

Abschlussbericht

zum Verbundvorhaben



Zuwendungsempfänger:

StreetScooter GmbH
Jülicher Straße 191
52070 Aachen

Förderkennzeichen:

01MX15006A

Vorhabenbezeichnung:

POLICE - PrOlonged Life Cycle for Electric vehicles

Teilprojekt: Systemintegration der Remanufacturing-Konzepte in Elektrofahrzeuge

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2016 – 31.12.2018

Projektpartner



Werkzeugmaschinenlabor
WZL der RWTH Aachen



Futavis GmbH



DEKRA Automobil GmbH



RWTH University Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM)



STREETSCOOTER
StreetScooter GmbH

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Begleit und Wirkungsforschung (BuW) ELEKTRO
POWER II



1 Inhalt

1	Inhalt.....	2
2	Abbildungsverzeichnis.....	3
3	Tabellenverzeichnis.....	3
4	Überblick.....	4
4.1	Aufgabenstellung.....	4
4.1.1	Längere Nutzungsdauer durch Remanufacturing.....	5
4.1.2	Fahrzeuge neuwertig und aktuell gestalten.....	5
4.1.3	Verringerung der Total Cost of Ownership in Folge der Batteriekosten.....	5
4.2	Voraussetzungen im Projekt.....	6
4.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
4.4	Stand der Technik.....	8
4.4.1	Remanufacturing.....	8
4.4.2	Batterie.....	9
4.4.3	Anbindungskonzepte.....	10
4.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
5	Ergebnisbericht.....	12
5.1	Abgleich der erzielten Ergebnisse mit den Zielen und Aufwänden.....	12
5.1.1	AP1 - Entwicklung und Aufbau von Batteriepacks für das Remanufacturing von E-Fahrzeugen.....	12
5.1.2	AP2 - Entwicklung flexibler Anbindungskonzepte.....	14
5.1.3	AP5 - Wirtschaftliche Bewertung und Randbedingungen für Zulassung und technische Bewertung.....	18
5.1.4	AP6 – Aufbau Demonstrator-Fahrzeuge.....	25
5.1.5	AP7 – Batterietests, Fahrzeugtests, Austausch tests zur Validierung.....	26
5.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der Ergebnisse.....	28
5.3	Verwertung der Ergebnisse.....	29
5.4	Fortschritte in vergleichbaren Projekten.....	29
5.5	Veröffentlichungen.....	29



2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht über die Arbeitspakete von StreetScooter im Projekt	7
Abbildung 2 Remanufacturing in der Wiederverwertungspyramide	9
Abbildung 3 Schematische Abfolge zur Integration von Traktionsbatterien.....	10
Abbildung 4 Karosserie-Bauweisen: Schalenbauweise (links) und Spaceframe (mitte), Beispiel für Anbindungspunkte rechts (Heckrahmen Karosserie StreetScooter).....	10
Abbildung 5 Batteriepack (Bauteile nicht vollständig angezeigt).....	13
Abbildung 6 Einbausituation POLICE-Batterie im Fahrzeug D16	14
Abbildung 7 Funktionsstruktur der Anbindung	15
Abbildung 8 Justagebaustein	16
Abbildung 9 Snaploc-Element	16
Abbildung 10 3D-Druck Schraubdom	17
Abbildung 11 Witol-Element	17
Abbildung 12 Baukasten Anbindungselemente.....	18
Abbildung 13 Remanufacturing-Eignung der Komponenten eines Elektrofahrzeugs	19
Abbildung 14 Remanufacturing-Komponenten Minimalszenario	19
Abbildung 15 Gesamtkostenvergleich für das Minimalszenario.....	20
Abbildung 16 Remanufacturing-Komponenten des Szenarios 2a & 2b	21
Abbildung 17 Gesamtkostenvergleich für das Szenario 2b	22
Abbildung 18 Remanufacturing-Komponenten Szenario 3	23
Abbildung 19 Gesamtkostenvergleich Szenario 3.....	24
Abbildung 20 Gesamtkostenvergleich Maximalszenario.....	24
Abbildung 21 Probleme nach dem Einbau der Batterie in das Demonstratorfahrzeug 1.....	25
Abbildung 22 3D-gedruckter Baustein am Demonstrator 2.....	25
Abbildung 23 Testaufbauten ECE-R100	26
Abbildung 24 Schocktest in Z-Richtung	27
Abbildung 25 Kurzschlussdiagramm-Temperatur, Spannung, Stromstärke	28
Abbildung 26 POLICE Demonstrator-Fahrzeug auf der IAA 2017	29

3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Defizit und Lösungsansatz des Forschungsvorhabens	4
Tabelle 2 Meilensteine im Projektverlauf.....	7
Tabelle 3 Eigenschaften Batterie.....	12
Tabelle 4 Verwertung der Ergebnisse	29



4 Überblick

4.1 Aufgabenstellung

Derzeit sind die Anschaffungskosten ein zentraler Grund für die noch geringe Verbreitung von Elektrofahrzeugen, insbesondere wenn vergleichbare Reichweiten, wie bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen, erzielt werden sollen. Im Hinblick auf den Lebenszyklus eines Fahrzeugs, werden die höheren Anschaffungskosten zumeist nicht durch die geringeren Betriebskosten wieder kompensiert. Eine längere Nutzungsdauer des Fahrzeugs (z.B. 16 Jahre) ist ein möglicher Lösungsansatz. Dem stehen die Lebensdauer der Fahrzeugkomponenten und die Wünsche nach einem modernen Fahrzeug gegenüber, was zukünftige Ansprüche erfüllt.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, muss ein kontinuierliches Update von Fahrzeugen, wie bei einer Software, ermöglicht werden, anstatt dieses über den Lebenszyklus unverändert zu lassen. Da ein Fahrzeug aber Großteils aus „Hardware“ besteht, wird in diesem Zusammenhang von einem Remanufacturing des Elektrofahrzeugs gesprochen. Hierzu muss das Fahrzeug die Integration neuer Komponenten produktseitig sowie produktionseitig ermöglichen und die Lebensdauer von Komponenten muss dort, wo es wirtschaftlich sinnvoll ist, erhöht werden, so dass diese wiederverwendet werden können. Eine Gegenüberstellung des Defizites und des angestrebten Lösungsansatzes des Forschungsvorhabens visualisiert Tabelle 1.

Tabelle 1 Defizit und Lösungsansatz des Forschungsvorhabens

Defizit	Lösungsansatz
Kostendefizit eines E-Fahrzeugs	Updatefähiges Elektrofahrzeug
<ul style="list-style-type: none"> Anschaffungskosten Kosten Batterie Begrenzte Nutzungsdauer Lebensdauer Batterie Starre Fahrzeugfunktionalität 	<ul style="list-style-type: none"> Längere Nutzungsdauer durch Remanufacturing Fahrzeuge sind wieder neuwertig und auf aktuellem Stand Batterie: Lange Lebensdauer mit Zelltausch vs. Low-Cost-Batterie mit begrenzter Lebensdauer

Insbesondere aus ökologischer Sicht ist das Remanufacturing besonders erstrebenswert, da hier mit wenig Energie- und Materialeinsatz neue Produkte geschaffen werden können, was dem Leitziel der Bundesregierung nach Verbesserung der Energieeffizienz und einer Optimierung des Ressourceneinsatzes von der Idee bis zum Produkt entspricht. Aus ökonomischer Sicht kann Remanufacturing die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen und damit deren Verbreitung erhöhen. Dies unterstützt eine umweltfreundliche und zukunftsfähige Mobilität.

In diesem Forschungsvorhaben wurde das Remanufacturing von Elektrofahrzeugen untersucht, bei denen z.B. die tragende Struktur (z.B. Stahl Spaceframe) weiterverwendet wird. Eine Verlängerung der Batteriebensdauer wird ebenfalls betrachtet.

Zu den übergeordneten Zielen, die mit dem beantragten Forschungsvorhaben erreicht werden sollten, zählen:

- Erarbeitung von Batteriekonzepten für das Remanufacturing
- Entwicklung eines updatefähigen Fahrzeugkonzepts
- Qualifizierung des 3D-Drucks für Fahrzeugkomponenten
- Befähigung der Fahrzeugmontage/ -demontage für Remanufacturing
- Wirtschaftliche Bewertung des Remanufacturings
- Randbedingungen für Zulassung und technische Bewertung

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollten bereits während der Projektlaufzeit in zwei Demonstrationsfahrzeugen münden, an welchen die entwickelten Technologien getestet werden konnten. Mit Hilfe der Fahrzeuge wurde gleichzeitig die Datenbasis für eine wirtschaftliche Bewertung erstellt.



4.1.1 Längere Nutzungsdauer durch Remanufacturing

Problemstellung

Derzeit sind die Anschaffungskosten ein zentraler Grund für die geringe Verbreitung von Elektrofahrzeugen, insbesondere wenn vergleichbare Reichweiten wie bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen erzielt werden sollen. Über den Lebenszyklus eines Fahrzeugs betrachtet, können die höheren Anschaffungskosten noch nicht durch geringere Betriebskosten kompensiert werden.

Lösungsansatz

Es soll eine längere Nutzungsdauer des Fahrzeugs von bis zu 12 Jahren realisiert werden, um die höheren Anschaffungskosten durch geringere Betriebskosten zu kompensieren. Eine so lange Nutzungsdauer bedingt die einfache Austauschbarkeit diverser kurzlebiger Fahrzeugteile. Um dies zu ermöglichen, soll ein modularer Aufbau und eine prozessseitige Demontierbarkeit wichtiger Komponenten entwickelt werden.

Risiken

Als Folge der Steigerung der Lebensdauer der Fahrzeuge können Probleme bei weiteren, bisher nicht bedachten, Komponenten auftreten. Außerdem könnte bei einigen Kunden die Akzeptanz fehlen ein derart altes Auto zu fahren, obwohl die kritischen Bauteile ausgewechselt wurden. Ein weiteres Risiko stellen die unklaren gesetzlichen Rahmenbedingungen bezüglich des Remanufacturings dar, insbesondere sind die Auswirkungen des Austauschs einzelner Komponenten auf die Typzulassung bislang nicht ausreichend untersucht. Falls bei der Abnahme eines Fahrzeugs nach dem Remanufacturing plötzlich neue Sicherheitsstandards zu erfüllen wären, könnte weiterhin ein Remanufacturing in Folge des Mehraufwands für dementsprechende Anpassungen nicht mehr wirtschaftlich sein.

4.1.2 Fahrzeuge neuwertig und aktuell gestalten

Problemstellung

Eine längere Nutzungsdauer der Fahrzeuge hat zwangsläufig ein veraltetes Design des Elektroautos zur Folge. Dies birgt die Gefahr, dass Privatkunden aus emotionalen Gründen und Unternehmer in Hinblick auf ihr Image trotz einwandfreier Funktionalität des Fahrzeugs auf einen Neuwagen zurückgreifen. Zudem können besonders im Bereich der Nutzfahrzeuge auch wichtige Verbesserungen der Funktionalität, beispielsweise eine verbesserte Ergonomie, zu einer Bevorzugung des Neuwagens führen.

Lösungsansatz

Durch eine flexiblere Gestaltung bereits vorhandener Anbindungskonzepte soll ein unkomplizierter und kostengünstiger Austausch von Außenhaut- und Innenraumkomponenten ermöglicht werden. Als Folge der besseren Austauschbarkeit wäre dann ein Austausch von Außenhaut- und Innenraumkomponenten wirtschaftlich. So kann erreicht werden, dass mehr Kunden das hohe Alter des Elektroautos, aufgrund der Möglichkeit das Fahrzeug günstig hinsichtlich der Optik und/oder der Funktionalität zu updaten, akzeptieren. In der Konsequenz kann so vor allem das „Betriebsmittel Auto“ im Betriebsalltag effizienter und ergonomischer genutzt werden.

Risiken

Analog zum ersten Teilziel bestehen rechtliche Risiken hinsichtlich der Typzulassung und der sicherheitsrelevanten Änderungen, welche im Rahmen dieses Vorhabens zu klären sind.

4.1.3 Verringerung der Total Cost of Ownership in Folge der Batteriekosten

Problemstellung

Der größte Kostentreiber eines Elektroautos ist die Traktionsbatterie. Hinzu kommt, dass die Traktionsbatterie zumeist auch der limitierende Faktor der Lebensdauer eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs ist. Um eine Verlängerung der Fahrzeuglebensdauer zu erreichen, muss eine maximal ökonomische Lösung gefunden werden, dass das Elektroauto über einen derart langen Zeitraum stets über einen funktionierenden Energiespeicher verfügt. Es existieren Traktionsbatterien, die bei entsprechender Auslegung und Gebrauch eine ausreichende Lebensdauer aufweisen.



Aufgrund technischer und wirtschaftlicher Restriktionen sind diese Traktionsbatterien für den Einsatz in Elektrofahrzeugen jedoch ungeeignet.

Lösungsansatz

Durch eine modulare Gestaltung der Traktionsbatterie und deren Module soll ein reversibler (nicht spanender) Austausch einzelner Komponenten der Traktionsbatterie schnell und kostengünstig durchgeführt werden können. In Folge der einfachen Austauschbarkeit können lange Lebensdauern dann auch mit Traktionsbatterien des derzeitigen Technikstands realisiert werden. Diese werden nach einer festgelegten Zeitspanne oder in Folge einer stark abnehmenden Funktionalität durch aufbereitete Batteriepacks ersetzt. Anschließend wird die ausgebaute Traktionsbatterie aufbereitet, um sie idealerweise später wieder in ein Elektroauto einzubauen oder sie als „Second-Life-Speicher“ einsetzen zu können. Auf diese Art und Weise soll der Kostenanteil der Traktionsbatterie am Gesamtfahrzeug signifikant gesenkt werden.

Risiken

Es ist unklar, ob und inwieweit sich die gebrauchten Batteriezellen nach der verlängerte Nutzungsdauer noch als stationäre Speicher eignen. Bislang liegen keine verlässlichen Studien über die Auswirkungen der verlängerten Nutzungsdauer vor. Zudem könnte ein Technologiesprung im Batteriesektor stattfinden, so dass geringes Interesse an den alten, ursprünglich eingesetzten Traktionsbatterien besteht.

Zu den übergeordneten Zielen, die im Forschungsvorhaben erreicht werden sollen, zählen:

- Erarbeitung von Batteriekonzepten für das Remanufacturing
- Entwicklung eines updatefähigen Fahrzeugkonzepts
- Qualifizierung der Mitarbeiter für das Remanufacturing
- Wirtschaftliche und technische Bewertung des Remanufacturings
- Klärung der Randbedingungen für die Homologation

4.2 Voraussetzungen im Projekt

Als Voraussetzung für das Projekt brachte StreetScooter seine offene und flexible Technologieplattform des StreetScooter WORK L (interne Bezeichnung B16 & D16) in das Projekt ein. Diese war zu Projektbeginn prototypenfertig entwickelt und bot daher ein ideales Anwendungsobjekt, von dem einerseits die Anforderungen abgeleitet werden können und andererseits die Flexibilität besitzt auch tiefgreifende Anpassungen für das Projekt vorzunehmen.

Durch die Serienfertigung bot sich außerdem eine Erprobung der entwickelten Technologien in der Praxis mit Hilfe von StreetScooter-Fahrzeugen an. Weitere Erfahrungen die als Voraussetzung für das Projekt galten, sind die Updates die bereits an den ersten 100 StreetScooter Fahrzeugen durchgeführt wurden. Diese wurden nach einigen Jahren im Feld in die StreetScooter Produktion zurückgebracht und durch ein Getriebe-Update und ein Batterie-Update auf einen neuen Technologiestand gebracht. Die bereits gesammelte Erfahrung bei der Entwicklung von Traktionsbatterien war auch eine ideale Voraussetzung für die Entwicklung der Remanufacturingfähigen Batterie die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführt wurde.

4.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Insgesamt ist das Forschungsprojekt in acht, teilweise aufeinander aufbauende, Arbeitspakete gegliedert. Der Beginn des Forschungsprojektes war der 01.01.2016 mit den Arbeitspaketen 1 bis 5. Die Projektdauer betrug 3 Jahre mit dem Projektabschluss am 31.12.2018. StreetScooter beteiligte sich an den Arbeitspaketen 1, 2, 5, 6 und 7 sowie am Projektmanagement.



Abbildung 1 Übersicht über die Arbeitspakete von StreetScooter im Projekt

Inhalt von Arbeitspaket 1 war die Entwicklung eines modular aufgebauten Batteriepacks, welches für Elektrofahrzeuge geeignet ist. Die Arbeiten wurden in Kooperation mit der Futavis und dem PEM durchgeführt. StreetScooter passte unter anderem die verfügbaren Batteriepacks hinsichtlich Bauraum und Schnittstellen für seine Elektrofahrzeuge an. Im zweiten Arbeitspaket wurden zusammen mit dem PEM Anbindungskonzepte für das Remanufacturing von Außen- und Innenraumteile entwickelt. Im fünften Arbeitspaket unterstützte StreetScooter die DEKRA und das WZL bei der wirtschaftlichen Bewertung des Remanufacturingkonzeptes. In Arbeitspaket 6 baute StreetScooter auf Basis der vorangegangenen Arbeitspakete zwei Demonstratorfahrzeuge auf, in welche die in AP1 aufgebauten Batteriepacks integriert wurden. Im letzten Arbeitspaket erfolgte eine Untersuchung der Traktionsbatterien durch einen Technischen Dienst, eine Untersuchung der Demonstratorfahrzeuge im Feld sowie die Validierung des Konzeptes. Begleitend zu den sieben Arbeitspaketen verlief das nullte Arbeitspaket Projektmanagement, in dem die Ergebnisse des Vorhabens dokumentiert wurden, ein Projektreporting stattfand und weitere organisatorische Aspekte des Forschungsvorhabens bearbeitet wurden.

Eine Auflistung mit kurzer Beschreibung der Meilensteine, an denen StreetScooter beteiligt war, zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2 Meilensteine im Projektverlauf



Meilensteine und Ergebnisse im Projekt POLICE			
Arbeitspaket /-schritt	Meilenstein	Datum	Beschreibung
AS 1.12	M1 – Remanufacturing Traktionsbatterie entwickelt	31.12.2016	Die modular aufgebaute Traktionsbatterie wurde entwickelt: Ein Lasten- und Pflichtenheft wurde erstellt.
AS 1.13	M2 – Batteriepack gefertigt	30.04.2017	Aus dem Pflichtenheft wurde ein Produktionskonzept entwickelt. Zwei Batteriepacks wurden gefertigt.
AS 2.5	M3 – Anbindungskonzept entwickelt	30.04.2017	Anbindungskonzept für die Karosseriebauteile entwickelt und Demonstratorbauteil gefertigt.
AS 4.7	M7 – Montagelayout	30.04.2017	Konzipiertes Montagelayout in 3D.
AS 4.11	M8 – Montagekonzept in Anlaufabrik	30.04.2018	Montagekonzept ist in der Anlaufabrik aufgebaut und verifiziert worden.
AS 5.7	M9 – Wirtschaftliche Bewertung	31.08.2017	Total Cost of Ownership wurden ermittelt und einem normalen Fahrzeug gegenübergestellt.
AS 6.11	M10 – Demonstratorfahrzeuge	30.04.2018	Demonstratorfahrzeuge wurden gefertigt.
AS 7.9	M12 – Feldtests durchgeführt und Projekt validiert	31.12.2018	Die Fahrzeuge wurden im Feldtest untersucht. Das Konzept wurde hinsichtlich der ökonomischen, ökologischen und produktionstechnischen Aspekte untersucht.

4.4 Stand der Technik

4.4.1 Remanufacturing

Unter Remanufacturing (engl.: Refabrikation) versteht man einen Ansatz, welcher das Aufarbeiten eines gebrauchten Geräts auf einen Qualitätsstandard forciert, der dem eines Neugeräts entspricht. Er stellt ein besonders nachhaltiges Konzept zur Steigerung der Rohstoff-, Material- und Ressourceneffizienz dar¹. Es wird als ein industrieller Prozess verstanden, welcher Gebraucht- oder Altteile (Wieder-)aufbereitet, d.h. die Rückgewinnung auf der Komponentenebene steht und den zweiten Platz gemäß KrWG (Kreislaufwirtschaftsgesetz) einnimmt. Einzig die Wiederverwendung eines ganzen Produktes, steht auf einer höheren Stufe in der Wiederverwertungspyramide (Abbildung 2). Allerdings ist eine direkte Wiederverwendung von der vorliegenden Abnutzung abhängig, demnach

¹ Vgl. Walther (Nachhaltige Wortschöpfungen), 2010, S. 189–209.

wäre Remanufacturing als ein Mittel anzusehen, um bestmöglich eine Wiederverwendung eines Elektrofahrzeugs umzusetzen.²

In der Literatur wird der Remanufacturing-Begriff vielfältig definiert und verstanden. Das VDI ZRE (Verband Deutscher Ingenieure – Zentrum für Ressourceneffizienz) sieht es „als eine zentrale Maßnahme zu Steigerung der Ressourceneffizienz [...] Ferner wird die ursprüngliche Wertschöpfung auf hoher Stufe erhalten und die Importabhängigkeit kritischer Rohstoffe verringert“.³

SUNDIN beschreibt das Remanufacturing, als „ein industriellen Prozess, mittels dessen Altteile wieder nutzbar gemacht werden. Während dieses Prozesses durchlaufen die Teile eine gewisse Anzahl an Schritten wie z. B. Inspektion, Demontage, Austausch/Aufarbeitung (Refurbishment) von Teilen, Reinigung, Remontage und Tests um sicherzustellen, dass die gewünschten Produktstandards erfüllt werden.“⁴

Der British Standard BS, 2009 ergänzt das Remanufacturing als „Wiederherstellung der Produktleistung [...], die gleich- oder höherwertig der eines neue gefertigten Produkts ist“.⁵ Darüber hinaus fordert er, dass die wiederhergestellte Leistungsfähigkeit durch eine Garantie gewährleistet wird.⁶

Das Centre for Remanufacturing & Reuse und die Automotive Parts Remanufacturers Association (APRA), folgen der Definition des British Standard und ergänzen, dass Altteile in der Automobil- und Zuliefererbranche die aufgearbeitet werden zudem sichtbar als refabrizierte Produkte zu kennzeichnen sind.

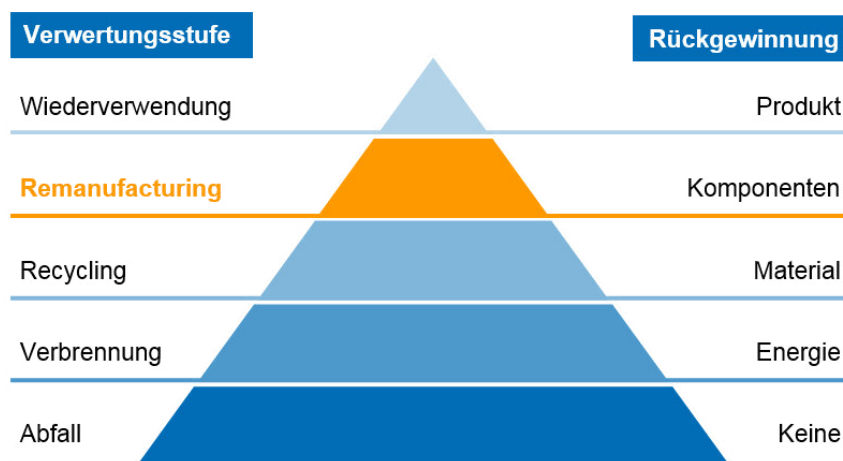


Abbildung 2 Remanufacturing in der Wiederverwertungs- und Rückgewinnungspyramide

4.4.2 Batterie

Alternative Antriebe für die Automobilbranche sind in der Forschung und Praxis ein zentrales Thema. Die Lithium-Ionen Batterie (LIB) stellt dabei kurz- und mittelfristig die attraktivste Alternative zur Energiespeicherung im Antriebsstrang dar.⁷

² Vgl. Kampker (Elektromobilproduktion), 2014, S. 4–5.

³ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE Kurzanalyse 18: Ressourceneffizienz durch Remanufacturing – Industrielle Aufarbeitung von Altteilen), 2017, S. 9.

⁴ Vgl. Sundin (Product and process design for successful remanufacturing), 2004, S. 2.

⁵ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE Kurzanalyse 18: Ressourceneffizienz durch Remanufacturing – Industrielle Aufarbeitung von Altteilen), 2017, S. 12.

⁶ Vgl. BSI (8887-2: 2009 Design for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE)), 2009.

⁷ Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien), 2013

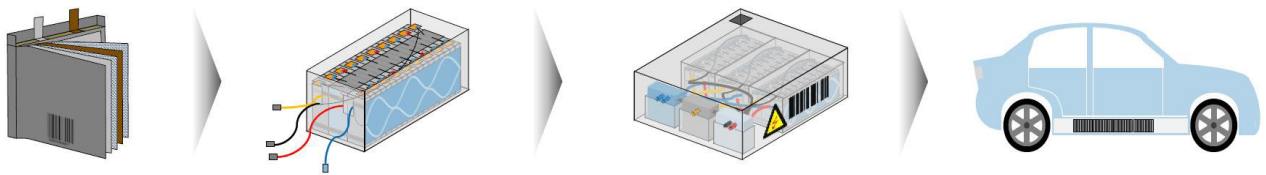


Abbildung 3 Schematische Abfolge zur Integration von Traktionsbatterien

Einzelne Batteriezellen werden zu Batteriemodulen zusammengefügt und mehrere Batteriemodule zu einem Batteriepack. Zusätzlich zu den Modulen werden dabei das Batterie-Management-System (BMS) zum Überwachen und Steuern der Batterien, das Thermomanagement und die Leistungselektronik der Batterie in das Batteriepack eingebaut. Derzeitige Traktionsbatterien werden dabei nicht auf ein späteres Update oder Remanufacturing ausgelegt. Beispielsweise sind die Gehäuse heutiger Traktionsbatterien nur mit großem Aufwand spanfrei zu öffnen. Dies ist allerdings eine Voraussetzung, um beim Austausch von Komponenten die Batterie nicht zu beschädigen. Darüber hinaus werden die Zellen innerhalb der Module in der Regel verschweißt und sind nicht ohne erhöhten Aufwand lösbar.

Aktuelle Traktionsbatterien sind kostenintensiv, da sie aufgrund der Zell- und Anforderungsvarianz individuell entwickelt werden und gleichzeitig hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen müssen. Neben den hohen Entwicklungskosten spielen jedoch auch die Herstellungskosten eine große Rolle. Wünschenswert sind die fortwährende Senkung der Herstellungskosten sowie eine Verlängerung der Lebensdauer der Batterie. Bei der Lebensdauer von Batterien wird zwischen kalendarischer und zyklischer Lebensdauer unterschieden. Die schwächste Zelle bestimmt dabei die Leistung der Gesamtbatterie. Der Zellaufbau und die Dichtigkeit der Zellen (Qualität) sind maßgeblich für die kalendarische Lebensdauer entscheidend, der Modulaufbau und das Thermomanagement für die zyklische Lebensdauer. Batterien für Elektrofahrzeuge werden typischer Weise für eine Nutzungsdauer von 10 Jahren bzw. 3.000 Zyklen ausgelegt, welche der Nutzungsdauer von Verbrennerfahrzeugen entspricht.

4.4.3 Anbindungskonzepte

Fahrzeugkarosserien können in unterschiedliche Bauweisen aufgeteilt werden, wobei die Schalenbauweise und Spaceframe-Karosserien (Abbildung 4) als besonders relevant anzusehen sind. Die am häufigsten zu findende Variante ist die selbsttragende Schalenbauweise⁸. Bezüglich des Remanufacturings von Elektrofahrzeugen und der Updatefähigkeit von Außenhautkomponenten, ist die selbsttragende Schalenbauweise nicht optimal, da die Anbindung über komplexe, aufeinander abgestimmte Flächen erfolgt und zumeist mit Schweißverfahren realisiert wird.



Abbildung 4 Karosserie-Bauweisen: Schalenbauweise⁹ (links) und Spaceframe (mitte)¹⁰, Beispiel für Anbindungspunkte rechts (Heckrahmen Karosserie StreetScooter)

⁸ Vgl. Grabner (Konstruieren von Pkw-Karosserien. Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht, Beispiele mit CATIA V4 und V5), 2006

⁹ BMW AG: BMW Baureihenarchiv BMW Werk Leipzig – BMW 1er 3-Türer-Karosseriebau

¹⁰ Audi AG A2 Museum. Der Aluminium-Space-Frame des Audi A2



Im Gegensatz dazu sind Spaceframe-Karosserien in sich selbst tragend ohne Außenteile. Durch den Aufbau aus Knotenpunkten und Profilen (geringere Werkzeugkosten als beim Tiefziehen) ist das Konzept für kleinere Stückzahlen und daher auch Elektrofahrzeuge gut geeignet. Außen- aber auch Innenkomponenten sind oftmals nicht tragend und können einfacher austauschbar gestaltet werden. Häufig angewendete Fügeverfahren sind Kleben, Schrauben, Nieten und Clipsen, die je nach Anforderung unterschiedlich kombiniert werden können. Die Herausforderung liegt in der Gewährleistung sicherer, reproduzierbarer und industrialisierungsfähiger Fügeprozesse in der Fahrzeugendmontage, die sicher gegenüber unerwünschter Trennung sind. Zudem müssen optische Anforderungen erfüllt, eine Abdichtung gewährleistet und je nach Anwendungsfall die Demontage berücksichtigt werden. Typische Komponenten, die bei Fahrzeugen einfach ausgetauscht werden können, sind z.B. Stoßstangen oder Abdeckungen im Innenraum. Die Position der Anbindungspunkte ist dabei durch die Karosserie oder andere darunterliegende Komponenten vorgegeben und auf die Komponente abgestimmt. Bei einer Spaceframe-Karosserie kommt die Besonderheit dazu, dass diese aufgrund der geometrischen Beschränkungen viele Anbindungspunkte nicht bereitstellen kann. Deshalb müssen teilweise Bauräume überbrückt werden, um Anbindungspunkte an der gewünschten Position zu erhalten.

Es werden also zusätzliche Zwischenelemente benötigt, die eine Abstandsüberbrückung in mehreren Achsen ermöglichen. Elemente für einen einachsigen Toleranzausgleich existieren bereits in der Industrie. Da die Anbindungspunkte, ohne neuartige Verbindungselemente, fix vorgegeben sind, ist die Geometrie der Außenhaut- oder Innenkomponente nur noch in geringem Maße änderbar.

Für ein updatefähiges Fahrzeug muss die Anbindung der Außenhaut neben der Demontage demnach auch eine geometrische Flexibilität ermöglichen. Dazu sollten nicht nur die Fügelemente bzw. das Fügeverfahren selbst, sondern auch die benötigten Zwischenelemente weiterentwickelt werden, wozu der 3D-Druck eine geeignete Technologie sein könnte.

4.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Projekts gab es eine intensive Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern sowie einem externen Dienstleister der von der StreetScooter GmbH im Rahmen des Arbeitspaketes 2 beauftragt wurde. Neben der organisatorischen Abstimmung fand eine inhaltliche Zusammenarbeit in folgenden Bereichen statt:

- Mit Futavis zur Entwicklung einer Traktionsbatterie die für das Remanufacturing geeignet ist
- Mit RWTH-PEM bei der Entwicklung flexibler Anbindungskonzepte und dem Aufbau der Demonstrator-Fahrzeuge
- Mit RWTH-WZL zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Remanufacturing-Konzeptes
- Mit DEKRA zur Betrachtung von homologationsrelevanten Themen
- Mit RLE als externer Dienstleister bei der Entwicklung flexibler Anbindungskonzepte



5 Ergebnisbericht

5.1 Abgleich der erzielten Ergebnisse mit den Zielen und Aufwänden

5.1.1 AP1 - Entwicklung und Aufbau von Batteriepacks für das Remanufacturing von E-Fahrzeugen

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines für Elektrofahrzeuge geeigneten modular aufgebauten Batteriepacks. Die verfügbaren Batteriepacks sollten hinsichtlich Bauraum und Schnittstellen für Elektrofahrzeuge wie z.B. StreetScooter angepasst werden. Bei der Anpassung sollten Mindeststandards für das Batteriepack erarbeitet werden. Der besondere Fokus in diesem Arbeitspaket lag auf der möglichen Demontierbarkeit und damit die Eignung zum Remanufacturing der Traktionsbatterie.

Im Rahmen des Projektes ist es gelungen eine modulare Traktionsbatterie zu entwickeln, zu fertigen und in ein Demonstrator-Fahrzeug zu verbauen und somit alle Ziele aus dem Arbeitspaket 1 zu erreichen. Das Konzept eines modularen Aufbaus ermöglicht es die entwickelten Batterien mit 8 oder 16 Modulen aufzubauen. Im Hinblick auf das Remanufacturing von Elektrofahrzeugen kann so ein Update in Bezug auf den Energiegehalt eines Fahrzeugs durchgeführt werden. Die wichtigsten Daten zu der Batterie sind im Folgenden kurz beschrieben.

Tabelle 3 Eigenschaften Batterie

Mechanische Eigenschaften	
Abmessungen	1179,0 mm x 1363,5 mm x 199.1 mm
Gewicht	190 kg (einstöckig) / 323 kg (zweistöckig)
Schutzklasse (Schutz gegen Eindringen von Wasser und Staub)	IP67
Schutzklasse (Berührschutz)	IPXXB
Elektrische Eigenschaften System	
Kapazität (einstöckig)	63 Ah
Kapazität (zweistöckig)	125 Ah
Nom. Energieinhalt	24 kWh (einstöckig) / 48 kWh (zweistöckig)
Nennspannung	379,6 V
Betriebsbereich (Spannung)	281 V - 429 V
Elektrische Eigenschaften Modul	
Kapazität Modul	3 kWh
Kapazität Modul	66 Ah
Parallele Zellen	22
Serielle Zellen	13
Elektrische Eigenschaften Zelle	
Nennspannung Zelle	3,6 V
Ladeschlussspannung Zelle	4,2 V
Entladeschlussspannung Zelle	2,5 V
Anzahl Zellen pro Modul	286
Nennkapazität Zelle	3 Ah
Komponenten	
Zelle	Zelltyp: 18650NC1 Zellchemie: <ul style="list-style-type: none"> • Kathode: Lithium-Manganoxid - Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide (LMO-NMC) • Anode: Graphit
Schütze	Trennen des HV-Stromkreises im Normalbetrieb und SW-erkennbaren Fehlerfall; allpolige Trennung
HV-Sicherung	Trennen des HV-Stromkreises im niederohmigen Kurzschlussfall
Stromsensor	Messen des fließenden Stromes im HV-Stromkreis (Hall Sensor)
Pyrocutter	Trennen des HV-Stromkreises im Crash-Fall



Isolationswächter	Messung des Isolationswiderstandes zwischen HV-Stromkreis und Masse
Ventil	Ventil zum Druckabbau im Fall der Entgasung von Zellen
Gore Membran	Membran zum Feuchtigkeits- und Druckausgleich zwischen Batterieinnenraum und Umgebung

Das Batteriesystem besteht aus einer Aluminium-Bodenplatte, auf welcher 8 Module in Serie verschaltet sind. Jedes Modul ist 28,6 kg schwer und hat einen nominalen Energieinhalt von 3 kWh. Jedes Modul beinhaltet 286 Zellen (13s22p) mit jeweils 3 Ah. Die maximale Spannung pro Modul sind 54,6 V. Die Module werden wie in Abbildung 5 gezeigt ausgerichtet und auf der Bodenplatte verschraubt.

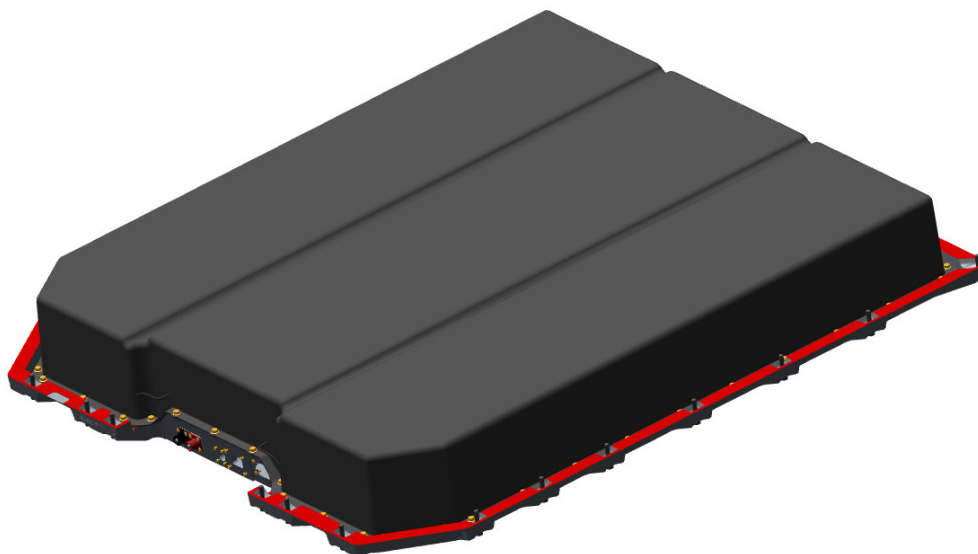


Abbildung 5 Batteriepack (Bauteile nicht vollständig angezeigt)

Die Batterie-Management-System Slave Platinen werden in die vorgesehenen Gehäuse eingesteckt und an den Modulfronten montiert. Ein Austausch dieser Platinen bei Fehlern ist innerhalb kurzer Zeit möglich. Die Schaltbox wird hinter den Schnittstellen des Packs montiert. Die LV-Verkabelung am Master und an den Slaves der einzelnen Module angeschlossen. Zum Betrieb der Batterie ist eine 12 V Versorgung notwendig. Das Massepotential der Batterie muss mit dem Massepotential des Fahrzeugs galvanisch verbunden werden. Als Kommunikationsschnittstelle zum Fahrzeug inklusive Fahrzeug CAN Bus ist ein Stecker vorgesehen. Der Inverter wird über zwei separate Stecker an plus- und minus- HV-Potential der Batterie verbunden. Innerhalb der Batterie sind ein Battery Management System (BMS) sowie eine Schaltbox integriert, welche die Zu- und Abschaltung und die Steuerung der Batterie realisieren sowie die Absicherung gegen externen, niederohmigen Kurzschluss und die Auftrennung des HV-Stromkreises im Falle eines Crash-Ereignisses (Pyrocutter). Das BMS beinhaltet einen Master (zentrale Steuereinheit), HV-Platine (Ansteuerung der HV-Komponenten) und einen Slave pro Modul (Auslesen und senden der Zelltemperaturen und –spannungen). Ein batterieinterner CAN-Bus realisiert die Kommunikation zwischen Slaves und Master. Die Schaltbox beinhaltet folgende Sicherheitselemente: Schütze, HV-Sicherung, Stromsensor, Pyrocutter, Isolationswächter

Mechanischer Aufbau

Die Batterie wird im Unterboden des Fahrzeuges verbaut, unterhalb der Fahrgastkabine. Abbildung 6 zeigt den Einbau mit den entsprechenden Bemaßungen.

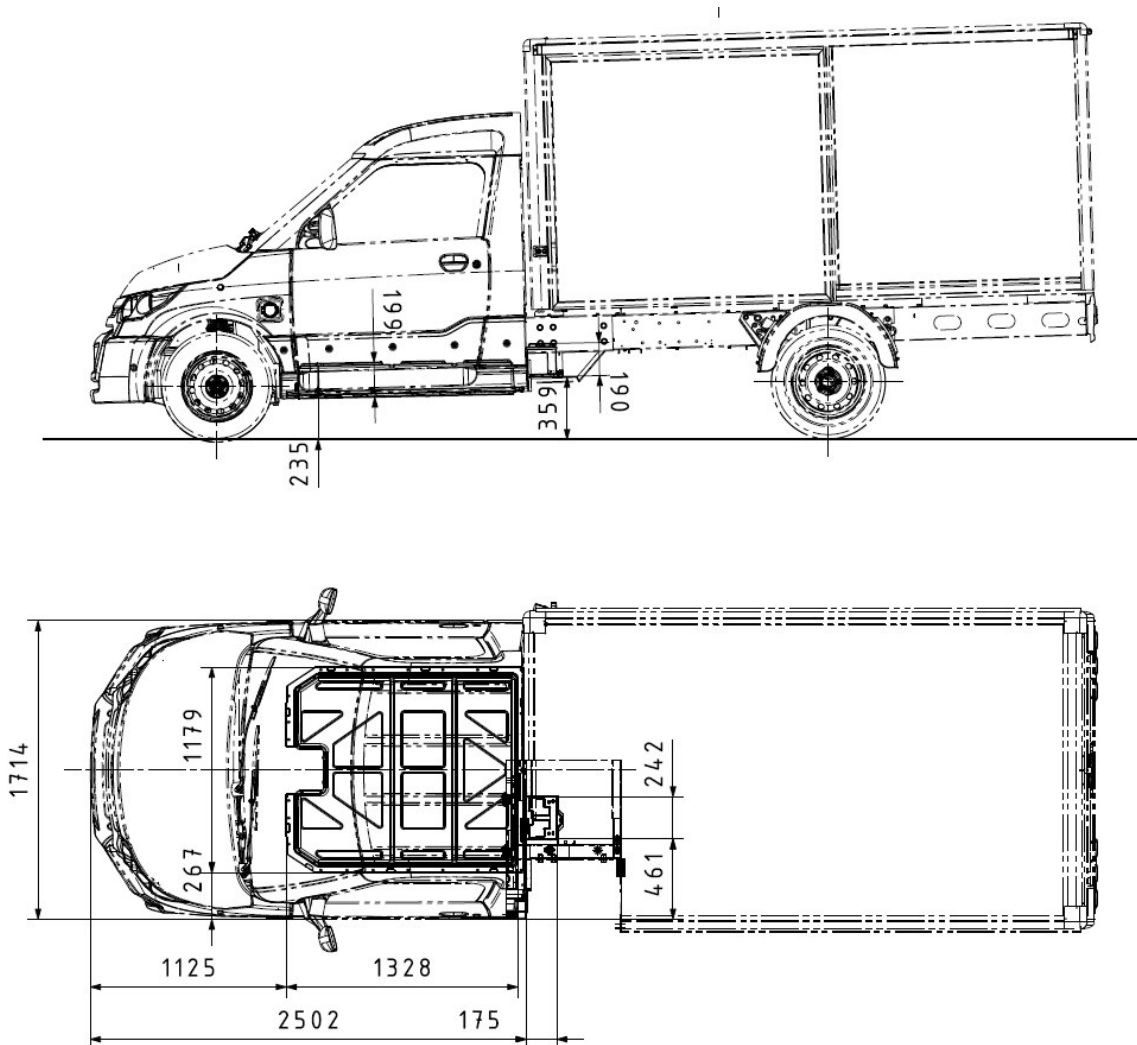


Abbildung 6 Einbausituation POLICE-Batterie im Fahrzeug D16

Das Batteriegehäuse wird durch eine Kunststoffhaube (Material: ABS, V0, schwer entflammbar) abgedeckt, wodurch die angegebenen Schutzklassen (IP67, IPXXB) erreicht werden. Die Batterie beinhaltet ein Ventil zum Druckabbau im Fall des Ausgasens einzelner Zellen (Notentgasung), sowie ein Ventil zum Druckausgleich mit Feuchtigkeitsbarriere. Die beiden Ventile werden an der Bodenplatte montiert.

5.1.2 AP2 - Entwicklung flexibler Anbindungskonzepte

Im Arbeitspaket 2 bestand das Ziel darin einen Anbindungs-Baukasten sowohl seitens des Fahrzeugs als auch der Außen- oder Innenteile, das eine deutlich größere Flexibilität hinsichtlich der anzubindenden Komponenten aufweist zu entwickeln. Dieser Anbindungs-Baukasten sollte für eine vorgegebene Änderung der Außenhautgeometrie eine schnelle technische Anbindungslösung ermöglichen.

Zunächst wurde für die Anbindungselemente zwischen der Karosserie und Exterior-Komponenten eine Funktionsstruktur erstellt um die nötigen Anforderungen zu definieren. Die Gesamtfunktion lässt sich in die Teilfunktionen „Remanufacturingfähig sein“, „Bauraum einhalten“ und „Toleranzen ausgleichen“ gliedern. Die Teilfunktionen lassen sich weiter untergliedern, bis die Elementarfunktionen erreicht sind. Die Funktionen „Bauraum einhalten“ und „Toleranzen ausgleichen“ stellen Sonderfunktionen dar, die nicht zwangsläufig bei jedem Anbindungspunkt vorkommen müssen. Die Funktionen „Lasche/Bohrung aufnehmen“ und „Gewinde/Clipse aufnehmen“ sind konstruktiv gesehen jeweils die Gegenstücke voneinander.

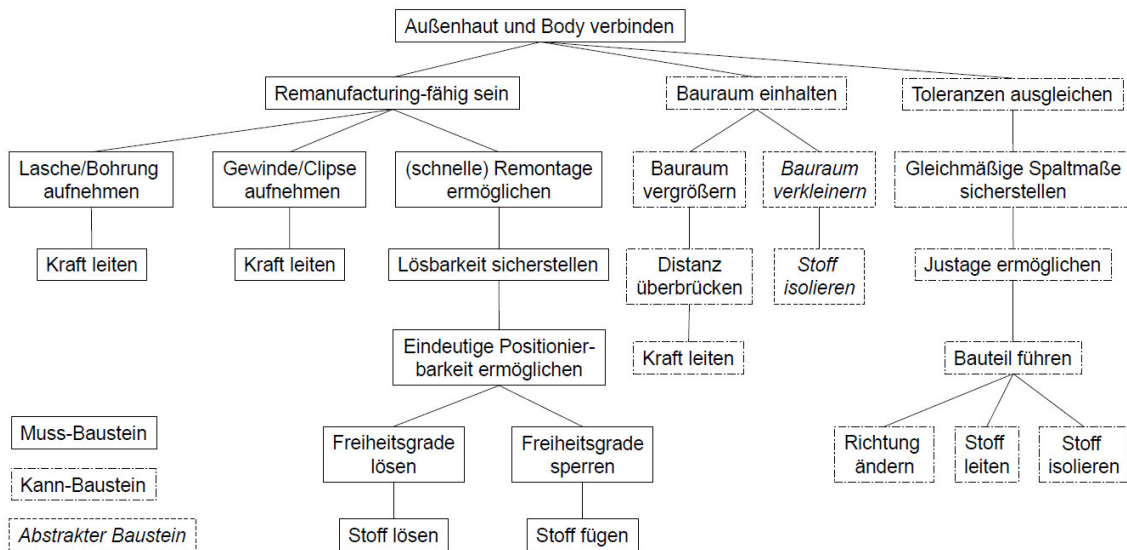


Abbildung 7 Funktionsstruktur der Anbindung

Durch verschiedene Anordnungen der Wirkprinzipien lassen sich verschiedene Lösungen generieren. Die Aufnahme der Außenhaut kann über eine Schraube, einen Clips, eine Mutter oder eine Lasche erfolgen. Bedingt ist auch ein Niet geeignet. Für das Distanzstück bietet sich als sinnvolle Variante ein Balken an. Die Verbindung der Teile kann ähnlich wie die Aufnahme der Außenhaut erfolgen. Mögliche Varianten sind Clipse, Schrauben, Klammern, Federn oder Formschlusselemente. Die Justage kann entweder über eine Schiene oder ein Gewinde erfolgen. Die Richtung wird über einen (festen) Winkel geändert. Die Aufnahme des Bodys bildet das Gegenstück zur Aufnahme der Außenhaut. Dementsprechend kommen hier die gleichen Teile zur Anwendung. Mithilfe dieser Grundlagen wurden die Elemente für den Baukasten ausgewählt und entwickelt.

Danach wurde in Zusammenarbeit mit dem PEM ein Baukasten bestehend aus drei Bausteinen die verschiedene Anwendungs- und Funktionsumfänge abdecken können ausgewählt. Hierzu gehören zwei verschiedene Arten von Clipsen sowie ein eigens entwickelter, hochflexibler Baustein, der mithilfe eines additiven Verfahrens hergestellt werden kann. Die Bausteine wurden in verschiedenen Workshops zwischen dem PEM und der StreetScooter GmbH an den Außenhautkomponenten „Kotflügel“, „Grill“ und „Lampenmaske“ getestet.

3D-gedrucktes Anbindungselement

Der Justage-Baustein besteht aus einem Langloch zur Aufnahme der Schraube bzw. des Klebebolzens, sowie einer Aufnahme für die Spreizmutter orthogonal dazu. Die Spreizmutter besteht aus einem Kunststoff-Clips, in den ein Gewinde geschnitten wurde. Über den Clips werden 2 Bauteile miteinander verbunden. Zur Fixierung wird eine Schraube eingefügt. Sie spreizt den Clips auseinander und sorgt somit durch Querkontraktion des Clipses für die erforderlichen Klemmkräfte. Die Klemmkräfte werden in radialer Schraubenrichtung erzeugt. Über die Spreizmutter werden die Aufnahme und die Schiene miteinander verbunden. Die Schiene wird wiederum an das zweite Außenhautteil geklebt. Nach dem Justieren wird die Spreizmutter mit einer Schraube festgezogen. Die Spreizmutter sperrt die Freiheitsgrade in ihrer Fügerichtung und erlaubt vor dem Anziehen eine Justage senkrecht zu ihrer Fügerichtung.

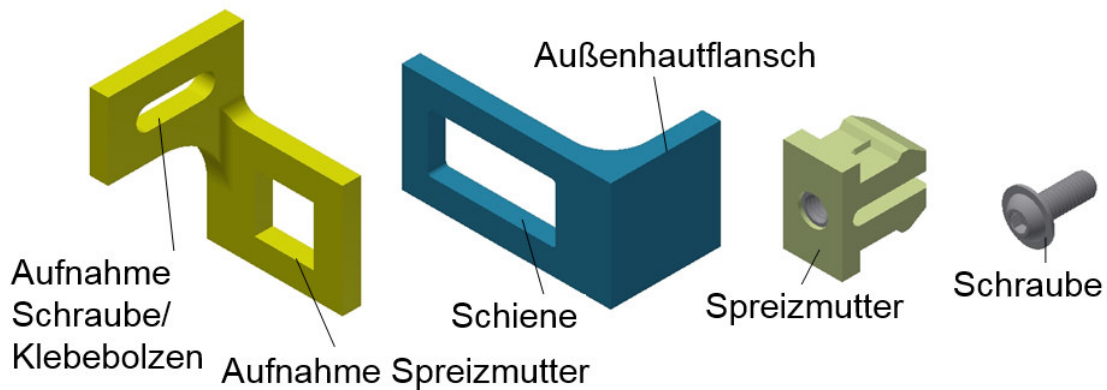


Abbildung 8 Justagebaustein

Snaploc-System

Das Snaploc-System besteht aus einem Kugelbolzen und einer Kupplung für den schnellen Einbau und basiert auf dem System einer einfachen Schnapp- bzw. Steckverbindung. Wenn der Kugelbolzen in die Kugelpfanne innerhalb der Kupplung einschnappt, entsteht eine toleranzausgleichende, schwingungs- und geräuschkoppelnde Verbindung. Dadurch ergibt sich eine einfache und schnelle Montage und Demontage sowie eine einfache Integration in bestehende Systeme. Das Snaploc-System wurde am Demonstrator-Fahrzeug als Verbindung zwischen der Karosserie und dem Kotflügel getestet.

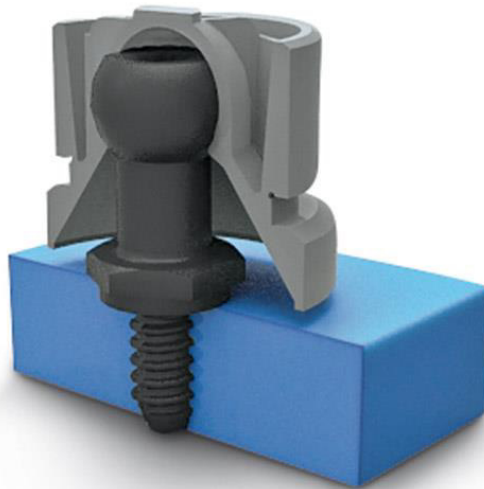


Abbildung 9 Snaploc-Element

3D-Druck Schraubdom

Als weiteres Element für den Baukasten, wurden bereits vorhandene Anbindungselemente an StreetScooter Exterior-Teilen auf Montierbarkeit und Toleranzausgleich optimiert. Dazu wurde ein Schraubdom entwickelt. Dieser wird ohne Formschluss am Exterior Teil (Kotflügel oder Grill) verklebt. Die Verklebung müsste für eine Serienfertigung direkt beim Hersteller der Exterior Komponenten durchgeführt werden. Für eine höhere Stabilität des Bauteils wurden Verstärkungssicken mit eingebaut. Der Dom besitzt ein Langloch mit dem Toleranzen ausgeglichen werden können. In das Langloch wird dann eine Schraube eingesteckt die die Verbindung zur Karosserie herstellt. Der Schraubdom ist in Abbildung 10 dargestellt.

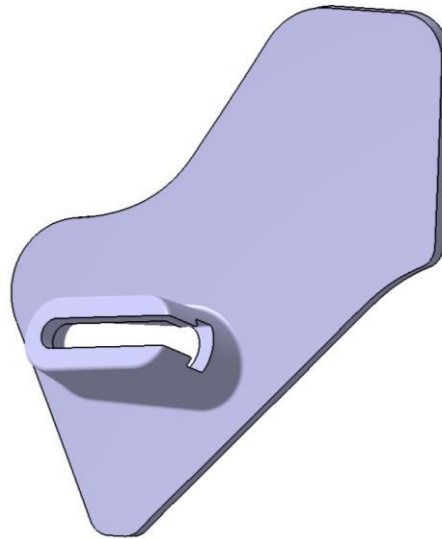


Abbildung 10 3D-Druck Schraubdom

Witol-Element

Für die Serienproduktion und den Ausgleich von unterschiedlich auftretenden Abständen der Bauteile sind Witol-Elemente gut geeignete Produkte. Abweichungen und Ungenauigkeiten werden schnell und präzise ausgeglichen. Fertigungsschritte werden vereinfacht. Montagezeiten werden erheblich reduziert. Aufwändiges Justieren entfällt. Am StreetScooter WORK eignen sie sich für die Anbringung zwischen dem Kotflügel und der Karosserie.



Abbildung 11 Witol-Element

Der im Rahmen des Projektes entwickelte hochflexible Baustein wurde an Demonstrator-Fahrzeugen erprobt. Durch die Möglichkeit der Einstellung des Bausteins in drei Richtungen ergab sich hierbei eine längere Montagezeit als bei konventionellen Anbindungskomponenten. Daher erscheint eine Erweiterung des Baukastens um ähnliche Komponenten sinnvoll, die weniger Freiheitsgrade bieten als die aktuelle Komponente und somit in Fällen, in denen keine Justage in weitere Richtungen notwendig ist, eine schnellere Montage erlauben. Für diesen Zweck wurde die Firma RLE durch die StreetScooter GmbH beauftragt. Der Baukasten konnte dadurch durch weitere Elemente ergänzt werden. Die wichtigsten Elemente aus dem Baukasten sind in Abbildung 12 dargestellt.

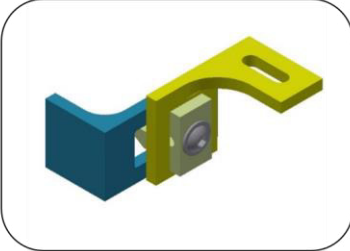

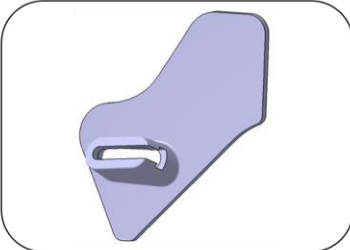

Baukasten: Anbindungselemente	
	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-gedrucktes Anbindungselement • Befestigung Grill an Karosserie • Justage in x, y & z
<ul style="list-style-type: none"> • Snaploc-System • Befestigung Kotflügel an Karosserie • Schnelle Montage & Demontage 	
	<ul style="list-style-type: none"> • 3D-Druck Schraubdom • Fender & Grill • Schnelle Montage & Toleranzkettenunterbrechung
<ul style="list-style-type: none"> • Witol-Element • Anbindung Fender-Türrahmen • Schnelle Montage & Demontage 	

Abbildung 12 Baukasten Anbindungselemente

5.1.3 AP5 - Wirtschaftliche Bewertung und Randbedingungen für Zulassung und technische Bewertung

Innerhalb dieses Kapitels werden Szenarien gebildet, anhand derer die möglichen Remanufacturing-Fälle und deren Wirtschaftlichkeit schrittweise analysiert werden können. Es gibt einige technische und wirtschaftliche Grenzen, die sich auf die Szenarien auswirken. Defekte am Kabelbaum oder Beschädigungen der Karosserie sowie ein Totalschaden sind Ausschlusskriterien bezüglich des Remanufacturings, da sie durch den entstehenden technischen Aufwand nicht wirtschaftlich wären. Des Weiteren wird die Batterie in dieser Betrachtung nur als Gesamtsystem getauscht. Durch den Tausch einzelner Module würde ein Ungleichgewicht unter den einzelnen Modulkapazitäten entstehen, das ausbalanciert werden müsste und in einer herabgesetzten Kapazität für die neuen Module resultieren würde. Es existieren einige Teile wie z.B. die Leistungselektronik, die aufgrund ihrer Lebensdauer oder Sicherheitsrelevanz nach acht Jahren immer ausgetauscht werden müssen. In dem realen Remanufacturingsystem könnten diese beispielsweise dann im Fahrzeug verbleiben, falls sie vor kurzem erst ausgetauscht worden sind. Abbildung 13 zeigt alle Fahrzeugkomponenten und die jeweilige Remanufacturing Eignung.

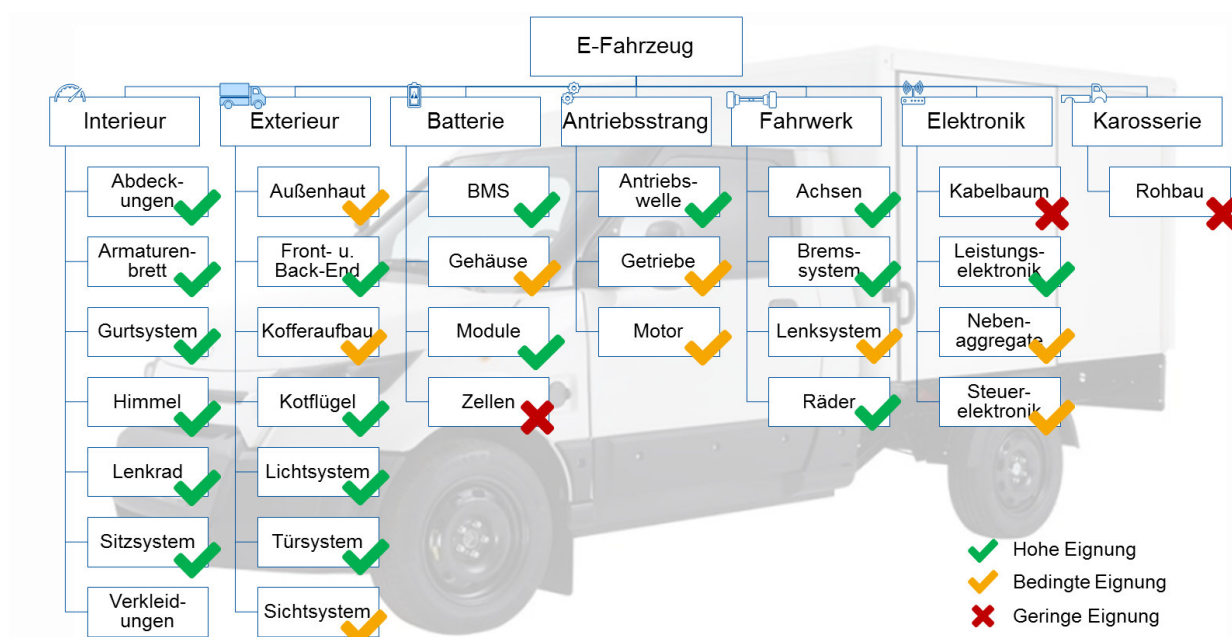


Abbildung 13 Remanufacturing-Eignung der Komponenten eines Elektrofahrzeugs

Minimalszenario – Fokus Sicherheit

Im Minimalszenario wird davon ausgegangen, dass lediglich Komponenten ausgebaut werden müssen, die entweder ihre maximale Lebensdauer erreicht haben oder eine Gefährdung für die Sicherheit der Fahrzeugnutzer darstellen würden. Optische Gesichtspunkte werden nicht betrachtet. Es werden die in Abbildung 14 dargestellten Komponenten ausgetauscht, die insgesamt einen mengenmäßigen Anteil von 12,61 % des Gesamtfahrzeugs ausmachen.

Antriebsstrang	Leistungselektronik	
	Kühlsystem	Pumpe
Gurtsystem	Gurt	
	Gurtschloss	
	Gurtaufroller	
Fahrwerk	Räder	Reifen
	Vorder- und Hinterachse	Stoßdämpfer
		Federbein
Betriebsbremse	Vorder- und Hinterradbremse	Bremsscheibe
		Bremssattel
		Bremsbeläge
Bordelektronik	12V-Batterie	
Sichtsystem	Wischersystem	Wischerblätter und -arm

Abbildung 14 Remanufacturing-Komponenten Minimalszenario

Als Neuwert der vier Jahre alten Komponenten wird der ursprüngliche Wert aus den Angaben der Bill of Materials (BOM) berechnet und inflationiert. Der Neuwert der zwölf Jahre alten Komponenten entspricht dem Gesamtwert nach BOM abzüglich des Materialwertes der ausgetauschten Komponenten im Jahre 2018. Mit diesem Restwert ergibt sich durch die Differenz zwischen den TCO von Minimalszenario und Vergleichsfall „ohne Remanufacturing“. Da in dieser Untersuchung als Remanufacturingoption nur der Austausch der Komponenten vorgesehen ist und dementsprechend hohe Materialkosten anfallen, wird davon ausgegangen, dass eine Aufarbeitung einiger Komponenten die Remanufacturingkosten und demzufolge die TCO weiter senken könnte.

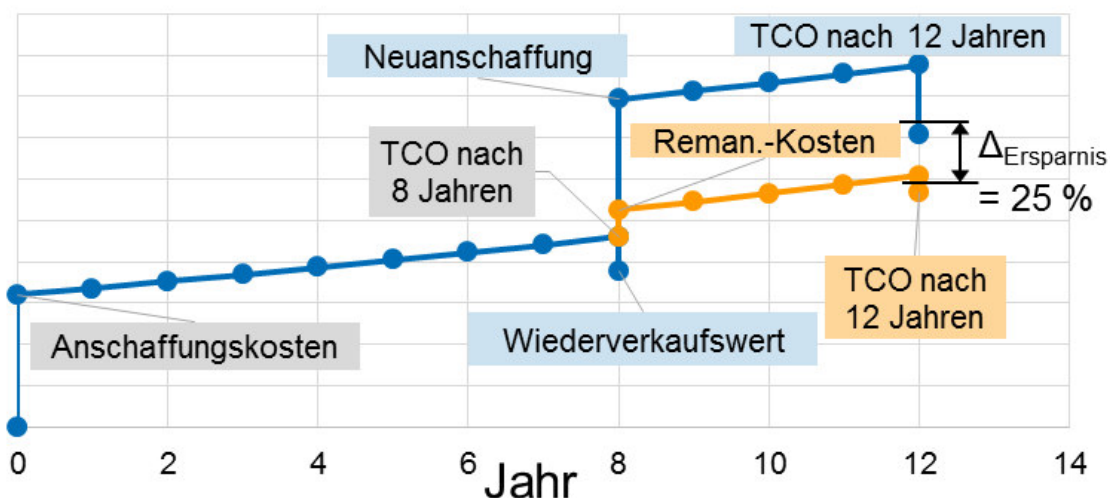


Abbildung 15 Gesamtkostenvergleich für das Minimalszenario

Szenario 2a & b – Post-Nutzung ohne / mit neuer Batterie

Dieses Szenario soll einen Fahrzeugverschleiß darstellen, der mit hoher Wahrscheinlichkeit bei der Nutzung durch die Deutsche Post auftritt. Der Gebrauch als Zustellfahrzeug unterscheidet sich von dem durch andere Gewerbe, dass die Fahrerseite wesentlich stärker als die Beifahrerseite beansprucht wird, weil z. B. die Tür häufig geöffnet und geschlossen wird. Zudem sind im Stadtverkehr Verschleiß an bspw. Exterior und Außenspiegeln wahrscheinlicher. Darüber hinaus finden viele Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge statt. In Szenario 2a wird die Batterie nicht ausgetauscht, während Szenario 2b den Austausch gegen eine neue Batterie mitbetrachtet. Es werden insgesamt 35,6% bzw. 37,5% der Komponenten ausgetauscht (siehe Abbildung 16).



Lade- und Batteriesystem	Batterie	
Antriebsstrang	Leistungselektronik	
	Kühlsystem	Pumpe
Gurtsystem	Gurt	
	Gurtschloss	
	Gurtaufroller	
Lenksystem	Lenkrad	
Fahrwerk	Räder	Reifen
	Vorder- und Hinterachse	
Betriebsbremse	Vorder- und Hinterradbremse	Bremsscheibe
		Bremssattel
		Bremsbeläge
Bordelektronik	12V-Batterie	
Sichtsystem	Wischersystem	Wischerblätter und -arm
	Außenspiegel	
	Frontscheibe	
Schließsystem	Türschlösser	
Türen	Fahrertür	
Sitzsystem	Fahrersitz	
Exterior		
Interior	IP	HMI
	Fußmatte	
	Türinnenverkleidung (fahrerseitig)	

Abbildung 16 Remanufacturing-Komponenten des Szenarios 2a & 2b

Das Einsparpotenzial beträgt zwar nur noch gut die Hälfte dessen, was im Minimalszenario minimal eingespart werden kann, dennoch ist es hoch. Auch ohne einen quantifizierbaren Restwert wäre dieses Szenario dem Vergleichsfall gegenüber wirtschaftlich. Würde es einen hohen Nachlass auf das Neufahrzeug geben, der auf das Remanufacturing nicht gegeben werden würde, wäre die Aufarbeitung im Sinne des Post-Nutzungs-Szenarios ohne Batterieaufbereitung möglicherweise unwirtschaftlich. Die verbleibende Batteriebensdauer oder -leistung könnte potenziell als kritisch angesehen werden. Dieser Faktor wird im Szenario 2b durch Einsetzen einer neuen Batterie eliminiert.

Durch den Austausch der Batterie erhöht sich der Fahrzeugrestwert nach 12 Jahren im Szenario 2b gegenüber dem Szenario 2a. Auf Grundlage des Restwertes lässt sich die TCO und dementsprechend der Kostenvorteil gegenüber dem Vergleichsfall berechnen.

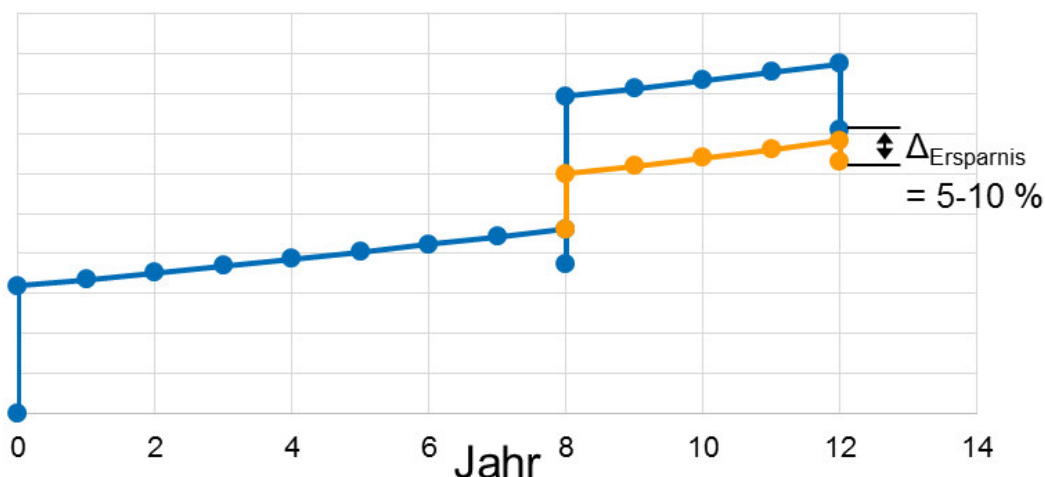


Abbildung 17 Gesamtkostenvergleich für das Szenario 2b

Wenn der Wert des Remanufacturing-Fahrzeugs nach 12 Jahre dem berechneten Wert entsprechenden würde, wäre das Remanufacturing in dieser Betrachtung relativ wirtschaftlich. Der Restwert ist im Vergleich zum vorherigen Szenario durch die neue Batterie gestiegen, jedoch sind auch die Remanufacturingkosten höher, dadurch ergibt sich eine geringere potenzielle Ersparnis. Das Risiko, dass die Leistung oder Lebensdauer der Batterie eine Einschränkung für die zweite Nutzungsphase darstellt, ist in diesem Szenario dafür nicht vorhanden. Die Ersparnis wirkt prozentual zwar gering, dennoch ist durchaus vorstellbar, dass ein Kostenvorteil insbesondere im Nutzfahrzeugbereich ausreichen würde, um als Kunde die Option des Remanufacturings wahrzunehmen. Wie in den Szenarien zuvor wäre diese Einschätzung im Fall von Neufahrzeugrabatten hinfällig.

Szenario 3: Komfort und Leistungsupdate – Fokus Drittkunden

Neben den Vorgängen, die minimal erforderlich sind, werden in diesem Szenario zusätzliche Komfort- und Leistungsaspekte berücksichtigt. Obwohl die Funktionsfähigkeit teils nicht beeinträchtigt ist, werden einige Komponenten, mit Augenmerk auf die Wünsche eines potenziellen Drittkunden, ausgetauscht, um die höchste Leistung und eine neuwertige Optik zu gewährleisten. Dazu gehören der Tausch der Batterie gegen das neueste, in dem Fahrzeugtyp verwendbare Modell, Materialupdates für Sitze und Lenkrad sowie der Einbau von zusätzlichen Features (vgl. Abbildung 18). Insgesamt werden 38,44 % der Fahrzeugkomponenten getauscht.



Lade- und Batteriesystem	Batterie	Update
Antriebsstrang	Leistungselektronik	
	Kühlsystem	Pumpe
Gurtsystem	Gurt	
	Gurtschloss	
	Gurtaufroller	
Lenksystem	Lenkrad	Update
Fahrwerk	Räder	Reifen
	Vorder- und Hinterachse	Stoßdämpfer
		Federbein
Betriebsbremse	Vorder- und Hinterradbremse	Bremsscheibe
		Bremssattel
		Bremsbeläge
Bordelektronik	12V-Batterie	
Sichtsystem	Wischersystem	Wischerblätter und -arm
	Außenspiegel	
	Frontscheibe	
Schließsystem	Türschlösser	
Türen	Türkontaktschalter	
	Griffe	
Sitzsystem	Fahrer- und Beifahrersitz	Update
Exterior		
Interior	IP	HMI
	Fußmatte	
	Türinnenverkleidung	
Zusätzliche Features	Radio	Update
	Navigationssystem	Update

Abbildung 18 Remanufacturing-Komponenten Szenario 3

In Abbildung 19 ist der Verlauf des TCO-Vergleichs zwischen dem Remanufacturing-Fall gemäß Szenario 3 und dem Vergleichsfall „ohne Remanufacturing“ zur Veranschaulichung abgebildet. Obwohl die prozentuale Ersparnis wie in Szenario 2b zunächst gering wirkt, ist es vorstellbar, dass ein Kostenvorteil von mehr als 4.200 € ausreichen würde, um Drittkunden von einem Remanufacturing-Fahrzeug mit Komfort- und Leistungsupdate zu überzeugen. Um die von den Kunden geforderten Preisnachlass vergleichen zu können, wird im Rahmen dieser Szenariobetrachtung die Ersparnis bezogen auf den Verkaufspreis berechnet. Dafür wird der Preis für ein Remanufacturing-Fahrzeug verwendet, der eigentlich im Sinne einer Direct-Order-Betrachtung nicht relevant ist. Wie bereits zuvor erläutert, wird dafür die Summe aus Restwert und Remanufacturingkosten berechnet und mit der festgelegten Marge von 5 % beaufschlagt.

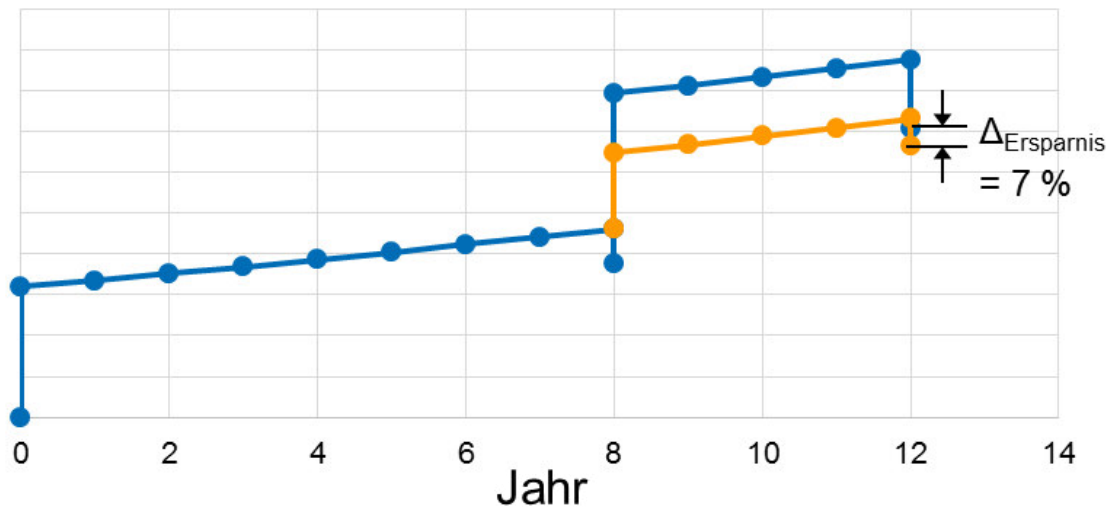


Abbildung 19 Gesamtkostenvergleich Szenario 3

Szenario 4 - Maximalszenario

Im Rahmen von Szenario 4 wird angenommen, dass 92,94 % der Teile ausgetauscht werden. Ausnahmen bilden lediglich, wie bereits erwähnt, der Kabelbaum und die Karosserie, die niemals als Remanufacturing-Komponenten angenommen werden. Jedoch erfährt die Karosserie eine Aufarbeitung in Form einer Lackierung mit einem Korrosionsschutz. Es handelt sich somit, bezogen auf das durchschnittliche Alter der Komponenten, fast um ein Neufahrzeug.

Für das Maximalszenario wird der Restwert abweichend berechnet. Der Fahrzeugrestwert, der durch die bisherige Methode berechnet wurde, wurde als zu gering eingeschätzt. Da es sich beim Maximalszenario nach dem Remanufacturing um ein fast vollkommen durch Neuteile ersetztes Fahrzeug handelt, werden als Neuwert der vier Jahre alten Teile die gesamten Remanufacturingkosten angenommen.

Die negative Ersparnis ist im Gesamtkostenvergleich in Abbildung 20 veranschaulicht.

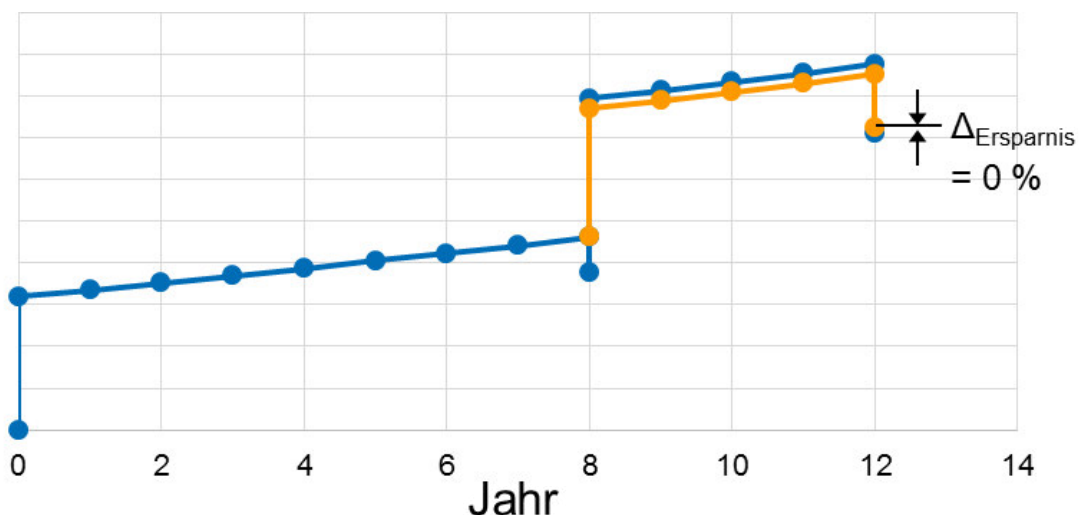


Abbildung 20 Gesamtkostenvergleich Maximalszenario

Unter Berücksichtigung der aktuell angenommenen Restwerte ist das Remanufacturing nach Maximalszenario nicht wirtschaftlich. Um den gleichen oder einen besseren TCO als der Fall „ohne Remanufacturing“ zu erreichen, ist ein Restwert von mindestens 14.264 € notwendig. Bei gleichem TCO ist jedoch fraglich, ob das Remanufacturing-Fahrzeug der Alternative vorgezogen wird, da man davon ausgehen kann, dass die Preisbereitschaft stark von einem Nachlass gegenüber dem Neufahrzeug abhängt. Dennoch lässt sich festhalten, dass der Remanufacturing-TCO trotz



Mehraufwand durch die Demontage beinahe den TCO eines Neufahrzeugs erreicht. Eine Aufwertung durch den Faktor eines „grünen Images“ wäre möglich.

5.1.4 AP6 – Aufbau Demonstrator-Fahrzeuge

Ziel des Arbeitspakets ist der Aufbau von einem StreetScooter Demonstrator-Fahrzeug, in dem die in AP1 aufgebauten Batteriepacks integriert werden. Die geplante Spannung des Fahrzeugs beträgt 270V. Damit können Auswirkungen des Remanufacturings auf die Konstruktion und Produktion von Elektrofahrzeugen untersucht und entsprechende Optimierungspotentiale erkannt werden.

Die mechanische sowie die elektrische Integration der Batterie in das Demonstratorfahrzeug wurde konzeptioniert. Daraufhin wurde die Batterie in einem Demonstratorfahrzeug montiert. Die Batterie wird im Unterboden des Fahrzeuges verbaut, unterhalb der Fahrgastkabine. Bevor der erfolgreiche Einbau gelungen ist, fielen bei der Montage allerdings noch einige Probleme auf die im Anschluss behoben wurden. Beispielsweise stimmten zwei Bohrungen in der Karosserie nicht mit den Bohrungen in der Batterie-Bodenplatte überein. Außerdem musste die Kabelführung angepasst werden um Zugänglichkeit zu den Steckern zu gewährleisten. Die aufgetretenen Probleme sind in Abbildung 21 zu sehen.

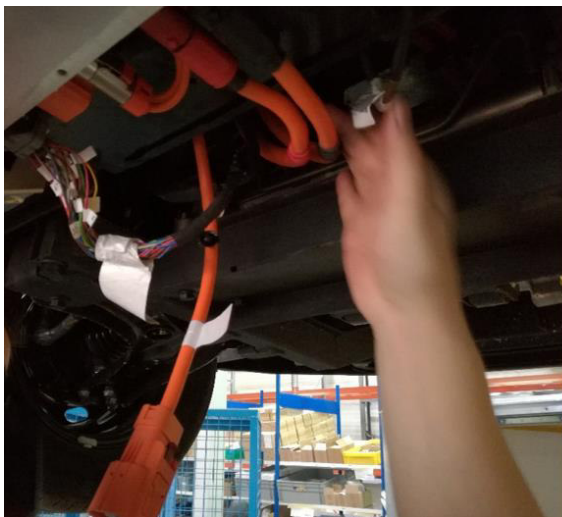


Abbildung 21 Probleme nach dem Einbau der Batterie in das Demonstratorfahrzeug 1

An dem Demonstrator wurden zusätzlich Teile für das AP2 verbaut. Hier wurde der Einbau der unterschiedlichen Anbindungselemente getestet.



Abbildung 22 3D-gedruckter Baustein am Demonstrator 2



5.1.5 AP7 – Batterietests, Fahrzeugtests, Austauschtests zur Validierung

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, die entwickelten Komponenten und das Demonstrator Fahrzeug auf der Plattform StreetScooter zu testen. Eine umfassende Beschreibung der Testergebnisse der Batterie, hinsichtlich der thermischen, mechanischen und elektrischen Belastbarkeit des Batteriepacks sein, soll erstellt werden. Darüber hinaus sollen Erkenntnisse über die praktische Verwendung des Konzeptes im Feld gewonnen werden.

ECE-R100

Im Fokus stand die Homologation der entwickelten Batterie nach ECE R100. Die Homologationstests konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Die Batterie wurde nach dem Aufbau zunächst erfolgreich auf Funktionalität getestet

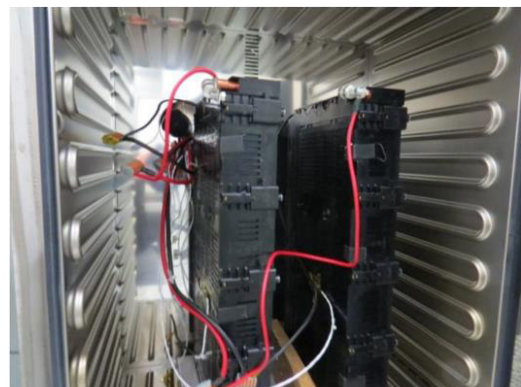
Im Rahmen der Homologation der Batterie wurden folgende Tests durchgeführt, dessen Ergebnisse auszugsweise in diesem Abschnitt dargestellt werden sollen:

- Vibration
- Temperaturschock und –wechsel
- Mechanischer Schock
- Mechanische Integrität
- Feuerbeständigkeit
- Externer Kurzschluss
- Überladen, Tiefenentladen, Übertemperatur

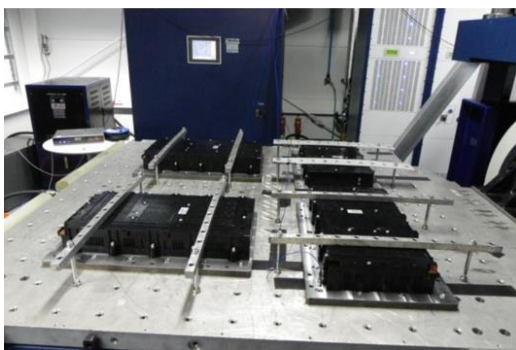
Die Testaufbauten zu einigen der durchgeführten Prüfungen sind in Abbildung 23 zu sehen.



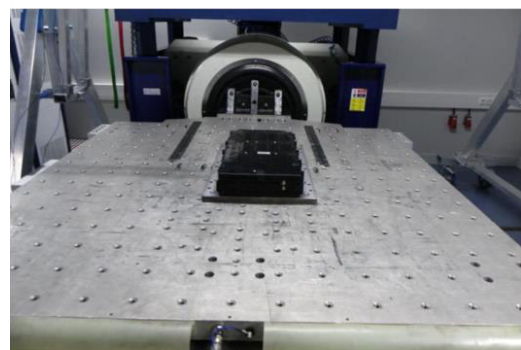
Testaufbau Überladen



Temperaturtestkammer



Testaufbau Vibrationstests



Testaufbau Schocktests

Abbildung 23 Testaufbauten ECE-R100



Im Rahmen der Schocktests wird die Robustheit von Zellen von Batterien gegen zunehmende Stöße bewertet. Abbildung 24 zeigt beispielsweise die Ergebnisse der Schock Prüfungen in Z-Richtung. Dabei ist die Erdbeschleunigung g über der Zeit t aufgetragen. Die Ergebnisse des Kurzschluss tests sind in Abbildung 25. dargestellt, in der die Temperatur T , die Spannung U und die Stromstärke A während des Tests dargestellt sind. Es ist zu erkennen, dass beim Kurzschließen der Batterie ein kurzer Strom zu messen ist. Dann ist zu sehen dass die Sicherung durch den Kurzschluss ausgelöst wird und die Spannung schlagartig auf 0V abfällt.

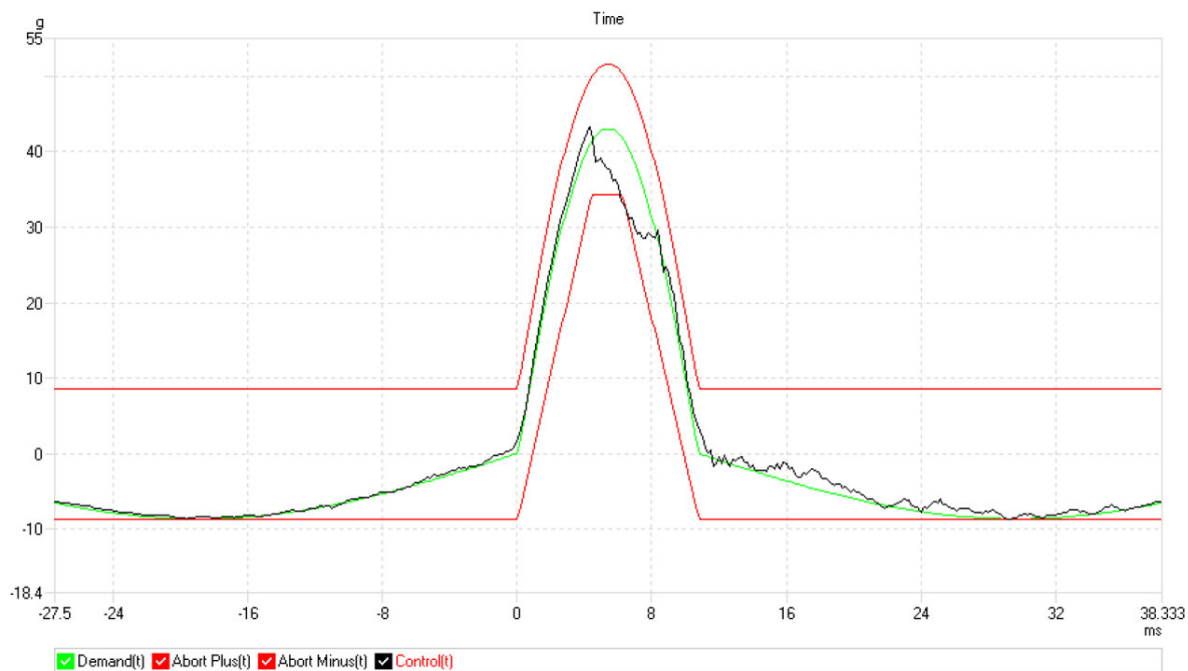


Abbildung 24 Schocktest in Z-Richtung

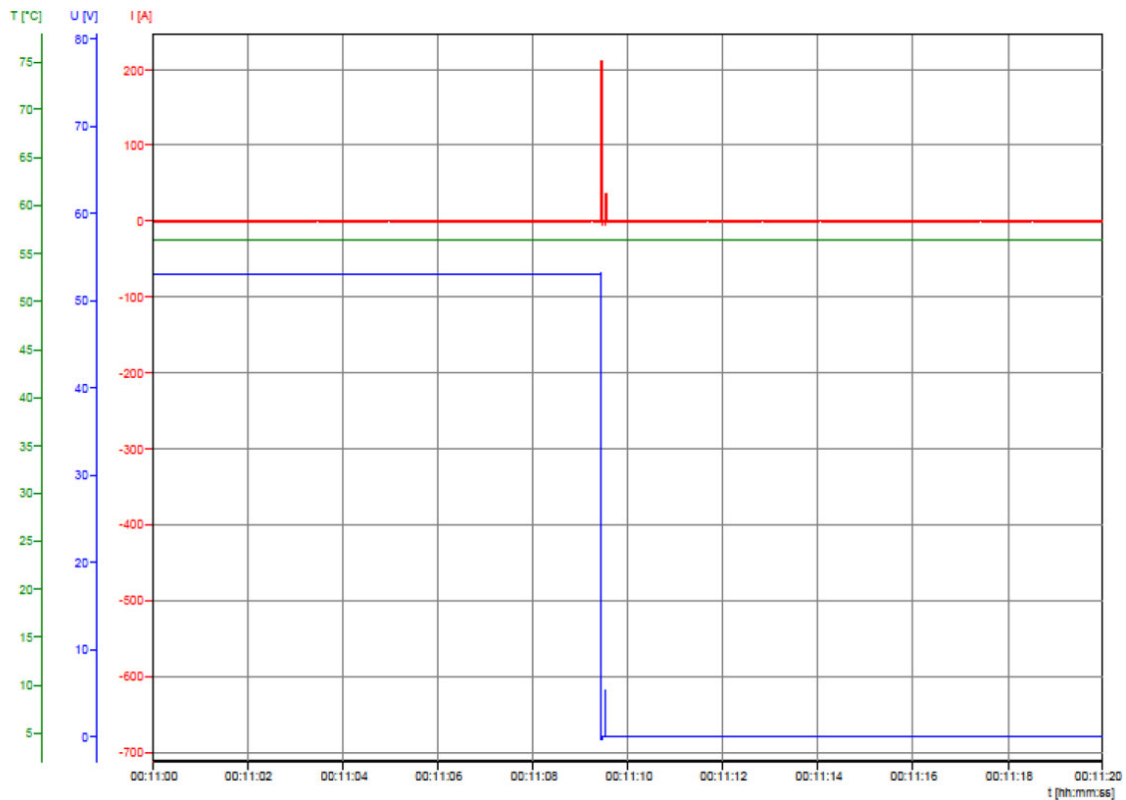


Abbildung 25 Kurzschlussdiagramm-Temperatur, Spannung, Stromstärke

Schlechtwegstreckentest

Während der Projektlaufzeit wurde ein Schlechtwegstreckentest zur Analyse der mechanischen Festigkeit der Batterie durchgeführt. Getestet wurde eine doppellagige Batterie mit 16 Batteriemodulen (48kWh). Dabei wurden mit der Batterie mindestens 60 Ladezyklen durchgeführt. Die real gefahrenen Kilometer betragen 4000km die auf der Schlechtwegstrecke eine mechanische Belastung von 160.000km entspricht. Nach dem Test wurde eine elektrische und mechanische Analyse der Batterie durchgeführt. Einige Ergebnisse der optischen Prüfungen waren:

- Die Haube der Batterie weist keine Risse oder Beschädigungen auf
- Die Dichtungsverlegung ist ordnungsgemäß und es konnte keine Feuchtigkeit eindringen
- Die Dichtung hat sich, wie vorgesehen, zwischen Haube und Bodenplatte gezogen
- Die Batteriemodulverbinder aus Kupfer haben keine Risse, Schmauchspuren oder Beschädigungen
- Einige Modulverbinder standen unter mechanischer Spannung aufgrund des gewählten Drehmoments und Anschraubverfahrens. Dadurch fand eine plastische Verformung statt, welche die elektrische Funktionsfähigkeit nicht beeinträchtigt. Bei stärkerer Verformung ist es möglich, dass die einzelne Lamellen reißen und die elektrische Funktionsfähigkeit nicht sicher gewährleistet ist. Aus diesen Erkenntnissen wurden für die künftige Produktion Maßnahmen abgeleitet um die Probleme zu beheben.

Anhand einer Losbrechmomentanalyse ist erkennbar, dass die Schrauben an den Batteriemodulen sich während der Fahrt nicht durch Vibration gelöst haben.

5.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Ergebnisse

Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Verbundprojekt sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag formulierten Planung entsprachen und alle wesentlichen im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden.



5.3 Verwertung der Ergebnisse

Tabelle 4 Verwertung der Ergebnisse

Nr.	Ergebnisse laut Arbeitsplan	Verwertung
1	Produzierte, modular aufgebaute, Traktionsbatterie	Die im 1. AP entwickelte Traktionsbatterie wird nach einer Weiterentwicklung ab 2019 in die Serienfahrzeuge von StreetScooter verbaut werden. Durch die Ergebnisse aus dem Projekt wird es möglich sein, die TCO der Fahrzeuge zu senken und CO2-Emissionen durch Ressourcenschonung zu senken, um die Einsparziele der Deutschen Post zu erreichen.
2	Getesteter Anbindungsbaukasten	Die Komponenten und Konzepte aus dem getesteten Anbindungsbaukasten werden ab 2019 in den Entwicklungsabteilungen verwertet werden. Die ausgewählten Elemente werden auf Serientauglichkeit überprüft. Dabei wird die Festigkeit der Elemente betrachtet, die Kosten in der Serienfertigung und zulassungsrelevante Themen betrachtet.
3	Wirtschaftliche Validierung des Gesamtkonzepts	Die im AP5 erarbeiteten Remanufacturing Szenarien werden Anfang 2019 praktisch validiert werden. Das PEM der RWTH plant gemeinsam mit der StreetScooter GmbH, die erste 100er Serie des StreetScooter WORK durch die Remanufacturing Szenarien zu führen. Dadurch soll praktisch weiterhin validiert werden ob aus dem entwickelten Konzept ein profitables Geschäftsmodell entstehen kann.

5.4 Fortschritte in vergleichbaren Projekten

Im Forschungsprojekt BatteReMan konnte eine Batterie eines StreetScooters aus dem Jahr 2014 redesigned werden um eine Steigerung der Ressourceneffizienz zu garantieren in dem der Lebenszyklus der Lithium-Ionen-Batterie verlängert wurde. Auch hier gelangen der Einbau der betrachteten Batterie in ein Testfahrzeug sowie der Feldtest des Projektes.

5.5 Veröffentlichungen

Das Projekt wurde im Rahmen mehrerer Veranstaltungen der interessierten Öffentlichkeit präsentiert. Unter anderem waren dies:

- Präsenz und Vorstellung des Projektes bei Kick-Off-Veranstaltungen
- Präsentation auf der Vernetzungskonferenz Elektromobilität 2016
- Ausstellung eines Demonstrator-Fahrzeugs auf der IAA 2017 in Frankfurt
- Vortrag auf dem 6. Elektromobilitätsproduktionstag in Aachen am 17.10.2018
- Veröffentlichungen über die Begleitforschung



Abbildung 26 POLICE Demonstrator-Fahrzeug auf der IAA 2017



STREETSCOOTER



Abschlussbericht

StreetScooter GmbH, Aachen

27.06.19, Aachen

Datum, Ort

CTO

CEO

Position

Unterschrift

27.06.19, Aachen

Datum, Ort

Prokurist

Position

Unterschrift