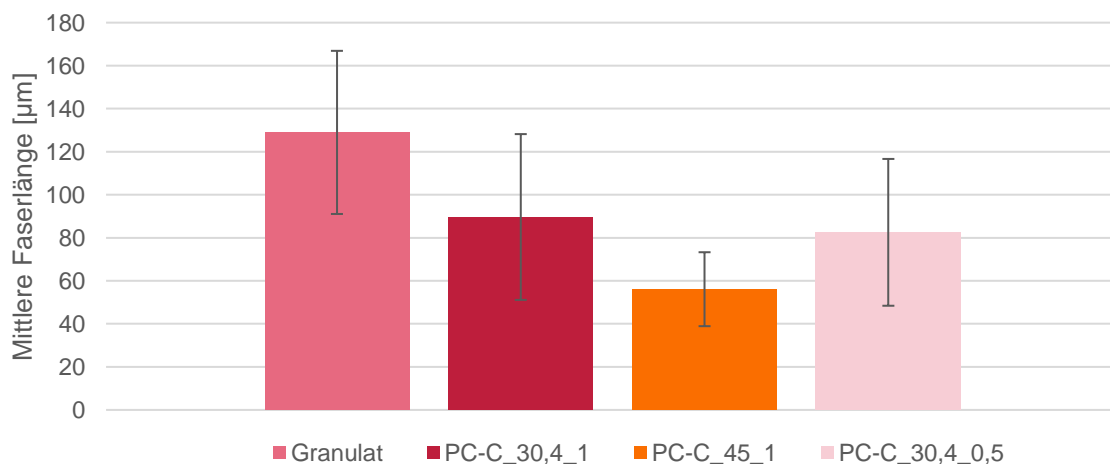


Abbildung 6.21: Mittlere Faserlänge der verschiedenen PC-C-Proben.

Die Verarbeitung der Werkstoffe führt entsprechend zu einer Verringerung der Faserlängen. Diese Verkürzung resultiert unter anderem aus der Scherspannung, die während des Verarbeitungsprozesses auf die Fasern wirkt, sowie Faser-Faser-Wechselwirkungen, die ebenfalls zu einem Bruch der Fasern führen [7, 44, 64, 49]. Zu beachten ist hierbei, dass die Scherung vor allem eine Funktion der Schneckendrehzahl ist [2]. Dies ist auch anhand der Ergebnisse zu erkennen. So weisen die PC-C_45_1 Proben eine geringere mittlere Faserlänge als die PC-C_30,4_1 Proben und die PC-C_30,4_0,5 Proben auf. Die PC-C_30,4_1 und PC-C_30,4_0,5 weisen dabei ähnliche Faserlängen auf, was den signifikanten Einfluss der Schneckendrehzahl unterstreicht.

Bestimmung der Faser-Matrix-Haftung

Abbildung 6.22 zeigt das Bruchbild der Zugproben PC-C_30,4_1. Zu erkennen ist, dass Fasern mit einer Länge von mehr als 50 μm aus der Oberfläche herausragen. In Abbildung 6.22 b) lassen sich Fasern erkennen, die sogar mit mehr als 100 μm aus der Oberfläche herausstehen.

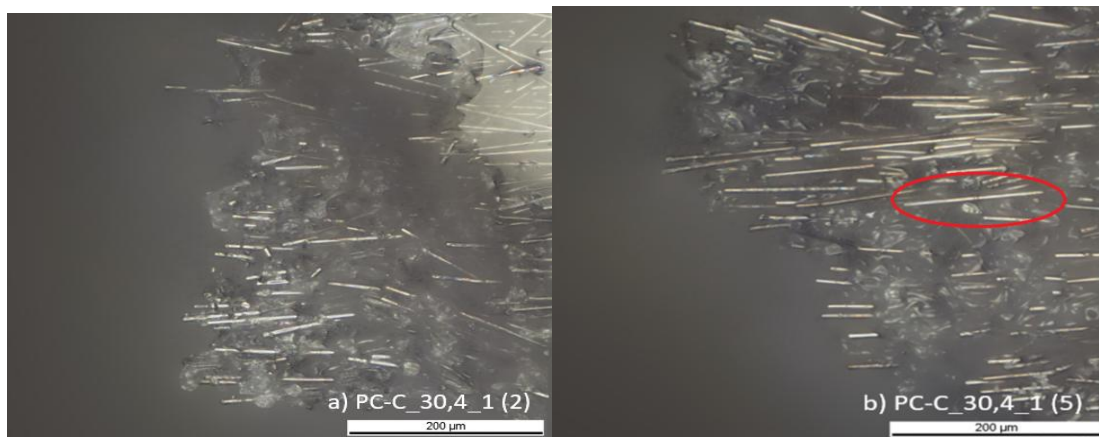


Abbildung 6.22: Bruchbild der Zugproben PC-C_30,4_1 a) PC-C_30,4_1 (2); b) PC-C_30,4_1 (5).

Abbildung 6.23 zeigt das Bruchbild der Zugproben PC-C_45_1. Auch hier ist zu erkennen, dass Fasern aus der Bruchfläche ragen. Wie auch schon bei Abbildung 6.22 sind auch hier Fasern zu erkennen, die länger als 50 μm sind.

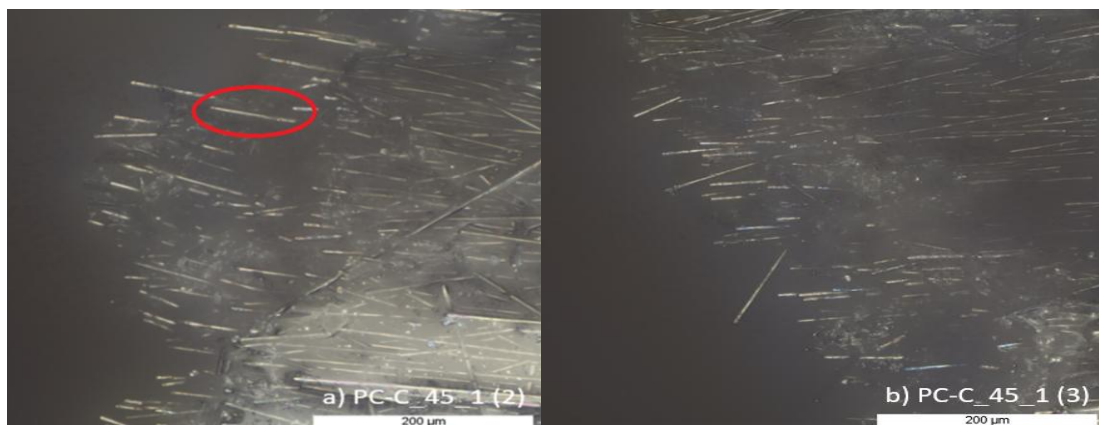


Abbildung 6.23: Bruchbild der Zugproben PC-C_45_1 a) PC-C_45_1 (2); b) PC-C_45_1 (3).

Abbildung 6.24 zeigt das Bruchbild der Zugproben PC-C_30,4_0,5. Auch hier ist ein analoges Bild wie in den vorangegangenen Abbildungen auszumachen. So sind Fasern zu erkennen, die mit einer Länge von 50 μm bis 100 μm herausragen.

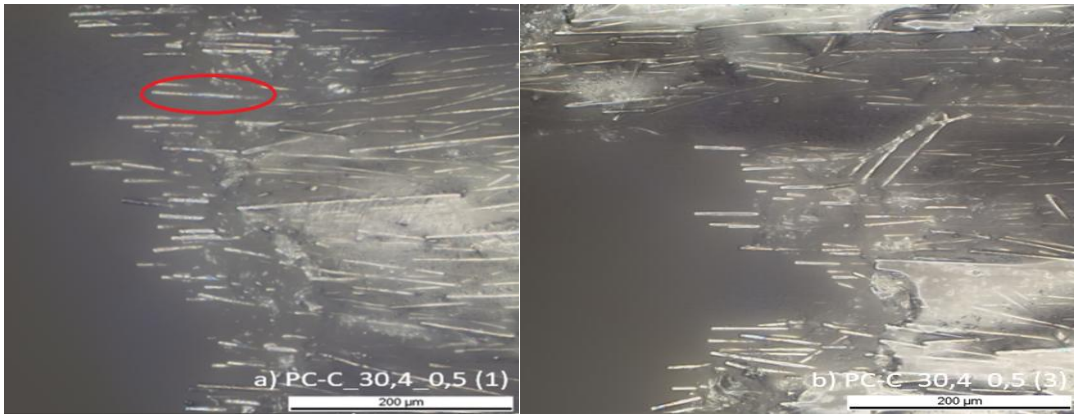


Abbildung 6.24: Bruchbild der Zugproben PC-C_30,4_0,5 a) PC-C_30,4_0,5 (1); b) PC-C_30,4_0,5 (3).

Die Faser-Pullouts, die allen Abbildungen zu erkennen sind, sind ein Indiz dafür, dass bei dem Werkstoff eine schlechte Faser-Matrix-Haftung vorliegt. Ein Hinweis liefert dabei die Länge der Fasern, die aus der Bruchfläche herausragen [15, 44]. Eine schlechte Faser-Matrix-Haftung kann dabei sowohl Zugfestigkeit als auch E-Modul beeinflussen [22, 29].

Es lässt sich abschließend feststellen, dass sowohl Faserlänge, Faserorientierung, Porosität als auch Faser-Matrix-Haftung eine Schwankung der Kennwerte bedingen können. Wobei eben die Schneckendrehzahl eine besondere Relevanz besitzt. Somit sollte der Fokus im Nachfolgendem vor allem auf die Schneckendrehzahl gelegt werden, da sie nach den erhobenen Ergebnissen eine signifikante Beeinflussung der Faserlänge sowie der Porosität bewirkt. Diese Erkenntnisse können dazu genutzt werden eine Materialmodell zu erstellen, um die Prozessparameter-Eigenschaftsbeziehung zu beschreiben.

6.2.2 Modellbildung

Zunächst wurde über eine Literaturrecherche grundlegende Zusammenhänge erarbeitet, die eine Material-Modellierung ermöglichen. So wurde zunächst festgestellt, dass eine Betrachtung von Faserlänge, Porosität und Faserorientierung eine grundlegende Beschreibung des extrudierten Materials ermöglichen sollte [36, 36, 21, 40]. Die erhobenen Daten aus Kapitel 6.2.1 wurden als Eingangsparameter für die Berechnung genutzt. Dabei wurden die Mischungsregel für kurzfaserverstärkte Kunststoffe sowie die Plattentheorie für die Modellierung der Zugmodule in 0° und 90° verwendet [41, 36, 2, 33]. Der grundlegende Aufbau der Modellierung ist in Abbildung F.1 im Anhang dargestellt. Das Zugmodul in 0° und 90° -Richtung zur Druckrichtung wurde anschließend mithilfe des Modells berechnet und mit den Ergebnissen der jeweiligen Proben aus der DMTA-Zugprüfung bei 23° verglichen.

In Abbildung 6.25 sind die Ergebnisse aus der Simulation und aus der DMTA-Zugprüfung für die Proben PC-C 30,4_1 gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass in 0° -Richtung lediglich eine Abweichung von 8 % zwischen Simulation und Messwert besteht. Allerdings ist in 90° eine größere Abweichung zu detektieren.

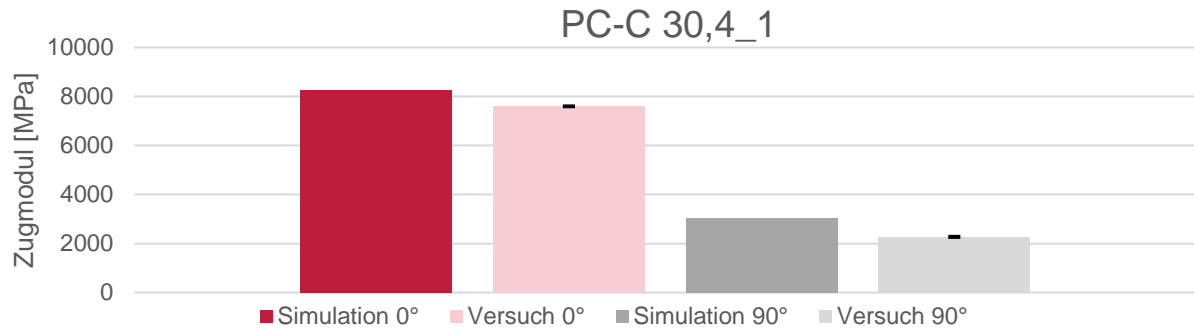


Abbildung 6.25: Vergleich Simulation mit den Ergebnissen der DMTA-Zug für die Probe PC-C 30,4_1.

Abbildung 6.26 visualisiert die Ergebnisse der Proben PC-C 30,4_0,5. Auch hier werden die realen Ergebnisse aus der DMTA-Zugprüfung mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Der Vergleich zeigt, dass in 0°-Richtung die Differenz zwischen Simulation und Messung lediglich 5 % beträgt. In 90°-Richtung kann auch hier wieder eine höhere Differenz ausgemacht werden.

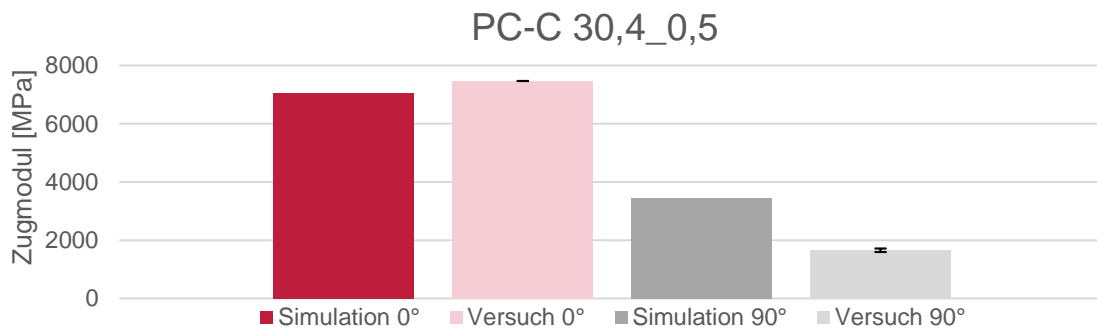


Abbildung 6.26: Vergleich Simulation mit den Ergebnissen der DMTA-Zug für die Probe PC-C 30,4_0,5.

Abbildung 6.27 veranschaulicht die Ergebnisse der Proben PC-C 45_1 aus der Prüfung und stellt sie der Simulation gegenüber. Zu erkennen ist, dass in 0°-Richtung eine Abweichung von 16 % besteht. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem in 90°-Richtung die größte Abweichung zwischen Messergebnissen und Simulation vorherrscht. Dies deutet zunächst darauf hin, dass ein Faktor vernachlässigt wurde, der in 90°-Richtung einen dominanten Einfluss hat. Allem voran kann hierbei die Schichtenanbindung angeführt werden. Diese kann als Schwachstelle im System fungieren [28, 42, 37].

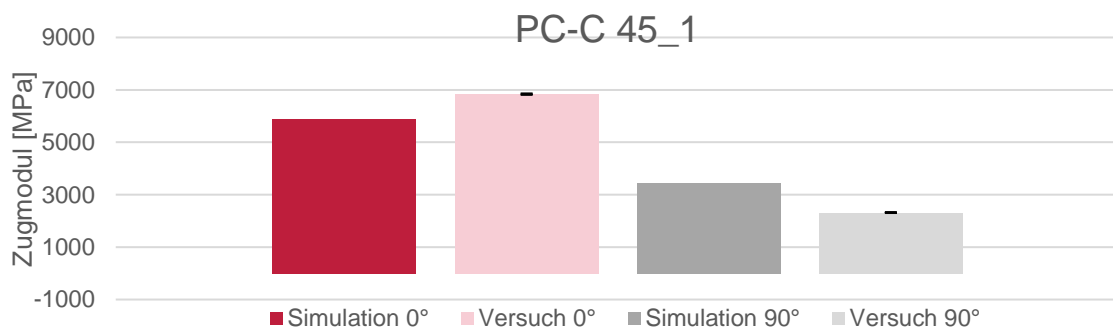


Abbildung 6.27: Vergleich Simulation mit den Ergebnissen der DMTA-Zug für die Probe PC-C 45_1

In 0°-Richtung sind die Abweichungen im Allgemeinen gering. Allerdings muss angemerkt werden, dass vor allem bei der Proben PC-C 45_1 eine stärkere Abweichung zu verzeichnen ist. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass Vereinfachung, wie das Verwenden einer mittleren Faserlänge zu Berechnungsfehlern geführt hat [22]. Auch könnte eine Korrelation zwischen Faserlänge und -winkel bestehen, die auch nicht genauer im Modell berücksichtigt wurde [3].

Neben den genannten kann auch eine genaue Charakterisierung des Druckers nötig sein, um den Einfluss von diversen Prozessparametern auf Faserlänge, Faserwinkel sowie Porosität zu bewerten. Auch sollte eine Berechnung der Eigenschaften der Einzelmaterialien vorgeschaltet werden, um nicht auf die Zuarbeiten des Materialherstellers angewiesen zu sein und nur mithilfe des Datenblattes zu arbeiten. In Abbildung F.2 im Anhang sind in einem Flussdiagramm die nötigen Weiterentwicklungen aufgezeigt. Im Rahmen des Projektes konnten jedoch nicht alle Weiterentwicklungen vorgenommen werden. Es wurde sich zunächst auf die Auswirkung der Drehzahl und der Strangumlenkung auf den Faserwinkel, die Faserlänge sowie die Porosität beschränkt.

Genauere Bewertung des Einflusses der Schneckendrehzahl und der Strangumlenkung

Um den Einfluss der Schneckendrehzahl und der Strangumlenkung auf die Faserlänge, den Faserwinkel und die Porosität zu bewerten, wurden Proben aus dem Druckprozess entnommen. Für die Betrachtung wurden das PC-C sowie das PC-G genutzt, um den Einfluss der Drehzahl und der Umlenkung auf die unterschiedlichen Fasermaterialien zu bewerten. Zu diesem Zweck wurde Material bei verschiedenen Drehzahlen in die Luft extrudiert sowie auf den Tisch abgelegt. Dies sollte es ermöglichen, auch den Einfluss der Strangumlenkung beim Druckprozess zu bewerten. Eine skizzenhafte Darstellung der Probenentnahme ist in Abbildung 6.28 zu sehen.

Ein Teil der Proben wurde eingebettet und ein Schlibfbild erzeugt. Mithilfe der Schlibfbilder sollten die Porosität und der Faserwinkel bestimmt werden. Des Weiteren wurden Proben sowie Granulat unter Stickstoffatmosphäre in einer TGA verascht, um die Faserlänge zu ermitteln. Das Granulat wurde mitbetrachtet um einen Wert für 0 U/min zu erhalten. Die Proben wurden nach der Präparation mikroskopisch untersucht.

Bestimmung der Faserlängenänderung in Abhängigkeit der Drehzahl

Abbildung 6.29 und Abbildung 6.30 zeigen die Faserlängenänderungen in Abhängigkeit von der Drehzahl. Abbildung 6.29 veranschaulicht dabei die Ergebnisse für das PC-C und stellt dabei die

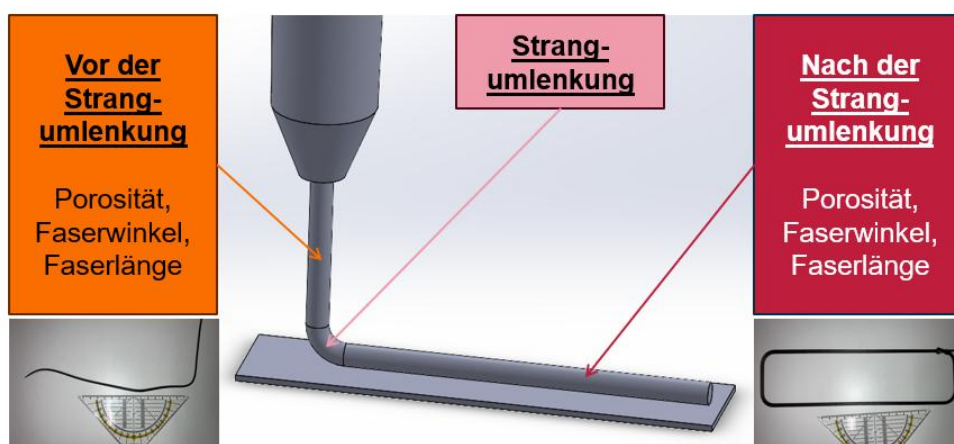


Abbildung 6.28: Probenentnahme für die Beurteilung der Drehzahl.

Ergebnisse vor und nach der Strangumlenkung gegenüber. Die Messungen zeigen, dass die Mittelwerte der Faserlänge vor der Strangumlenkung und nach der Strangumlenkung in der Standardabweichung der jeweiligen Proben liegen. Es kann anhand des Diagramms eine Abnahme der mittleren Faserlänge in Abhängigkeit von der Drehzahl festgestellt werden. Bei dem Vergleich zwischen den 0 U/min und den 60 U/min kann vor der Strangumlenkung eine Reduzierung der Faserlänge von 21 % festgestellt werden. Nach der Strangumlenkung ist eine Reduzierung von 25 % auszumachen. Außerdem kann eine Reduzierung der Standardabweichung mit zunehmender Drehzahl erkannt werden. Ein analoges Ergebnis lässt sich nach der Strangumlenkung erkennen. Hier ist bei einer Drehzahl von 60 U/min eine Reduzierung der Standardabweichung auf 21,38 μm zu verzeichnen. In Abbildung 6.30 sind die Ergebnisse für die Faserlängenmessung des PC-G zu sehen. Auch hier ist eine Reduzierung der Faserlänge mit steigender Drehzahl zu erkennen. Aufgrund der hohen Standardabweichungen kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen vor der und nach der Strangumlenkung festgestellt werden. Der Vergleich zwischen 0 U/min und 60 U/min kann vor der Strangumlenkung lässt eine Reduzierung der Faserlänge von 31 % erkennen. Nach der Strangumlenkung ist eine Reduzierung von 26 % zu verzeichnen.

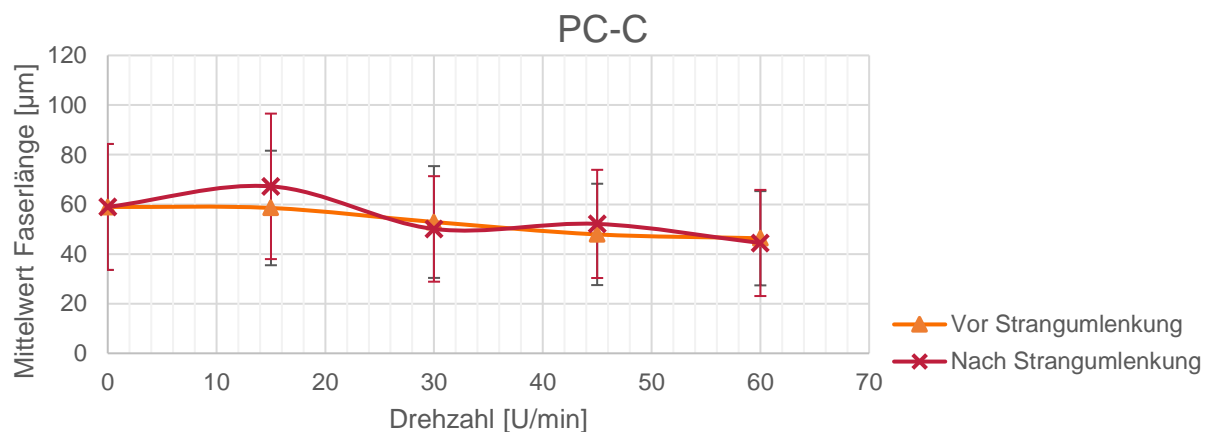


Abbildung 6.29: Faserlänge in Abhängigkeit von der Schneckenwahl des PC-C. Gegenüberstellung der Ergebnisse vor der Strangumlenkung und nach der Strangumlenkung.

Analog zum PC-C ist auch beim PC-G eine allgemeine Reduzierung mit zunehmender Drehzahl wahrzunehmen. So kann bei 0 U/min eine Standardabweichung von 106,51 μm festgestellt werden. Bei einer Drehzahl von 60 U/min fällt diese Standardabweichung vor der Strangumlenkung auf 58,5 μm ab. Ein ähnliches Ergebnis ist auch bei 60 U/min nach der Strangumlenkung zu erkennen. Hier beträgt die Standardabweichung 71,8 μm .

Im Allgemeinen ist sowohl bei dem PC-C als auch beim PC-G eine Reduzierung der Faserlänge in Abhängigkeit von der Drehzahl zu verzeichnen. Simultan ist auch eine Reduzierung der Standardabweichung mit zunehmender Drehzahl zu erkennen. Die Ergebnisse werden von der Literatur gestützt [9]. Durch die Erhöhung der Drehzahl findet eine Steigerung der Scherspannungen statt. Die Scherspannungen bewirken dabei ein Knicken der Fasern nach Euler [18]. Das Knicken wiederum bewirkt einen Bruch der Fasern [38, 18]. Da das Brechen der Fasern aus dem Knicken resultiert, ist nicht nur eine Material-, sondern auch eine Längenabhängigkeit des Versagens gegeben [24]. Somit existiert ein Grenzwert, gegen den der Versagensmechanismus tendiert [11, 20]. Laut Literatur sollte dieser Grenzwert die kritische Faserlänge sein [20]. Die Ergebnisse zeigen nicht, dass ein solcher Grenzwert erreicht wurde, daher scheinen weitere Versuche notwendig.

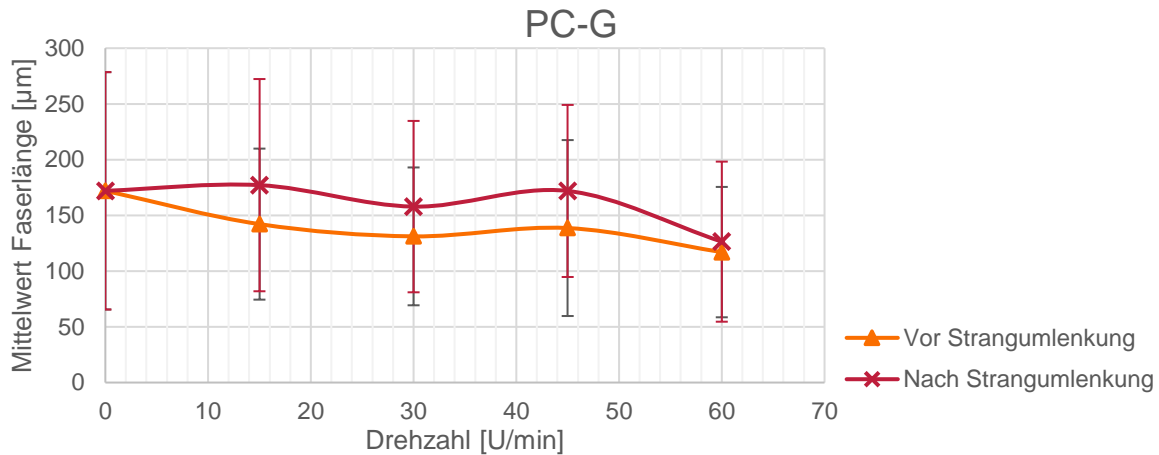


Abbildung 6.30: Faserlänge in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl des PC-G. Gegenüberstellung der Ergebnisse vor der Strangumlenkung und nach der Strangumlenkung.

Bei PC-C als auch beim PC-G kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Faserlängen vor und nach der Strangumlenkung erkannt werden. Laut Literatur wäre eine weitere Verkürzung der Fasern durch die Strangumlenkung zu erwarten gewesen [28, 23]. Da allerdings der Schädigungsprozess längenabhängig ist, könnten die Ergebnisse darauf hindeuten, dass die Fasern bereits im Extruder so stark verkürzt wurden, dass die Umlenkung keinen signifikanten Einfluss hatte.

Bestimmung der Faserwinkel in Abhängigkeit der Drehzahl

Abbildung 6.31 und Abbildung 6.32 zeigen die Ergebnisse der Faserwinkelmessungen. Wobei der Mittelwert der Faserwinkel sowie die Standardabweichungen in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl dargestellt werden. Dabei werden die Ergebnisse vor und nach der Strangumlenkung miteinander verglichen. Abbildung 6.31 zeigt die Ergebnisse des PC-C. Zu erkennen ist, dass die Ergebnisse vor und nach der Strangumlenkung nah 0° sind. Dabei sind zwischen den Ergebnissen vor und nach der Strangumlenkung keine signifikanten Unterschiede auszumachen. Allerdings ist zu erkennen, dass die Standardabweichungen nach der Strangumlenkung geringer sind als vor der Strangumlenkung. So ist vor der Strangumlenkung eine Standardabweichung von $7,3^\circ$ bis

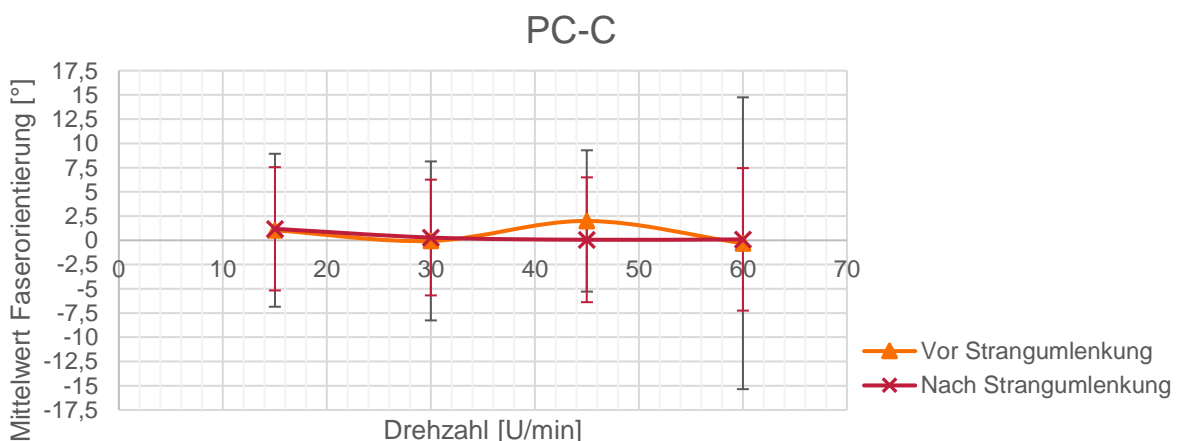


Abbildung 6.31: Faserwinkel in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl des PC-C. Gegenüberstellung der Ergebnisse vor der Strangumlenkung und nach der Strangumlenkung.

15,1° festzustellen. Nach der Strangumlenkung beträgt Standardabweichung 6° bis 7,4°. Somit wurde die Standardabweichung um bis zu 51 % reduziert. Der Mittelwert des Faserwinkels scheint sich mit steigender Drehzahl 0° weiter anzunähern. Dies ist vor allem bei den Ergebnissen nach der Strangumlenkung zu erkennen.

Abbildung 6.32 zeigt die Ergebnisse des PC-G. Wie beim PC-C lassen sich analoge Ergebnisse auch für das PC-G formulieren. Auch hier kann erkannt werden, dass sich die Mittelwerte nahe 0° befinden. Außerdem kann kein signifikanter Unterschied der Ergebnisse vor und nach der Strangumlenkung ausgemacht werden. Wie schon beim PC-C gilt auch hier, dass die Strangumlenkung eine Reduzierung der Standardabweichung des Faserwinkels bewirkt hat. Analog zum PC-C kann auch beim PC-G vermutet werden, dass sich der Mittelwert des Faserwinkels mit steigender Drehzahl 0° annähert.

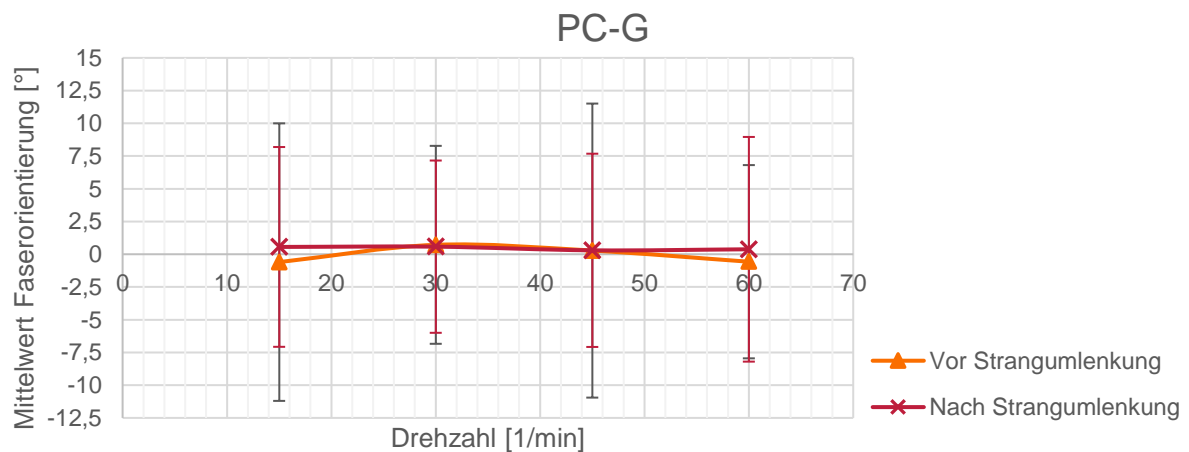


Abbildung 6.32: Faserwinkel in Abhängigkeit von der Extruderdrehzahl des PC-G. Gegenüberstellung der Ergebnisse vor der Strangumlenkung und nach der Strangumlenkung.

Für beide Materialien konnte ein mittlerer Faserwinkel von 0° erfasst werden, der sich mit der Literatur deckt. So gilt, dass die Fasern beim Druckprozess in Strangrichtung orientiert sind [22, 16]. Dass bei beiden Materialien eine reduzierte Standardabweichung nach der Strangumlenkung festgestellt wurde, könnte darauf schließen lassen, dass die Strangumlenkung eine Nachorientierung bewirkt. Allerdings könnte die Nachorientierung auch unabhängig von der Strangumlenkung stattgefunden haben und auf der Tischgeschwindigkeit beruhen. So könnte bei der Ablage des Strangs ein Verstecken des Strangs stattgefunden haben. Dieses Verstecken wiederum führt zu einer Nachorientierung der Fasern [35]. Somit kann nicht mit Gewissheit eine Wirkung der Strangumlenkung auf die Faserorientierung verifiziert werden.

Bestimmung der Porosität in Abhängigkeit der Drehzahl

Abbildung 6.33 und Abbildung 6.34 zeigen die Ergebnisse der Porosität in Abhängigkeit von der Drehzahl. Dabei werden die Ergebnisse vor und nach der Strangumlenkung gegenübergestellt. Abbildung 6.33 zeigt die Ergebnisse des PC-C. Zu erkennen ist, dass die Porosität mit steigender Drehzahl zunimmt. Dies ist sowohl vor als auch nach der Strangumlenkung zu erkennen. Vor der Strangumlenkung bei 15 U/min kann eine Porosität von 13,5 % festgestellt werden. Bei 60 U/min steigt diese auf 24,9 %. Analoges gilt für die Ergebnisse nach der Strangumlenkung. Nach der Strangumlenkung bei 15 U/min kann eine Porosität von 1,12 % ausgemacht werden. Bei 60 U/min steigt die Porosität auf 23,4 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Porosität vor der Strangumlenkung höher ist als nach der Strangumlenkung. Bei 15 U/min kann eine Differenz von ca. 12,4 % festgestellt werden. Bei 60 U/min kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen vor und nach der Strangumlenkung detektiert werden. Die Differenz beträgt lediglich 1,5 %. Die Standardabweichungen sind hier so groß, dass die Mittelwerte in den Standardabweichungen des jeweils anderen liegen. Somit ist kein bedeutender Unterschied auszumachen.

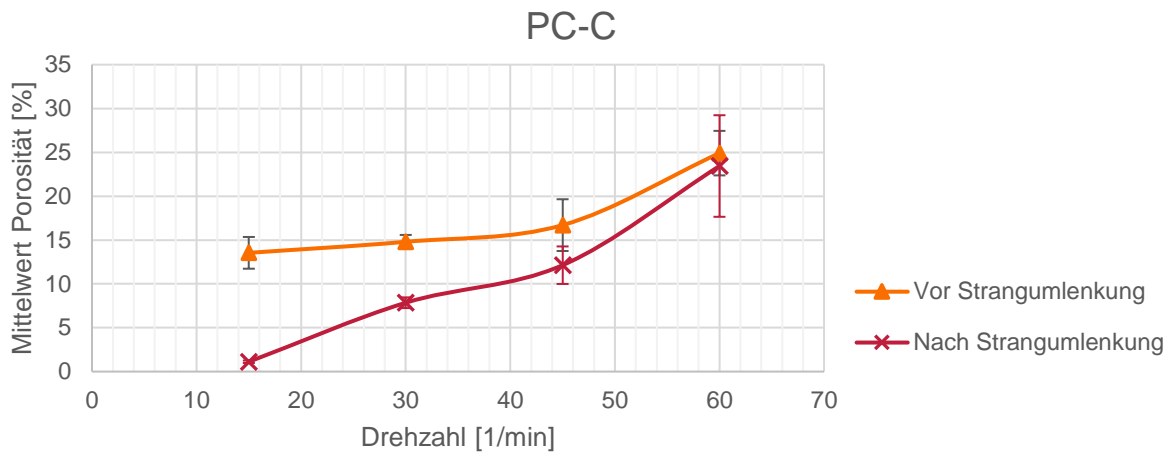


Abbildung 6.33: Porosität in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl des PC-C. Gegenüberstellung der Ergebnisse vor der Strangumlenkung und nach der Strangumlenkung.

Konträr dazu stehen die Ergebnisse des PC-G. Abbildung 6.34 zeigt die Ergebnisse des PC-G. Mit Ausnahme der 30 U/min kann hier kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen vor und nach der Strangumlenkung erkannt werden. Bei 15 U/min vor der Strangumlenkung kann eine Porosität von 4,9 % festgestellt werden. Bei gleicher Drehzahl beträgt die Porosität nach der Strangumlenkung 4,7 %. Ein ähnliches Ergebnis ist bei einer Drehzahl von 60 U/min festzustellen. Hier kann vor der Strangumlenkung eine Porosität von 4,8 % und nach der Strangumlenkung eine Porosität von 4,4 % festgestellt werden. Abweichend von dem Genannten sind bei 30 U/min eine Verringerung der Porosität vor der Strangumlenkung sowie eine Erhöhung der Porosität nach der Strangumlenkung zu erkennen.

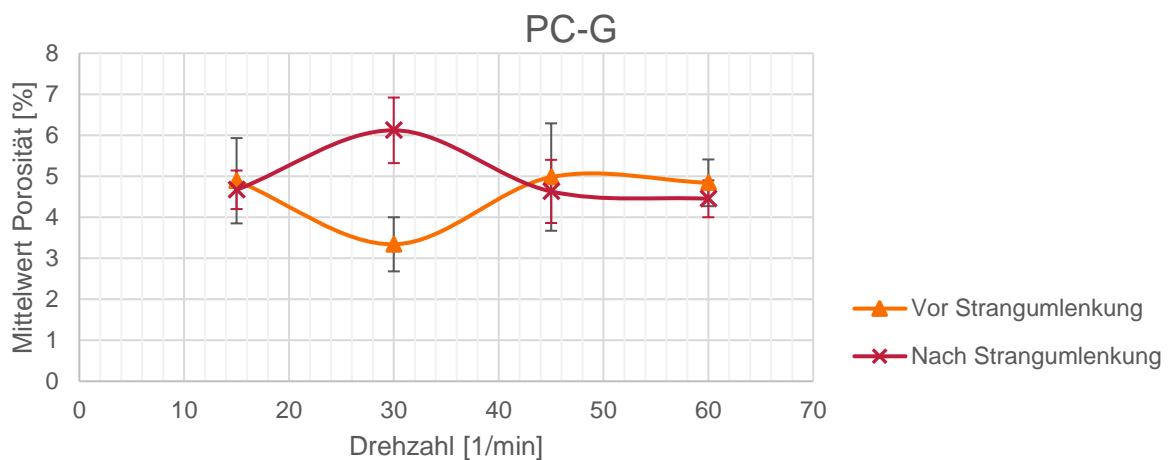


Abbildung 6.34: Porosität in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl des PC-G. Gegenüberstellung der Ergebnisse vor der Strangumlenkung und nach der Strangumlenkung.

Abschließend kann noch festgestellt werden, dass das PC-G im Vergleich zum PC-C gemeinhin eine geringere Porosität aufweist. So kann beim PC-G lediglich eine maximale Porosität von 6,12 % festgestellt werden. Beim PC-C beträgt der ermittelte Maximalwert der Porosität 24,9 %. Die Ergebnisse des PC-C zeigen, dass die Geschwindigkeit Einfluss auf die Porosität hat und eine höhere Schneckendrehzahl zu einer Erhöhung der Porosität führt. Dies wurde auch in anderen Arbeiten bereits festgestellt [23].

Der Unterschied zwischen den Ergebnissen vor und nach der Strangumlenkung könnte auf das Kompaktieren des Strangs zurückzuführen sein. Hierbei könnte durch den Abstand zwischen Düse und Tisch ein schmalerer Strang erzeugt worden sein, was zu einer Reduzierung der Porosität führt. So existieren bereits Arbeiten, die eine Korrelation zwischen einer geringeren Stranghöhe und einer geringeren Porosität erarbeitet haben [51, 32]. Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass die Steigerung der Porosität durch die Zunahme der Drehzahl einen größeren Einfluss zu haben scheint und nicht von der Verringerung der Strangdicke kompensiert werden kann.

Beim PC-G lassen sich die benannten Effekte nicht erkennen, was auf den Einfluss der Glasfasern zurückgeführt werden muss. Generell haben die Fasereigenschaften Einfluss auf die Eigenschaften des Verbundes, dabei auch auf die Viskosität der Schmelze [9, 38]. Die Viskosität wiederum beeinflusst die Bildung von Poren, wobei mit einer höheren Viskosität eine höhere Porosität einhergeht [44, 27]. Eine schlechte Faser-Matrix-Haftung kann die Porosität steigern [21].

Beim PC-G kann im Vergleich zum PC-C eine konstante Porosität festgestellt werden, die unabhängig von der Strangumlenkung oder der Drehzahl zu sein scheint. Auffällig sind lediglich die Ergebnisse bei 30 U/min. Hier muss eine Abweichung festgestellt werden. Dies könnte auf einen Messfehler oder Schwankungen in der Verarbeitung beruhen. Allerdings konnte dies im Rahmen des Projektes nicht weiter untersucht werden.

Die erarbeiteten Ergebnisse haben gezeigt, dass die Schneckendrehzahl beim PC-C vor allem die Porosität und Faserlänge beeinflusst. Beim PC-G hingegen konnte nur der Einfluss der Drehzahl auf die Faserlänge nachgewiesen werden. Die Porosität scheint bei diesem Material unabhängig von der Drehzahl zu sein. Ein Einfluss der Strangumlenkung auf die Faserorientierung wurde festgestellt. Allerdings kann das Ergebnis auch von der Tischgeschwindigkeit beeinflusst worden sein.

Die Ergebnisse können weiter dazu genutzt werden, ein Modell zu erstellen, um Faserverkürzung, Porosität und Faserwinkelverteilung im Vorfeld zu prognostizieren. Weitere Versuche sind nötig, um ein Modell mit ausreichender Genauigkeit zu erarbeiten.

6.3 Werkzeugherstellung

6.3.1 Vorversuch

Um die Eignung additiv gefertigter Werkzeuge für die Fertigung von Faserverbundstrukturen zu bewerten, wurden zunächst einfache Ablageversuche durchgeführt. Dazu wurden vom Projektpartner Fraunhofer IWU je 4 Werkzeugplatten (ebene Probekörper) aus den drei Materialien PC-G, PC-C, PEI-C hergestellt. Die Werkzeugplatten weisen die Abmessungen 19,8 cm x 15,5 cm auf. Exemplarisch ist in Abbildung 6.35 je ein Probekörper der betrachteten Materialien dargestellt. Mit diesen Werkzeugplatten wurden durch den Projektpartner INVENT ebene Probekörper hergestellt. Wesentliche Zielstellung der Versuche war dabei:

- die Sicherstellung der Dichtigkeit der Probekörper. Dieser Aspekt ist insbesondere für Werkzeuge und Fertigungsprozesse relevant, bei denen der Vakuumsack zur anschließenden Kompaktierung des Laminates direkt auf dem Werkzeug gesiegelt wird.
- die Sicherstellung der Materialverträglichkeit mit den für die Faserverbundfertigung typischen Materialien (z.B.: Fasern und Epoxidharz) und Hilfsstoffen (z.B.: Trennmittel, Siegelkit, Vakuumfolie usw.).
- die Sicherstellung der Trennbarkeit zwischen Werkzeug und Laminat, um ein dem Fertigungsprozess anschließenden Entformungsprozess zu gewährleisten.

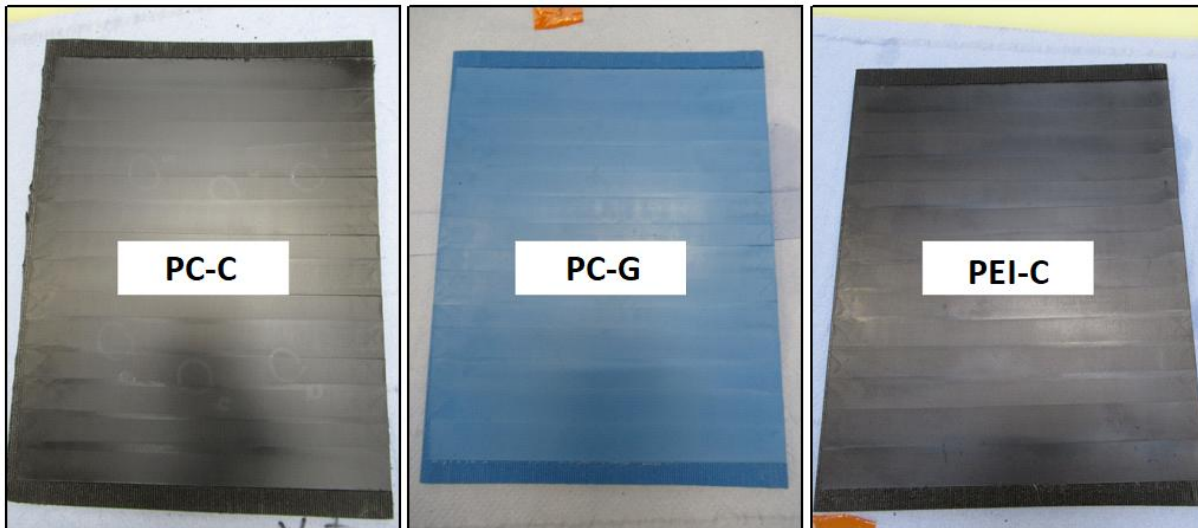


Abbildung 6.35: Vom Projektpartner Fraunhofer zu IWU zur Verfügung gestellte Probekörper für die Voruntersuchungen.

Die Dichtigkeit der Werkzeugplatten konnte mit einem einfachen Vakuumsack der direkt auf den Probekörpern gesiegelt wurde überprüft werden. Anschließend wurde ein Vakuum angelegt und der Druckverlauf nach dem Abklemmen der Vakuumpumpe gemessen. Die Messwerte bestätigten die Dichtigkeit der Werkzeuge.

Zur Sicherstellung der Materialverträglichkeit und der Trennbarkeit wurden Ablageversuche auf den Werkzeugplatten durchgeführt. Dazu wurden die Werkzeugplatten zunächst mit verschiedenen Trennmitteln eingetrennt. Als Trennmittel wurden zwei interne Standardtrennmittel sowie das Trennmittel Loctite Frekote 700 NC verwendet. Ergänzend dazu wurden Versuche mit dem Trennmittel Loctite Frekote 700 NC und einer vorherigen Oberflächenvorbehandlung mittels Formversiegler AIRTECH Toolpreg TP1 und TP2 durchgeführt.

Die sich dadurch ergebende Versuchsmatrix kann Abbildung 6.36. (unten) entnommen werden. Als Laminat wurden 4 Lagen Kohlefaserprepreg vom Typ ST94/RC200T/1270/42+-3%/S/S/L auf dem Werkzeug abgelegt. Nach dem Aufbau des Vakuumsackes wurde das Laminat in einem zweistufigen Autoklavprozess bei zunächst 80 °C für 120 Minuten und anschließend 120 °C für 180 Minuten bei einem Druck von 6 bar ausgehärtet. Anschließend wurden die ebenen Probekörper entformt.

Aufgrund von Frässpuren auf den Werkzeugplatten war eine Messung der Rauigkeiten mittels taktilen Oberflächenmessgerät nicht möglich. Weil sich die Oberflächenstruktur der Werkzeugplatten durch den Herstellungsprozess direkt auf die zu fertigenden Probekörper überträgt, wurde die sich

ergebende Oberflächenqualität der Probekörper nur qualitativ bewertet. Eine Messung der Rauigkeiten erfolgte nicht.

Für jede Konfiguration der Prüfmatrix stand eine Werkzeugplatte zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde eine qualitative Bewertung der Ergebnisse des Vorversuches durchgeführt. Die mit den Werkzeugplatten hergestellten Probekörper sind in Abbildung F.3 im Anhang dargestellt. Die Ergebnisse zur Versuchsauswertung sind in Abbildung 6.36 abgebildet. Die Bewertung erfolgte zwischen 1 (sehr gut) und 5 (sehr schlecht). Die vielversprechendsten Ergebnisse konnten mit dem Trennmittel Frekote 700 NC und einer dazugehörigen Oberflächenversiegelung mittels Toolpreg TP1 und TP2 erzielt werden.

Entformbarkeit				
Trennmittel	Trennmittel 1	Trennmittel 2	Loctite Frekote 700NC	Loctite Frekote 700NC + Toolpreg TP1 und TP2
	SN01	SN02	SN03	SN04
PC-C	1	1	1	1
PC-G	4	2	1	1
PEI-C	5	3	1	1

Materialrückstände				
Trennmittel	Trennmittel 1	Trennmittel 2	Loctite Frekote 700NC	Loctite Frekote 700NC + Toolpreg TP1 und TP2
	SN01	SN02	SN03	SN04
PC-C	2	4	2	1
PC-G	4	4	3	1
PEI-C	4	3	3	1

Oberfläche				
Trennmittel	Trennmittel 1	Trennmittel 2	Loctite Frekote 700NC	Loctite Frekote 700NC + Toolpreg TP1 und TP2
	SN01	SN02	SN03	SN04
PC-C	4	4	1,5	1
PC-G	5	5	3	1
PEI-C	3	1	1	1

Durchschnitt				
Trennmittel	Trennmittel 1	Trennmittel 2	Loctite Frekote 700NC	Loctite Frekote 700NC + Toolpreg TP1 und TP2
	SN01	SN02	SN03	SN04
PC-C	2,3	3,0	1,5	1,0
PC-G	4,3	3,7	2,3	1,0
PEI-C	4,0	2,3	1,7	1,0

Abbildung 6.36: Qualitative Bewertung der Vorversuche

6.3.2 Testwerkzeuge

Es wurde nun je ein Werkzeug aus PC-C und PEI-C hergestellt. Die Werkzeuge bildeten dabei ein Segment einer Halbschale des Flügels ab. Abbildung 6.38 visualisiert die Prozessabfolge. Zunächst wurden die beiden Werkzeuge in einem 45°-Winkel mithilfe des SEAMHex gefertigt. Der 45°-Winkel ermöglichte es in diesem Kontext, eine Hohlstruktur ohne Überhang zu erzeugen. Nach dem Herstellen der Geometrie wurde in einem nachgeschalteten Prozess die Oberfläche abgefräst. Dies sollte dazu beitragen, die Oberflächenqualität zu verbessern.

Anschließend wurden beide Werkzeuge mit Bohrungen versehen, um diese mit Wasser zu befüllen. Der Vorbereitungsprozess sowie die Befüllung sind in Abbildung 6.38 a) visualisiert. Durch die Befüllung mit Wasser sollte die Dichtigkeit und die spätere Möglichkeit der Temperierung bewertet



Abbildung 6.38: Additive Fertigung des Formwerkzeuges mit Oberflächennachbearbeitung.

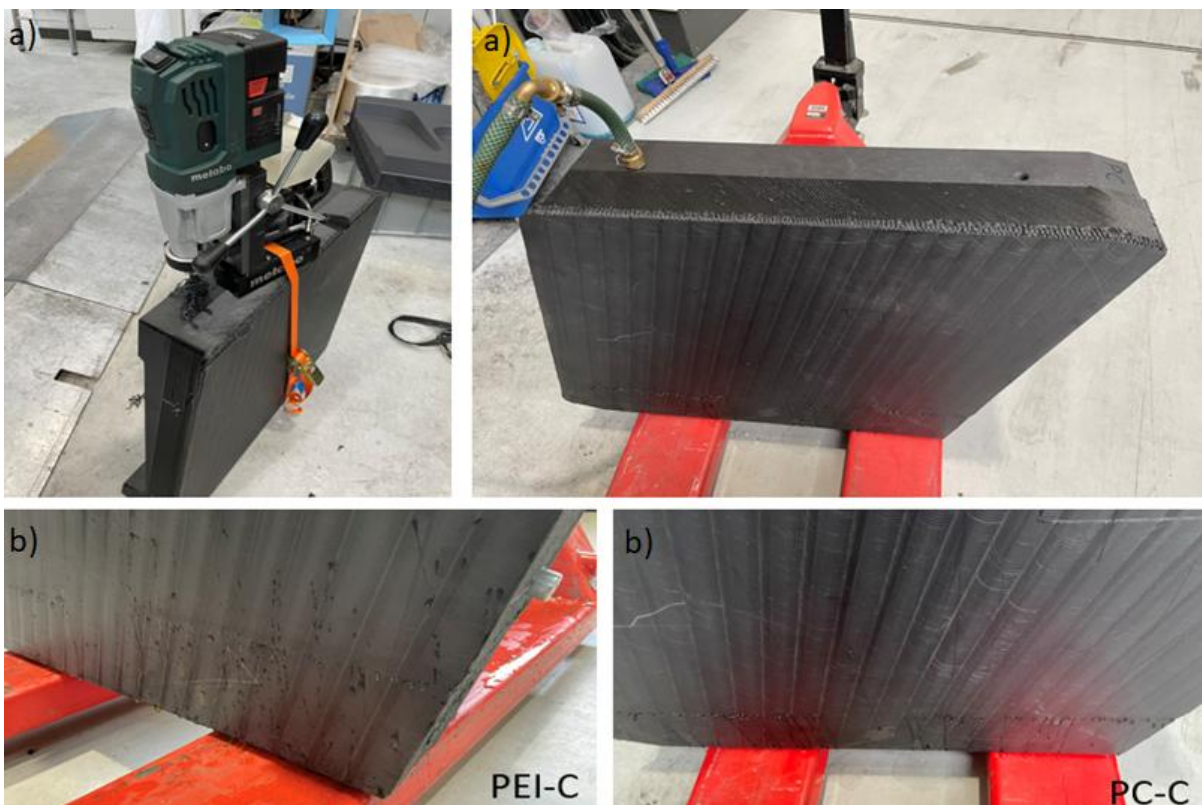


Abbildung 6.38: a) Vorbereitung und Befüllung der Werkzeuge mit Wasser, b) Tropfenbildung auf dem Boden der Werkzeuge.

werden. Beim Befüllen konnte festgestellt werden, dass die Werkzeuge Undichtigkeiten am Boden aufweisen. Diese Undichtigkeiten sind in Abbildung 6.38 b) anhand der Wassertropfen zu erkennen. Somit konnte anhand der Prüfung festgestellt werden, dass ein Optimierungsbedarf bestand. Als eine Möglichkeit der Optimierung wurde die Bahnplanung identifiziert.

Im Anschluss wurden Ablageversuche mit den Werkzeugen durchgeführt. Zielstellung der Untersuchungen war die Überprüfung der Eignung der Werkzeuge bzw. Materialien für die Fertigung von Faserverbundstrukturen. Dazu wurde zunächst eine Wareneingangskontrolle für die Werkzeuge durchgeführt. In diesem Zuge wurden Fertigungsfehler beim PEI-C-Werkzeug dokumentiert. Die Abweichungen sind in Abbildung 6.39 dargestellt. Auf den Seitenflächen des Mittelsteges wurden Löcher / Fehlstellen ohne Material festgestellt. In Absprache mit dem Fraunhofer IWU konnte diese Abweichung auf einen fertigungsbedingten Lunker zurückgeführt werden. Diese Lunker wurden mit Epoxidharz gefüllt und anschließend glattgeschliffen. Das Werkzeug aus PC-C wies keine Auffälligkeiten auf.

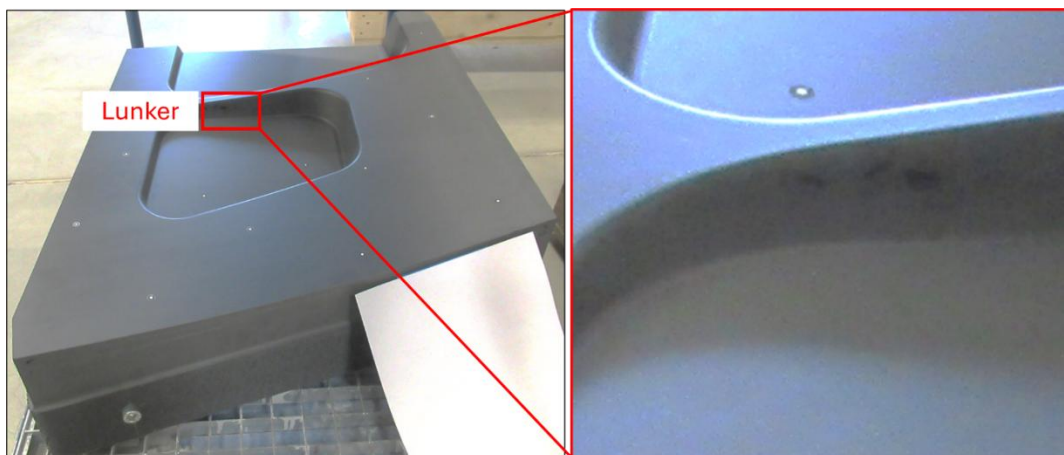


Abbildung 6.39: Fertigungsabweichungen vom Werkzeug aus PEI-C

Im Weiteren wurden die Werkzeuge mit einem taktilen Messarm vermessen und mit der Sollkontur des CAD – Modells verglichen. Die Messungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Ausrichtung zum CAD – Modell erfolgte mittels „Best-Fit“. Die Ergebnisse für das PEI-C-Werkzeug sind

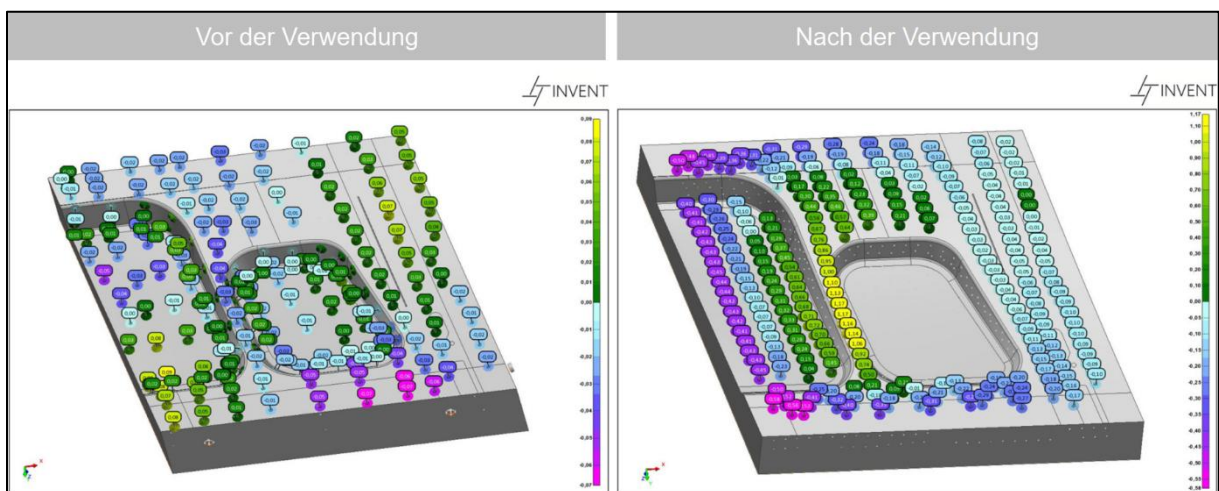


Abbildung 6.40: Abweichungen der Werkzeugoberfläche vom CAD-Modell für das Werkzeug aus dem Material PEI-C. Die Abweichungen sind in mm angegeben.

in der linken Abbildung von Abbildung 6.40 dargestellt. Die maximalen Abweichungen liegen zwischen +0,09 mm und -0,07 mm. Die Ergebnisse für das PC-C-Werkzeug sind in der linken Abbildung von Abbildung 6.41 dargestellt. Verglichen mit dem PEI-C-Werkzeug sind die Abweichungen ähnlich verteilt und weisen die gleichen Maximalabweichungen auf. Die Abweichungen sind vergleichsweise gering und genügen damit den geplanten Untersuchungen im Projekt TechnoHyb.

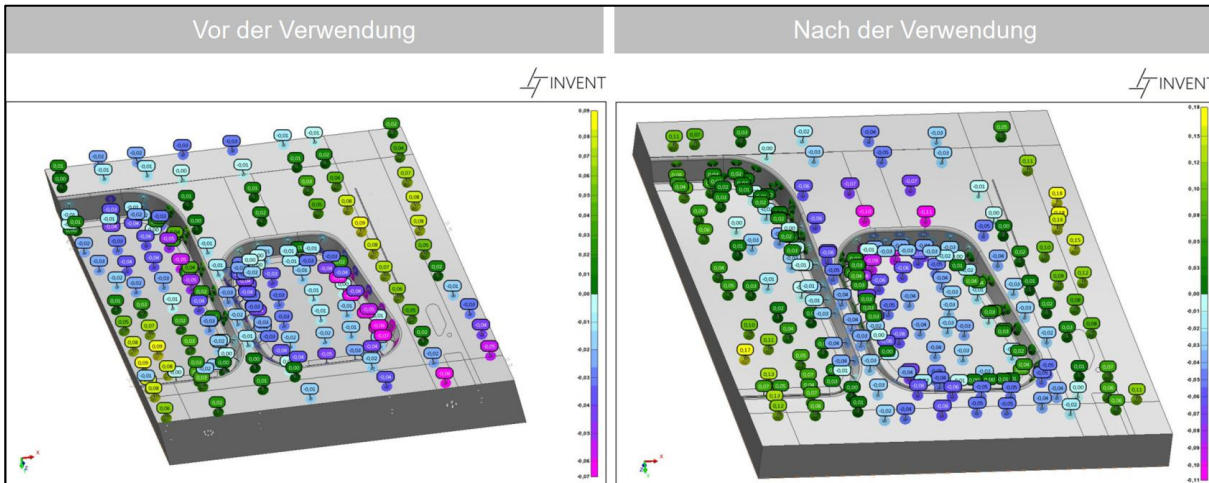


Abbildung 6.41: Abweichungen der Werkzeugoberfläche vom CAD-Modell für das Werkzeug aus dem Material PC-C. Die Abweichungen sind in mm angegeben.

Im Weiteren wurden die Rauigkeiten der Werkzeugoberflächen für den bauteilrelevanten Bereich erfasst. Für das PEI-C-Werkzeug wurde im Mittel eine Rauigkeit von $R_z = 14,4 \mu\text{m}$ gemessen. Das PC-C-Werkzeug weist eine mittlere Rauigkeit von $10,0 \mu\text{m}$ auf. Die Rauigkeiten sind damit größer als die im Rahmen der Anforderungsliste definierte Rauigkeit von $R_z=6,4$. Für die grundlegende Forschungsarbeiten im Projekt TechnoHyb können die Werkzeuge dennoch verwendet werden.

Im nächsten Schritt wurden die Ablageversuche durchgeführt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Ablageversuche auf den komplexeren Werkzeugen den Untersuchungen aus Abschnitt 6.3.1 vorgezogen werden mussten. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit verschiedenen Trennmitteln konnten bei den hier betrachteten Ablageversuchen daher nicht berücksichtigt werden. Bei den vorliegenden Ablageversuchen wurde das Trennmittel 2 aus Abbildung 6.36 verwendet. Als Laminat wurden wiederum 4 Lagen Kohlefaserprepreg vom Typ ST94/RC200T/1270/42+-3%/S/S/L auf dem Werkzeug abgelegt. Nach dem Aufbau des Vakuumsackes wurde das Laminat ausgehärtet. Der dabei verwendete Aushärtezyklus entspricht dem in Abschnitt 6.3.1 beschriebenen Aushärteprozess. Anschließend wurden die gefertigten Probekörper entformt.

Der mit dem PC-C-Werkzeug gefertigte Probekörper ist in Abbildung 6.42 auf der rechten Seite dargestellt. Im Vergleich zu Probekörpern, die mit Aluminiumwerkzeugen hergestellt wurden, weist die Oberfläche des hier gefertigten Probekörpers eine stumpfere Oberfläche auf. Dies konnte auch bei den Vorversuchen aus Abschnitt 6.3.1 festgestellt werden. Abgesehen davon weist die Oberfläche des gefertigten Probekörpers gute Oberflächeneigenschaften auf. Bei der Entformung des Bauteiles wurden keine Abweichungen zu Aluminiumwerkzeugen festgestellt. Die nach dem Entformen zurückbleibende ungereinigte Werkzeugoberfläche ist auf der linken Seite von Abbildung 6.42 dargestellt. Das Werkzeug weist keine visuellen Auffälligkeiten auf. Nach den Ablageversuchen wurde die Werkzeugoberfläche nochmals taktil vermessen. Zielstellung dabei war die Identifikation eines möglichen Bauteilverzuges aufgrund des Aushärteprozesses des Laminates und den damit verbundenen Temperaturen und Drücken. Die Ergebnisse sind im rechten Teil von Abbildung 6.41

dargestellt. Vergleichen mit den Ergebnissen vor dem Ablageversuch können nur geringfügige Abweichungen festgestellt werden. Die Abweichungen liegen in der Größenordnung der Messunsicherheiten. Zusammenfassend kann daher geschlussfolgert werden, dass das PC-C-Werkzeug bzw. das dafür verwendete Material grundsätzlich für weitere Entwicklungsarbeiten, die über das Projekt TechnoHyb hinausgehen, geeignet ist.



Abbildung 6.42: Links: Bauteilzugewandter Oberfläche des PC-C-Werkzeugs nach dem Ablageversuch. Rechts: Mit dem PC-C-Werkzeug gefertigter Probekörper.

Der mit dem PEI-C-Werkzeug gefertigte Probekörper ist in Abbildung 6.44 auf der rechten Seite dargestellt. Die nach dem Entformen zurückbleibende ungereinigte Werkzeugoberfläche ist auf der linken Seite von Abbildung 6.42 dargestellt. Hierbei fällt auf, dass Teile des Werkzeuges im Bereich des Steges ausgebrochen sind. Detailaufnahmen zu den Fehlstellen sind in Abbildung 6.45 dargestellt. In den übrigen Bereichen weist das Werkzeug keine visuellen Auffälligkeiten auf. Der Beschädigung kann verschiedene Ursachen haben.

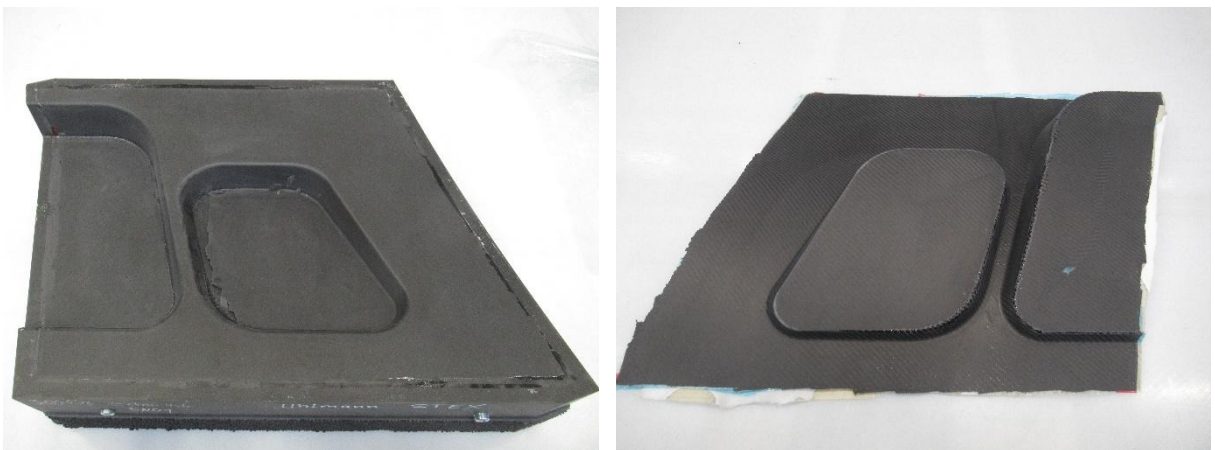


Abbildung 6.43: Links: Bauteilzugewandter Oberfläche des PEI-C-Werkzeugs nach dem Ablageversuch. Rechts: Mit dem PEI-C-Werkzeug gefertigter Probekörper.

Im Wesentlichen kann davon ausgegangen werden, dass die folgenden beiden Zusammenhänge die Ursache darstellen:

- Unterschiedliche Temperatursausdehnungskoeffizienten vom Werkzeugmaterial und dem verwendeten Epoxidharz zur Reparatur der Fehlstelle

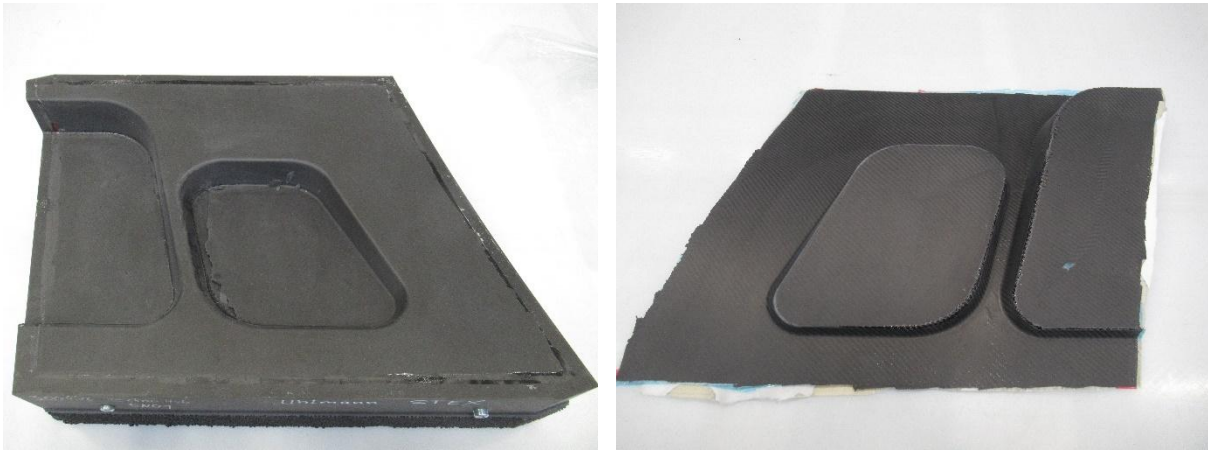


Abbildung 6.44: Links: Bauteilzugewandter Oberfläche des PEI-C-Werkzeugs nach dem Ablageversuch. Rechts: Mit dem PEI-C-Werkzeug gefertigter Probekörper.

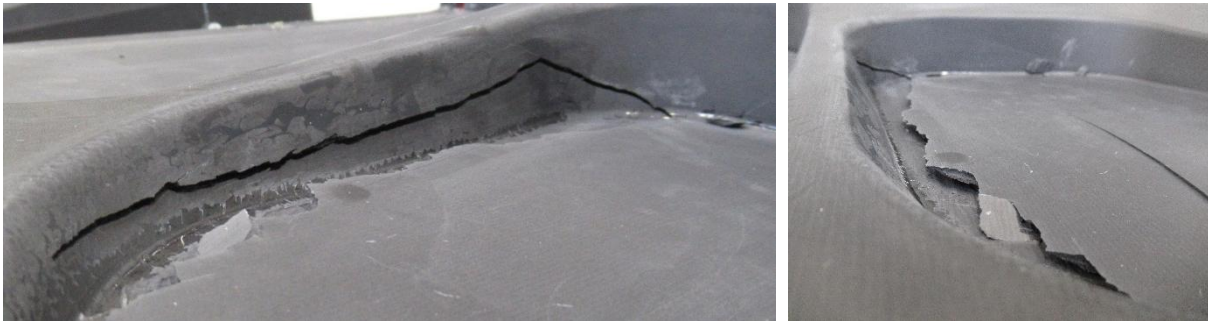


Abbildung 6.45: Detailaufnahme der Beschädigung des Werkzeuges.

- Das Epoxidharz konnte nur von außen aufgetragen werden. Daher besteht die Möglichkeit, dass das Epoxidharz im Werkzeuginnenraum nur bedingt eine Verbindung zum Werkzeug eingegangen ist

Eine Analyse der Oberfläche des gefertigten Bauteiles im Bereich des gebrochenen Werkzeuges hat keine Auffälligkeiten ergeben. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Werkzeug erst gebrochen ist, nachdem das Laminat weitgehend ausgehärtet war. Im Bereich der Innenradien der Vertiefungen weist der gefertigte Probekörper trockene Stellen auf. Dies liegt in dem vereinfachten Fertigungsverfahren begründet. Die Zuschnitte im Bereich der Vertiefung müssten kleiner sein, wurden jedoch nicht angepasst. Darüber hinaus wurden keine Druckstücke verwendet. Bei der Fertigung der großen Segmentschalen im Projekt TechnoHyb und EnerWing wurde dies berücksichtigt, sodass hier keine entsprechenden trockenen Bereiche vorhanden sind. Ähnlich zum vorherigen Probekörper weist der hier betrachtete Probekörper eine vergleichsweise stumpfe Oberfläche auf.

Wie das PC-C-Werkzeug wurde auch die Werkzeuggeometrie des PEI-C-Werkzeugs nach dem Ablageversuch vermessen. Die Ergebnisse sind auf der rechten Seite von Abbildung 6.40 dargestellt. Die Ausrichtung der Messpunkte erfolgte im Best-Fit-Verfahren. Der beschädigte Bereich wurde dabei nicht berücksichtigt. Die Messwerte der verbleibenden Bereiche weisen ähnlich zum PC-C-Werkzeug nur geringfügige Abweichungen zum CAD – Modell auf. Ein Vergleich der Messwerte mit den Ergebnissen vor dem Ablageversuch zeigt ebenfalls nur Abweichungen in der Größenordnung der Messunsicherheit.

Nach den Fertigungsversuchen wurde das PC-C-Werkzeug für eine Digital Image Correlation (DIC) vorbereitet. Anhand der DIC sollte die Wärmeausdehnung des Werkzeugs bewertet werden. Dazu wurde es mit einem weißen Fleckenmuster versehen. Dies ist in Abbildung 6.46 zu sehen. Nach dem Trocknen der Farbe wurde das Werkzeug in den Umluftofen Vötsch Typ VTL 200/200-250°C platziert.



Abbildung 6.46: Werkzeug vorbereitet für die DIC.

Für die Vermessung wurde das Aramis-System von GOM verwendet. Während der Versuchsdurchführung wurde der Ofen auf 140 °C aufgeheizt. Dabei wurde sowohl das Aufwärmen als auch die Abkühlphase erfasst. Da das Werkzeug während der Messung auf einem Aluminiumgestell stand, musste die Verschiebung des Aluminiumgestells herausgerechnet werden. Im Programm wurden daher kreuzförmig Messpunkte auf dem Werkzeug platziert und durch eine Differenzbildung die Dehnungen des Werkzeugs bestimmt. Die Dehnungen wurden in das Fertigungskordinatensystem transformiert. Das Fertigungskordinatensystem war um 17,932° gegen den Uhrzeigersinn um die Z-Achse gedreht. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Wärmeausdehnungskoeffizienten über die transformierten Dehnungen bestimmt. Eine Transformation war notwendig, da die Fasern im Werkstoff entsprechend des Fertigungskordinatensystems orientiert waren.

Für die Berechnung wurde die Formel 6.4 verwendet. Anhand der Formel 6.4 kann die Längenänderung aufgrund einer Temperaturerhöhung ermittelt werden. Durch Umstellen der Formel können die Wärmeausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit von den Längenänderungen bestimmt werden.

Thermische Längenänderung [mm]

Formel 6.4

$$\Delta L = L_0 * \alpha * \Delta T$$

[39]

L_0 - Ursprungslänge [mm]

α - Wärmeausdehnungskoeffizient [1/K]

ΔT – Temperaturänderung [K]

Bei der Bewertung der DIC-Ergebnisse wurden die TMA-Messungen für das PC-C aus dem Kapitel 6.1.1 sowie der Wärmeausdehnungskoeffizient von Aluminium aus der Literatur herangezogen. Dabei wurde für Aluminium ein Ausdehnungskoeffizient von $24 * 10^{-6} 1/K$ angenommen [39].

Abbildung 6.46 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der DIC-Messung für die Verschiebung in X-Richtung. Im unteren linken Bildrand ist auch das Koordinatenkreuz zu sehen. Durch den Vergleich von Facettenpunkt 2 und 4 lässt sich erkennen, dass sich das Werkzeug in X-Richtung um 3,142 mm gedehnt hat. Für die Y-Richtung konnte wiederum eine Längenänderung von 0,46 mm festgestellt werden. Zur Bewertung der Ausdehnungen im Fertigungskordinatensystem müssen die Längen des Werkzeugs in diesem Koordinatensystem betrachtet werden. Dabei wurde eine Länge des Werkzeugs von 633 mm sowie 586 mm ermittelt. Über den Strahlensatz lässt sich nun die Dehnung im Fertigungskordinatensystem bestimmen. In X' -Richtung kann hier eine Längenänderung von 3,01 mm und in Y' -Richtung von 0,48 mm festgestellt werden. Mithilfe der Formel 6.4 können die Wärmeausdehnungskoeffizient von $43,39 \cdot 10^{-6} 1/K$ in X' -Richtung und in Y' -Richtung von $7,6 \cdot 10^{-6} 1/K$ bestimmt werden. Die Werte sind in Tabelle 6.7 zusammengefasst.

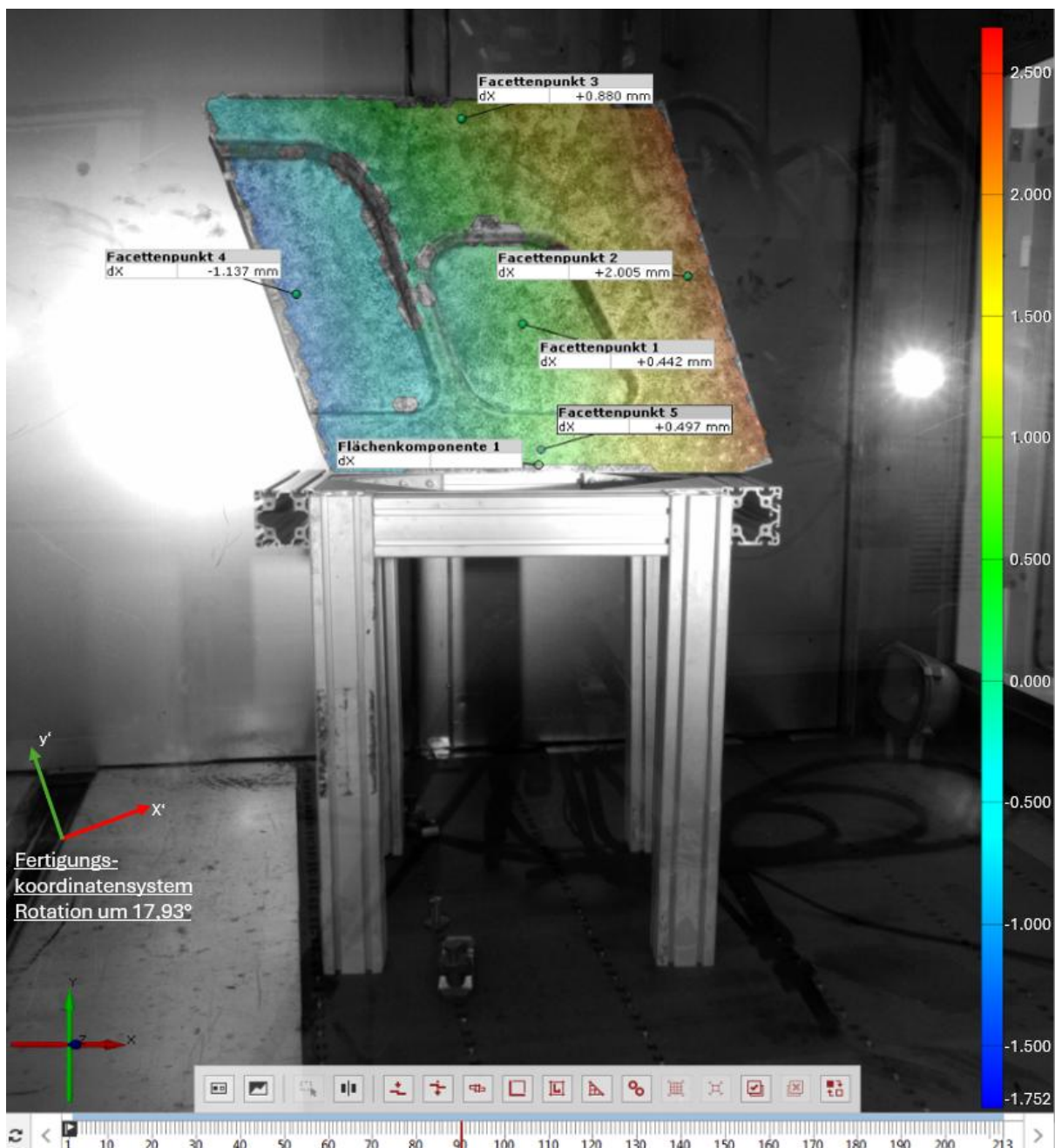


Abbildung 6.47: Ergebnis aus der DIC. Wärmedehnung in x Richtung nach 30 Minuten bei 140°C.

Tabelle 6.7: Beurteilung der Wärmeausdehnung im Fertigungskoordinatensystem X' und Y' .

Raumrichtung Werkzeug (Länge des Werkzeugs)	(Facettenpunkt) Verschiebung [mm]	Längen- änderung [mm]	Fertigungs- koordinaten- system (Länge des Werkzeugs)	Dehnung im Fertigungs- Koordinaten -system [mm]	Wärme- ausdehnungs- koeffizient [$10^{-6} \cdot (1/K)$]
X (660 mm)	(Facettenpunkt 2) +2,005	3,14	X' (633 mm)	3,01	43,39
	(Facettenpunkt 4) -1,137				
Y (557 mm)	(Facettenpunkt 3) +2,586	0,46	Y' (586 mm)	0,48	7,6
	(Facettenpunkt 5) +2,124				

Die Werte können nun mit den gemessenen Wärmeausdehnungskoeffizienten des PC-Cs aus Kapitel 6.1.1 verglichen werden und ein Abgleich mit den Kenndaten von Aluminium durchgeführt werden. In

Tabelle 6.8 sind Ergebnisse aus der DIC sowie die Wärmeausdehnungskoeffizienten des PC-Cs aus der TMA und von Aluminium aufgelistet.

Es ist zu erkennen, dass der berechnete Wärmeausdehnungskoeffizient für die X' -Richtung die Messwerte aus der TMA größtenteils unterschreitet. Mithilfe der TMA wurde nur in der 0° -Prüfrichtung ein geringerer Wärmeausdehnungskoeffizient gemessen. Der berechnete Wärmeausdehnungskoeffizient aus der DIC für die Y' -Richtung ist sogar noch geringer und liegt unter den Werten aus der TMA und den Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Aluminium ist das Dreifache des ermittelten Koeffizienten für die Y' -Richtung.

Die Ergebnisse legen nahe, dass sowohl die Werkzeuggeometrie als auch die Werkstoffanisotropie zu einer Verformungsbehinderung führen [19]. Dies zeigt sich durch die Abweichungen zwischen den gemessenen Wärmeausdehnungskoeffizienten aus der TMA und den berechneten Ausdehnungskoeffizienten aus der DIC. Besonders deutlich wird dies anhand des in der Y' -Richtung ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten. Dabei unterschreitet der Wärmeausdehnungskoeffizient der Y' -Richtung auch alle Ergebnisse aus der TMA sowie den Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium.

Tabelle 6.8: Vergleich der Wärmeausdehnungskoeffizienten des PC-Cs aus der TMA und von Aluminium mit den berechneten Wärmeausdehnungskoeffizienten aus der DIC.

Ergebnis aus	Werkstoff	Orientierung der Messung	Wärme-ausdehnungs-koeffizient [$10^{-6} * (1/K)$]
DIC	PC-C	Fertigungskordinatensystem X'	43,39
		Fertigungskordinatensystem Y'	7,6
0° zur Druckrichtung		12,30	
45° zur Druckrichtung		52,22	
90° zur Druckrichtung		98,74	
Literatur		Aluminium	-

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient des Werkzeugs richtungsabhängig ist und somit eine Anisotropie besteht. Diese Anisotropie basiert auf den anisotropen Eigenschaften des Materials. Um diese Anisotropie durch die Bahnplanung und Konstruktion gezielt steuern zu können, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

6.3.3 Prüfung der Temperierung

Um die Temperierung der Werkzeuge zu validieren, wurden Plattenwerkzeuge aus dem PC-C hergestellt. Diese Werkzeuge waren intern mit einer Kanalstruktur versehen. Die Kanalordnung der Plattenwerkzeuge ist in Abbildung 6.47 zu sehen. Die Werkzeuge wurden ebenfalls mithilfe des SEAMHex im 45°-Winkel hergestellt. Nach der Fertigung wurden die Werkzeuge unter Druck gesetzt,

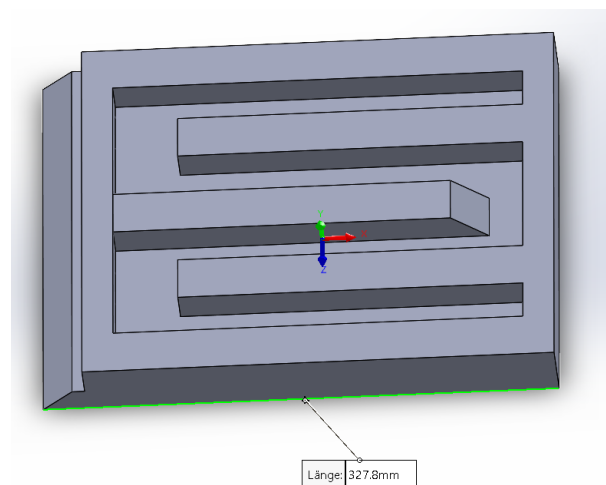


Abbildung 6.48: Plattenwerkzeug mit Kanalstruktur.

um die Dichtigkeit der Werkzeuge zu überprüfen. Da allerdings Leckagen festgestellt wurden, wurde die Kanalstruktur mit Epoxidharz gespült, um diese abzudichten.

Anschließend wurde eines der Werkzeuge an das Temperiergerät PIOVAN Model THW9 angeschlossen und über mehrere Tage hinweg die Temperatur schrittweise erhöht. Dabei wurde das Werkzeug 41 Stunden bei bis zu 90 °C temperiert. Es wurde eine Isolationsdecke auf das Werkzeug gelegt, um Wärmeverluste zu minimieren. Während der Temperierung bei 85 bis 90 °C wurde über einen Zeitraum von 415 Minuten die Oberflächentemperatur gemessen. Dazu wurde das Infrarotmesssystem Testo 835-T1 eingesetzt und an sieben Punkten auf dem Werkzeug die Temperaturänderung erfasst.

Anschließend wurde das Werkzeug an das Temperiergerät BOE-Therm Mark VI angeschlossen. Dabei wurde es von 105 °C bis 138 °C schrittweise hochtemperiert. Abschließend wurde die Temperatur bei 138 °C für eine Stunde gehalten. Somit wurde das Werkzeug insgesamt 43 Stunden stufenweise isotherm temperiert. Abschließend wurde das Werkzeug mit der variothermen Temperiereinheit Vario 3/4“ einer zyklisch wechselnden Temperatur von 23°C bis 90°C ausgesetzt.

Nach dem Temperieren wurde das Werkzeug mithilfe einer Bandsäge aufgeschnitten und die Kanalstruktur untersucht. Um Änderungen der Struktur durch abrasiven Abtrag erkennen zu können, wurde außerdem ein nicht temperiertes Werkzeug als Referenz aufgeschnitten und die Kanalstruktur erfasst.

Abbildung 6.49 zeigt den Temperaturverlauf des Werkzeugs. Dabei wird die Ist-Temperatur, die von der Temperiereinheit angegeben wurde, der gemessenen Temperatur der sieben Messpunkte auf der Werkzeugoberfläche gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass das Werkzeug nach ca. 80 Minuten seine statische Temperatur erreicht. Dabei stagniert die Oberflächentemperatur des Plattenwerkzeugs etwa 8 °C unterhalb der angegebenen Ist-Temperatur der Temperiereinheit. Auch nach der Erhöhung der Ist-Temperatur der Temperiereinheit bleibt eine Differenz von 8 °C bestehen.

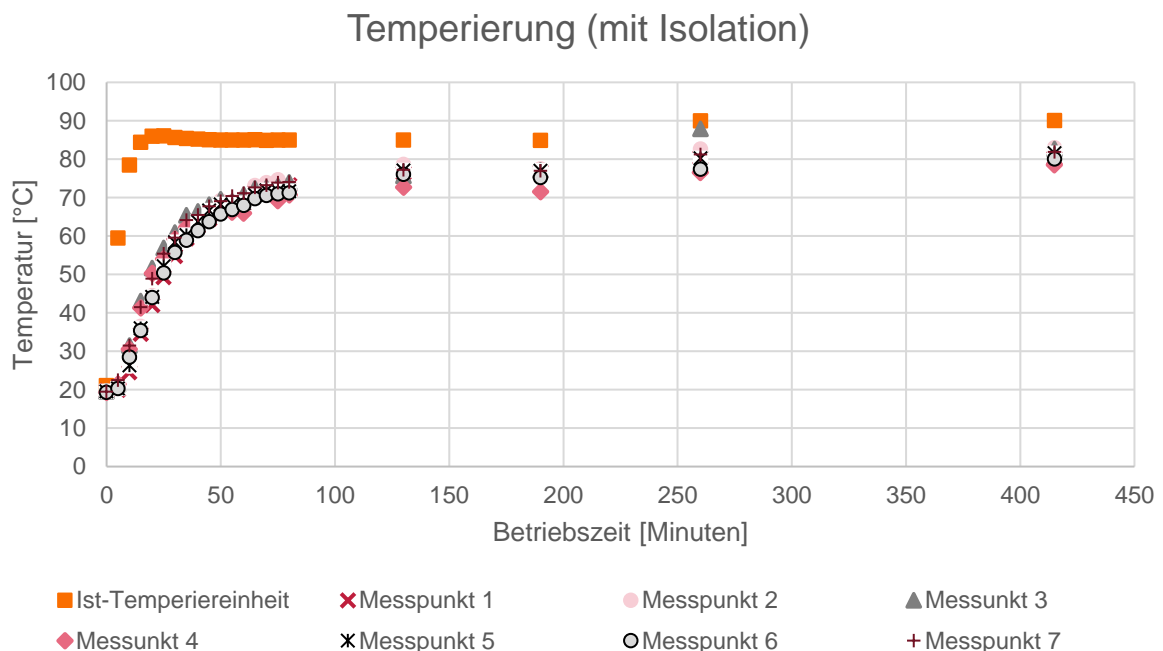


Abbildung 6.49: Ist-Temperatur der Temperiereinheit sowie die gemessene Oberflächentemperatur an den Messpunkten 1 bis 7 über einen Zeitraum von 415 Minuten.

Abschließend wurde das Werkzeug mit der variothermen Ventilumschaltung Vario 3/4“ eine zyklisch wechselnde Temperatur von 23 °C bis 90 °C ausgesetzt. Dabei wurde allerdings bereits während des 20. Zyklus Undichtigkeiten erkennbar, weshalb der Versuch abgebrochen werden musste.

Nach den Temperierungsversuchen wurde das Werkzeug, wie in Abbildung 6.50 zu sehen ist, aufgeschnitten. Abbildung 6.50 a) zeigt dabei das Plattenwerkzeug nach der Temperierung. In Abbildung 6.50 b) ist das nicht temperierte Plattenwerkzeug zu sehen. Durch die Betrachtung der Abbildungen wird deutlich, dass keine Unterschiede zu erkennen sind. Somit sind keine Abrasionen der Kanaloberfläche auszumachen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Temperierung bis 138 °C realisiert werden konnte. Somit ist die Verarbeitung von Prepregs möglich. Allerdings muss bei Fertigungsabläufen die Trägheit des Materials bei der Temperierung berücksichtigt werden. So wurde erst nach 80 Minuten eine statische Oberflächentemperatur erreicht, wobei diese 8 °C unterhalb der Ist-Temperatur verhardt.

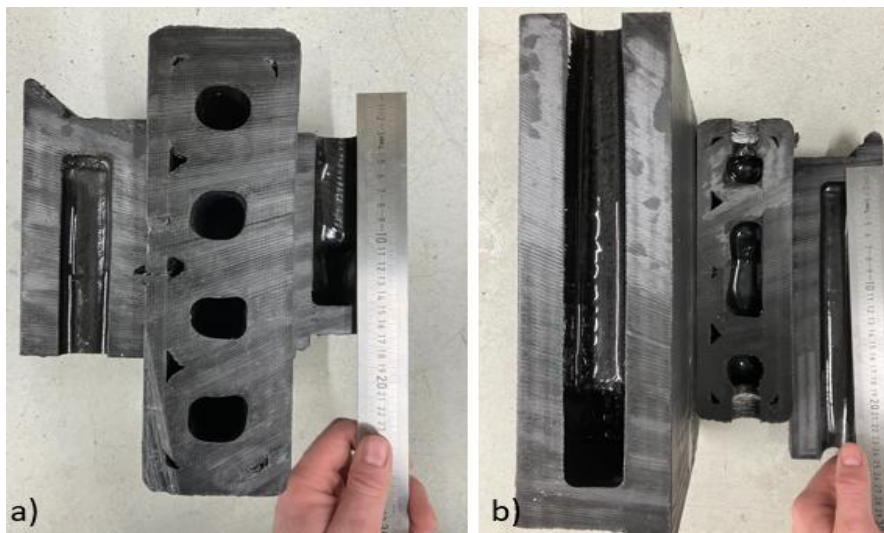


Abbildung 6.50: a) Temperiertes Plattenwerkzeug; b) Nicht Temperiertes Plattenwerkzeug.

Die fehlende Abrasion an der Kanalstruktur weist darauf hin, dass kein Abtrag der Kanäle während der Temperierung zu erwarten ist. Somit scheint dies kein limitierender Faktor für den Einsatz des Werkzeugs zu sein. Dennoch haben die Versuche auch gezeigt, dass eine Dichtigkeit der Werkzeuge nicht garantiert werden kann. So scheint der zyklische Temperaturwechsel zu einer Undichtigkeit geführt zu haben. Somit muss eine Optimierung der Werkzeugfertigung stattfinden, um die Dichtigkeit für die Temperierung zu gewährleisten.

6.3.4 Auszugsprüfungen Gewindeeinsätze

Auszugsversuche mit Gewindeeinsätze der Größe M10

Für die Auszugsprüfung wurden Proben aus PA6 CF40 hergestellt. Diese wurden mithilfe einer Bandsäge auf die Maße 18x80x80 mm zugeschnitten. Anschließend wurden diese mit einer 14 mm tiefen Bohrung versehen. Abbildung 6.51 zeigt die gefertigten Proben für die Auszugsprüfung. Für die Prüfung wurden M10x120 Gewindestangen verwendet. Das Fraunhofer IWU hat 10 Proben mit Drahtgewindeeinsätzen versehen. Dabei wurden die M10-Einsätze „W.TEC INSERT COIL FREE Running“ genutzt. In den übrigen 10 Proben wurde mithilfe eines Gewindeschneiders ein M10-Gewinde geschnitten. Für die Prüfung wurden die Zwick/Roell Z100 genutzt.

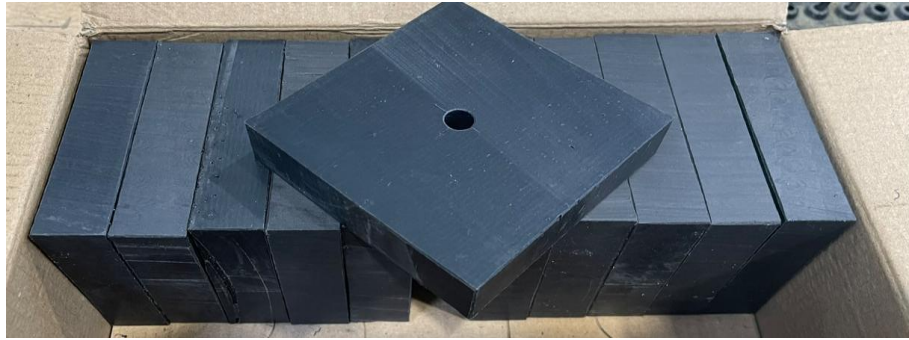


Abbildung 6.51: Prüfkörper für Gewindeauszugsversuch.

Abbildung 6.52 zeigt die Ergebnisse der Drahtgewindeeinsätzen und stellt diese den Ergebnissen der geschnittenen Gewinde gegenüber. Die Ergebnisse zeigen, dass die Proben mit geschnittenem Gewinde mit 15411 N ca. 84 % höhere Werte als die Proben mit Drahtgewindeeinsätzen erzielen. Die Standardabweichung beträgt bei den Drahtgewindeeinsätzen ca. 14 %, bei den geschnittenen Gewinden sind es 13 %.

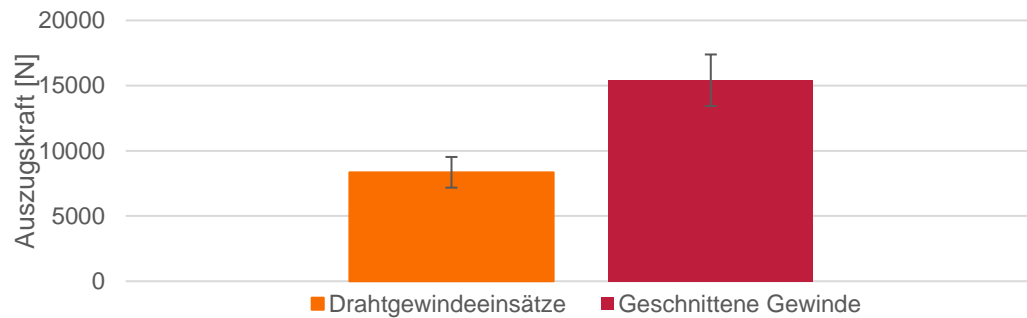


Abbildung 6.52: Gegenüberstellung Auszugskraft bei Drahtgewindeeinsatz sowie geschnittenem Gewinde.

Abbildung 6.53 zeigt die Prüfkörper nach der Prüfung. In Abbildung 6.53 a) ist eine Gewindeauszugsprobe mit Drahtgewindeeinsatz zu sehen. Zu erkennen ist, dass durch die Probe der Gewindeeinsatz beschädigt wurde. Abbildung 6.53 b) zeigt eine geprüfte Gewindeauszugsprobe mit geschnittenem Gewinde. Hier kam es im Rahmen der Prüfung zu einem Bruch der gesamten Probe.

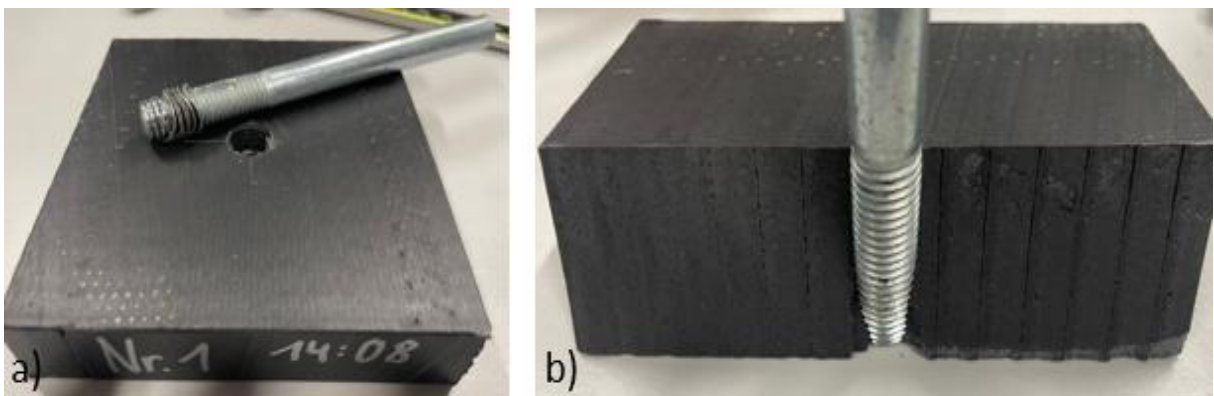


Abbildung 6.53: Exemplarische Darstellung der Gewindeauszugsprüfkörper nach der Prüfung. a) Prüfkörper mit Drahtgewinde b) Prüfkörper mit geschnittenem Gewinde.

Auszugprüfungen mit Gewindeeinsätze der Größe M6

Vergleichend zu den Untersuchungen mit den M10 Drahtgewindeeinsätzen wurden durch die INVENT GmbH Auszugversuche mit Einschmelzgewinden durchgeführt. Dazu wurden die vom Fraunhofer beigestellten Probekörper mittig mit Bohrungen des Durchmesser $\varnothing 8\text{mm}$ gebohrt. Anschließend wurden Einschmelzgewinde vom Typ ruthex RX-M6x12.7 eingeschmolzen. Der Einschmelzvorgang erfolgte mittels Einschmelzaufsatz für einen LötKolben. Das Faserstärkte Material der Probekörper erforderte mit einer Temperatur von ca. 400°C deutlich höhere Einschmelztemperaturen als üblich.

Im nächsten Schritt wurden Auszugversuche durchgeführt. Die Versuche wurde in Anlehnungen an Insertprüfungen nach ECSS-E-HB-32-22A auf einer Universalprüfmaschinen durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind Abbildung 6.54 (links) dargestellt. Vergleichend dazu wurden Versuche mit direkt in die Probekörper eingeschnittenem Gewinde durchgeführt. Die Gewindegröße betrug in beiden Fällen M6.

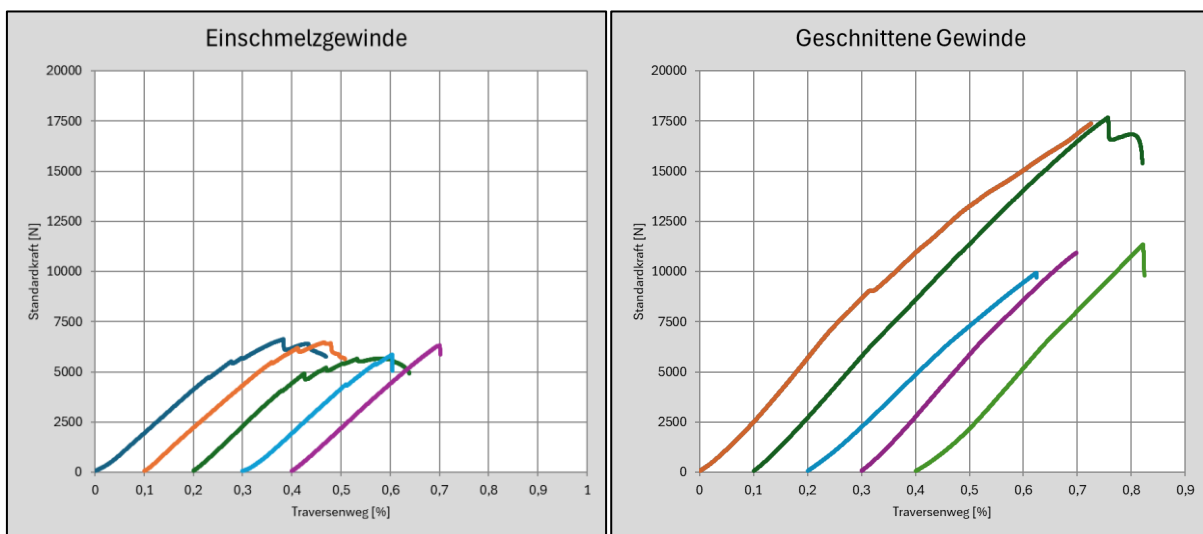


Abbildung 6.54: Ergebnisse der Auszugversuche mit Einschmelzgewinden. Links: Auszugversuche mit Einschmelzgewinde. Rechts: Auszugversuche mit direkt geschnittenem Gewinde.

Die Versuche mit Einschmelzgewinde zeigen eine durchschnittliche Auszugkraft von 6190 N bei einer Standardabweichung von 413,6 N. Die Versuche mit direkt geschnittenem Gewinde weisen eine durchschnittliche Zugkraft von 12465 N auf. Die Standardabweichung beträgt 3751 N. In Bezug auf die Probekörper mit geschnittenem Gewinde ist erkennbar, dass zwei von fünf Probekörper deutlich größere Auszugkräfte aufweisen. Werden diese Probekörper bei der Versuchsauswertung nicht einbezogen, ergibt sich eine durchschnittliche Auszugkraft von 10752 N bei einer Standardabweichung von 726N. Der Hauptversagensmodus bestand darin, dass die Probekörper aufrissen oder teilweise vollständig zerbrachen. Eine mögliche Ursache für die niedrigen Auszugswerte liegt in der hohen Wärmeeinbringung während des Einschmelzprozesses sowie im effizienten Wärmeabtransport durch die im Material enthaltenen Verstärkungsfasern

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass die Probekörper mit direkt eingeschnittenem Gewinde um ca. 74 % höhere Auszugkräfte aufweisen als die Probekörper mit Einschmelzgewinde. Die tendenziellen Versuchsergebnisse sind damit vergleichbar zu den Messergebnissen der M10 Drahtgewindeeinsätze.

6.3.5 Werkzeug Tragflächenschale

Es wurde ein finales Werkzeug konstruiert und gefertigt. Das Werkzeug wurde für die Herstellung der Unterseite des zweiten Segmentes auf der linken Seite der Flugwindkraftanlage konstruiert. Das Werkzeug ist in Abbildung 6.54 zu sehen. Dabei wurde das PC-C als Werkstoff genutzt. Zur Fertigung wurde der PentaSEAM P1410 mit einem Druckwinkel von 30° genutzt. Das Werkzeug wurde aus mehreren Teilen hergestellt. Es wurden drei Formhälften sowie zwei Stirnflächen gefertigt. Die Formhälften waren mit einer Kanalstruktur versehen, um eine Temperierung außerhalb der Autoklave zu ermöglichen. Nach der Fertigung wurde in einer der Stirnflächen Bohrungen erzeugt, um das Einsetzen von Funktionselementen zu ermöglichen. Anschließend wurde über das Fräsen die Oberflächenqualität verbessert. Mit einem Fräser wurde außerdem auf der Oberfläche des Werkzeugs eine V-Nut erzeugt. Abschließend wurden die Formhälften mit Stiften verbunden und mit einem hitzebeständigen Klebstoff gefügt. Dabei wurde der Klebstoff DP 8910 NS von 3M verwendet.

Bei der Herstellung wurde der Energie- und Materialverbrauch erfasst. Für die Bestimmung des CO_2 -Fußabdrucks des Werkzeugs wurde für das Material $17,1 \text{ kg CO}_2\text{-eq. pro kg}$ angenommen. Diese Annahme beruht auf Angaben durch FIT-Umwelttechnik. Für die Abschätzung wurde die LCA-Software Sphäre sowie die Datenbank ecoinvent 3.9.1 genutzt. Der CO_2 -Ausstoß des deutschen Energiemixes wurde mit $0,38 \text{ kg CO}_2\text{-eq. pro kWh}$ beziffert [58]. Für die Kalkulation des Preises wurden ein Materialpreis von $26,99 \text{ €/kg}$ veranschlagt und ein Strompreis von $0,152 \text{ €/kWh}$ einkalkuliert [46]. Des Weiteren wurde ein Maschinenstundensatz von 85 €/h berücksichtigt. Die Ergebnisse der Kalkulation sind in Abbildung 6.56 aufgeführt.

Durch die Fertigung des $138,8 \text{ kg}$ schweren Werkzeugs wurden $3891,32 \text{ kg CO}_2\text{-eq.}$ emittiert. Dabei sind Materialkosten von $5650,50 \text{ €}$ entstanden. Während des Fräsprozesses wurden ca. $70,6 \text{ kg}$ Material abgetragen.

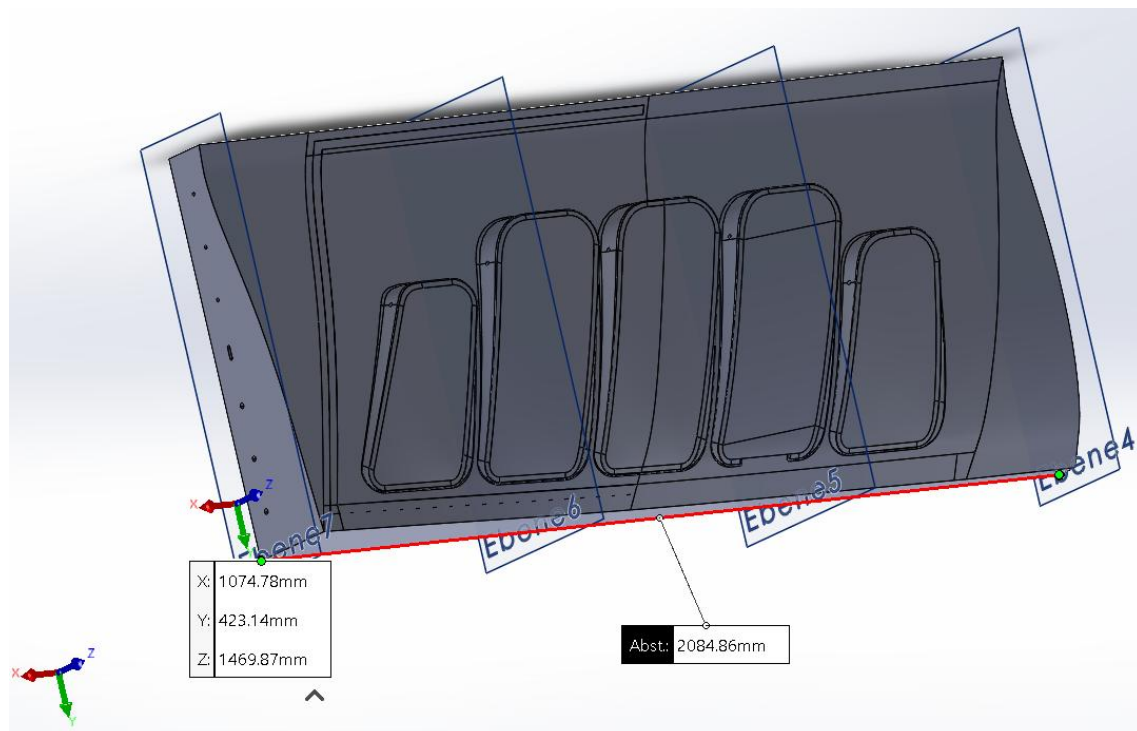


Abbildung 6.55: Formwerkzeug zur Herstellung der Unterseite des Segmentes der Flugwindkraftanlage.

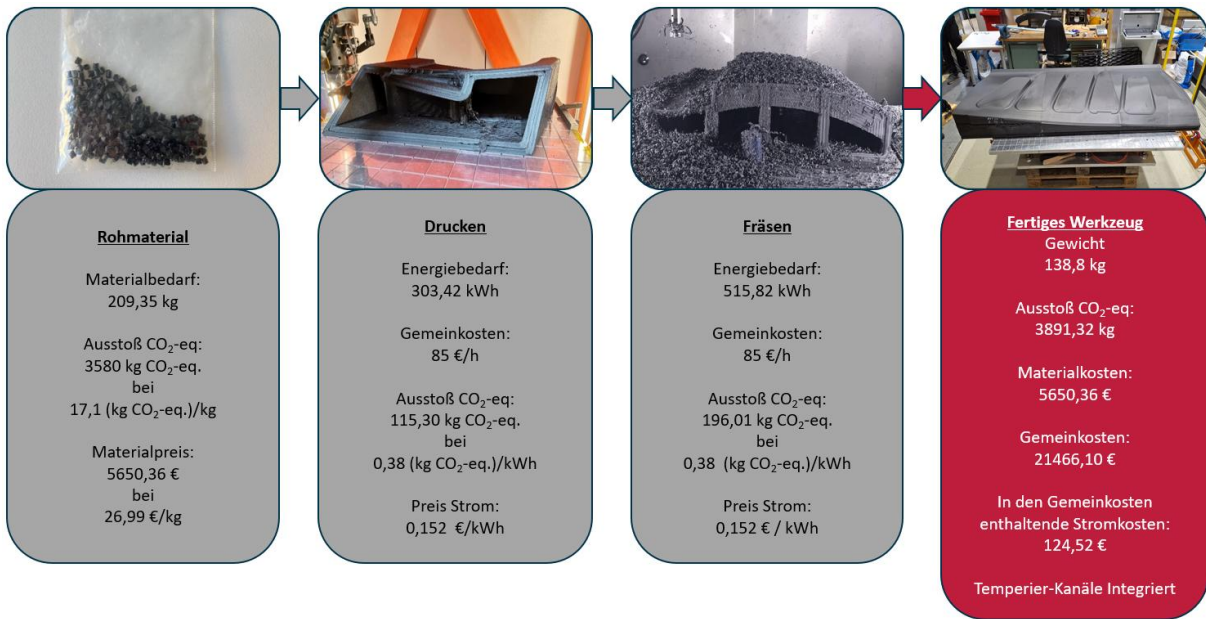


Abbildung 6.56: Auflistung der Kalkulation für das PC-C-Werkzeug der Segmentschale [46, 45].

Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurden zusätzlich eine Abschätzung für ein Aluminiumwerkzeug durchgeführt. Die Kostenschätzung beruht auf Angeboten für primär Aluminium mit den Maßen 250 x 890 x 2100 mm. So wären Materialkosten in Höhe von 5500 € bis 7800 € zu erwarten. Dabei kann für die Aluminiumproduktion 9,89 kg CO₂-eq. pro kg veranschlagt werden [11]. Bei einem Gewicht des Rohmaterials von 1164,86 kg entstehen somit 11.520 kg CO₂-eq. durch den Werkstoff. Sobald das Material durch zerspanende Bearbeitungsverfahren in Kontur gebracht wird, verringert sich das Gewicht auf 789,69 kg. Außerdem muss beachtet werden, dass in dieser Kalkulation keine internen Temperierekanäle vorgesehen sind.

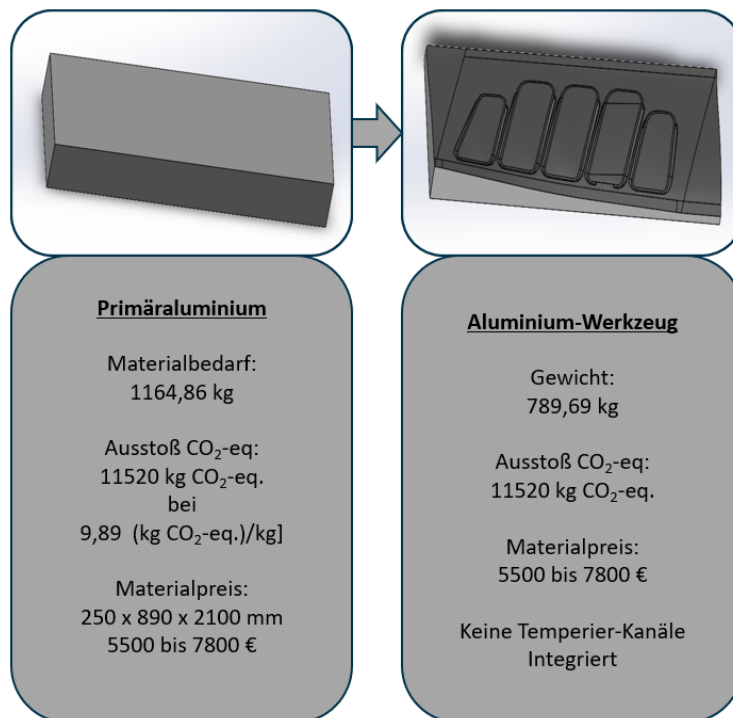


Abbildung 6.57: Auflistung der Kalkulation für ein Aluminiumwerkzeug [6].

Der Vergleich zeigt, dass bezüglich der Materialkosten keine signifikante Einsparung erzielt werden konnte, was auf die hohen Kosten des PC-C zurückzuführen ist. Des Weiteren ist der CO₂-Fußabdruck des PC-C zunächst signifikant schlechter als der des Aluminiums. Allerdings ermöglicht die additive Fertigung Schalenbauweisen. Dies führt dazu, dass Material eingespart werden kann. Auf diese Weise kann durch das PC-C nicht nur ein leichteres Werkzeug hergestellt werden, es kann auch der CO₂-Fußabdruck signifikant optimiert werden. So kann eine Differenz von etwa 66 % zwischen dem Fußabdruck des Aluminiumwerkzeugs und PC-C-Werkzeugs festgestellt werden.

Auch wurde eine bessere Materialausnutzung in der Fertigung erreicht. So mussten beim PC-C 70,5 kg Material abgetragen werden. Beim Aluminiumwerkzeug wären es 375 kg.

Des Weiteren kann das geringe Gewicht des PC-C-Werkzeugs dem Handling und Transport zugutekommen. So wiegt das PC-C-Werkzeug lediglich 138,8 kg. Das Aluminiumwerkzeug ist hingegen 650 kg schwerer. Dies beruht unter anderem auf der Hohlstruktur des PC-C-Werkzeugs. Diese Hohlstruktur entsteht zwangsläufig im Fertigungsprozess und ermöglicht die vergleichsweise einfache Erzeugung von Temperierkanälen, während bei Metallwerkzeugen die Erzeugung von Temperierkanälen erheblich komplizierter ist. [5]

Somit ermöglicht die additive Fertigung die Erzeugung von Hohlstrukturen und eine endkonturnahe Fertigung. Auf diese Weise kann die Materialausnutzung optimiert werden. Simultan wird die Möglichkeit eröffnet, Heiz- sowie Kühlstrukturen zu integrieren. Dennoch besteht noch Verbesserungsbedarf. So sollten weitere Materialien untersucht werden, um die Materialkosten weiter zu reduzieren und den CO₂-Fußabdruck weiter zu optimieren. Auch muss der Druckprozess weiter optimiert werden, um die Materialausnutzung weiter zu maximieren.

Abschließend muss noch angemerkt werden, dass der Recyclingprozess von Aluminium einen zehnfachen höheren Energiebedarf aufweist als das Recycling von faserverstärkten Thermoplasten. Damit einher geht auch, dass beim Recycling von faserverstärkten Thermoplasten weniger CO₂ ausgestoßen wird [55]. Allerdings bleibt die Frage offen, welche Auswirkungen der Recyclingprozess auf die thermomechanischen Eigenschaften hat. Dies soll im Folgenden genauer bewertet werden.

6.4 Recyclbarkeit

Um die Recyclingfähigkeit des Materials zu bewerten, wurden Grundkörper aus dem PC-C Material gefertigt, regranuliert und wieder zu Grundkörpern verarbeitet. Aus diesen wurden die PC-C_30,4_1_MG-Proben gefertigt. Die Parameter wurden entsprechend der PC-C_30,4_1-Proben gewählt, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Proben herzustellen. Als Prüfung wurden analog zu den vorangegangenen Versuchen die TMA, DMTA-Zug, DMTA-Biegung, DSC und Faserlängenmessung herangezogen. Es sollte hierbei beurteilt werden, welchen Einfluss das Regranulieren des Materials auf die Werkstoffeigenschaften hat. Dabei wurden die Proben in 0° und 90° zur Druckrichtung geprüft. Zudem wurde das PC-C-Granulat bei den DSC-Messungen und den Faserlängenmessungen inkludiert.

Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten

Abbildung 6.58 zeigt die Ergebnisse der TMA, dabei werden die Wärmeausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit vom Prüfwinkel dargestellt. In der Abbildung werden die Ergebnisse des PC-C_30,4_1 den Ergebnissen des PC-C_30,4_1_MG gegenübergestellt. Wie anhand der Ergebnisse zu erkennen ist, besteht nur eine geringe Differenz zwischen den gemessenen Werten. So kann bei einem Prüfwinkel von 0° eine Differenz zwischen PC-C_30,4_1 und PC-C_30,4_1_MG von 8 % ausgemacht werden. In 90°-Richtung ist die Differenz sogar noch geringer und beträgt hier 0 %. Die Ergebnisse der TMA zeigen

also, dass das Regranulieren keine Auswirkung auf den Wärmeausdehnungskoeffizienten hat. Somit sollte die Regranulierung der Formwerkzeuge keinen Einfluss auf den Wärmeverzug haben.

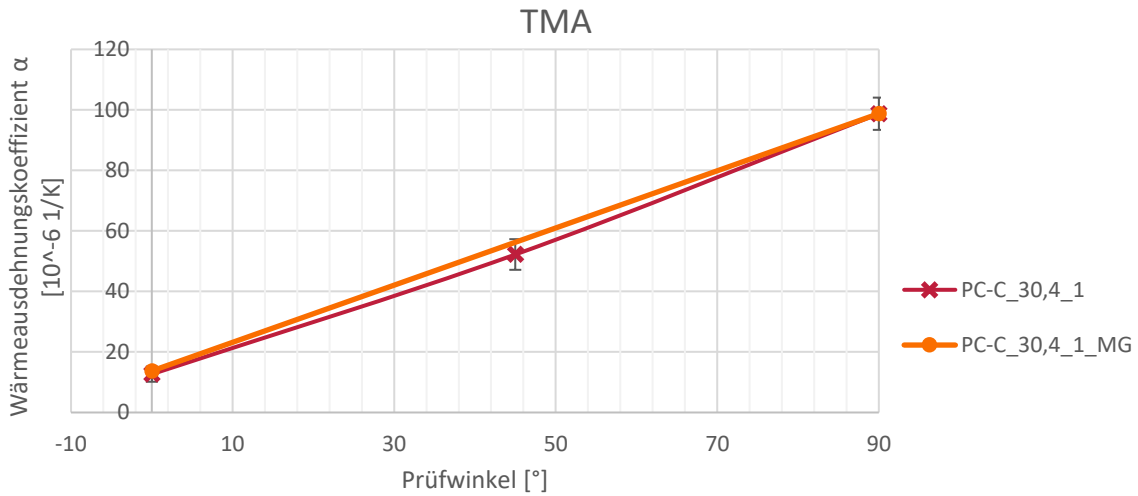


Abbildung 6.58: Wärmeausdehnungskoeffizient α für PC-C_30,4_1 und PC-C_30,4_1_MG in Abhängigkeit vom Prüfwinkel.

Bestimmung des Temperaturabhängigen Zug- und Biegemoduls

Abbildung 6.59 und Abbildung 6.60 zeigen die DMTA-Zug-Ergebnisse der PC-C_30,4_1_MG-Proben im Vergleich zu den PC-C_30,4_1-Proben. Die Abbildungen stellen dabei das Zugmodul in Abhängigkeit von der Temperatur dar.

Abbildung 6.59 visualisiert dabei die Ergebnisse für die Prüfrichtung 0° zur Strangrichtung. Bei Raumtemperatur besteht eine Differenz von ca. 8 % zwischen dem Zugmodul der PC-C_30,4_1_MG-Proben und der PC-C_30,4_1-Proben. Mit zunehmender Temperatur wird diese Differenz geringer, bis sich die Kurven schneiden. Dabei ist auffallend, dass beim PC-C_30,4_1_MG bei 130 °C eine Verringerung der Kennwerte zu verzeichnen ist. Wobei sich die beiden Linien bei ca. 120 °C scheiden. Die Differenz zwischen den Ergebnissen beträgt bei 130 °C ca. 6 %.

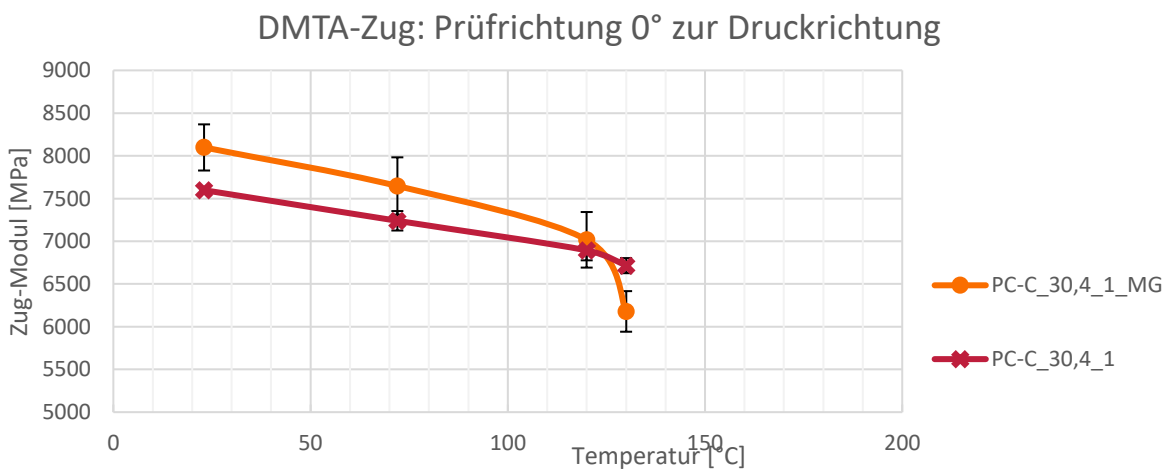


Abbildung 6.59: Zugmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 0° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-C_30,4_1 und PC-C_30,4_1_MG.

Abbildung 6.60 veranschaulicht die Ergebnisse für 90° zur Strangrichtung. Auch hier erzielen PC-C_30,4_1_MG Proben und die PC-C_30,4_1 ähnliche Ergebnisse. Zwischen den beiden Proben ist bei Raumtemperatur eine Differenz von ca. 1 % festzustellen. Die Differenz wird mit zunehmender Prüftemperatur größer. Eine abrupte Reduzierung des Zugmoduls bei 130 °C ist wahrzunehmen. Dieser Einbruch ist dabei noch deutlicher als in Abbildung 6.59. Bei 130 °C liegt eine Differenz zwischen den Ergebnissen von ca. 30 % vor. Die Ergebnisse der DMTA-Zug zeigen, dass das Regranulieren einen Einfluss auf das Zugmodul des PC-C zu haben scheint. Auffällig ist die Verringerung des Zugmoduls bei 130°C und dass dies besonders deutlich in 90° Richtung auftritt. Ein Ursprung dieses Einbruchs könnte dabei eine Veränderung der Matrix Eigenschaften sein [24].

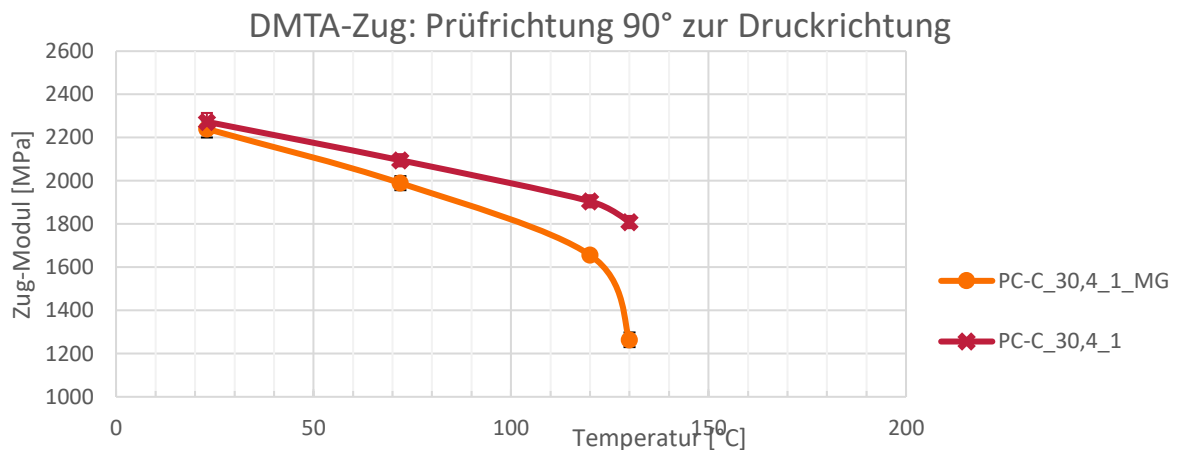


Abbildung 6.60: Zugmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 90° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-C_30,4_1 und PC-C_30,4_1_MG.

Abbildung 6.61 und Abbildung 6.62 zeigen die Ergebnisse der DMTA-Biegeprüfung der PC-C_30,4_1_MG-Proben und der PC-C_30,4_1-Proben. Abbildung 6.61 Zu erkennen ist, dass nur eine geringe Differenz zwischen den PC-C_30,4_1_MG-Proben und den PC-C_30,4_1-Proben besteht. So beträgt die Differenz bei Raumtemperatur in 0° Richtung 8 %. Wie bei der DMTA-Zug-Prüfung kann auch bei den PC-C_30,4_1_MG-Proben bei 130 °C eine Abnahme der Kennwerte gemessen werden.

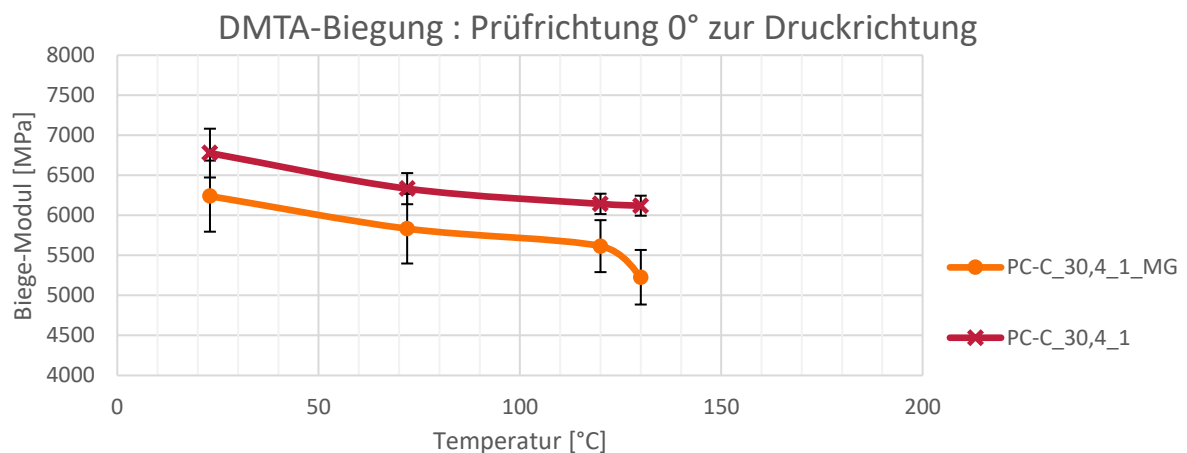


Abbildung 6.61: Biegemodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 0° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-C_30,4_1 und PC-C_30,4_1_MG.

In 90° Richtung kann bei Raumtemperatur eine Differenz der Ergebnisse von lediglich 2 % gemessen werden. Auch hier kommt es bei 130 °C zu einer Abnahme des Moduls. Diese Verminderung führt zu einer Differenz der Ergebnisse von 6 %.

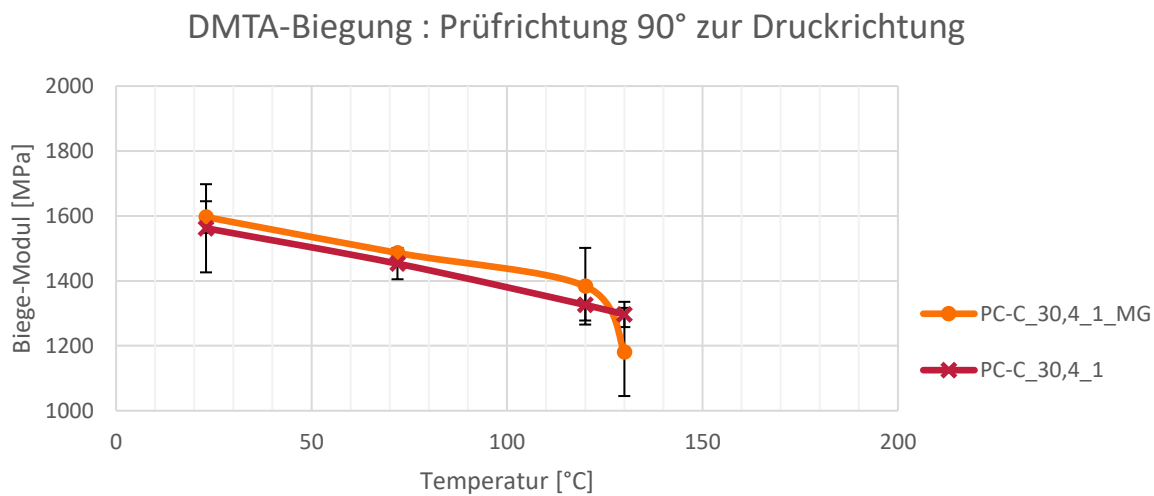


Abbildung 6.62: Biegemodul in Abhängigkeit von der Temperatur für 90° zur Druckrichtung bei den Werkstoffen PC-C_30,4_1 und PC-C_30,4_1_MG.

Analog zur DMTA-Zug Prüfung konnte auch bei der Biegeprüfung ähnliche Ergebnisse erfasst werden. So ist keine signifikante Beeinflussung des Biegemoduls durch das Regranulieren festzustellen. Allerdings konnte auch hier bei 130° eine Änderung der mechanischen Eigenschaften gemessen werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Änderung der Glasübergangstemperatur durch das Regranulieren stattgefunden hat. So könnte es durch mechanische oder thermische Belastungen zu einer Aufspaltung der Molekülketten gekommen sein [20]. Dies kann zu einer Verschiebung des Glasübergangs geführt haben, welcher sich nun in dem Einbruch des Zug- und Biegemoduls bei geringeren Temperaturen äußert [31, 20]. Um dies zu verifizieren, wurden DSC-Messungen durchgeführt.

Bestimmung der Glasübergangstemperatur

Die Ergebnisse der DSC-Messung sind in Abbildung 6.62 abgebildet. Dabei werden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Glasübergangstemperatur des PC-C-Granulats, PC-C_30,4_1 und des PC-C_30,4_1_MG gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass das PC-C-Granulat und das PC-C_30,4_1 eine Glasübergangstemperatur von 147 °C vorweisen. Beim PC-C_30,4_1 hingegen kann eine Verringerung des Glasübergangs auf ca. 137°C ausgemacht werden.

Die Ergebnisse verifizieren, dass eine Verschiebung des Glasübergangs der Ursprung des Einbruchs der thermomechanischen Eigenschaften bei 130°C ist. Somit ist hier ein limitierender Faktor identifiziert worden. Die Verringerung des Glasübergangs könnte dazu führen, dass das Material nach mehrfachem Regranulieren für die Autoklavanwendung unbrauchbar wird.

Bestimmung der Faserlängen

Abschließend muss noch die Faserlängenverkürzung betrachtet werden. Dies gründet darauf, dass nach der Literatur eine Verkürzung der Faserlängen zu erwarten ist. Allerdings lässt sich dies nicht in den mechanischen Eigenschaften erkennen. [10]

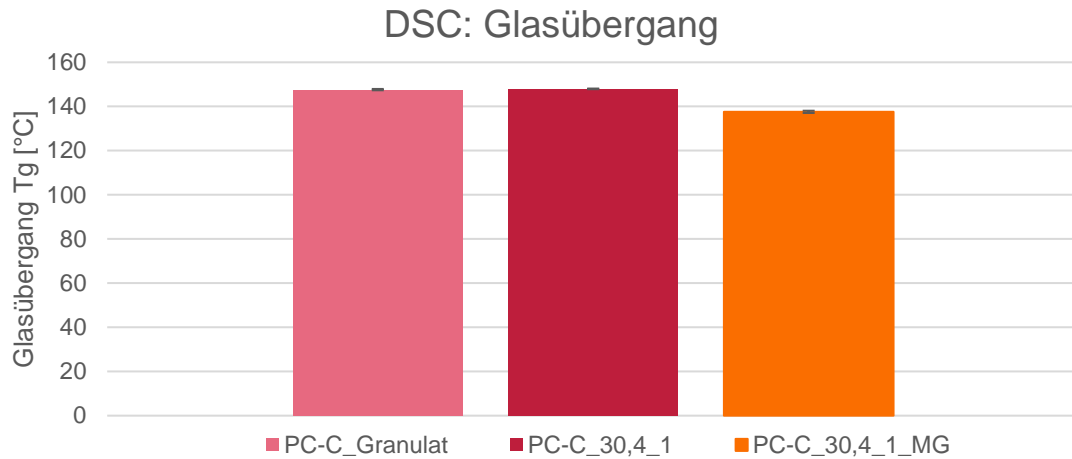


Abbildung 6.63: Glasübergangstemperatur der Proben PC-C_Granulat, PC-C_30,4_1 und PC-C_30,4_1_MG.

Abbildung 6.63 zeigt die Ergebnisse der Faserlängenmessung. Zu erkennen ist, dass durch die erste Verarbeitung eine Verkürzung der Fasern um 32 % stattgefunden hat. Dies wird aus dem Vergleich zwischen dem PC-C-Granulat und PC-C_30,4_1 deutlich. Das Regranulieren und erneute Verarbeiten hat zu einer weiteren Verkürzung der Fasern beigetragen. So ist hier eine Verkürzung um 38 % zu erkennen, was aus dem Vergleich PC-C_30,4_1 mit PC-C_30,4_1_MG ersichtlich wird.

Das Ergebnis zeigt, dass die Verarbeitung sowie Regranulieren und erneute Verarbeiten zu einer Verkürzung der Fasern führt, was aufgrund der Literatur auch zu erwarten war [7, 44]. Das allerdings die Faserverkürzung nicht in den mechanischen Eigenschaften erkennbar ist, kann auf eine schlechte Fasermatrixanhaftung sein [36]. Dies würde auch mit den Ergebnissen aus der Mikroskopie der Bruchbilder korrelieren (siehe Kapitel 6.2.1).

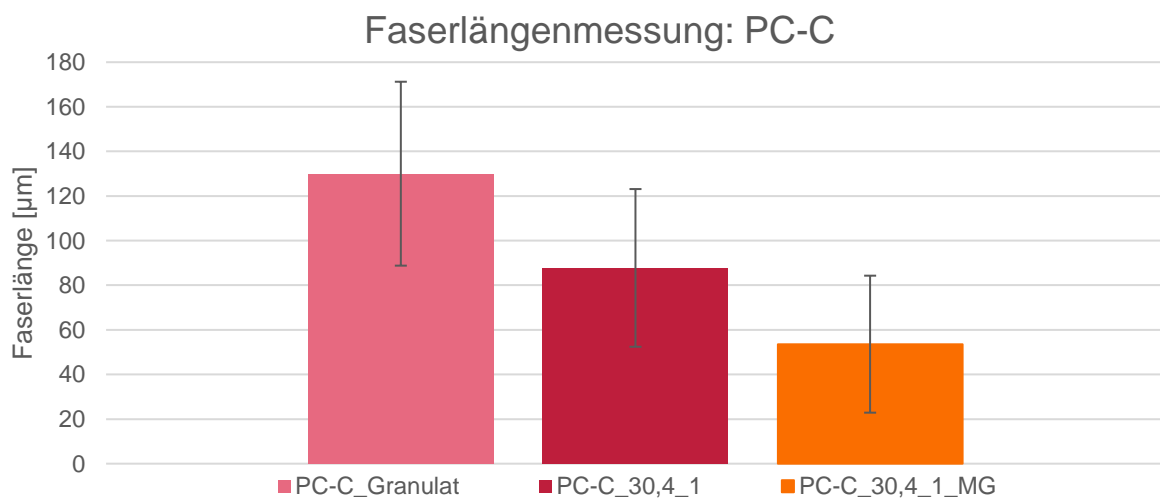


Abbildung 6.64: Faserlängenmessung für die Proben PC-C-Granulat, PC-C_30,4_1 und PC-C_30,4_1_MG.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass durch das Regranulieren eine Beeinflussung des Materials resultiert. Hervorzuheben sind hierbei die Faserverkürzung sowie eine Veränderung des Glasübergangs. Besonders letzteres kann als kritisch betrachtet werden, da dies eine Limitierung der Einsatztemperatur beiträgt. Eine mögliche Lösung wäre das Beimischen von frischem Granulat, wodurch der recyclingbedingte Eigenschaftsverringering entgegengewirkt wird [41].

Um die Kreislauffähigkeit des Materials noch genauer zu bewerten, sollte der Einfluss der Oberflächenvorbehandlung auf den Recyclingprozess berücksichtigt werden. So werden üblicherweise Formwerkzeuge mit Coating und Trennmittel behandelt. Dies konnte allerdings aufgrund des zeitlichen Rahmens nicht weiter untersucht werden, daher sollte dieser Einfluss in einem fortführenden Projekt betrachtet werden.

Literatur

- [1] *Akro Compounds*. AKROLOY® PARA ICF 40 schwarz (6130). <https://akroplastic.com/de/product/akroloy-para-icf-40-schwarz-6130-de>.
- [2] *Armita Hamidi Y. T.* Single step 3D printing of bioinspired structures via metal reinforced thermoplastic and highly stretchable elastomer. *Composite Structures*. 2019; 250 bis 261.
- [3] *Bernd Lauke S.-Y. F.* Strength anisotropy of misaligned short-fibre-reinforced polymers. 1999; 59: 699 bis 708.
- [4] *Brett G. Compton, Brian K. Post, Chad E. Duty, Lonnie Love, Vlastimil Kunc.* Thermal analysis of additive manufacturing of large-scale thermoplastic polymer composites. *Additive Manufacturing*. 2017; 17: 77 bis 86.
- [5] *Brian N. Turner, Robert Strong, Scott A. Gold.* A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2014; 20: 192–204.
- [6] *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.* Informationsblatt CO2-Faktoren. Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft - Zuschuss.
- [7] *Caihan Zhu, Tianya Li, Mohamedazeem M. Mohideen, Ping Hu, Ramesh Gupta, Seeram Ramakrishna, Yong Liu.* Realization of Circular Economy of 3D Printed Plastics: A Review. *Polymers*. 2021; 13.
- [8] *EFFECTS OF FIBER LENGTH AND FIBER ORIENTATION DISTRIBUTIONS ON THE TENSILE STRENGTH OF SHORT-FIBER-REINFORCED POLYMERS.* Shao-Yun Fu & Bernd Lauke. *Composite Science and Technology*. 1996; 56: 1179 bis 1190.
- [9] *F. Berzin, J. Beaugrand, S. Dobosz, T. Budtova, B. Vergnes.* Lignocellulosic fiber breakage in a molten polymer. Part 3. Modeling of the dimensional change of the fibers during compounding by twin screw extrusion. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017; 101: 422–431.
- [10] *Fatemeh Asoodeh, Mohammad Aghvami-Panah, Saeed Salimian, Mohammadreza Naeimirad, Hamed khoshnevis, Ali Zadhoush.* The Effect of Fibers' Length Distribution and Concentration on Rheological and Mechanical Properties of Glass Fiber–Reinforced Polypropylene Composite. *Journal of Industrial Textiles*. 2022; 51: 7279S-9096S.
- [11] *Funda Inceoglu, Julien Ville, Nessim Ghamri, Jean Laurent Pradel, Audrey Durin, Rudy Valette, Bruno Vergnes.* Correlation Between Processing Conditions and FiberBreakage During Compounding of GlassFiber-Reinforced Polyamide. 32. 2011; 11: 1842–1850.
- [12] *G. Barera, S. Dul, and A. Pegoretti.* Screw Extrusion Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced PA6 Tools. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023; 32: 9579–9597.
- [13] *Georg Abts.* Kunststoff-Wissen für Einsteiger. München; 2016.
- [14] *Gottfried W. Ehrenstein.* Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften. München Wien; 2006.
- [15] *Gottfried W. Ehrenstein.* Polymere Werkstoffe. Struktur - Eigenschaften - Anwendung. München; 2011.
- [16] *Halil L. Tekinalp, Vlastimil Kunc, Gregorio M. Velez-Garcia, Chad E. Duty, Lonnie J. Love, Amit K. Naskar, Craig A. Blue, Soydan Ozcan.* Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*. 2014; 105: 144–150.
- [17] *Hans Domininghaus, Peter Elsner, Peter Eyerer, Thomas Hirth.* Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen, 8. Aufl. Heidelberg; 2012.
- [18] *Hatice Malatyali, Volker Schöppner, Nils Rabeneck, Felix Hanselle, Laura Austermeier, David Karch.* A model for the carbon fiber breakage along the twin-screw extruder. *SPE Polymers*. 2021; 2: 145 bis 152.

- [19] *Helmut Schürmann*. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin Heidelberg; 2007.
- [20] *Henry W. H. Yang, Richard Farris, James C. W. Chien*. Study of the effect of regrinding on the cumulative damage to the mechanical properties of fiber-reinforced nylon 66. 23. 1979; 11: 3375–3382.
- [21] *J.L. Thomason*. The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP. Composites: Part A. 2002: 1641 bis 1652.
- [22] *Jiongyi YAN*. Carbon fibre reinforced material extrusion additive manufacturing: fibre orientation and mechanical properties. Loughborough; 2023.
- [23] *John M. Pappas, Aditya R. Thakur, Ming C. Leu, Xiangyang Dong*. A parametric study and characterization of additively manufactured continuous carbon fiber reinforced composites for high-speed 3D printing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021: 2137 bis 2151.
- [24] *Katharina Albrecht, Tim Osswald, Erwin Baur, Thomas Meier, Sandro Wartzack und Jörg Müssig*. Fibre Length Reduction in Natural Fibre-Reinforced Polymers during Compounding and Injection Moulding—Experiments Versus Numerical Prediction of Fibre Breakage. Journal of Composites Science. 2018; 2.
- [25] *Kern*. Polyetherimid (PEI). https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyetherimid-pei?n=2501_1.
- [26] *Kern*. Polyetherimid mit 30 % Glasfaser (PEI GF30). https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyetherimid-pei-gf30?n=2513_1.
- [27] *L.G. Blok, M.L. Longana, H. Yu, B.K.S. Woods*. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic. Additive Manufacturing. 2018; 22: 176 bis 186.
- [28] *Lonnie J. Love, Vlastamil Kunc, Orlando Rios, Chad E. Duty, Amelia M. Elliott, Brian K. Post, Rachel J. Smith and Craig A. Blue*. The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing. Journal of Materials Research. 2014.
- [29] *Mahta Sadegh Vishkaei, Mohamad Amran Mohd Salleh, Robiah Yunus, Dayang Radhiah Awang Biak, Firoozeh Danafar and Fatemeh Mirjalili*. Effect of short carbon fiber surface treatment on composite properties. Journal of Composite Materials. 2010; 45: 1885 bis 1891.
- [30] *Manfred Merkel, Karl-Heinz Thomas*. Taschenbuch der Werkstoffe, 7. Aufl. München; 2008.
- [31] *Martin Reuter*. Methodik der Werkstoffwahl. Der systematische Weg zum richtigen Material, 2. Aufl. München; 2014.
- [32] *Michael Holzinger*. Neues additives Fertigungsverfahren für faserverstärkte Kunststoffbauteile in Skelettbauweise. Chemnitz.
- [33] *Nadim S. Hmeidat, Daniel S. Elkins, Hutchison R. Peter, Vipin Kumar, Brett G. Compton*. Processing and mechanical characterization of short carbon fiber-reinforced epoxy composites for material extrusion additive manufacturing. Composites Part B: Engineering. 2021; 223.
- [34] *Nekoda van de Werkena, Halil Tekinalp, Pouria Khanbolouki, Soydan Ozcan, Andrew Williams, Mehran Tehrani*. Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective. Additive Manufacturing. 2020; 31.
- [35] *Pasita Pibulchinda, Eduardo Barocio, Anthony J. Favaloro, R. Byron Pipes*. Influence of printing conditions on the extrudate shape and fiber orientation in extrusion deposition additive manufacturing. Composites Part B. 2023; 261.
- [36] *Pedram Parandoush D. L.* A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. 2017: 36 bis 53.
- [37] *Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, P. Gu*. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. Rapid Prototyping Journal. 2008; 14: 72–80.

- [38] *RICHARD von TURKOVICH, LEWIS ERWIN*. Fiber Fracture in Reinforced Thermoplastic Processing. POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE. 1983; 23.
- [39] *Schaeffler Technologies AG & Co. KG*. Technisches Taschenbuch. Hamburg; 2023.
- [40] *Seyyedvahid Mortazavian A. F.* Effects of fiber orientation and anisotropy on tensile strength and elastic modulus of short fiber reinforced polymer composites. Composites: Part B. 2015; 72: 116 bis 129.
- [41] *Shao-Yun Fu, Bernd Lauke*. THE ELASTIC MODULUS OF MISALIGNED SHORT-FIBERREINFORCED POLYMERS. Composites Science and Technobgy. 1998; 58: 389 bis 400.
- [42] *Sithiprumnea Dul, Luca Fambri, and Alessandro Pegoretti*. High-Performance Polyamide/Carbon Fiber Composites for Fused Filament Fabrication: Mechanical and Functional Performances. Journal of Materials Engineering and Performance. 2021; 30: 5066 bis 5085.
- [43] *Statista*. Globales Marktvolumen von 3D-Druck-Verfahren in ausgewählten Branchen im Jahr 2015 und eine Prognose für 2030. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/802439/umfrage/globales-marktvolumen-von-3d-druck-verfahren-in-ausgewaehlten-branchen/>.
- [44] *Thang Q. Tran, Carla Canturri, Xinying Deng, Chu Long Tham, Feng Lin Ng*. Enhanced tensile strength of acrylonitrile butadiene styrene composite specimens fabricated by overheat fused filament fabrication printing. Composites Part B. 2022; 235.
- [45] *V. Pawlik*. Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>.
- [46] *V. Pawlik*. Strompreise für Industriekunden in der EU nach Verbrauchsmenge im Jahr 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151260/umfrage/strompreise-fuer-industriekunden-in-europa/>.
- [47] *Warrayut Kanabenja, Kunanon Passarapark, Thanaporn Subchokpool, Nithiwach Nawaaukkaratharnant, Allen Jonathan Rom'an, Tim A. Osswald, Chuanchom Aumnate, Pranut Potiyaraj*. 3D printing filaments from plasticized Polyhydroxybutyrate/Poly(lactic acid) blends reinforced with hydroxyapatite. Additive Manufacturing. 2022; 59.
- [48] *Wolfgang Grellmann, Sabine Seidler*. Kunststoffprüfung, 1. Aufl. München; 2005.
- [49] *Wolfgang Hintze*. CFK-Bearbeitung. Trenntechnologien für Faerverbundkunststoffe und den hybriden Leichtbau. Berlin; 2021.
- [50] *Ying Yan, Yu Mao, Bo Li and Ping Zhou*. Machinability of the Thermoplastic Polymers: PEEK, PI, and PMMA. Polymers. 2021; 13.
- [51] *Zhihe Yang, Zeshi Yang, Hui Chen, Wentao Yan*. 3D printing of short fiber reinforced composites via material extrusion: Fiber breakage. Additive Manufacturing. 2022; 58.

Anhang

Tabelle F.1: Übersicht der Prüfungen sowie der zu ermittelnde Parameter.

Prüfung	E-Modul in Abhängigkeit der Temperatur	Festigkeit	Glasübergangstemperatur	Einfluss Anisotropie	Warmform-beständigkeit	Oberflächenqualität (Rauigkeit, Schäden)	Wärmekapazität	Anwendungsnähe
Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)			x				x	
Dynamisch-mechanische-thermische Analyse Zug (DMTA-Zug)	x			x				
Dynamisch-mechanische-thermische Analyse Biegung (DTMA-Biegung)	x			x				x
Thermomechanische Analyse (TMA)				x	x			
Optische Messung (Konvokal Mikroskop)						x		
Zugprüfung		x		x				

Tabelle F.2: Fertigungsparameter der Prüfkörper für die Werkstoffauswahl.

Parameter	PC-G	PC-C	PEI-C	PARA-C
Temperaturen Extruder [°C]	270, 280, 300, 290, 290	270, 280, 300, 290, 290	330, 370, 390, 390, 390	260, 270, 280, 280, 280
Temperatur Tisch [°C]	150	150	150	120
Düsendurchmesser [mm]	2	2	2	2
Strangbreite [mm]	4	4	4	4
Schichthöhe [mm]	1	1	1	1
Schneckendrehzahl [U/Min]	30,4	30,4	30,4	30,4
Tischgeschwindigkeit [mm/s]	77	77	77	77
L/D - Verhältnis der Schnecke	25			

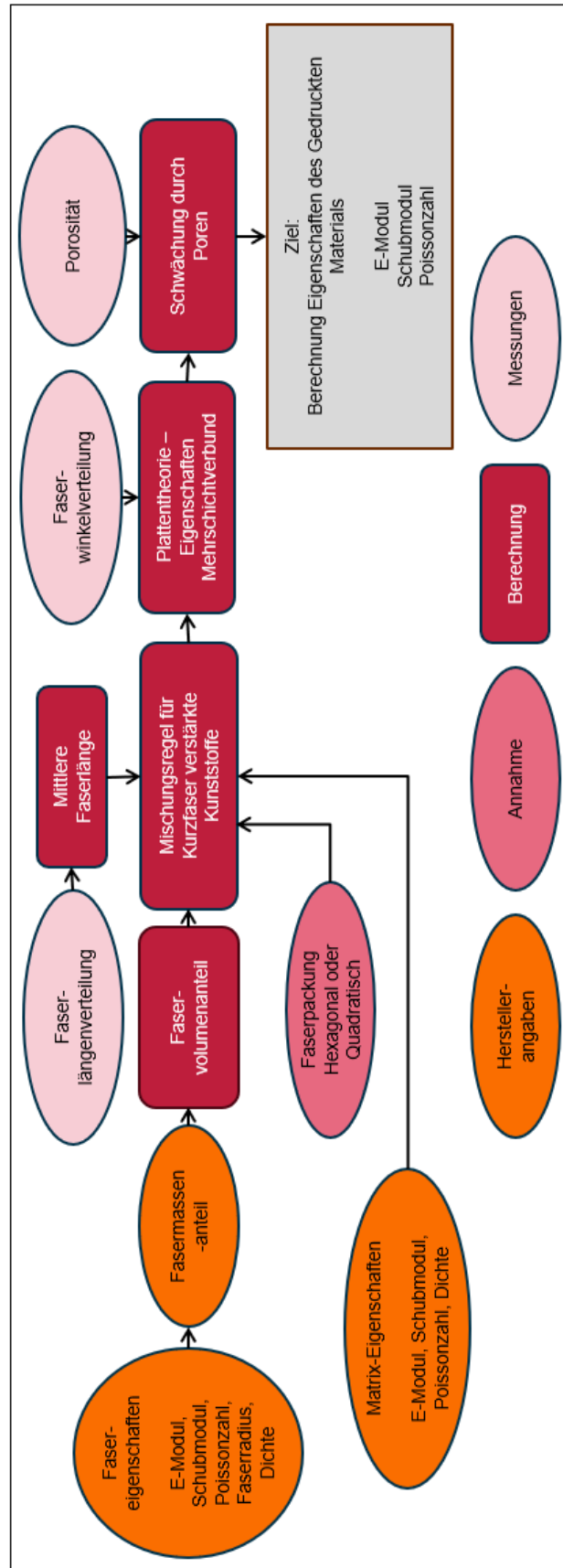


Abbildung F.1: Flussdiagramm für Materialmodellierung [41, 36, 40].

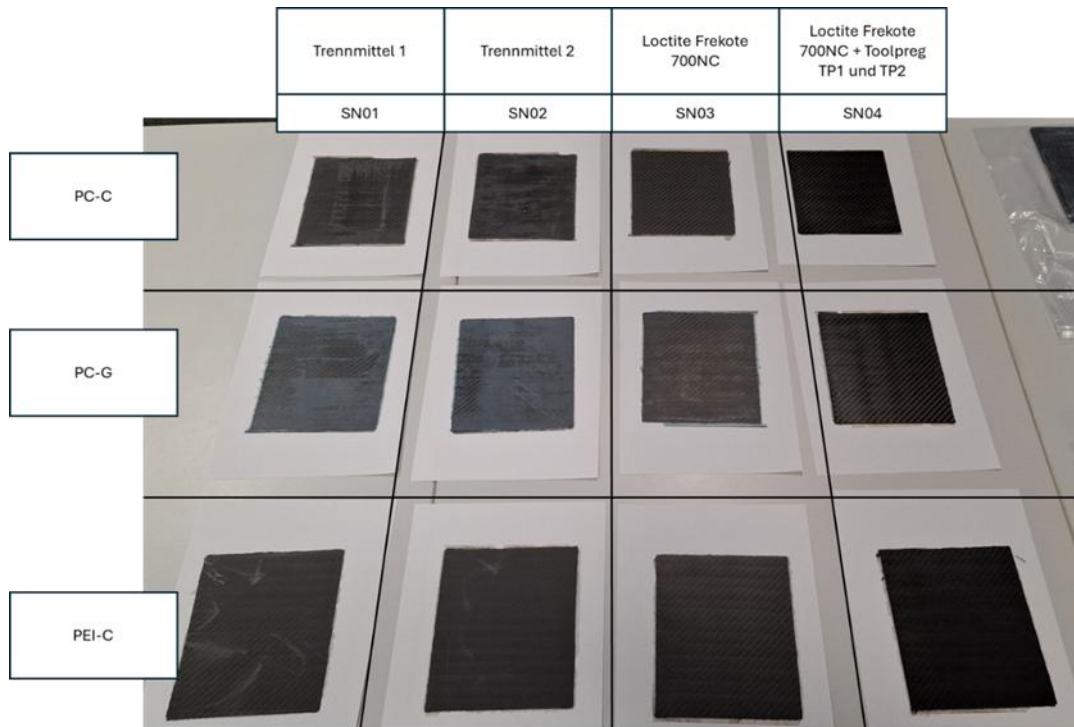


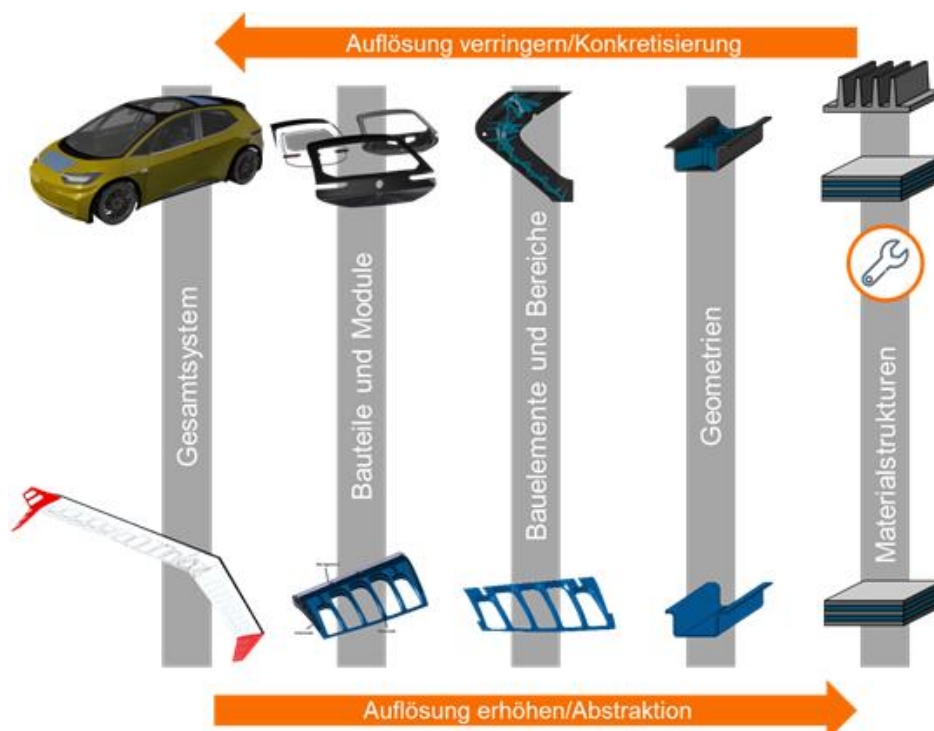
Abbildung F.3: Mit den Werkzeugplatten gefertigte ebene Probekörper mit verschiedenen Trennmitteln

7 Systematische Funktionsintegration

Tim Fröhlich ✉

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202507110654-0>

Die Vielzahl möglicher Ansätze zur Integration von Funktionen erfordert eine methodische Unterstützung bei der systematischen Entwicklung multifunktionaler Lösungen durch Identifikation geeigneter Lösungen. Da viele Integrationskonzepte auf spezifischen Konstruktionsprinzipien oder Materialkombinationen basieren und die Gestaltungsfreiheit in der Produktentwicklung oft eingeschränkt ist, ist eine gezielte Filterung nach einschränkenden Randbedingungen notwendig. Die Umsetzbarkeit hängt dabei stark von produktspezifischen Faktoren wie mechanischen Belastungen, Geometrie oder Stückzahl ab. Es besteht somit ein Bedarf für eine allgemeingültigere Beschreibung multifunktionaler Lösungen, damit diese auch auf andere Anwendungsfälle angewandt werden können. Aus diesem Grund wird die Entwicklung funktionsintegrierter Lösungen anhand unterschiedlicher Entwicklungsebenen spezifiziert (vgl. Abschnitt 7.1). So lassen sich spezifische Fragestellungen den einzelnen Ebenen zuteilen und die Entwicklung multifunktionaler Lösungen strukturieren. Eine zentrale Rolle spielen die eingesetzten Materialien und deren Kombination. In diesem Zusammenhang wird auf Basis von elementaren Gestaltprinzipien ein Produktmodell entwickelt, das zur Darstellung komplexer Materialstrukturen und Ansätzen zur Integration zusätzlicher Funktionen geeignet ist (vgl. Abschnitt 7.2). Für eine bessere Nutzbarkeit bestehender Lösungen werden Kataloge zur Sammlung bestehender Lösungen entwickelt. Abschließend erfolgt die exemplarische Darstellung der Entwicklung eines in den Vorflügel der Flugwindkraftanlage (vgl. Kapitel 3) integriertes Enteisungssystems (vgl. Abschnitt 7.3).



7.1 Entwicklungsebenen

Bei der Entwicklung von Lösungen im Allgemeinen sowie für multifunktionale Lösungen im Speziellen gilt es unterschiedlichste Anforderungen und Randbedingungen zu berücksichtigen. Für eine bessere Übersicht und Unterscheidung unterschiedlicher Entwicklungsaspekte lassen sich einzelne Entwicklungsebenen definieren, die bestimmte Aspekte der Entwicklung bzw. des Produkts berücksichtigen.

Im Rahmen des Projekts wurden sieben spezifische Ebenen definiert, die in Abbildung 7.1 anhand der Entwicklung der in Kapitel 2 betrachteten funktionsintegrierten Heckklappe dargestellt sind. Auf der linken Seite findet eine Spezifizierung der zu integrierenden Funktion statt. Dabei werden ausgehend von der Beschreibung von Funktionen und deren Anwendung (Ebene 1) Möglichkeiten zur grundlegenden Umsetzung der Funktion über physikalische Effekte und Prinzipien (Ebene 2) sowie zur physischen Umsetzung von Funktionsträgern bspw. in Form von Materialien oder Funktionskomponenten (Ebene 3) betrachtet. Von der rechten Seite findet eine schrittweise Erhöhung der Auflösung des betrachteten Produkts durch Betrachtung des Gesamtsystems und dessen Schnittstellen zum Supersystem (Ebene 7), einzelner Module und Bauteile des Produkts (Ebene 6) sowie spezifischer Bereiche und Bauelemente (Ebene 5) statt. Verknüpft werden beide Seiten durch die Ebene der Materialstrukturen, auf der die eingesetzten Materialien und deren Topologie ohne Berücksichtigung geometrischer Eigenheiten betrachtet wird. Anhand dieser Ebenen lassen sich verschiedene Ausgangslagen bzw. Ziele der Entwicklung nachvollziehen bzw. voneinander unterscheiden. Im Rahmen dieses Kapitels ist es das Ziel, auf der Ebene der Materialstrukturen methodische Unterstützung in der Entwicklung multifunktionaler Lösungen bereitzustellen, die nachfolgend dargestellt werden.

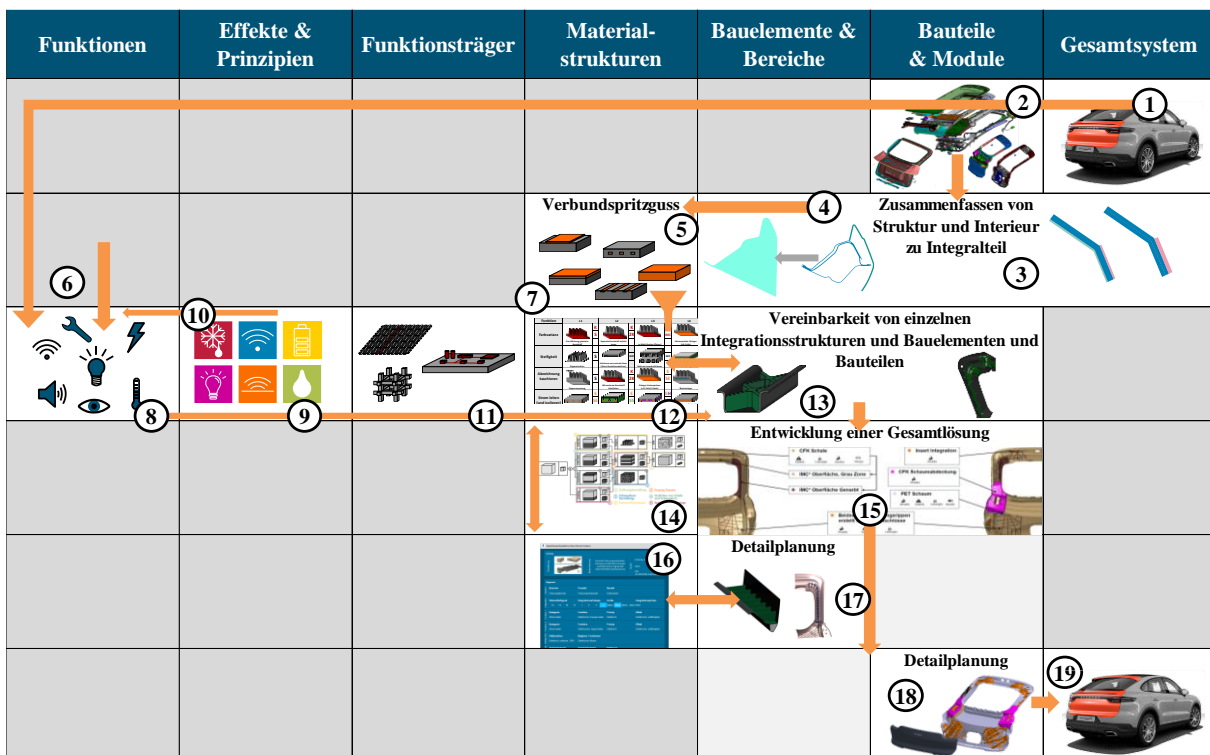


Abbildung 7.1: Entwicklungsebenen am Beispiel der funktionsintegrierten Fahrzeugheckklappe

7.2 Multifunktionale Materialstrukturen

Zur Planung von Funktionsintegration auf Ebene der Materialstrukturen bedarf es geeigneter Modelle zur Darstellung der dort relevanten Aspekte. Nachfolgend werden Ansätze zur Darstellung von Materialstrukturen in Bezug auf die eingesetzten Materialien und deren Topologie vorgestellt, die bei der Entwicklung multifunktionaler Materialstrukturen unterstützen sollen.

7.2.1 Integrationsprinzipien

Die Vielfältigkeit von möglichen Lösungen zur Integration von Funktionen in strukturelle Bauteile unterstreicht die Notwendigkeit einer strukturierten Kategorisierung. Dabei hängen die grundsätzlichen Möglichkeiten bzw. spezifischen Eigenschaften der Integration von nicht-strukturellen Funktionen in strukturelle Bauteile stark vom gewählten Gestaltungsansatz bzw. den verwendeten Materialien ab. Um die Möglichkeiten der Funktionsintegration im Kontext unterschiedlicher Bauweisen aufzuzeigen, ist es notwendig, verschiedene Prinzipien für den inneren Materialaufbau von Bauteilen zu definieren. Eine Kombination der einzelnen Prinzipien ermöglicht wiederum die Beschreibung komplexerer Strukturen. Darüber hinaus müssen diese Prinzipien auch Möglichkeiten zur Darstellung von Funktionsintegration ermöglichen. Diese Anforderungen zeigen eine Lücke im derzeitigen Stand der Technik und Forschung auf. Aus diesem Grund wurden auf der Grundlage der Projektergebnisse sowie bestehender Ansätze aus der Literatur Kombinations- und Spezifikationsprinzipien abgeleitet und kategorisiert, die zu komplexeren mehrstufigen Strukturen kombiniert und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Fertigungsverfahren konkretisiert werden können. Die im Folgenden vorgestellten Gestaltprinzipien beschreiben die Möglichkeiten der Unterteilung, Kombination oder Integration verschiedener Materialien oder Bauteile. Da nicht festgelegt ist, ob es sich um einzelne Materialien, komplexere Bauteile oder ähnliches handelt, werden die einzelnen Bereiche im Folgenden als Elemente bezeichnet. Für jede Kategorie können wiederum Unterkategorien definiert werden, die eine Detaillierung des jeweiligen Prinzips darstellen. Abbildung 7.2 zeigt die grundsätzliche Einteilung zusammen mit Beispielen für die jeweilige Kategorie nach Fröhlich & Viotor [1].

Segmente beschreiben die Aufteilung in zwei Elemente. Bei vertikalen Verbundwerkstoffen kann diese beispielsweise als gleich (Joint), als dünnere Schicht (Coating) oder als dünne Schicht (Film) definiert werden. Materialverbunde beschreiben vor allem geschichtete Verbunde, wie Mehrschicht- oder Sandwichstrukturen, wobei im Falle des Sandwichkerns genauer zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Kernen unterschieden werden kann. Einbettungen beschreiben die Einbettung von Elementen in andere. Inserts/Onsets stellen größere, aber lokal angelegte Elemente dar. Einsätze werden in die bestehende Struktur integriert und können intern oder extern sein. Ein Sonderfall sind Inserts, die zwischen zwei anderen Elementen platziert werden. Einsätze hingegen werden außen angebracht. Verbundwerkstoffe beschreiben eine makroskopisch homogene Verbindung zwischen zwei Elementen unter Berücksichtigung von Faser-, Partikel- und Kreuzungsverbunden.

Neben der Kombination mehrerer Elemente spielt auch die genauere Spezifizierung einzelner Elemente eine entscheidende Rolle bei der Beschreibung von multifunktionalen Hybridstrukturen. Neben der Zuordnung eines Materials kann auch dessen innere Struktur beschrieben werden. Dabei können Porosität (bspw. Schaum), Kornstrukturen (bspw. Partikelschaum) oder Gitterstrukturen unterschieden werden. Darüber hinaus können in begrenztem Maße auch geometrische Aspekte auf makroskopischer Ebene unterschieden werden. So kann ein Element beispielsweise eine komplexe Form wie eine Rippenstruktur aufweisen oder Hohlräume besitzen. Ein anderes Beispiel sind Sandwichkerne oder die genaue Definition von Fasern in FVK in Bezug auf Länge oder Verknüpfung untereinander.

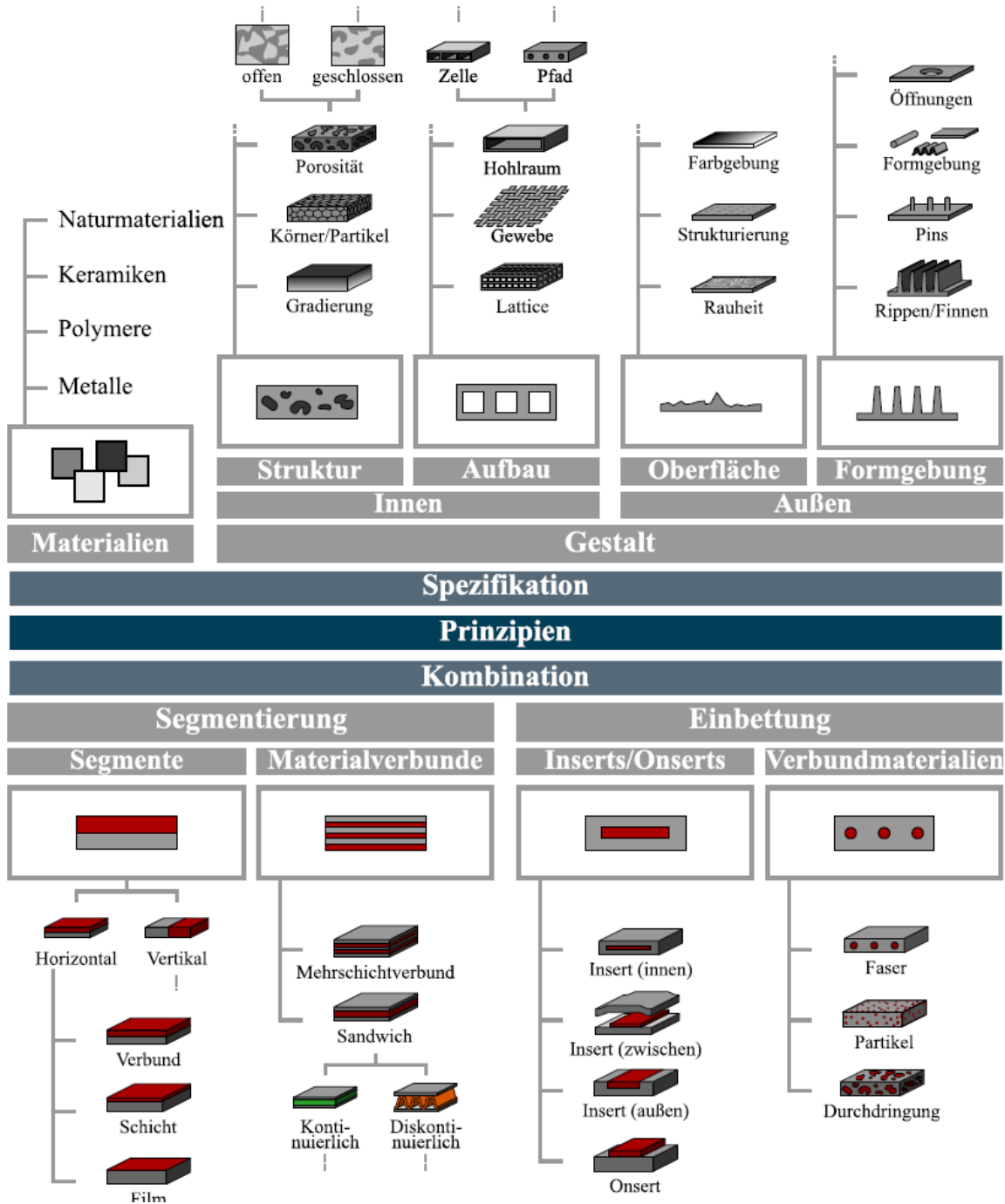


Abbildung 7.2: Prinzipien zur Kombination und Spezifizierung von Materialstrukturen nach [1]

7.2.2 Generische Materialstrukturen

Die abgeleiteten Gestaltprinzipien stellen jeweils nur einzelne Möglichkeiten zur Unterteilung von Elementen dar. Insbesondere in hybriden Bauteilen werden jedoch in der Regel mehrere Gestaltungsprinzipien miteinander kombiniert. Dies ist auch für die Darstellung von Funktionsintegration essentiell. Abbildung 7.3 (oben) zeigt die Darstellung verschiedener Ansätze zur Integration von elektrischen Leitungen in ein Kunststoffbauteil auf Ebene der Materialstrukturen (vgl. Kapitel 2). Dabei werden teilweise mehrere Integrationsprinzipien in einer Struktur dargestellt. Diese generischen Materialstrukturen eignen sich zur anwendungsneutralen Darstellung von

Grundprinzip	Klassische Leitungen als Einleger		Leiter auf/in Halbzeug			Variierter Leiter		Mehrschichtverbunde		Leitfähiges Grundmaterial	Hohlraum		
Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Bezeichnung	Leitungen als Einleger SD	Leitungen als Einleger im Schaumspritzguss	Faserhalbzeug mit applizierten Leitern	Halbzeug mit applizierten Leitern	Schaumhalbzeug mit applizierten Leitern	Variierter (Bläsiger) Leiter als Einleger	Metalleinleger (auch Struktureinleger)	Mosaik-FKV Mehrschichtverbund	C-Faser-Leitung in CFK	Leitfähiger Kunststoff	Hohlstruktur als Kabelschacht		
Beschreibung	Leitungseinleger in Spritzgusswerkzeug mittels Schieber	Leitungseinleger in Schaumspritzgusswerkzeug mittels Schieber	Anpassung auf Faserhalbzeug und anschließendes Einlegen in Werkzeug	Anpassung auf Halbzeug allgemein (Bspw. Folie) und anschließendes Einlegen in Werkzeug	Anpassung in Schaumhalbzeug und anschließendes Einlegen in Werkzeug	Mischwerk: CF-Balancen in GFK Formstabilisiert von Vlies in Prozess	In Verbundspritzguss eingetragene Halbzeug	Mechanische Grundstruktur	Mechanische Grundstruktur	Durch aktive Wirkung generierter Hohlstruktur, mit mechanischen Eigenschaften	Hohlstruktur als Kabelschacht		
Darstellung													
Herausforderungen (Einleitende Faktoren)	Ggf. Isolierung notwendig Versteifung im Prozess (Krausbildung)	Ggf. Isolierung notwendig Versteifung im Prozess (Krausbildung)	ggf. -vollschichtiger Prozess zur Konsolidierung des Faserhalbzeuges Einhaltung Durchmesser auf Kupfer Faserhalbzeug auf -vollschichtiger Einleger	2D-Krümmung ggf. schwierig	Halbbarkeit Schaum im Prozess	Herstellung bei Notwendigkeit unterschiedlicher Spannungen	Herstellung bei Notwendigkeit unterschiedlicher Spannungen	Schleifig umformbar	Leitfähigkeit zu schlecht für elektrische Verbraucher und Korrosionsschutz schwierig	Schwierigkeit zu erreichen für mechanische Verbraucher und Korrosionsschutz schwierig	Mittlere Positionierung Einleger für zuverlässige Lösung oder WTT/GTG		
Prozesse	Spritzguss mit Einleger	Schaumspritzguss	Spritzguss mit Einleger	Verbundspritzguss mit flächigem Einleger	Verbundspritzguss mit Schaumleinleger	Spritzguss mit Einleger	Spritzguss mit Einleger	Verbundspritzguss mit MSV	Verbundspritzguss mit FKV	Spritzguss	Spritzguss mit Wasser-Gestein		
Ergebnis/FaB	umsetzbar	umsetzbar	umsetzbar prüfen	umsetzbar	nicht umsetzbar	nicht umsetzbar	nicht umsetzbar	nicht umsetzbar	nicht umsetzbar	nicht umsetzbar	nicht umsetzbar	Stand der Techn.	
Projekt	Entwicklungsaufwand bzgl. Technologie	Entwicklungsaufwand Funktionsintegration	Experte Konsortium	Kostenabschätzung	Reparatur und Wartung	GWP	Recyclingfähigkeit	Anforderungen an Funktion	Heckleuchte (V.S.A)	Spoller	Schnittstelle	Heckklappe	Übertragung



Funktion	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Farbvarianz	 K S	 K 2K	 K IMC	 E SE	 E SE	 E SE	
Steifigkeit	 S	 GWD	 GWD	 SS	 E SE	 E SE	 E VS
Abzeichnung kaschieren	 S	 K 2K	 E SE	 E SE	 E SE	 SS	 SS
Strom leiten (und isolieren)	 E SE	 E SE	 E SS	 E VS	 E SE	 E SE	 E SE
Medien leiten	 E SE	 E SE	 E SS	 E VS	 E SE	 E SE	 E SE
Elektrisches Signal leiten	 E SE	 E SE	 E SS	 E VS	 E SE	 E SE	 E SE
Innenbeleuchtung	 E SE	 E SE	 E SE	 E M	 E SE	 E SE	 E SE
Akustike Dämmung	 SS	 E SE	 E SE	 E SE	 SS	 E SE	 E SE
Thermische Dämmung	 SS	 E SE	 E SE	 E SE	 E SE	 E SE	 E SE

Abbildung 7.3: Morphologischer Kasten zur Umsetzung verschiedener Funktionen mittels generischer Materialstrukturen

multifunktionalen Grundansätzen, die sich somit auch für die Übertragung multifunktionaler Lösungen auf andere Anwendungsfälle eignen. Aufgrund der begrenzten Darstellbarkeit mehrerer Ansätze eignen sich die generischen Materialstrukturen in der Regel nur für einfache Lösungen oder Teillösungen komplexerer Strukturen. Für den letzteren Fall lassen sich Ansätze für verschiedene Teilfunktionen gegenüberstellen und somit eine verträgliche Lösung generieren. Auf diese Weise können ggf. auch Synergien zwischen Ansätzen zur Integration unterschiedlicher Funktionen genutzt

werden. Abbildung 7.3 (unten) zeigt die Generierung einer Gesamtlösung auf Basis verschiedener Teillösungen am Beispiel der multifunktionalen Heckklappe durch eine morphologische Analyse.

7.2.3 Multi-Level-Strukturen

Die zuvor gezeigte generischen Materialstrukturen eignen sich für die Darstellung bestimmter Umsetzungsmöglichkeiten einzelner Funktionen anhand der Kombination einer geringen Anzahl von Integrationsprinzipien. Die Darstellung komplexerer Materialstrukturen unter Berücksichtigung verschiedener Funktionen und Integrationstiefen erfordert neue Produktmodelle, wie die im Rahmen des Projekts entwickelten Multi-Level-Strukturen. Auf diese Weise können Funktionen oder funktionale Komponenten an unterschiedlichen Positionen oder in unterschiedlichen Größenordnungen integriert werden.

Abbildung 7.4 zeigt eine Multi-Level-Struktur am Beispiel der Integration einer Batterie in die Struktur eines Faser-Kunststoff-Verbunds (FKV) nach Adam et al. (2018) [2]. Die Beschreibung der Multi-Level-Struktur erfolgt baumartig, sodass die links als "Blackbox" dargestellte Gesamtstruktur rechts zunehmend durch die Gestaltprinzipien unterteilt bzw. definiert wird. Diese Darstellung ermöglicht eine detailliertere Betrachtung der Möglichkeiten zur Integration von Funktionen oder Funktionskomponenten. In diesem Beispiel wird die ursprüngliche Lösung ohne integrierte Batterie durch zusätzliche Elemente ergänzt bzw. entsprechend angepasst, indem eine Batterieschicht im Makromaßstab durch eine zusätzliche Segmentierung (1), eine Stapelung von leitenden Schichten und isolierenden Schichten als Separatoren (2a), leitende Fasern und ein Festelektrolytmaterial als Matrix (2b) oder koaxiale Faserkondensatoren (3) hinzugefügt werden. Wie dieses kurze Beispiel zeigt, lassen sich durch die Kombination von Gestaltprinzipien in mehrstufigen Strukturen komplexe multifunktionale Hybridstrukturen darstellen.

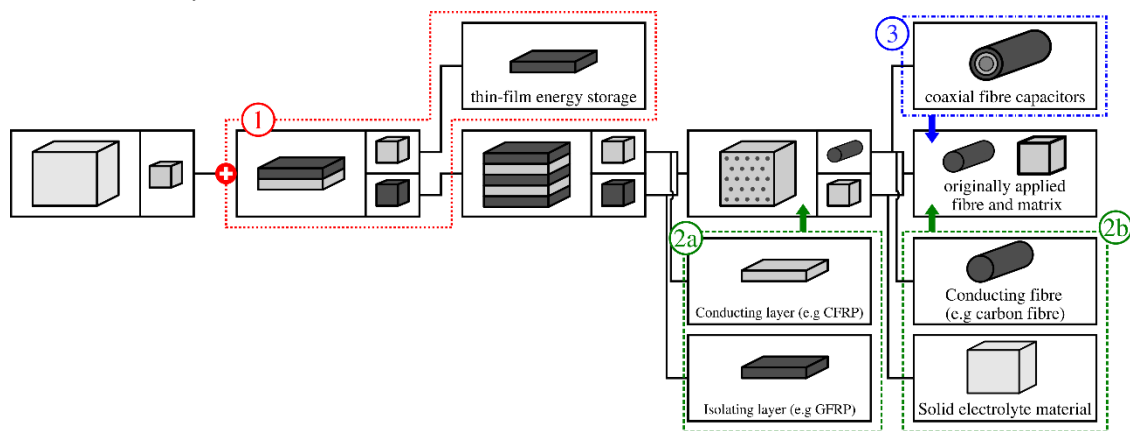


Abbildung 7.4: Beispiel einer Multi-Level-Struktur anhand unterschiedlicher Integrationstiefen nach [1] am Beispiel der Integration eines Energiespeichers nach [2]

7.2.4 Anwendungsszenarien

Der vorgestellte Ansatz zur Darstellung von Materialstrukturen ermöglicht eine strukturierte Bereitstellung von multifunktionalen Lösungen. Aufgrund der unterschiedlichen Auflösungen können unterschiedliche Fragestellungen in der Entwicklung und damit unterschiedliche Entwicklungsszenarien adressiert werden. Im Folgenden werden exemplarisch drei Entwicklungsszenarien mit den entsprechenden Fragestellungen zur Funktionsintegration nach Fröhlich und Vietor [1] vorgestellt. Hierdurch wird die Unterstützung innerhalb der Produktentwicklung und damit das Potenzial des entwickelten Ansatzes angesprochen.

a) Identifikation einer Bauweise

Im ersten Szenario soll ein multifunktionales Bauteil entwickelt werden, das die Leitung von elektrischer Energie ermöglicht. Bei der Wahl der Werkstoffe und Herstellungsverfahren besteht grundsätzlich Freiheit, so dass zunächst eine Analyse bestehender Gesamtlösungen durchgeführt werden

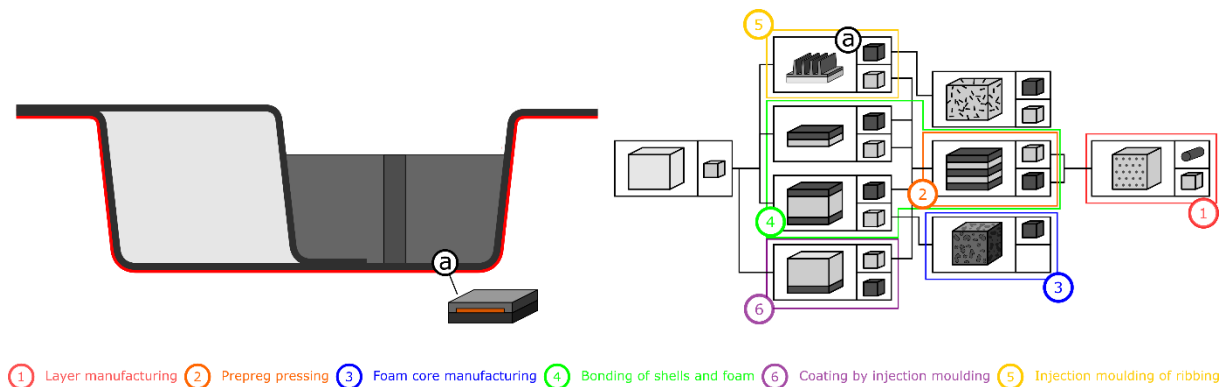


Abbildung 7.5: Darstellung einer spezifischen multifunktionalen Bauweise [1]

Abbildung 7.5 zeigt ein generisches Modell der in Kapitel 2 entwickelten Heckklappe mit integrierten Leitern sowie den repräsentativen mehrstufigen Aufbau und die damit verbundenen Fertigungsschritte. Das Profil besteht aus einer Schale aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) sowie einer Deckschale, die etwa die Hälfte des Profils auf der linken Seite bedeckt und einen Schaumkern enthält. Beide CFK-Schalen werden durch Prepreg-Pressen in ihre endgültige Form gebracht. Der Kern besteht aus einem Extrusionsschaum. Der resultierende Sandwichaufbau wird durch eine anschließende Verklebung unter Unterdruck realisiert. Die rechte Seite des Profils wird im Spritzgussverfahren mit einer Kunststoffverrippung gefüllt. Eine zusätzliche Beschichtung sorgt für die nötige optische Qualität und Farbvarianz durch ein separates Spritzgussverfahren. Der gesamte Fertigungsweg ist in der entsprechenden mehrstufigen Struktur unter Berücksichtigung der einzelnen Fertigungsprozesse in der Reihenfolge ihrer Anwendung (1-6) und Zuordnung zu den beeinflussten Elementen dargestellt. Der Leitereinsatz wird in Schritt 2 durch Umspritzen integriert. Durch die Darstellung der Gesamtlösung können Rückschlüsse auf die Anforderungen an die Umsetzungen und die Machbarkeit gezogen werden. Darüber hinaus können einzelne Zweige der mehrstufigen Struktur für die Entwicklung weiter berücksichtigt werden.

b) Identifikation eines Integrationsansatzes

Im zweiten Szenario soll die elektrische Leitfähigkeit in ein FKV-Mehrschichtverbundprofil integriert werden. Es gibt also bereits Vorgaben für das Design in Form der zu verwendenden Materialien und der Herstellungsverfahren. Somit ist es möglich, nach spezifischen Konstruktionsprinzipien in Kombination mit den verwendeten Materialien zu suchen. Die oben genannten Vorgaben bieten aber in der Regel auch gewisse Freiheiten, die für die Integration von Funktionen genutzt werden können.

Abbildung 7.6 zeigt die mehrstufige Struktur der Komponente zusammen mit möglichen Integrationsansätzen. Durch die Verknüpfung von Lösungen ist es möglich, Lösungen für untergeordnete Strukturen auf Basis des Mehrschichtverbundes zu finden. Die Integration kann z.B. durch einen leitfähigen Metall-FRP-Mehrschichtverbund, Metall-CFK-Hybride, leitfähige Fasern oder eine Kreuzverbundmatrix erfolgen. In der Regel erfordert die Integration von Zusatzfunktionen eine

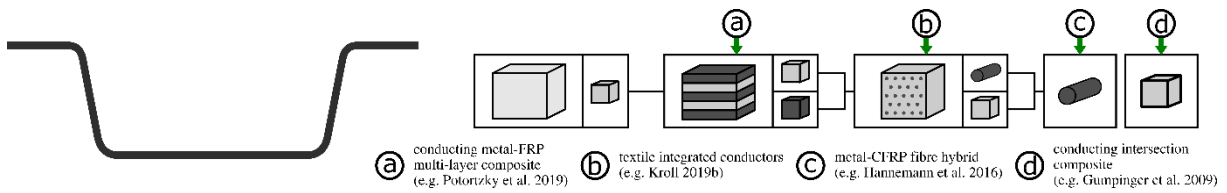


Abbildung 7.6: Auswahl geeigneter Integrationsansätze für eine bestehende Bauweise [1]

Änderung oder zusätzliche Elemente. Daher ist es von Bedeutung, auf welcher Ebene die Änderungen vorgenommen werden können, ohne kritische Eigenschaften zu beeinflussen.

c) Identifikation einer Integrationsposition

In diesem Szenario erfordert das Design eine spezifische Integration des Leiters durch einen Einsatz. Dies führt zu einer höheren Flexibilität oder Anpassungsfähigkeit bei der Gestaltung der Komponenten und des Leiters. Das Bauteil und die mehrstufige Struktur sind die gleichen wie in Szenario 1.

Abbildung 7.7 zeigt mögliche Positionen des Einsatzes. Aus den unterschiedlichen Positionen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an den Einsatz. Die Anforderungen ergeben sich aus unterschiedlichen Randbedingungen bei der Herstellung, Einflüssen in der Nutzungsphase und einer End-of-Life-Trennung. Wie auf der rechten Seite zu sehen ist, hat jede Position ganz spezifische Anforderungen. Daher können unterschiedliche Ansätze für Leitereinsätze notwendig sein. Der Einfluss der Herstellung durch hohe Drücke und Temperaturen ist beispielsweise bei einer Integration in den Schaumkern gering. Im Gegensatz dazu sind diese Einflüsse bei einer Integration in das GFK-Laminat sehr hoch. Diese Bedingungen erfordern eine Lösung, die entweder widerstandsfähiger ist oder weniger von den Bedingungen beeinflusst wird.

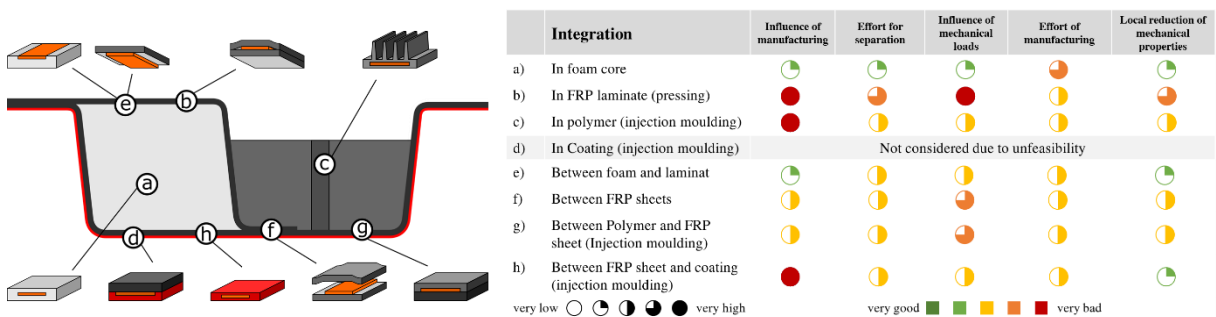


Abbildung 7.7: Einflussfaktoren auf die und von der zu integrierenden Komponente für unterschiedliche Positionen [2]

7.3 Kataloge

Bei der Entwicklung multifunktionaler Lösungen ist es zielführend auf bereits bestehende Lösungen zurückzugreifen. Diese können bspw. unter Anpassung übernommen werden oder als Inspiration für eigene Entwicklungen dienen. Für die Identifikation von Lösungen bedarf es einer geeigneten Bereitstellung. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von Lösungsspeichern, wie Kataloge oder Datenbanken, in denen Lösungen hinsichtlich bestimmter Merkmale und Eigenschaften beschrieben sind. Diese Eigenschaften und Merkmale lassen sich wiederum als Filterkriterien für die Identifikation geeigneter Lösungen anwenden. Nachfolgend werden zwei Grundansätze zur Umsetzung bzw. Anwendung von Lösungsspeichern dargestellt.

7.3.2 Lösungskataloge für Materialkombinationen

Neben Katalogen, die sich auf spezifische Lösungen für Funktionsintegration fokussieren, lassen sich auch Kataloge für die Kombination bestimmter Materialien nutzen. Vorteil gegenüber einer Sortierung nach den innerhalb der Lösungskataloge angegebenen Materialstrukturen ist die für bestimmte Materialkombinationen spezifische Kategorisierung bzw. Gestaltung von Materialstrukturen. So lassen sich beliebige Prinzipien für Kombination anlegen, ohne dass hierfür bestimmte multifunktionale Lösungen angelegt sind. Abbildung 7.9 zeigt den Ausschnitt eines innerhalb des Projekts erstellten Katalogs für die Kombination von Metall und FKV bzw. Kunststoffen. Grundlage für die Gliederung sind dabei die in Abschnitt 7.2.1 vorgestellten Integrationsprinzipien. Der Katalog ist im Rahmen der Betrachtung einer verschleißfesten Seilanbindung bzw. eines verschleißfesten Vorflügels (vgl. Abschnitte 3.2 und 3.3) entstanden und bezieht deshalb insbesondere auf die Möglichkeiten zur Anwendung der Materialkombinationen für diese Anwendungsfälle. Darüber hinaus sind den Kombinationen jedoch weitere spezifischen Eigenschaften und Merkmalen zugeordnet. Dies betrifft unter anderem die Trennbarkeit der Verbunde und dafür verfügbare Verfahren. Zudem werden Beispiele für die Umsetzung nicht-struktureller Funktionen gegeben.


















Gliederungsteil			Hauptteil			
Typ	Art	Beschreibung	Beispiel	Nr.	Matrix-/Deckschicht	Verstärkung/Kern
Verbundwerkstoffe	Faserverbundwerkstoff	Metallmatrix (Verstärkungen: Kurz-, Lang- oder Endlosfaser, Whisker)		1	Informationen und Bewertung hinsichtlich spezifischer Eigenschaften	
		Polymermatrix (Verstärkungen: Kurz-, Lang- oder Endlosfaser)		4		
		Hybrid-Yarns (Metallfaser mit Polymerfaser umwickelt)		7		
		Faser-Metall Gewebe oder Gelege		8		
	Schichtverbundwerkstoff	FKV-Metall Laminat		9		
		"Bi-Metall" aus FKV und Metallblech		10		
		Sandwich: FKV als Deckschicht, Metall-Honigwaben Kern		11		
		Sandwich: Metall Deckschicht, Polymerschaum		14		
		Sandwich: Metall Deckschicht, FKV-Faltwaben		16		
	Teilchenverbund	Metallmatrix mit Partikeln gemischt		18		
Durchdringungsverbund	Metallschaum mit kurzfaserverstärktem Polymer		19			
Mehrere Komponenten	Insert	in-mould Verfahren		20		
		zwischen zwei Hälften eingelegt, Fasern vollständig geschnitten		23		
		in Oberfläche eingelassen		24		
	Onsert	auf Oberfläche aufgebracht		25		
Beschichtungen	Coating	Metall auf FKV aufgebracht		26		
	Film	dünner Metallfilm auf FKV		27		

Abbildung 7.9: Ausschnitt eines Lösungskatalogs für Materialkombinationen

7.4 Integration einer Vorflügelenteisung

Im Rahmen des Projekts wurden mögliche Umsetzungen einer Enteisung für den Vorflügel untersucht. Ziel war es dabei nicht, ein realisierbares Konzept oder sogar eine technisch ausgereifte Lösung zu entwickeln, sondern vielmehr mögliche Lösungen auf ihre Anwendbarkeit zu untersuchen und somit Spezifika von Lösungen auszuarbeiten. Die Erkenntnisse dienen als Ausgangslage für die Aufnahme von Lösungen für eine Enteisung und Eisdetektion in den Lösungskatalog. Dieser Ansatz stellt damit eine Alternative zu der Strukturierung von Lösungen aus Abschnitt 7.3.1 dar. Dort wurden die Funktionen entsprechend des Umsetzungsprinzips geordnet, wie die Funktion *elektrisches Signal leiten*, die bspw. auch optisch umgesetzt werden kann. Die Anwendung der Enteisung kann hingegen über Erwärmung oder Vibrationen und somit über völlig unterschiedliche physikalische Effekte bzw. prinzipielle Lösungen umgesetzt werden.

7.4.1 Systemdarstellung

Das im Rahmen dieser Betrachtung zu berücksichtigende Gesamtsystem ist der Flügel der Flugwindkraftanlage mit den entsprechenden Anforderungen und Randbedingungen (vgl. Abschnitt 3.1). Relevanten Anforderungen sind an dieser Stelle insbesondere ein möglichst geringes Gewicht, keine aerodynamische Beeinflussung durch das Enteisungssystem. Zudem ist die benötigte Energie für das System stark begrenzt, da der Strom am Boden erzeugt wird und somit für die Energiebereitstellung am Flügel eine separate Energieerzeugung notwendig ist. Bei der Energieversorgung ist zudem auf die Möglichkeiten eines Übergangs zwischen Flügel und Vorflügel bzw. zwischen den Vorflügeln zu achten. Die Verbindung an den Vorflügel kann dabei zum einen für jedes Segment separat über den Flügel erfolgen. Eine elektrische Anbindung unten den einzelnen Segmenten besteht bereits und kann auch für die Energieversorgung der Enteisung genutzt werden. Zum anderen kann die Verbindung zentral über ein Segment (bspw. die Centerbox) erfolgen. In diesem Fall müssten die Vorflügel bei der Flügelmontage zusätzlicher untereinander kontaktiert werden.

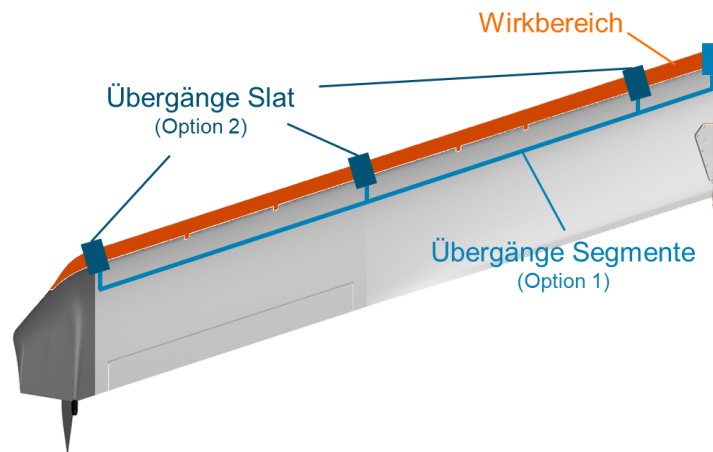


Abbildung 7.10: Optionen für die Übergänge der Stromversorgung

7.4.1.1 Arten von Vereisung

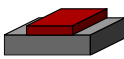
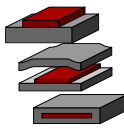
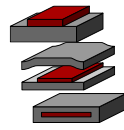
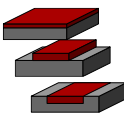
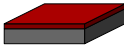

Die Vereisungsphänomene für die Flugwindkraftanlage ähneln grundsätzlich denen von Windkraftanlagen oder Flugzeugflügeln. Perentia & Ilinca (2011) beschreiben für Windkraftanlagen drei unterschiedliche Vereisungsarten. Bei einer Vereisung innerhalb von Wolken (*in-cloud icing*) treffen unterkühlte Wassertropfen auf die Oberfläche und gefrieren dort. Hierbei kann wiederum zwischen drei Phänomenen unterschieden werden. Raufreif (*soft rime*) bildet eine dünne Schicht und

besitzt eine geringe Dichte und Anhaftung. Raueis (*hard rime*) besitzt im Vergleich eine höhere Dichte und Anhaftung. Klareis (*glaze*) entsteht, wenn ein unterkühlter Tropfen nicht sofort beim Auftreffen auf die Oberfläche gefriert, sondern erst später. Sowohl Eisdichte als auch Anhaftung sind sehr stark. Die zweite Vereisungsart wird durch Niederschlag hervorgerufen, wobei zwischen gefrierendem Regen und nassem Schnee unterschieden werden kann. Während gefrierender Regen eine hohe Dichte und starke Anhaftung aufweist, führt nasser Schnee zu einer nur leicht anhaftenden Masse und kann somit leicht entfernt. Ein nachträgliches Gefrieren erschwert die Entfernung jedoch erheblich. Die dritte Art der Vereisung ist Frost, bei dem sich Luftfeuchtigkeit direkt als Eis auf kalten Oberflächen ablegt, wobei eine starke Anhaftung entstehen kann. Dieser Effekt tritt eher bei niedrigen Windgeschwindigkeiten auf und ist auf dem Flügel der Flugwindkraftanlage eher in Parkposition zu erwarten.

7.4.2 Konzepte

Für die Umsetzung einer Enteisung für den Vorflügel gilt es neben den produktbedingten Randbedingungen auch einige funktionale Randbedingungen zu beachten. Insbesondere aufgrund der begrenzten zur Verfügung stehenden Leistung sind zusätzliche passive Maßnahmen zu Eisprävention sinnvoll. Darüber hinaus muss zur Vermeidung eines unnötigen Betriebs der Enteisung auch eine Eisdetektion umgesetzt werden. Hierbei wird eine synergetische Umsetzung angestrebt. Nachfolgend wird eine Auswahl unterschiedlicher Lösungen für diese drei Funktionen vorgestellt und hinsichtlich der angewendeten Integrationsprinzipien analysiert. Für die Enteisung des Flügels stehen verschiedene prinzipielle Lösungen unter Anwendung unterschiedlicher physikalischer Effekte zur Verfügung. Grundsätzlich sind dabei Lösungen anwendbar, die für die Enteisung von Flugzeugflügeln oder Blättern von Windkraftanlagen entwickelt worden sind. Dabei sind jedoch die abweichenden Randbedingungen für den Einsatz im Flügel der Flugwindkraftanlage zu berücksichtigen. Tabelle 7.1 stellt eine Auswahl möglicher mechanischer und thermischer Lösungen zur Enteisung gegenüber.

Tabelle 7.1: Beispiele für mechanische und thermische Enteislösungen

Effekt	Prinzip	Ausführung	Integration	Vor- und Nachteile	Bsp.
Mechanisch (Vibration oder Verformung erzeugen)	Aufblasen, Balglösung	Aufbringen einer Balgstruktur		Ggf. kritischer Einfluss auf Aerodynamik; weiche Oberfläche; vergleichsweise hohes Flächengewicht	[4]
	Verformbare Oberfläche oder Struktur / Morphing	Einbringen von Aktuatoren		Aktuatoren auch anderweitig nutzbar; Schwieriger Auslegung; kritischer Einfluss auf Aerodynamik	[5] [6]
	Einbringen von Schwingungen	Integration von Aktuatoren (bspw. Piezo)		Anderweitig nutzbar, geringer Energieverbrauch, geringer Bauraum und geringes Gewicht Auslegung erforderlich, nicht Stand der Technik	[7] [8]
Thermisch (Wärme erzeugen)	Elektrischer Widerstand (Joule Heating)	Aufgebrachtes Element oder Schicht		Technisch ausgereift und als Fertiglösung kaufbar; hoher Energieverbrauch; Sekundärvereisung durch geschmolzene Tropfen; Eisabtragung abhängig von Windgeschwindigkeit	[9] [10]
	Mikrowellen	Direkt oder indirekt		Nicht Stand der Technik; Auslegung schwierig	[11] [12]
	Heißluft	Heißluftkanal		Freie Positionierung der Wärmeerzeugung Energieverbrauch; erforderlicher Bauraum	[13] [14]

Um eine Ablagerung von Eis zu verhindern oder zumindest zu verringern lassen sich die zuvor für die Enteisung beschriebenen Möglichkeiten auch präventiv anwenden. Dies führt jedoch in der Regel zu einem hohen Energieverbrauch oder anderweitigen Beeinflussungen der Nutzung. Aus diesem Grund werden zur Verhinderung von Eisablagerungen in der Regel passive Maßnahmen angewendet. Neben chemischen Ansätzen eignen sich insbesondere Modifikationen der Oberfläche, die sich den Spezifikationsprinzipien zuordnen lassen (vgl. Abschnitt 7.2.1). Im Rahmen der Untersuchungen wurden zahlreiche Möglichkeiten zur Verhinderung von Eisanhaftung durch hydrophobe Oberflächen ermittelt [15, 16, 17]. Diese lassen sich unterteilen in Strukturierungen der Oberfläche sowie einer Modifikation der Oberflächenpolarität. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit einer passiven Erwärmung der Oberfläche durch Coatings [18]. Grundsätzlich kann eine Kombination verschiedener Ansätze bzw. eine Nutzung eines Ansatzes für mehrere Funktionen sinnvoll sein. Beispiele hierfür sind eine Kombination aus thermischer Enteisung zusammen mit einem hydrophobem Oberflächencoating [19, 20, 21], die Nutzung von Ultraschall für Enteisung und Eisdetektion [22] oder einer Kombination aus thermischer und mechanischer Enteisung [6]. Eine Übersicht über die Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Ansätze für Eisdetektion Anti-Vereisung und Enteisung wird bspw. durch Madi et al. [23] analysiert.

Für den zielgerichteten Einsatz einer Enteisung bedarf es einer geeigneten Sensorik, um Vereisung festzustellen. Ebenso wie für die Enteisung lassen sich auch für eine Eisdetektion unterschiedliche Effekte nutzen. Beispiele hierfür sind die Messung der Eigenfrequenz [24], Messung induzierter akustischer Wellen [25], optische Detektion [26] oder Infrarotmessung [27].

7.4.3 Suche nach und Übertragung von Lösungen

Da sich die Randbedingungen des Einsatzes für die Flugwindkraftanlage und damit auch für mögliche andere Anwendungsfälle von den Randbedingungen für den Einsatz bei einer Windkraftanlage oder Flugzeug unterscheiden, lassen sich auch andere Lösungen zur Erzeugung von Wärme heranziehen. Dabei können sowohl Lösungen zur Erzeugung von Wärme, als auch Lösungen für andere Funktionen genutzt werden. So können bspw. Lösungen zum Leiten von elektrischem Strom ggf. durch Anpassung des Leitermaterials zur Erzeugung von Wärme genutzt werden. So lassen zusätzlich zu den konventionellen Enteisungslösungen auch weitere Lösungen hinsichtlich einer Anwendbarkeit untersuchen. Abbildung 7.11 zeigt mögliche Integrationen der Heizfunktion in die bestehende Struktur des Vorflügels auf unterschiedlichen Auflösungsgraden unter Darstellung des jeweils heizenden Elements (rot) sowie ggf. zugehöriger Integrationsprinzipien (blau).

Neben außen aufgetragenen Heizschichten (1, [9, 10]) können auch lokale oder lineare Inserts als Heizelement genutzt werden (2, [28]). Sowohl Schichten (3, [29]) als auch lokale Elemente (4, [30, 31]) können auch innerhalb der Struktur untergebracht werden. Darüber hinaus lassen sich auch die Fasern bspw. in Form von C-Fasern (5, [32, 33]) oder bei nicht-leitenden Fasern durch eine zusätzliche Beschichtung (6, [34, 35]) sowie die Matrix durch zusätzliche Additivierung (7, [36, 37]) als Heizelemente nutzen. Bei einer Anwendung von Gewebehalbzügen können auch zusätzliche Heizelemente in das Gewebe eingebracht werden (8, [38, 39]).

Die gezeigten Möglichkeiten bedürfen einer weiteren intensiven Prüfung hinsichtlich der Anwendbarkeit für den spezifischen Anwendungsfall. Es wird jedoch ersichtlich, dass die Nutzung von Multi-Level-Strukturen in Kombination mit Lösungssammlungen effizient Möglichkeiten zur Umsetzung von Funktionen ermöglicht.

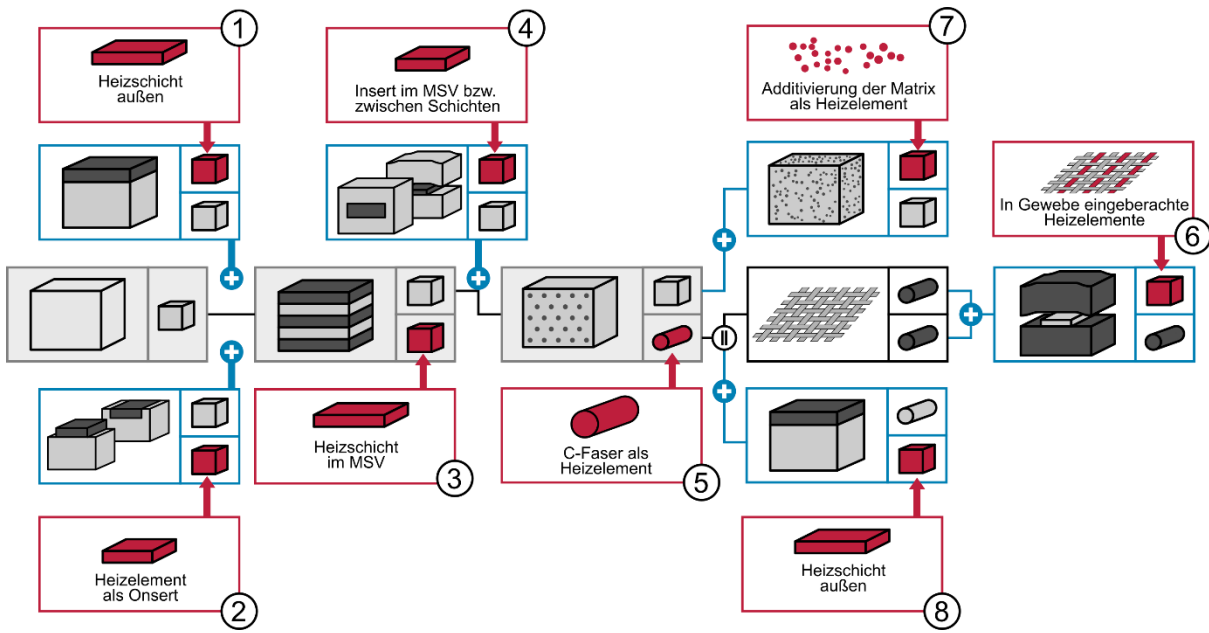


Abbildung 7.11: Darstellung der Integrationsmöglichkeiten anhand einer MLS

Literatur

- [1] T. Fröhlich und T. Vietor, „Design Principles and Multi-Level Structures for Multi-Functional and Multi-Material Design,“ *Proceedings of the Design Society*, Bd. 2, p. 395–404, May 2022.
- [2] T. Adam, G. Liao, J. Petersen, S. Geier, B. Finke, P. Wierach, A. Kwade und M. Wiedemann, „Multifunctional Composites for Future Energy Storage in Aerospace Structures,“ *Energies*, Bd. 11, p. 335, February 2018.
- [3] T. Fröhlich, „Kataloge für multifunktionale Konzepte und Technologien,“ <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202507110705-0>, 2025.
- [4] (. S. S. F.A.A - Federal Aviation Administration, *Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe Volume 2*, 2018.
- [5] C. GmbH, *Curve® Biegeaktorenbringen Bewegung in Ihr Produkt*, 2024.
- [6] O. Tamer, *Thermo-mechanisches Enteistungssystem auf Basis von Formgedächtnislegierungen*, Springer Berlin Heidelberg, 2024.
- [7] VillingerGmbH, *EMIPS - Electromechanical Ice Protection System*, 2024.
- [8] S. V. Venna, Y.-J. Lin und G. Botura, „Piezoelectric Transducer Actuated Leading Edge De-Icing with Simultaneous Shear and Impulse Forces,“ *Journal of Aircraft*, Bd. 44, p. 509–515, March 2007.
- [9] Z. Wang, J. Tao, Y. Shen und S. Liu, „Molecular design and preparation of an integrated CNT@EVA/PVDF composite film heater for effective deicing applications,“ *Journal of Materials Science*, Bd. 57, p. 1019–1035, January 2022.
- [10] VillingerGmbH, *ETIPS - Electro-Thermal Ice Protection*, 2024.
- [11] L. E. Feher, „Avionic Microwave Anti-/De-Icing Systems,“ in *Energy Efficient Microwave Systems*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009, pp. 35 - 58.
- [12] L. Feher, T. Seitz und V. Nuss, „Microwave De-/anti-Icing Using the Mias-Technology,“ *J Microw Power Electromagn Energy*, Bd. 43, Nr. 1, pp. 56 - 59, 2009.
- [13] M. Papadakis, S.-H. Wong, H.-W. Yeong und S.-C. Wong, „Icing Tests of a Wing Model with a Hot-Air Ice Protection System,“ in *AIAA Atmospheric and Space Environments Conference*, 2010.
- [14] L. Battisti, P. Baggio und R. Fedrizzi, „Warm-Air Intermittent De-Icing System for Wind Turbines,“ *Wind Engineering*, Bd. 30, p. 361–374, October 2006.
- [15] X. Liu, T. Wang, W. Tong, Q. Xu und J. Kong, „Fabrication of Unmodified Bionic Copper Surfaces with Highly Stable Hydrophobicity and Anti-Icing Properties via a Transfer with Zr-Based Metallic Glasses,“ *Advanced Materials Interfaces*, Bd. 8, December 2020.

- [16] E. Ueda und P. A. Levkin, „Emerging Applications of Superhydrophilic-Superhydrophobic Micropatterns,“ *Advanced Materials*, Bd. 25, p. 1234–1247, January 2013.
- [17] L. Mishchenko, B. Hatton, V. Bahadur, J. A. Taylor, T. Krupenkin und J. Aizenberg, „Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets,“ *ACS Nano*, Bd. 4, p. 7699–7707, November 2010.
- [18] Y. Li, W. Ma, Y. S. Kwon, W. Li, S. Yao und B. Huang, „Solar Deicing Nanocoatings Adaptive to Overhead Power Lines,“ *Advanced Functional Materials*, Bd. 32, March 2022.
- [19] Y. Ibrahim, R. Kempers und A. Amirfazli, „3D printed electro-thermal anti- or de-icing system for composite panels,“ *Cold Regions Science and Technology*, Bd. 166, p. 102844, October 2019.
- [20] K. Morita, S. Kimura und H. Sakaue, „Hybrid System Combining Ice-Phobic Coating and Electrothermal Heating for Wing Ice Protection,“ *Aerospace*, Bd. 7, p. 102, July 2020.
- [21] G. Fortin, M. Adomou und J. Perron, „Experimental Study of Hybrid Anti-Icing Systems Combining Thermoelectric and Hydrophobic Coatings,“ in *SAE Technical Paper Series*, 2011.
- [22] Z. Shi, Z. Kang, Q. Xie, Y. Tian, Y. Zhao und J. Zhang, „Ultrasonic Deicing Efficiency Prediction and Validation for a Flat Deicing System,“ *Applied Sciences*, Bd. 10, p. 6640, September 2020.
- [23] E. Madi, K. Pope, W. Huang und T. Iqbal, „A review of integrating ice detection and mitigation for wind turbine blades,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 103, p. 269–281, April 2019.
- [24] S. Gantasala, J.-C. Luneno und J.-O. Aidanpaa, „Detection of ice mass based on the natural frequencies of wind turbine blade,“ September 2016.
- [25] V. Berbyuk, B. Peterson und J. Möller, „Towards early ice detection on wind turbine blades using acoustic waves,“ in *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2014*, 2014.
- [26] S. Shajjee, L. Y. Pao, P. N. Wagner, E. D. Moore und R. R. McLeod, „Direct ice sensing and localized closed-loop heating for active de-icing of wind turbine blades,“ in *2013 American Control Conference*, 2013.
- [27] C. Q. Gómez Muñoz, F. P. García Márquez und J. M. Sánchez Tomás, „Ice detection using thermal infrared radiometry on wind turbine blades,“ *Measurement*, Bd. 93, p. 157–163, November 2016.
- [28] Y. Y. A. J. T. Z. G. T. L. R. J. Z. Z. Yuting Zhou, „Co-extrusion 4D printing of shape memory polymers with continuous metallic fibers for selective deformation,“ *Composites Science and Technology*, 18 August 2022.
- [29] D. Michaelis, „Demonstrator,“ in *Leichtbau durch Funktionsintegration*, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2020.
- [30] C. Hopmann, K. Bobzin, M. Weber, M. Öte, P. Ochotta und X. Liao, „IMKS and IMMS—Two Integrated Methods for the One-Step-Production of Plastic/Metal Hybrid Parts,“ in *Advances in Production Technology*, Springer International Publishing, 2014, p. 131–141.

- [31] M. Mohseni und A. Amirfazli, „A novel electro-thermal anti-icing system for fiber-reinforced polymer composite airfoils,“ *Cold Regions Science and Technology*, Bd. 87, p. 47–58, March 2013.
- [32] L. Pan, Z. Liu, O. Kızıldağ, L. Zhong, X. Pang, F. Wang, Y. Zhu, W. Ma und Y. Lv, „Carbon fiber/poly ether ether ketone composites modified with graphene for electro-thermal deicing applications,“ *Composites Science and Technology*, Bd. 192, p. 108117, May 2020.
- [33] C. Hühne, E. Kappel und D. Stefaniak, „Compliant Aggregation of Functionalities,“ in *Adaptive, tolerant and efficient composite structures*, Springer Berlin Heidelberg, 2012, p. 225–235.
- [34] Y. Wu, S. S. Mechael, C. Lerma, R. S. Carmichael und T. B. Carmichael, „Stretchable Ultrasheer Fabrics as Semitransparent Electrodes for Wearable Light-Emitting e-Textiles with Changeable Display Patterns,“ *Matter*, Bd. 2, p. 882–895, April 2020.
- [35] H. Liu, Y. Wang, T. Wang, J. Li, Y. Liu, Y. Liu und L. Liu, „Polypyrrole coated fabrics as high performance sensors and heating elements,“ February 2022.
- [36] H. Watschke, K. Hilbig und T. Vietor, „Design and Characterization of Electrically Conductive Structures Additively Manufactured by Material Extrusion,“ *Applied Sciences*, Bd. 9, p. 779, February 2019.
- [37] H. Sun, Z. Han und N. Willenbacher, „Ultrastretchable Conductive Elastomers with a Low Percolation Threshold for Printed Soft Electronics,“ *ACS Applied Materials & Interfaces*, Bd. 11, p. 38092–38102, September 2019.
- [38] T. Linz and C. Kallmayer, *Textilintegrierte und textilbasierte LEDs und OLEDs, Entwicklung neuer Technologien zur Erzeugung textiler Flächen und Fäden mit hoher Leuchtdichte (Texoled) : Abschlussbericht des Fraunhofer IZM zum Projekt TexOLED ; Laufzeit/Berichtszeitraum: 01.03.2007 - 28.02.2010*, Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2010.
- [39] L. Kroll, „Metallintensive Hybridtechnologien,“ in *Technologiefusion für multifunktionale Leichtbaustrukturen*, Springer Berlin Heidelberg, 2019, p. 159–299.

