



ONYX composites GmbH

**Weiterentwicklung eines
ultraleichten E-Mobils für den urbanen Einsatz
„Phase 2“**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az 30693/02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing.(FH) Nicolas Meyer & Dipl.-Ing.(FH) Michael Schnakenberg

Osnabrück der 15.07.2015



Az	30693/02	Referat	21	Fördersumme	67.600€
Antragstitel		Weiterentwicklung eines ultraleichten E-Mobils für den urbanen Einsatz			
Stichworte		E-Mobil, Leichtbau, Faserverbund, Nachwachsende Rohstoffe, Akku to go			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
12 Monate		01.08.2014		30.06.2015	
Zwischenberichte		Verwendungsnachweis vom 06.07.2015			
Bewilligungsempfänger		ONYX composites GmbH Marie-Curie-Str. 3 49076 Osnabrück		Tel 0541-58051528 Fax 0321-21290923	
				Projektleitung Nicolas Meyer	
				Bearbeiter Nicolas Meyer & Michael Schnakenberg	
Kooperationspartner		Commeo GmbH Albert-Einstein-Str. 1 49076 Osnabrück			

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Auf Basis des Mobilitäts- und Leichtbaukonzeptes aus „Phase 1“ wurde mittels Faserverbundwerkstoffen (Karosseriestruktur & Anbauteile) in Kombination mit Bauteilen aus dem s.g. Pedelec-Umfeld und weiteren Standardlösungen ein Ultraleichtmobil für den Einsatz im urbanen Lebensraum weiterentwickelt.

Folgende übergeordnete Projektziele werden hierbei verfolgt:

- Ressourcen- und Energieeffizienz in der Herstellung sowie im Betrieb des Elektrofahrzeuges durch konsequenten Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen (speziell auch nachwachsende Rohstoffe als Alternative für herkömmliche Glas- und Kohlenstofffasern).
- Deutliche Emissionseinsparungen (CO₂, Stickoxide, Rußpartikel & Lärm) im urbanen Lebensraum.
- Gesundheitsförderung durch die flexible Einbindung körperlicher Aktivität im mobilen Alltag auch bei längeren Strecken und schlechtem Wetter durch die Integration eines Hybridantriebes.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

- Weiterführung der Detailkonstruktion auf Basis der Entwürfe aus „Phase 1“ unter Berücksichtigung der Hauptzielparameter Kosten, Gewicht, Nutzlastfaktor, technische Umsetzbarkeit und der Abschätzung der Marktrelevanz
- Weiterentwicklung und dynamische Tests des vorläufigen 1:1 AGT's um die Fahrtauglichkeit, die Zulassungsfähigkeit und die Betriebsfestigkeit abprüfen zu können.
- Überprüfung und Optimierung des Designkonzeptes aus Phase 1 unter Berücksichtigung der Fertigungs- und Montagetauglichkeit.
- Iterative Überprüfung der ökologischen und ökonomischen Ziele im Rahmen einer vergleichenden Ökobilanz für das ONYX E-Mobilkonzept.

Ergebnisse und Diskussion

Die im Projektplan zu „Phase 2“ kommunizierten Vorhabensziele wurden größtenteils erreicht. Im Rahmen der Entwicklungsprozesse „Monocoque“, „Antrieb“ sowie „Felgen & Lenkung“ waren teilweise unerwarteten Herausforderungen zu bewältigen. Diese Herausforderungen, wie z.B. das Versagen der Aluminium-Felgen aus dem Fahrradbereich, konnte aber durchgängig durch die Anpassung der Entwicklungsziele gemeistert werden. Im Fall der Felgen wurde z.B. entschieden für das Fahrzeug eine spezifische Composite-Felge zu entwickeln, welche die Leichtbau- und Kostenziele einhält und dem Fahrzeug ein nunmehr komplett selbstständiges Aussehen verleiht.

Der übergeordnete Zielparameter hinsichtlich der Umweltentlastung ist der formulierte „Nutzlastfaktor“ (NLF) mit einem Ursprungsziel von 1,5 (Verhältnis Nutzlast zu Eigengewicht eines Fahrzeuges), welcher durch das aufgezeigte Potential des Leichtbaus mit Faserverbundwerkstoffen und minimal dimensionierten Funktionsbauteilen nachgewiesen wurde (Beispiel NLF für CFK-Variante = ca. 1,4). Jedoch ist dieser Extremleichtbau nicht in Bezug auf das anvisierte Marktpotential im Preissegment <10.000 € nicht wirtschaftlich. Parallel ergab eine Ökobilanzierung, dass dieser vermeintliche Hightech-Vorteil sich durch hohe Emissionen in CFK-Herstellung und Entsorgung erst nach mehreren 100.000 km Laufleistung gegenüber den anderen Faserverbund-Varianten amortisiert.

Die parallele Berücksichtigung der verfügbaren Faserverbundwerkstoffe und Konstruktionslösungen über Standardbauteile in Bezug auf eine vergleichenden Ökobilanz sowie der Material- und Herstellungskosten zeigt auf, dass ein Kompromiss zwischen Leichtbaupotential sowie die Suche nach der kostengünstigsten und nachhaltigsten Lösung den Einsatz von GFK verlangt. Jedoch kann über die spezifisch schlechteren Eigenschaften das Grenzgewicht von 100 kg (ohne Akku) nicht mehr gehalten werden und muss um min. 25 % nach oben korrigiert werden. Parallel muss der Antrieb zur Minimierung der Herstellungskosten „von der Stange“ gekauft werden und sorgt somit durch seine Überdimensionierung für einen weiteren Anstieg der Fahrzeugmasse um ca. 15-20 %. Somit gilt es nun mit dem erarbeiteten Entwicklungskompromiss und einer max. Leermasse (ohne Akku) von unter 150 kg (bei zul. Nutzlast von 200 kg) zu bleiben. Der Nutzlastfaktor wird somit aber noch deutlich über 1,0 liegen und ein Leichtbauunikat für den Transport von 2 Personen im urbanen Lebensraum darstellen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

In der Außenkommunikation durch Zeitungsartikel, Messepräsentationen, Vorträge, elektronische Kommunikation auf unserer Homepage, Youtube etc. konnte ein ausgeprägtes Interesse sowie die grundsätzliche Akzeptanz der Produktidee nachgewiesen werden. Aktuell ist eine Pause in der Projektkommunikation bis zur Fertigstellung des zulassungsfähigen Prototypens (inkl. Composite-Monocoque) vorgesehen, um anschließend ein marktfähiges Produkt vorstellen zu können.

Fazit

Um auf Basis der Produktidee, der Konzeptentwicklung, der Ausarbeitung und der positiven Testergebnisse in „Phase 2“ nun die Marktreife zu erzielen, sind die Fertigung und der Test eines zulassungsfähigen Prototyps notwendig. Hierzu müssen die Kosten- und Gewichtstreiber fertigungsgerecht optimiert, die Zulassung erwirkt und im Rahmen einer Feldstudie der reale Nutzen nachgewiesen werden.

Kann auf Basis des zulassungsfähigen Prototypen die Marktakzeptanz nachgewiesen werden, wird ONYX ab 2016/17 mit dem Aufbau einer Kleinserie von 200 Einheiten/Jahr beginnen und versuchen, parallel einen Partner für die Großserie zu gewinnen, um die Vorteile für Ressourcen – und Energieeffizienz über den dann deutlich sinkenden Einstiegspreis für jedermann verfügbar zu machen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Zusammenfassung „Phase 2“	8
2 Einleitung	9
3 Hauptteil	11
3.1 Entwicklung und Prototypenbau	11
3.1.1 Detailkonstruktion & Designentwicklung	11
3.1.2 Simulation und Ökobilanzierung	26
3.1.3 Weiterentwicklung Fertigungskonzept	35
3.1.4 Elektronik und Akku	36
3.1.5 Prüfstand und Fahrversuche Antriebsvarianten 2-4 kW	42
3.2 Fertigung, Optimierung und Test Funktionsmodelle 1:3 und 1:1	43
3.3 Marktpotentialabschätzung & Businessplan	45
3.3.1 Marktpotentialabschätzung	45
3.3.2 Zielpreisdefinition	50
3.3.3 Vermarktungskonzept	50
4 Fazit	52
5 Literaturverzeichnis	53
6 Anhänge	54
6.1 Projektplan detailliert „Phase 2“	54
6.2 Protokollbeispiel einer 10 km-Testfahrt mit dem AGT	55

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Organigramm der beteiligten Fachbereiche und Aufgliederung des Designprozesses.....	11
Abb. 2: Isometrische Konzeptansichten und 3-Seitenansicht Variante „Threewheeler“.....	12
Abb. 3: Isometrische Konzeptansicht und 3-Seitenansicht Variante „Kabinenroller“.....	12
Abb. 4: Isometrische Konzeptansicht 3-Seitenansicht Variante „Raumwunder“.....	12
Abb. 5: Bewertungsmatrix Konzeptbewertung „Stadtfahrzeug der Zukunft“.....	12
Abb. 6: Konzeptbewertung der drei zu überprüfenden Grundvarianten.....	13
Abb. 7: Darstellung des digitalen Mock-ups inkl. der Fahrwerks- und Antriebselemente.....	14
Abb. 8: Pflichtenheft mit den wichtigsten Vorgaben für den Designprozess.	14
Abb. 9: Skizzenanfertigung von Hand	15
Abb. 10: Renderings der Designkonzepte „leicht“ und „sportlich“.....	15
Abb. 11: Renderings der Designkonzepte „dynamisch“ und „minimalistisch“.....	15
Abb. 12: Designfazit im Rahmen der Definition des Designthemas	16
Abb. 13: Darstellung der möglichen Positionen für „Lieferboxen“ oder „ZweitAkku“.....	16
Abb. 14: Darstellung der Charakterlinien.....	16
Abb. 15: Ausgestaltung des Monocoquekonzeptes	17
Abb. 16: Rendering des optimierten Gesamtfahrzeugdesigns inkl. Beleuchtung	17
Abb. 17: Schnittabsichten zur Darstellung der Interieuraufteilung & der Sichtfeldanalyse	18
Abb. 18: Konstruktion der unteren Seitenelemente	18
Abb. 19: Konstruktion der „Akku to go“-Aufnahme.....	18
Abb. 20: Überprüfung der Flächenkonstruktion im Zusammenspiel mit allen Funktionselementen	19
Abb. 21: Konstruktion der Heckpartie	19
Abb. 22: Konstruktion des oberen Türelementes	19
Abb. 23: Konstruktion Frontpartie und Übergangssituation Tür- und Heckpartie.....	19
Abb. 24: Detaillierte Konstruktion der Beleuchtungsaufnahme, des Kotflügels und der A-Säule	20
Abb. 25: Überprüfung der Flächenkonstruktion im Zusammenspiel mit allen Funktionselementen	20
Abb. 26: Konstruktion der integrierenden Mittelschale	20
Abb. 27: Spiegeln und Vereinen der Halbschalenkonstruktion	20
Abb. 28: Überprüfung des Zusammenbaus und der Montageschnittstellen im digitalen Mock-up.....	21
Abb. 29: Darstellung des Rapidprototyping-Modells im 1:5 Maßstab.....	21
Abb. 30: Größen- und Massenverhältnisse auf Basis des Modells „Preisschnapper“	22
Abb. 31: Geometrie- und Funktionsmodell der Lamborghini-Tür.....	22
Abb. 32: Darstellung der einfaltbaren „Persinning“.....	23
Abb. 33: Prinzip des Lenkungskettentriebes.....	24
Abb. 34: Einbauposition im Fahrzeug, links: CAD, rechts: 2D Zeichnungsableitung	25
Abb. 35: Felgengestaltung und Fertigung der Composite-Hinterradfelge	26
Abb. 36: Darstellung der Konstruktions- und Simulationssoftwarebausteine „CATIA“ & „SIMULIA“	27
Abb. 37: Composite-Türbalken Geometrischer Aufbau in CATIA und „vernetzt“ in SIMULIA/Abaqus	27
Abb. 38: Ergebnisdarstellung statischer Test „500 kg mittig“.....	28
Abb. 39: Darstellung der Ergebnisse des dynamischen Pfahltests	28
Abb. 40: Darstellung der Systemgrenze für die Bilanzierung der 3 Monocoque-Varianten.....	29
Abb. 41: Vergleich von Materialspezifischen CO ₂ -Äquivalenten auf Basis verschiedener Quellen	30
Abb. 42: Vergleich des Global Warmin (GWP) Potentials der untersuchten Monocoque-Varianten.....	31
Abb. 43: Anteile am GWP (GFK-Monocoquevariante) Strommix.....	32
Abb. 44: Anteile am GWP (GFK-Monocoquevariante) Ökostrommix.....	32
Abb. 45: li. CO ₂ GWP in Abhängigkeit der km-Leistung ; re. Spannungsdreieck: Preise, Masse & GWP	32
Abb. 46: Vergleich der Fahrzeuge und Antriebsarten in der Nutzungsphase; GWP.....	34
Abb. 47: Darstellung der Composite- Bauteile welche bei ONYX & vacopro gefertigt werden	35
Abb. 48: Designvariationsmöglichkeiten durch die Beleuchtungsanordnung.....	36
Abb. 49: Zeichnungsableitung zur zulassungsgerechten Positionierung der Beleuchtungselemente	36
Abb. 50: Funktionsaufbau der Fahrzeugbeleuchtung inkl. kompletten Kabelbaum	37
Abb. 51: Inbetriebnahme und Überwachung der ersten Zellpakete	38
Abb. 52: Darstellung des „Akku to go“-Schubladenprinzips.....	39
Abb. 53: Schnittansicht der Akku-Positionierung mit gleichzeitigem Andocken an das Fahrzeug.....	39

Abb. 54: li.: Teststrecke (ca. 950 m lang); re.: Darstellung der verbrauchten Energie/ km.....	40
Abb. 55: Vergleich Akkuprototyp 1.0 vs. Akkuprototyp 2.0.....	41
Abb. 56: Zustandsdiagramm zur Überwachung des Akkus.....	42
Abb. 57: Prüfstands Aufbau „Akku to go_1.0“ in Kombination mit 4 kW-Antrieb ohne Getriebe.....	43
Abb. 58: Herstellung des Fräsrohlings für das 1:3 Positivmodell	43
Abb. 59: Arbeitsschritte Werkzeugbau für das 1:3 Monocoque	44
Abb. 60: Überblick der Fertigungsschritte zur Herstellung eines 1:3 GFK-Monocoques	44
Abb. 61: Darstellung des AGT „Phase-2“.....	44
Abb. 62: li. Testfahrt mit Akku to go- Prototy; re. Test & Optimierung der Einstiegssituation	45
Abb. 63: Potentialabschätzung nach dem „Bottom-Up-Prinzip“	45
Abb. 64: Das resultierende Marktpotential für die Elektromobilität nach Selektion	46
Abb. 65: Vorgehen bei der Top-Down-Abschätzung	46
Abb. 66: Übersicht zur Technischen Spezifikation	46
Abb. 67: Schritt IV: Beispiel der Berechnung der Durchschnittswerte einzelner Segmente	47
Abb. 68: Darstellung des Vorgehens bei der Berechnung und Wertung der einzelnen Faktoren.....	47
Abb. 69: Schritt VI: Definition der kritischen Faktoren und Einstufung für die Bewertung	47
Abb. 70: Ergebnisdarstellung zum Gesamtpotential mit und ohne Berücksichtigung der P-L-A-Matrix.....	48
Abb. 71: Methodik für die Gesamtmarktpotentialabschätzung und das ONYX E-Mobil-Potential 2015.....	48
Abb. 72: Darstellung des Trendszenarios für die Neuzulassung von Elektrofahrzeugen.....	49
Abb. 73: Berücksichtigung der TCO-Lückenentwicklung für verschiedene Nutzergruppen.....	49
Abb. 74: Darstellung der abgeleiteten Marktpotentiale für den Gesamtmarkt und das ONYX E-Mobil.....	49
Abb. 75: Übersicht Kostenrechnung ONYX E-Mobil Standardvariante „Preisschnapper“.....	50
Abb. 76: Darstellung des Online-Konfigurationssoftwarekonzeptes inkl. Bestellsystem	50
Abb. 77: Paretoauswertung der Bauteilbezogenen Massen der Variante Preisschnapper.....	51
Abb. 78: Paretoauswertung der Bauteilbezogenen Kosten der Variante Preisschnapper	51
Abb. 79: Darstellung der Material-Massenverteilung in Bezug auf die 3 Monocoquevarianten	51

Abkürzungsverzeichnis

AGT	Aggregateträger
BRD	Bundesrepublik Deutschland
bzgl.	bezüglich
CAE	Computer-Aided Engineering
CAD	Computer-Aided Design
CI	Competitive-Intelligence
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
E-Mobil	Elektronisches Mobil
ERP	Enterprise-Resource-Planning
Fzg	Fahrzeug
FEM	Finite Elemente Methode
F&E	Forschung und Entwicklung
FEM	Finite Elemente Methode
ggf.	gegebenenfalls
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GHV	Geheimhaltungsvereinbarung
GSD	Generated Shape Design
GWP	Global Warming Potential
HFK	Hanffaserverstärkter Kunststoff
inkl.	inklusive
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KMU	kleine mittelständische Unternehmen
NLF	Nutzlastfaktor
Pedelec	Pedal Electric Cycle
Pkw	Personenkraftwagen
PU	Polyurethan
Mio.	Millionen
s. g.	so genannte
SMC	Sheet mold compound-Verfahren (Heißpressverfahren für Compositebauteile)
Stk.	Stück
u.a.	unter anderem
URL	Uniform Resource Locator
USP	Unique Selling Proposition
VBA	Visual Basic for Applications
VK	Verkaufspreis inkl. MwSt.
Vgl.	Vergleiche
z. B.	zum Beispiel

1 Zusammenfassung „Phase 2“

Im DBU Förderprojekt „Konzeptstudie -Phase 1- der Entwicklung eines ultraleichten E-Mobils für den urbanen Einsatz“ mit dem Az. 30693 wurde von der Firma ONYX composites GmbH (ONYX) eine E-Mobilitäts-Konzeptidee als Bindeglied zwischen der aktuellen fossilen PKW-Dominanz im urbanen Lebensraum und der zukünftigen überregionalen E-Mobilität ausgearbeitet.

Durch den Ultraleichtbauansatz und der definierten Maximalreichweite auf max. 50 km innerhalb eines Aktionsradius von 10-25 km konnte das Hauptziel für den gesellschaftlichen Nutzen über das s.g. „Akku to go Prinzip“ erreicht werden. Dieses Prinzip, ähnlich dem bekannten Pedelec-Prinzip, ermöglicht es, den Akku als Trolley-Koffer kinderleicht zu entnehmen und an jeder beliebigen 230 V Steckdose zu laden. Hierdurch wird ermöglicht, dass es für einen Großteil von zukünftigen urbanen Wegstrecken keine Notwendigkeit einer statischen Ladeinfrastruktur gibt.

Der übergeordnete Zielparamester zur Erreichung der Funktionskette um einen tragbaren Akku und hinsichtlich der Umweltentlastung ist der formulierte „Nutzlastfaktor“ von 1,5 (Verhältnis Nutzlast zu Eigengewicht eines Fahrzeuges).

Über die Entwicklungsbausteine Design & Konstruktion, Ökobilanzierung, Fertigungsplanung sowie Marktstudien & Businessplanerstellung, wurde genau dieser immer wieder neu berechnet. Anschließend wurde eine Überprüfung der bewertbaren Zielparamester „Umweltrelevanz“, „Technische Umsetzbarkeit“, „Marktrelevanz“ und „Wirtschaftliches Potential“ durchgeführt und die Entwicklungsschritte für den optimalen Kompromiss definiert.

Im Rahmen der Abwägung Leichtbaupotential von Einzellösungen in Bezug auf die Auswirkung des resultierenden Verkaufspreises wurde schnell die wirtschaftliche Grenze ausgelotet. Somit musste z.B. auf die Verwendung von CFK-Materialien verzichtet werden, auch weil das Leichtbaupotential im Rahmen der Ökobilanzierung nur nach unrealistischen Wegstrecken einen ökologischen Mehrwert bot. Entwickelt und konstruktiv ausgearbeitet, wurde eine Kompromiss basierend auf einer hochintegrierten und nur 3-teiligen GFK-Monocoquebauweise, die mit einer Hinterradantriebseinheit aus dem Rikscha-Bereich ausgestattet ist, welche die humane- und elektrische Energie auf die Straße bringt.

Die technische und wirtschaftliche Umsetzung und das Potential für Umwelt und Gesellschaft wurden somit grundlegend nachgewiesen. Um alle technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Details für die Serie abzusichern, ist es aber notwendig einen seriennahe und zulassungsfähigen Prototypen aufzubauen und im Rahmen einer Feldstudie durchgängig zu testen und evtl. weiter zu optimieren.

Nur über diesen Prototypen mit Composite-Monocoque, mit der einmaligen Energieeffizienz und dem sowohl hervorstechendem aber auch individuellen Design und kann der Weg für eine Marktdurchdringung geebnet werden. Denn es gilt, den zukünftigen und sehr kritischen Kunden und jetzigen Klein-PKW-Nutzer das hier entwickelte Fahrzeugkonzept erfahrbar zu präsentieren und somit ein Umdenken in den Köpfen zum aktuellen urbanen Mobilitätverhalten zu erreichen.

2 Einleitung

Durch die stark ansteigenden Preise der fossilen Energiequellen, dem stetigen Anstieg von PKW-Kurzstreckenfahrten und die Forderung nach emissionsfreiem Verkehr, ist eine Veränderung der Mobilität speziell in den Stadtgebieten hinsichtlich des Antriebs unvermeidbar. Dies führt schon heute zu einem Umdenken der Gesellschaft, welches durch politische Bemühungen (Energiewende, E-Mobil Zulassungsziele) weiter forciert wird. Fortbewegungsmittel, die durch Muskelkraft (z.B. Pedelec-Fzg.) angetrieben werden, gewinnen zunehmend an Bedeutung und werden als Folge dieser Entwicklung immer häufiger für alltägliche Strecken genutzt. Jedoch beim Transport von Lasten und bei schlechtem Wetter setzen sich die Stadtbewohner oft und gerne in ihren PKW.

Die Hälfte aller mit dem Auto zurückgelegten Wege ist kürzer als sechs Kilometer, fünf Prozent sogar kürzer als ein Kilometer. Das hat Folgen für die Umwelt. Ein Auto mit kaltem Motor verbraucht auf den ersten drei Kilometern überproportional viel Kraftstoff. Insgesamt ist der Straßenverkehr mit gut 18% für einen Großteil der CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich, der Anteil des Pkw-Verkehrs allein beträgt 13%.

Leichte muskelkraftunterstützte Hybridfahrzeuge bieten dazu eine urbane Mobilitätsalternative und sind geeignet, den Stadtverkehr wesentlich umwelt- und menschenfreundlicher zu gestalten. Mit Verbreitung der Hybridtechnik (Kombination von Muskelkraft und Elektromotor in den sogenannten Pedelec- und E-Bikemodellen) im Zweiradbereich wurde eine demografiefeste und emissionsfreie Möglichkeit der urbanen Reichweitenmaximierung geschaffen. Mittels dieser technischen Unterstützung, wird es auch schwächeren und älteren Menschen ermöglicht, größere Strecken leichter, kostengünstig unabhängig von öffentlichen Verkehrsmitteln und emissionsfrei zurückzulegen.

Die Fa. ONYX hat zur Ergänzung der aktuell erhältlichen rein „automobilen“ Elektrofahrzeuge, die auf Geschwindigkeit, Komfort und Reichweite, aber nicht auf nachhaltige Effizienz ausgelegt sind und den beschriebenen hybriden Zweiradmodellen das fehlende „Mobilitäts-Bindeglied“ für urbane Lebensräume konzeptioniert. Im Rahmen des DBU- Projektes Phase-1 „Entwicklung eines ultraleichten E-Mobils für den urbanen Einsatz“ wurde dieses Konzept weiter ausgearbeitet und auf Basis eines fahrbaren Aggregateträgers die technische Machbarkeit nachgewiesen. Dieses neuartige und innovative Fahrzeugkonzept verbindet die Vorteile der bestehenden Technik im Zweiradsektor (leicht, günstig, hohe Variantenvielfalt, „Akku to go-Prinzip“) und überträgt diese auf die herkömmlichen Leichtkraft- und Elektroautomobile (z.B. e-Up, Twizy, Twike & CityEL). Die Vorzüge eines herkömmlichen PKWs im urbanen Aktionsradius von 10-25 km und die des Humanhybrid-Antriebs wurden auf diese Weise miteinander kombiniert, sowie der kostengünstige Einstieg in ein leichtes und somit effizientes, nachhaltiges und alltagstaugliches Elektromobil aufgezeigt.

In Phase 1 des Entwicklungsprojektes wurden die innovativen Kernpunkte des ultraleichten E-Mobilkonzeptes konzeptionell ausgearbeitet und anhand der Zielparameterüberprüfung (Gewicht, Kosten & zu erwartende Umwelrelevanz) überprüft.

Das technische Entwicklungsziel, auf Basis des enormen Leichtbaupotentials von Faserverbundwerkstoffen (im Speziellen auch Naturfasern wie Hanf und Flachs) ein hybrides Elektromobil für den urbanen Einsatz zu entwickeln, welches mit einem Fahrzeuggewicht von möglichst unter 100 kg (ohne Akku), Platz für 2 nebeneinander sitzende Personen, einer zusätzlichen Ladung von min. 50 kg und einer Maximalgeschwindigkeit von 45-50 km/h (L6e-Zulassung) alle Zielkundenbedürfnisse im Stadt-

verkehr erfüllt, konnte theoretisch nachgewiesen werden. Anhand von ersten Fahrversuchen an einem s.g. fahrbaren Aggregateträger konnten auch praktische Erfahrungen gesammelt werden.

Die wirtschaftliche Marktfähigkeit konnte über geringe Kosten der Einzelkomponenten aus „Großserienbranchen“ (Fahrwerk, Lenkung, Antriebstechnologie, Akku und Beleuchtung) theoretisch dargestellt werden. Durch den Einsatz dieser Standardteile kann somit ein Elektromobilitäts- Einstiegspreis für den Endverbraucher von unter 9.000 € als Kleinserien-Startpreis (> 200 Einheiten/Jahr) angeboten werden. Die Herausforderung dabei ist es trotz des „Zusammenwürfelns“ von verfügbaren Einzelbauteilen ein ansprechendes und eigenständiges Design umzusetzen.

Aus diesen Erkenntnissen und Erfahrungen wurden die Aufgabenpakete zur Weiterentwicklung des Konzeptes in Richtung Entwicklung und Detailkonstruktion formuliert und in Form des Projektplans (Anhang 6.1) mit der DBU für Projektphase 2 abgestimmt. Mittels der definierten Projektziele sollen DBU, Projektpartner und ONYX vor der Investition in hochpreisige 1:1 Werkzeuge z.B. für das selbsttragende Monocoque, Risiken abschätzen, Konstruktionsfehler minimieren und die Zulassung des Fahrzeuges vorbereiten und Fehlinvestitionen zu vermeiden.

Terminliches Ziel ist es, dass Gesamtpaket eines 1:1 Prototypens, welcher in „Phase 3“ des Entwicklungsvorhabens ab Ende 2015 gefertigt werden soll, soweit auszuarbeiten, dass die Fertigung, Montage und Betriebsfestigkeit im Rahmen der Hauptzielparameter Kosten und Gewicht sichergestellt sind. Im Rahmen des Abschlussberichtes wird auf folgende Schwerpunkte eingegangen:

- Der Designprozess im iterativen Zusammenspiel mit der Detailkonstruktion, insbesondere der alles vernetzenden Monocoque-Strukturbauteile.
- Die Simulation im Rahmen der technischen Anforderungen sowie die Ökobilanzierung als Entscheidungsgrundlage für die Material- und Konstruktionsvariante mit dem höchsten Einsparungspotential im Rahmen der Ressourcen- und Energieeffizienz.
- Das Fertigungskonzept für die Compositebauteile.
- Die Entwicklung und Umsetzung der zulassungsfähigen Beleuchtungseinheiten, sowie des „Akko to go-Prinzips“ in Kombination mit der 4 kW Antriebseinheit.
- Die 1:3 Design- und Technikdemonstratoren, Prüfstand- und Komponententests sowie realen Tests am 1:1 AGT und deren Resultate.
- Sowie die Analysen zur Marktabschätzung, dem Businessplan und dem Vermarktungskonzept.

Neben den Entwicklungsaufgaben wurde auch im Rahmen der optischen Ausgestaltung das Kommunikationspotential in Richtung potentieller Kundenkreise, Zulieferer, Förderer und neuer Partner aufgebaut. Somit werden die detaillierten 3D-Daten genutzt um Animation, Broschüren und Online-Vertriebstools für die digitale Verbreitung zu erzeugen, um zur Markteinführung möglichst viele Informationen speziell zum viralen Marketing nutzen zu können.

Die Ziele werden im Fazit auf Basis der 4 Hauptgruppen „Umweltrelevanz“, „Technische Umsetzbarkeit“, „Marktrelevanz“ und „Wirtschaftliches Potential“ diskutiert, bewertet und eine Empfehlung zum Vorgehen in Phase 3 ausgesprochen.

3 Hauptteil

Im Hauptteil dieses Berichtes werden auf Basis der wichtigsten Arbeitspakete des Gesamtprojektplans für Phase 2, siehe Anhang 6.1, die durchgeführten Entwicklungsschritte dargestellt. Die erzielten Ergebnisse werden mit Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung verglichen und kritisch bewertet. Das Gesamtergebnis wird im anschließenden Fazit zusammengefasst und eine Empfehlung für das weitere Vorgehen ausgesprochen.

3.1 Entwicklung und Prototypenbau

Ziel dieser grundlegenden Projektbausteine war es die konzeptionellen Ansätze aus dem Konstruktionsentwurf und des ersten Aggregateträgers (AGT) aufzubauen und offene Detailfragen theoretisch aber auch praktisch zu klären.

3.1.1 Detailkonstruktion & Designentwicklung

Die Detailkonstruktion baute auf die Konzeptarbeit, die Entwürfe sowie die Umsetzung dieser Vorentwicklungsaktivitäten im Rahmen einer fahrbaren Sitzkiste (AGT) auf. Es galt nun die Überlegungen, Prinzipien und Berechnungen zur Erreichung der Projektziele im Detail um- und auszukonstruieren und auf Basis der technischen und finanziellen Rahmenbedingungen iterativ zu überprüfen.

Ziel der Detailkonstruktion ist es, Bauteil und Baugruppen-Zeichnungen für die Herstellung eines seriennahen Prototypens zu liefern, welcher in „Projekt-Phase 3“ gefertigt, getestet und zugelassen wird. Speziell die Umsetzung der Designziele in Kombination mit den konstruktiven Randbedingungen sowie den Fertigungsmöglichkeiten der verfügbaren Composite-Herstellungsverfahren für die Monocoquestruktur stellten eine besondere Herausforderung dar. Die Methodik der Freiflächenkonstruktion mit dem High End Tool „Generated Shape Design“ (GSD) im Umfeld der Konstruktionssoftware „CATIA V5“ wurde im Rahmen von Schulungen erlernt und in iterativen Schritten auf das Monocoquedesign umgesetzt.

Über eine Strukturierung der Konstruktions- und Kreativarbeit in Form eines Projektorganigramms wurden die beteiligten Fachbereiche und Projektpartner gesteuert und die stetige und effiziente Kommunikation gefördert. Der Designprozess wurde wie rechts in Abb. 1. dargestellt definiert.

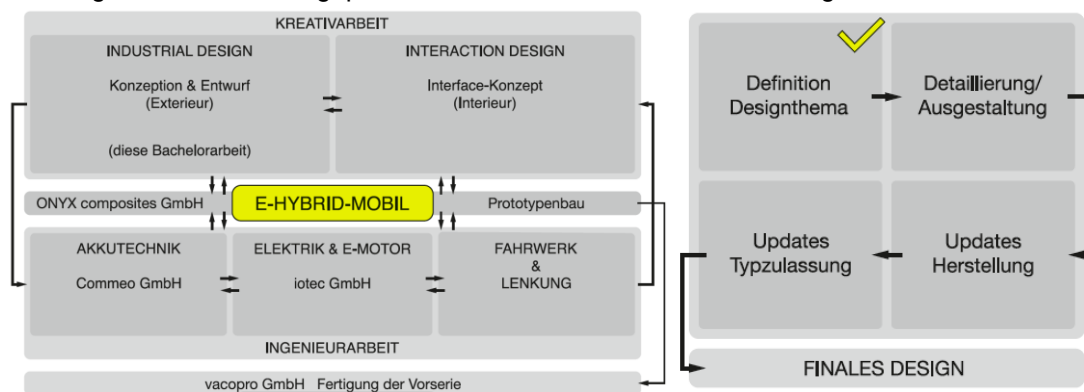


Abb. 1: Organigramm der beteiligten Fachbereiche und Aufgliederung des Designprozesses

3.1.1.1 Monocoque & Design Gesamtfahrzeug

Wie zuvor beschrieben, galt es Konstruktion und Design schrittweise zu vereinen, um einen idealen Kompromiss zwischen den jeweiligen Einzelzielen zu ermöglichen. Hierzu wurden nochmals die 3 wesentlichen Designkonzepte aus Phase 1 auf den konstruktiven Prüfstand gestellt und in Form von CAD-Simulationen miteinander verglichen, um vor der aufwendigen Detailkonstruktion das optimale Konzept in Bezug auf Funktion und Ergonomie zur Markterreichungs- und Durchdringung umzusetzen. Es wurden die grundlegenden Fahrzeugeinheiten: Räder, Antrieb, Sitzpositionen, Akkueinheit und Zuladung in Form von Wasserkisten positioniert und bewertet:

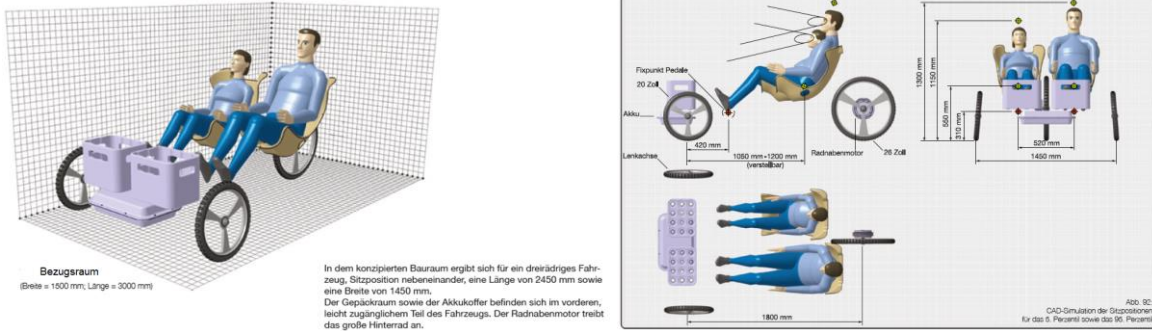


Abb. 2: Isometrische Konzeptansichten und 3-Seitenansicht Variante „Threewheeler“

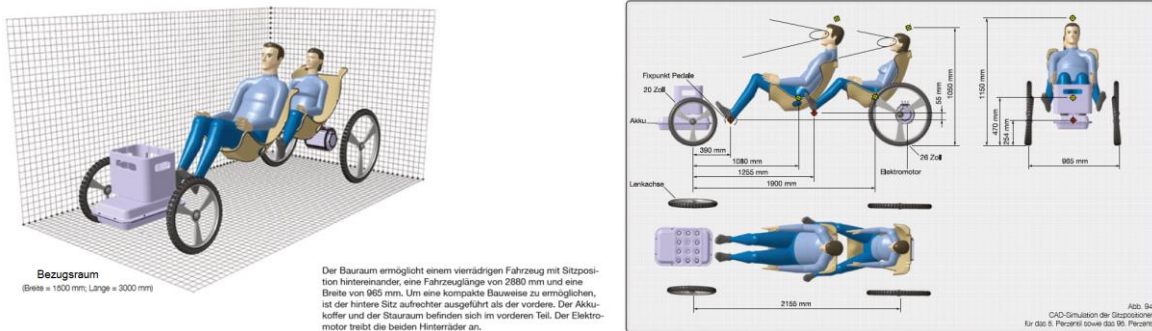


Abb. 3: Isometrische Konzeptansicht und 3-Seitenansicht Variante „Kabinenroller“

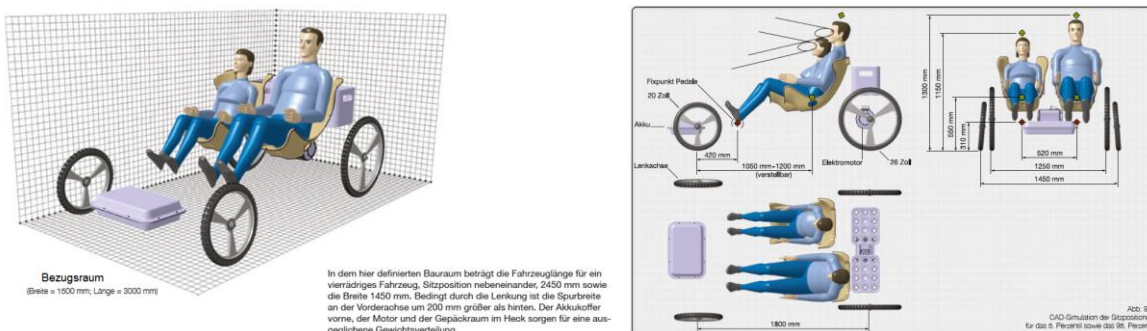


Abb. 4: Isometrische Konzeptansicht 3-Seitenansicht Variante „Raumwunder“

	✗	✗	✓
	„Three Wheeler“	„Kabinenroller“	„Raumwunder“
Fahrspaß	●○○	●●●	●●●
Komfort	●●●	●○○	●●●
Fahrwerk	●○○	●●○	●●●
Stauraum	●●○	●○○	●●●
Raumnutzung	●●○	●○○	●●●
Modularität	○○○	●○○	●●○
Gesamt	●●○	●●○	●●●

Abb. 5: Bewertungsmatrix Konzeptbewertung „Stadtfahrzeug der Zukunft“

Im Rahmen der abschließenden Konzeptbewertung wurden die in Phase 1 definierten Hauptanforderungen an ein Stadtfahrzeug der Zukunft nochmals überprüft: eine kompakte Bauweise, die komfor-

table und Energieeffiziente Beförderung von zwei Personen, eine angemessene Nutzlast und ein attraktiver Preis.

Die Tandembauweise, Konzept zwei, hat die geringstmögliche Fahrzeugbreite. Die tiefe Sitzposition ermöglicht eine stabile Straßenlage mit Einschränkungen beim Ein- und Aussteigen. Ein weiterer Nachteil ist die relativ große Fahrzeuglänge und der geringe Sitzkomfort für große Personen.

Bei dem dreirädrigen Fahrzeugkonzept ist eine Sitzposition nebeneinander möglich. Die Fixpunkte der Pedale sind für unterschiedlich große Personen gut erreichbar und es besteht mehr Raum für Ablagemöglichkeiten. Bauartbedingt treten jedoch größere Torsionsverformungen auf und die Straßenlage ist deutlich eingeschränkt.

Das dritte Konzept bietet durch vier Räder und einen relativ breiten Radstand die beste Straßenlage. Auch hier finden zwei Personen nebeneinander Platz. Der Stauraum im Fahrzeugheck sorgt für eine gute Gewichtsverteilung bei verbesserter Crashesicherheit. Für die aufwendige Lenkachse (Siehe Lenkung) bleibt ausreichend Platz. Dieses Modell wird als Raumwunder bezeichnet, da es einen großen Nutzwert für Passagiere und Gepäck auf geringstem Raum bietet.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der Modularität. Das stabile Fahrwerk und die geringe Fahrzeuglänge ermöglichen das Anbringen einer zusätzlichen Transportbox am Fahrzeugheck. Dieses ist ein enormer Vorteil für die private und gewerbliche Fahrzeugnutzung gleichermaßen.

Folglich wurde dieses Fahrzeugkonzept für eine breite Kundenschicht mit entsprechend großem Volumen am zukünftigen Mikromobilmarkt für am besten geeignet bewertet.

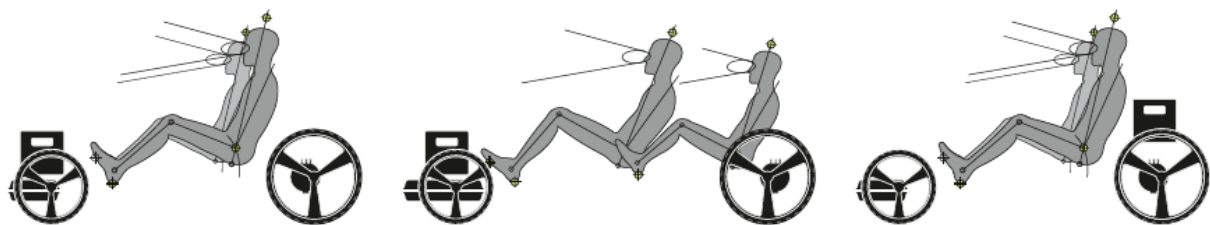


Abb. 97

ERSTES KONZEPT: „THREE WHEELER“

Vorteile

- + weniger Bauteile (nur drei Räder)
- + komfortable Sitzhaltung für zwei Personen
- + angemessener Stauraum im Frontbereich

Nachteile

- wenig Platz im Heckbereich
- Fahrstabilität beeinträchtigt
- verminderter Fahrkomfort
- geringe Verwindungssteifigkeit

ZWEITES KONZEPT: „KABINENROLLER“

Vorteile

- + geringe Fahrzeugbreite
- + guter cw-Wert möglich

Nachteile

- verminderter Komfort für große Menschen
- Pedalantrieb aus Platzgründen für hinteren Sitzplatz problematisch
- verringerte Stauraummöglichkeit
- große Fahrzeuglänge

DRITTES KONZEPT: „RAUMWUNDER“

Vorteile

- + angenehme Sitzposition
- + Pedalantrieb für beide Personen möglich
- + viel Stauraum auf der Hinterachse
- + vorne Platz für größere Akkueinheit
- + gute Balance der Gewichtsverteilung
- + ausgeglichenes Fahrverhalten

Nachteile

- vergleichsweise großes Bauvolumen

Abb. 6: Konzeptbewertung der drei zu überprüfenden Grundvarianten

Somit konnte das Konzept aus Phase 1 nach der aus unserer Sicht wichtigen Überprüfung bestätigt werden und auf Basis der Überarbeitung der einzelnen Baugruppen ein neues Digitales Mock-up konstruiert werden.

Das digitale Mock-up gilt als digitale Vorlage für den weiteren Design- und Entwicklungsprozess und gibt alle Fixpunkte bzw. „Hardpoints“ vor.

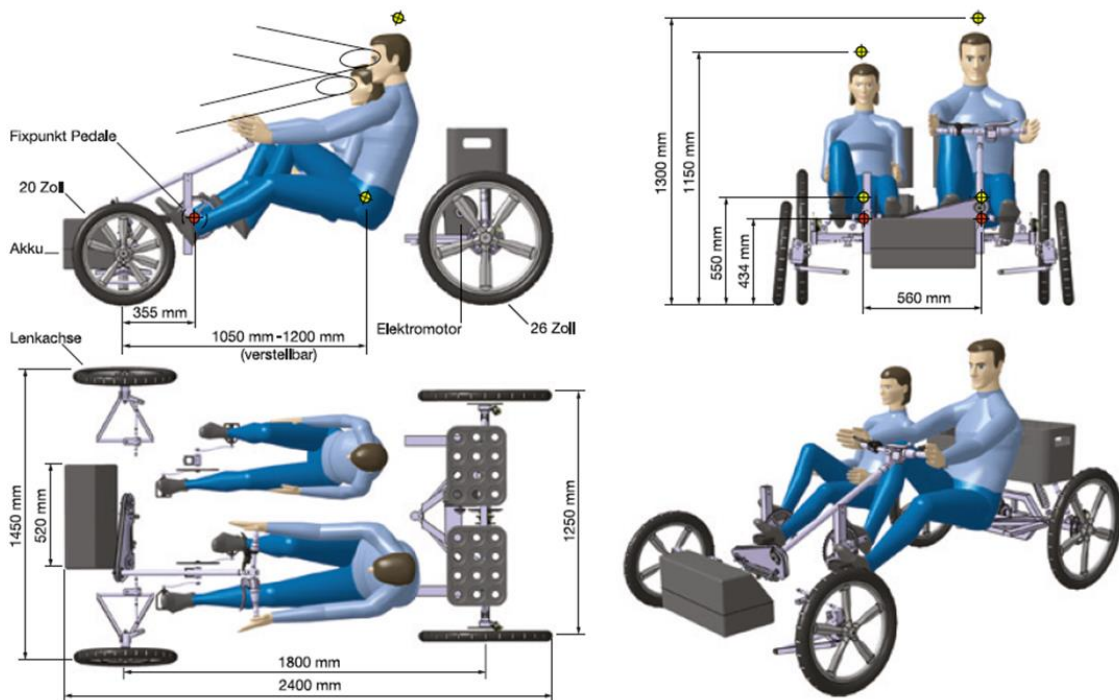


Abb. 7: Darstellung des digitalen Mock-ups inkl. der Fahrwerks- und Antriebselemente.

Parallel wurde für den Designprozess auf Basis der aktualisierten Anforderungsliste für das Gesamtfahrzeug, den Erfahrungen aus Phase 1 und den iterativen Optimierungen in Phase 2 ein Pflichtenheft erstellt. Dieses soll dem Designer als Leitfaden für den kompletten Prozess dienen.

PFLICHTENHEFT	
<p>ÄUSSERE ABMESSUNGEN</p> <p>Länge: < 2500 mm Breite: < 1450 mm Höhe: < 1400 mm</p>	<p>KAROSSERIE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Monocoque-Bauweise aus Faserverbundwerkstoffen - selbsttragende Fahrgastzelle - keine zusätzlichen metallischen Komponenten - Fertigung in drei Hauptelementen (Unterschale, Innenschale & Oberschale) - Zonenbasierte Gestaltung (Struktur- und Versteifungsflächen zur Stabilität & Crashesicherheit) - Hinterschneidung zur Formtrennung vermeiden
<p>ANTRIEB & AKKUTECHNIK</p> <p>Akku: vorne, leicht zu entnehmen E-Motor: zwischen der Hinterachse, leicht zugänglich Fahrwerk: vorne 20", hinten 26"-Fahrradbereifung</p>	<p>OPTIONALE AUSSTATTUNGEN</p> <ul style="list-style-type: none"> - beheizte Frontscheibe mit Scheibenwischer - Seitenscheiben - Glasdach - zusätzlicher Pedalantrieb zum Elektromotor
<p>PASSAGIERZELLE</p> <ul style="list-style-type: none"> - zwei Personen nebeneinander - groß klein 	<p>GESTALTERISCHE MERKMALE</p> <ul style="list-style-type: none"> - Individualisierungsmöglichkeiten durch Farbkombinationen - flächige Composite-Felgen - harmonische Integration externer Komponenten (z.B. Fahrzeugbeleuchtung)
<p>STAUERAUM</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kofferraum im Heckbereich - Heckklappe nach unten öffnend - Möglichkeit zur Modularität (Ergänzung durch externe Lieferbox soll möglich sein) 	

Abb. 8: Pflichtenheft mit den wichtigsten Vorgaben für den Designprozess.

Nach Festlegung dieser Randbedingungen startete der Designprozess Richtung zulassungsfähigen und fertigen Kleinserienfahrzeugs für die urbane Mobilität der Zukunft. Aufgrund von Handskizzen wurden digitale Renderings mittels der Software „Photoshop“ erstellt und die Designziele überprüft.

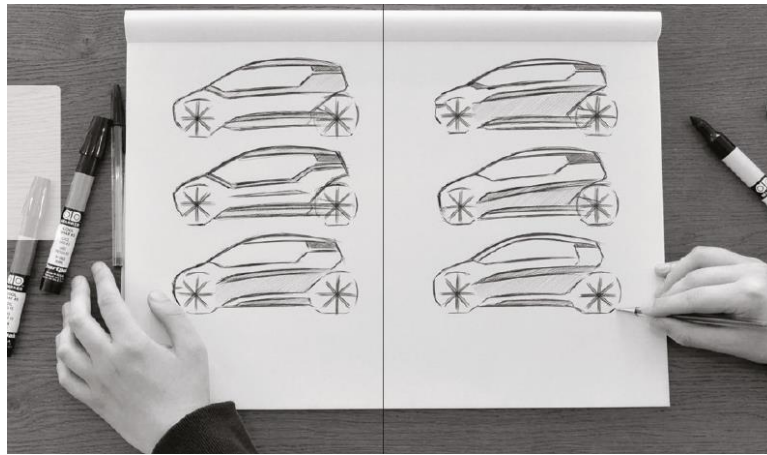


Abb. 9: Skizzenanfertigung von Hand

Im Bereich Design, insbesondere im Automobildesign, wird damit die Umsetzung einer oft vorher mit Bleistift oder Kugelschreiber angelegten Skizze in differenzierterer Darstellung bezeichnet. Die Umsetzung wird sowohl mit Markern als auch mit Buntstiften oder Kreiden so angelegt, dass durch Modellierung natürlicher Phänomene wie Textur, Refraktion, Reflexion, Schatten etc. dem Betrachter ein Eindruck der Materialität, der Größe und Form vermittelt wird. Seit Mitte der 1990er Jahre wird dieser Vorgang vermehrt per Computergrafik mit entsprechender Software durchgeführt.

Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Rendern_\(Design\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Rendern_(Design))

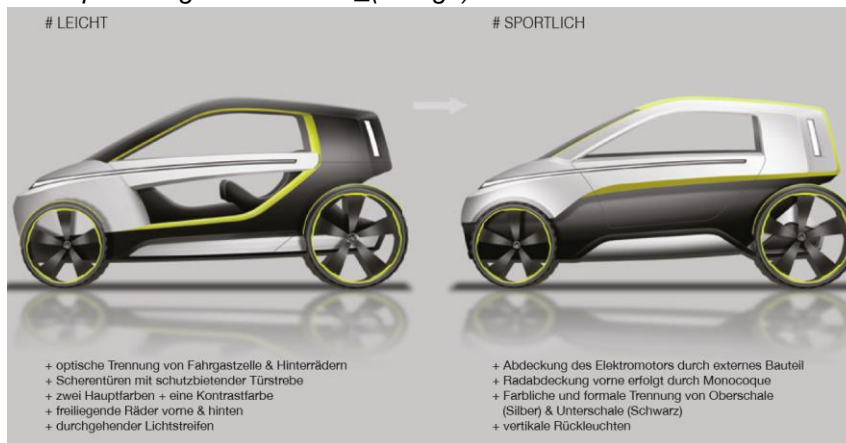


Abb. 10: Renderings der Designkonzepte „leicht“ und „sportlich“

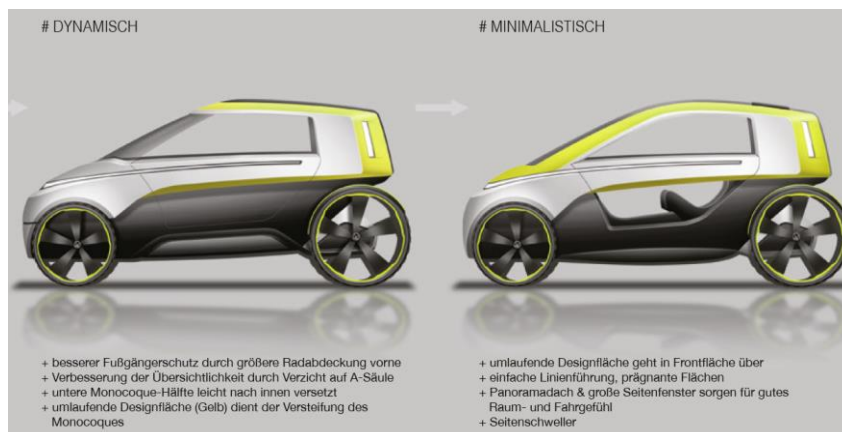


Abb. 11: Renderings der Designkonzepte „dynamisch“ und „minimalistisch“

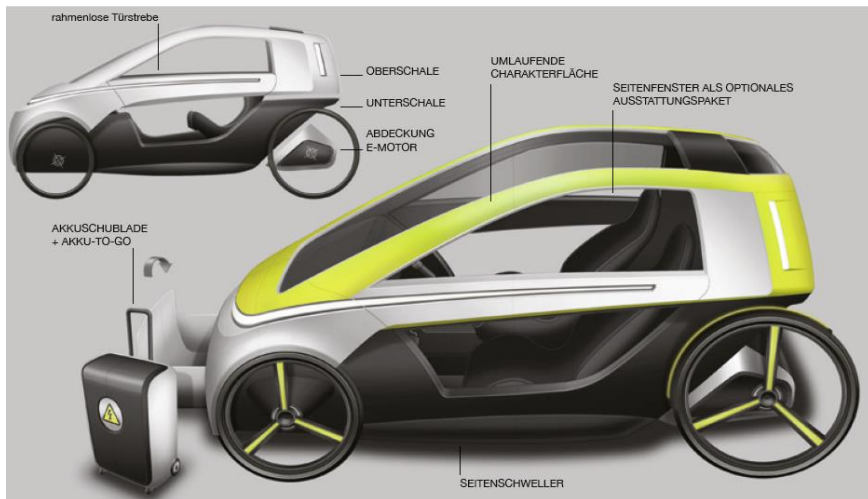


Abb. 12: Designfazit im Rahmen der Definition des Designthemas

Als Designfazit im Definitionsprozess wurde eine klare Unterteilung der Fahrgastzelle zu den Hinterrädern vorgenommen. Diese ermöglicht eine Abdeckung der Technik durch das Monocoque zum Innenraum und nach außen durch die Heckverkleidung. Die umlaufende Designfläche unterstreicht die Form des Monocoques und ergibt eine schmale Unterschale sowie eine breitere Oberschale mit mehr Bewegungsfreiheit für die nebeneinander sitzenden Nutzer im Innenraum. Die seitlich fortlaufende Lichtfläche bietet eine Grundlage für eine lineare Trennungsfuge. Im Rahmen der Monocoque-Auslegung sollte untersucht werden, ob eine durchgehende Scheibe ohne Querstrebe umsetzbar ist und somit eine fahradähnlich Übersicht für den Fahrer ermöglicht werden kann. Dieses Konzept galt es im nächsten Schritt im Zusammenspiel mit allen Fachdisziplinen weiter auszuarbeiten.

Um Das Ladevolumen zu vergrößern, wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht, abnehmbare „Lieferboxen“ an Fahrzeug zu montieren. Denkbar wäre auch eine Reichweitenerhöhung durch einen zweiten Akku.

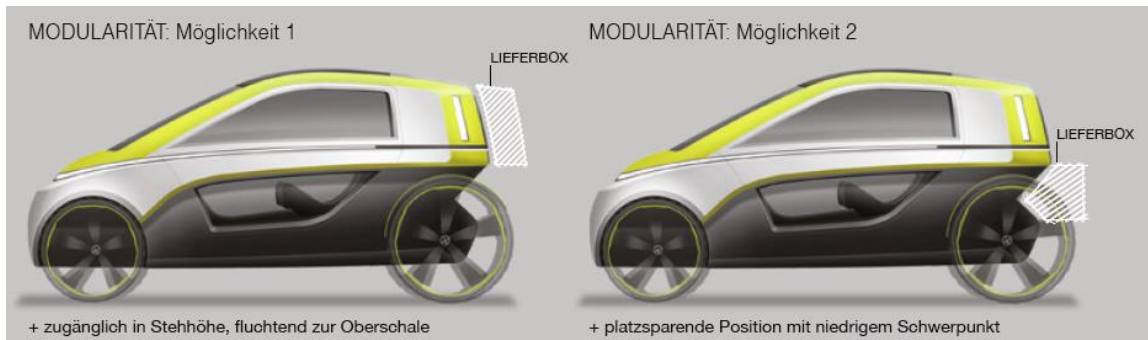


Abb. 13: Darstellung der möglichen Positionen für „Lieferboxen“ oder „ZweitAkku“

Bei der weiteren Ausarbeitung wurde ein besonderes Augenmerk auf die Linienführung gelegt, um dem Fahrzeug einen Wiedererkennungswert aber auch ein möglichst zeitloses Design zu geben.

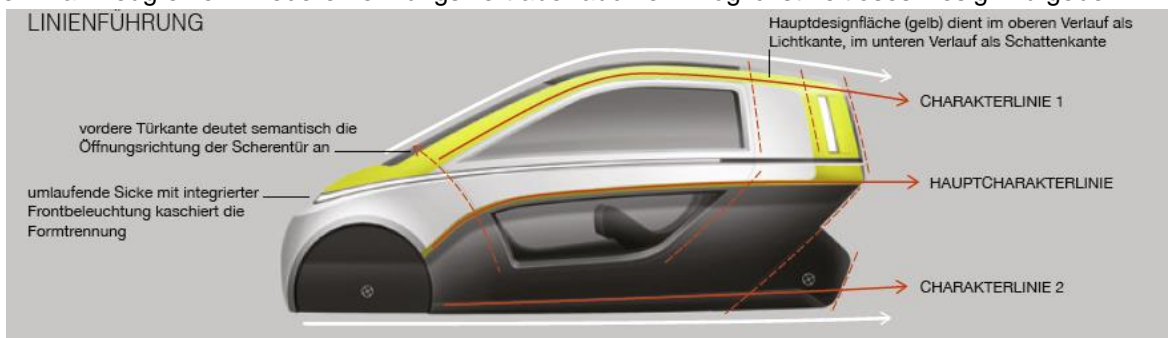


Abb. 14: Darstellung der Charakterlinien

Die sogenannten Charakterlinien wurden auf Basis der Fertigungserfahrungen beim 1:3 Modellbau so angepasst und verfeinert, dass gleichzeitig die Designanforderungen und die Fertigungs- und Montagebedingungen eingehalten werden konnten.

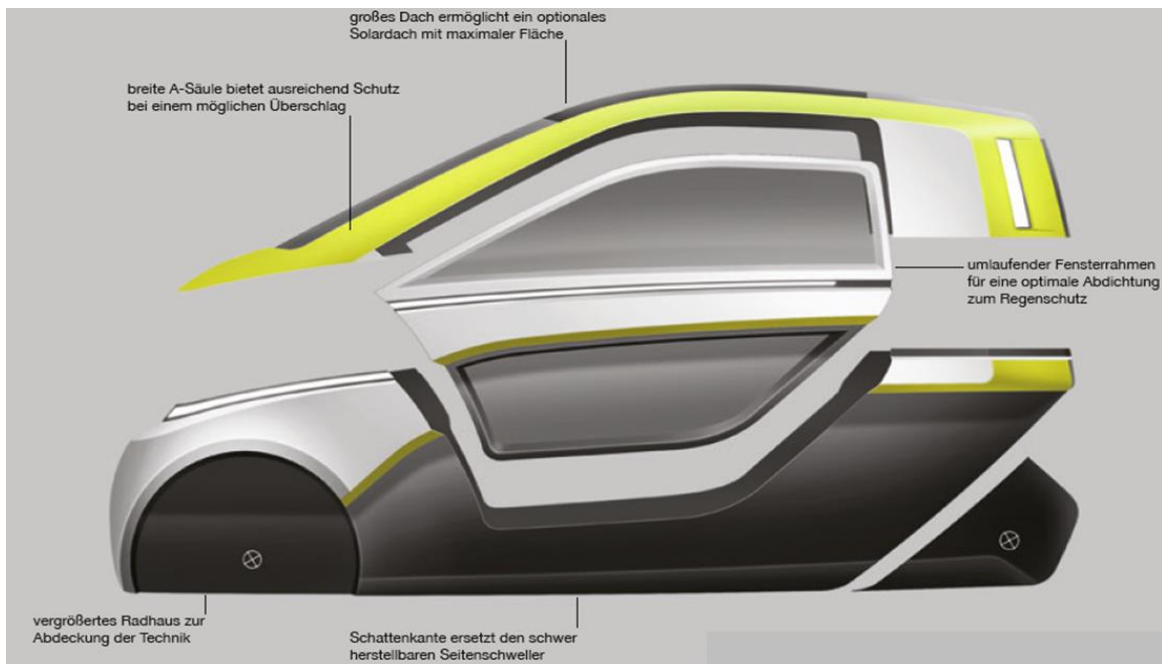


Abb. 15: Ausgestaltung des Monocoquekonzeptes



Abb. 16: Rendering des optimierten Gesamtfahrzeugdesigns inkl. Beleuchtung

Parallel zur Ausarbeitung des äußeren tragenden Monocoques wurde der Interieurbereich auf die ergonomischen und technischen Anforderungen hin ausgearbeitet. Hier galt es möglichst viel Bewegungsspielraum für die Bedienung der Pedalerie von Fahrer und Beifahrer darzustellen und alle Bedienelemente so zu platzieren, dass eine intuitive und sichere Bedienung für jedermann möglich ist.

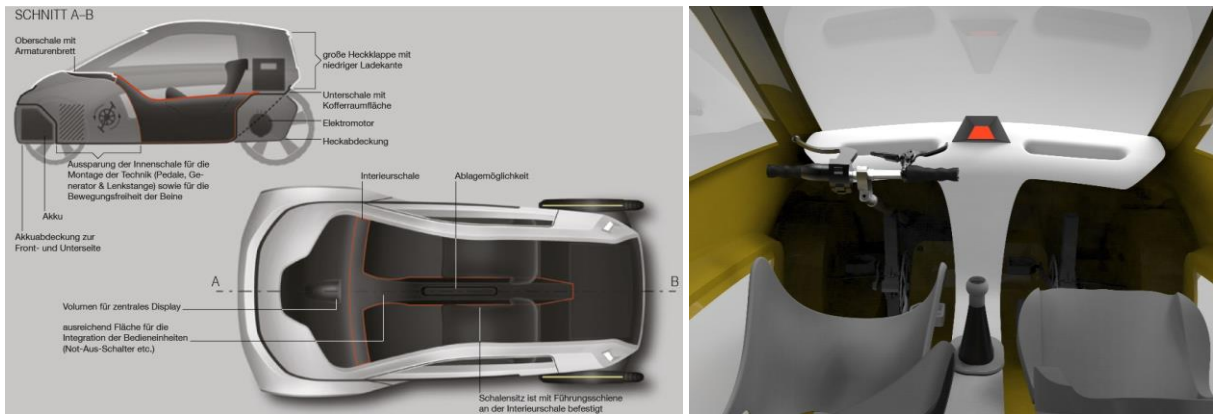


Abb. 17: Schnittabsichten zur Darstellung der Interieuraufteilung & der Sichtfeldanalyse

Im Rahmen der Überprüfung der Zielkosten für die Herstellung der tragenden Exterieur- und Interieurkomponenten musste eine Lösung zur Kosteneinsparung gefunden werden. Hierzu wurde die Idee weiterentwickelt, die verstellbaren Einzelsitze aus Phase 1 und die notwendige Monocoqueversteifungen längs über die Mittelkonsole und quer über Cockpit- und Bodenelemente in einem Bauteil zusammenzufassen. Diese Innenschale kann somit bis zu 20 Einzelbauteile ersetzen und wenn möglich so gestaltet werden, dass es im sehr preiswerten Vakuumtiefziehverfahren im Rahmen der Zielkosten hergestellt werden kann. Der sich dadurch ergebende Nachteil der fehlenden geometrischen Anpassung wird durch das Konzept „verstellbares Sitzkissen“ kompensiert. Dieses Sitzkissen wird entweder in fester Größe von S-XL, oder z.B. für Carsharing- Anwendungen mit einem „flexiblen Sitzsack“ angeboten. Die Umsetzung der Lösung befand sich bei Berichtserstellung noch in der Vorentwicklung. Um die Entwicklungen „vom Zeichenbrett“ in die Realität zu übertragen, wurden alle Anpassungen im CAD-Design umgesetzt, um für die Fertigung und Zulassung eine eindeutige Konstruktion für die Kommunikation der Fachbereiche bereitstellen zu können.

Folgend werden die grundlegenden Konstruktionsschritte gezeigt, um die Konstruktionsvorgehensweise darzustellen. Startpunkt bildete das Digitale Mock up aus Abb. 7, welches als Halbschalenmodell mit sogenannten Leitkurven (rote und schwarze Linien in der unteren Abb.) zur Steuerung der Designlinien ausgestattet wurde.

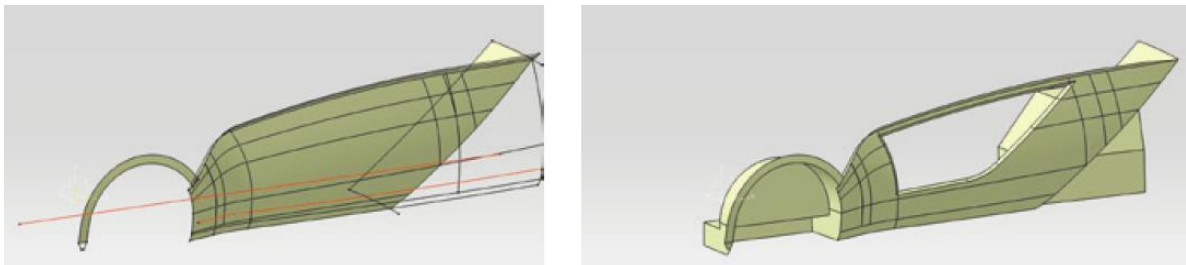


Abb. 18: Konstruktion der unteren Seitenelemente

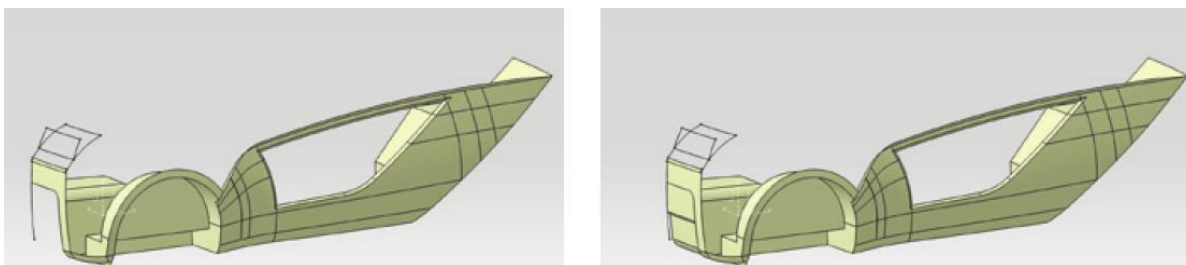


Abb. 19: Konstruktion der „Akku to go“-Aufnahme

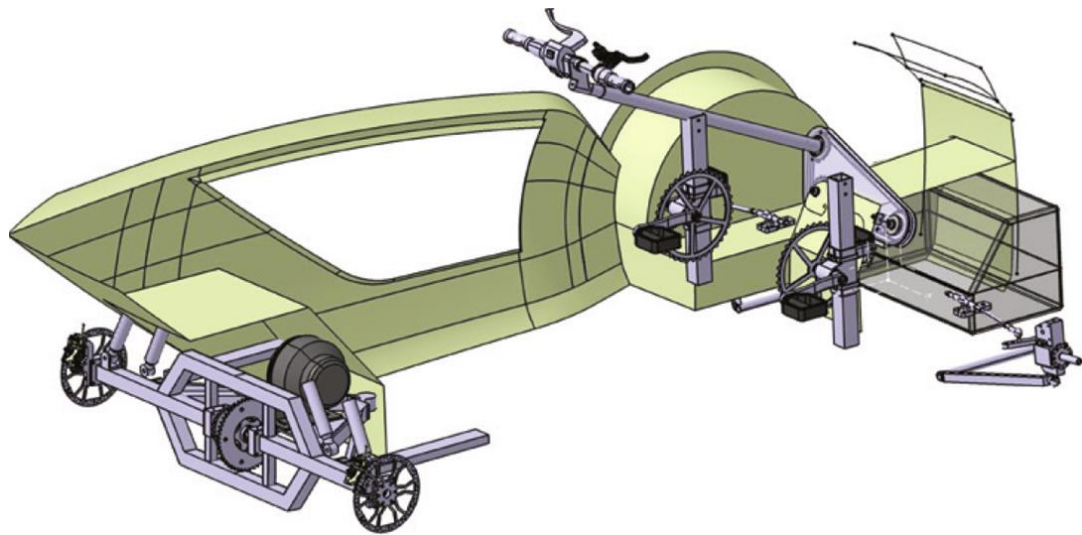


Abb. 20: Überprüfung der Flächenkonstruktion im Zusammenspiel mit allen Funktionselementen

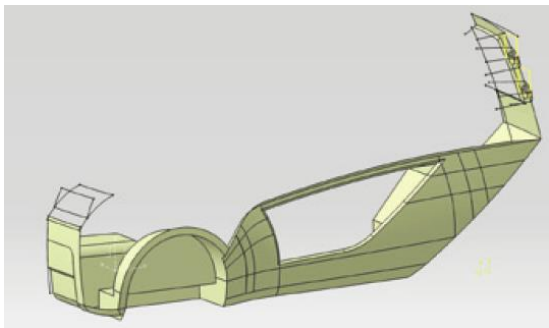


Abb. 21: Konstruktion der Heckpartie

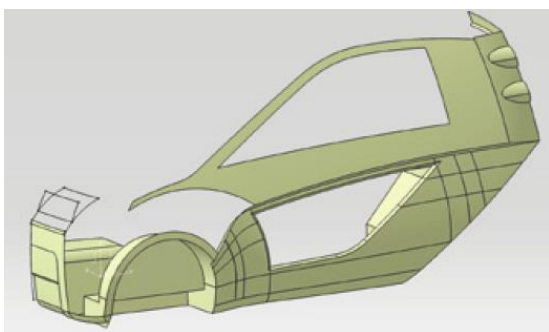
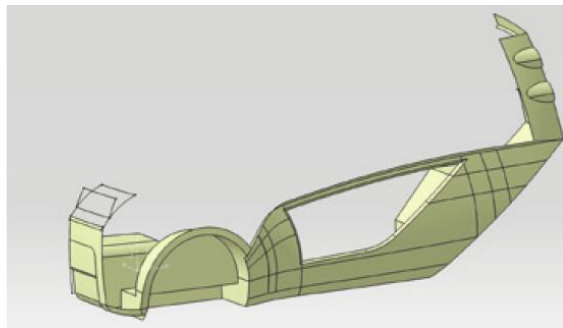


Abb. 22: Konstruktion des oberen Türelementes

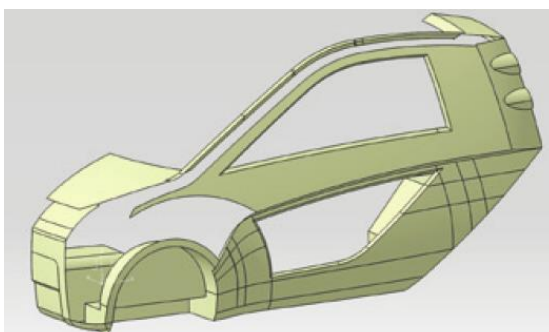
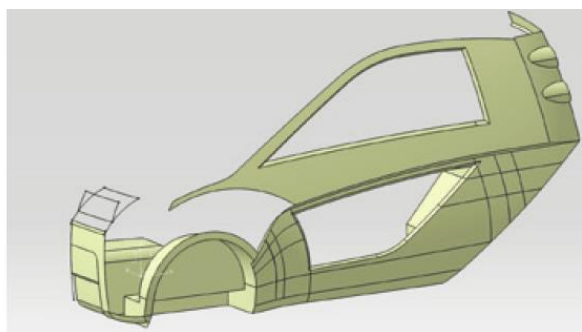
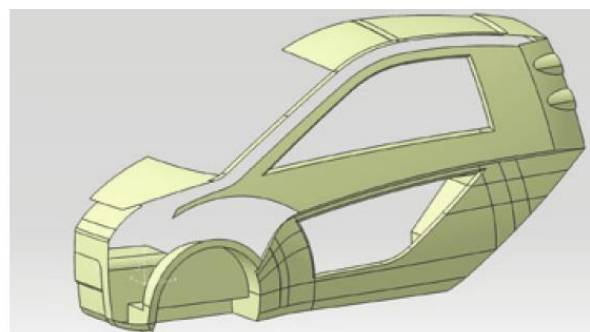


Abb. 23: Konstruktion Frontpartie und Übergangssituation Tür- und Heckpartie



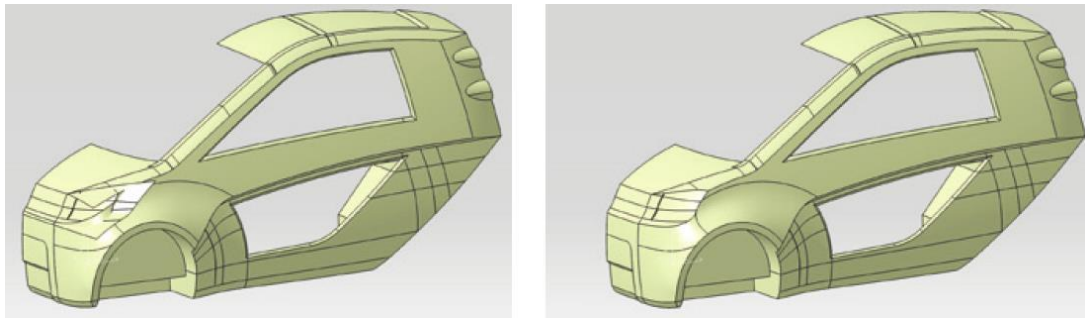


Abb. 24: Detaillierte Konstruktion der Beleuchtungsaufnahme, des Kotflügels und der A-Säule

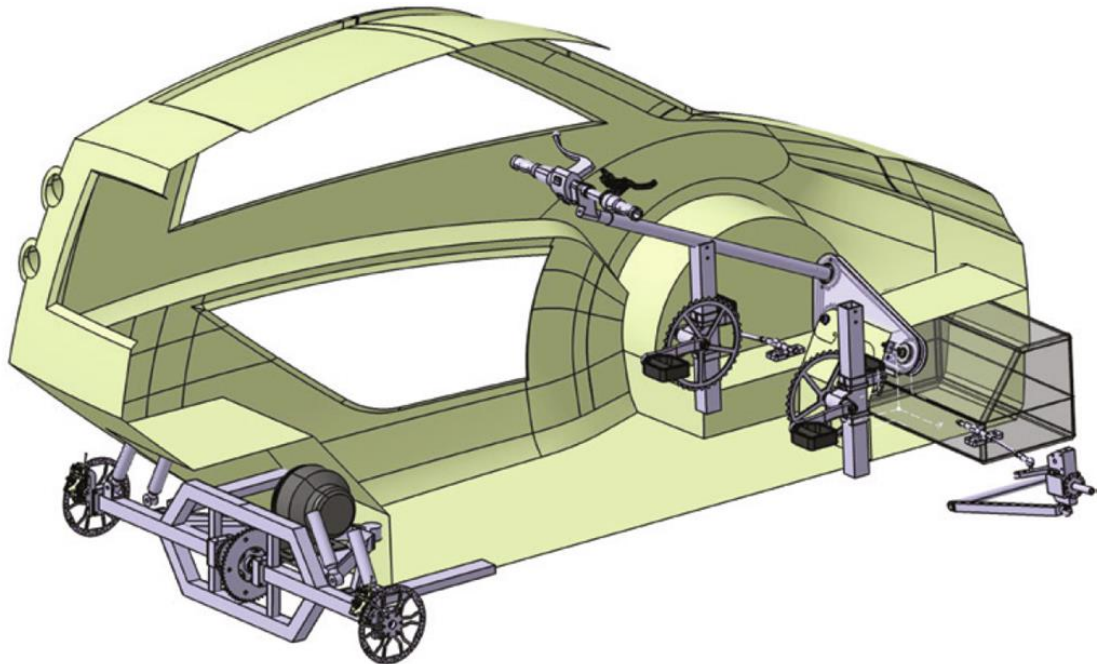


Abb. 25: Überprüfung der Flächenkonstruktion im Zusammenspiel mit allen Funktionselementen

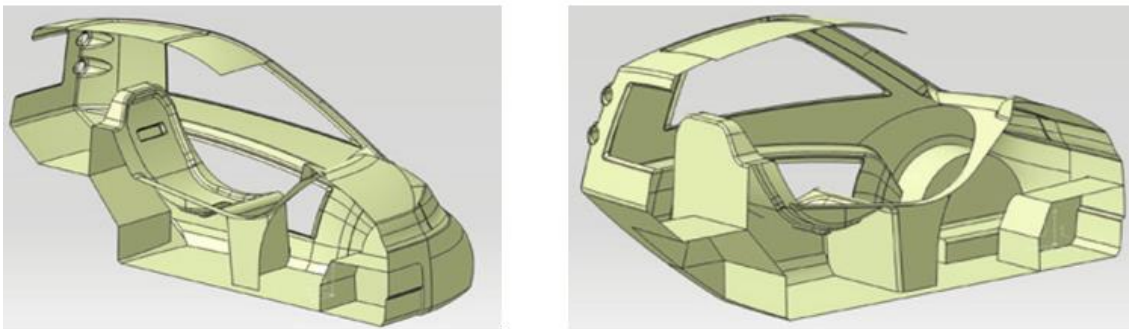


Abb. 26: Konstruktion der integrierenden Mittelschale

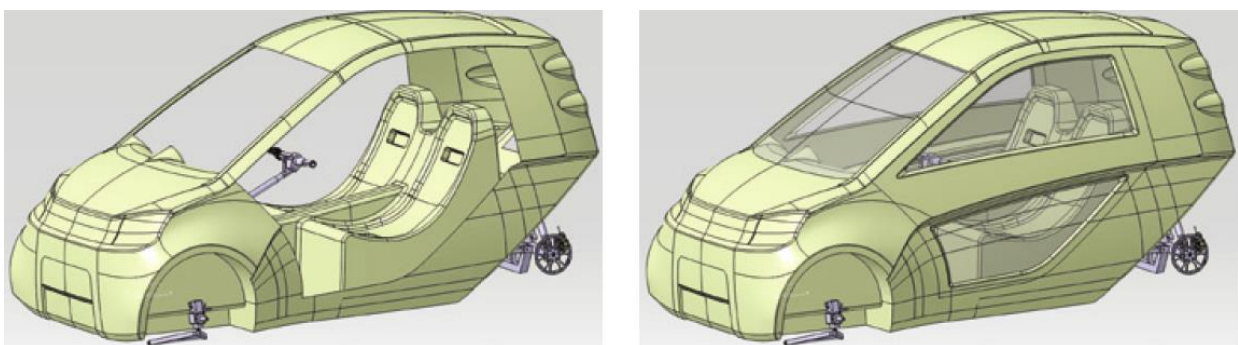


Abb. 27: Spiegeln und Vereinen der Halbschalenkonstruktion

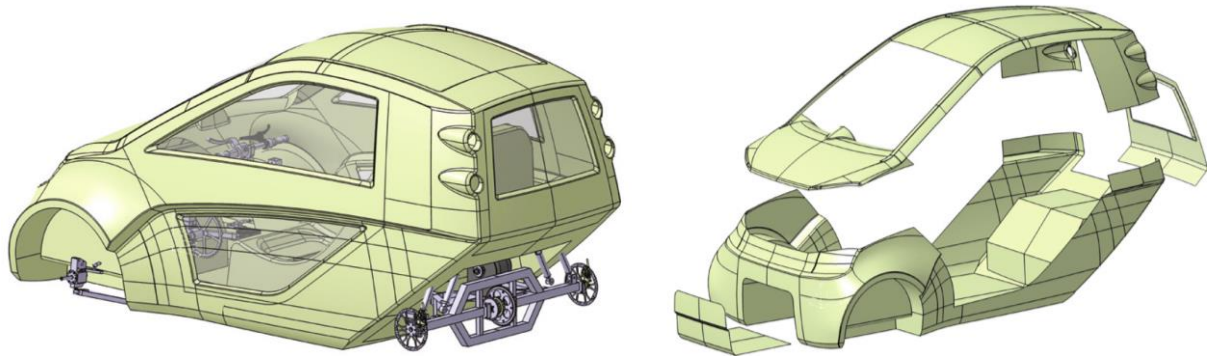


Abb. 28: Überprüfung des Zusammenbaus und der Montageschnittstellen im digitalen Mock-up

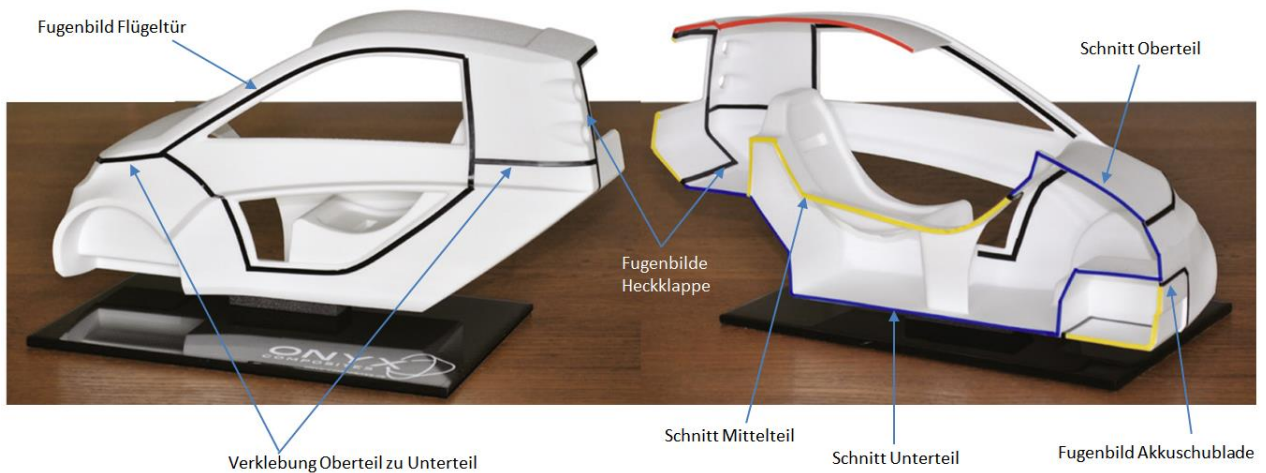


Abb. 29: Darstellung des Rapid-Prototyping-Modells im 1:5 Maßstab

Nach Abschluss des Konstruktionsprozesses und der Überprüfung des Zusammenbaus im digitalen Mock-up wurde ein sogenanntes Rapid-Prototyping-Modell hergestellt. Dieses generative Herstellungsverfahren (in diesem Fall das „Lasersintern“) ermöglicht es, „über Nacht“ ein maßstäbliches Modell herzustellen. Dieses konnte zur „begreifbaren“ Überprüfung der Bauteilgeometrie sowie deren Funktion und Aussehen herangezogen werden.

Die aus den Überprüfungen resultierenden Erkenntnisse fließen zusammen mit den Erfahrungen aus dem Prototypenbau aktuell in die letzte Optimierungsschleife in Richtung fertigungsgerechte und kostenoptimierte Konstruktion ein. Um die Verhältnismäßigkeit von Größe und Masse des selbsttragenden Monocoques aufzuzeigen, hat der verantwortliche Designer Felix Minta sich und das Bauteil im Maßstab dargestellt (siehe Abb. 30). Dieses Verhältnis gibt dem Betrachter die Möglichkeit zu erkennen, wie viel Raum und Masse zum herkömmlichen Klein-PKW durch das ONYX-Emobil-Konzept eingespart werden kann. Die in der Abbildung dargestellten Massenverhältnisse beziehen sich auf das sogenannte Modell „Preisschnapper“, welches als Basismodell in GFK-Bauweise zum Markteinstieg angeboten werden soll. Die Massenkalkulation basiert auf dem notwendigen Flächengewichten von ca. 4 kg/m² für eine ausreichende Bauteilsteifigkeit. Die Rechnung beinhaltet die Monocoquestruktur inkl. Türrahmen, Klappen und Scheiben aus „Makrolon“ (Zulassung für die Windschutzscheibe soll es bis 2016 geben). Das Fügen durch Kleben sowie die notwendigen Metallteile wie Scharniere wurden nicht berücksichtigt.



Abb. 30: Größen- und Massenverhältnisse auf Basis des Modells „Preisschnapper“

3.1.1.2 Klappen & Türen

Um das Fahrzeug gegenüber unbefugtem Zugriff zu schützen und die Allwettertauglichkeit zu gewährleisten, ist es notwendig das selbsttragende Monocoque mit entsprechend abschließbaren Türen und Klappen auszustatten. Die Einstiegstüren wurden im Rahmen der Weiterentwicklung ins Zentrum gestellt. Die folgenden Randparameter waren bei Entwicklung und Versuch entscheidend:

- Großzügiger und dadurch bequemer Einstieg
- Platzsparend bei der Parkplatznutzung
- Neuartiges Design, einfache Bedienung und sichtbare Technik

Somit wurde die sogenannte Scheren-Türen-Bauweise aus „Phase 1“ weiter verfeinert und im Rahmen der Optimierung des AGT's im 1:1 Maßstab aufgebaut und getestet.



Abb. 31: Geometrie- und Funktionsmodell der Lamborghini-Tür

Je nach Funktion und Einbaulage wurden möglichst preiswerte und leichte Scharniere und ggf. Dämpfer für die jeweiligen Klappen und Türen vorausgewählt. Hier war es möglich durch die Leichtbauweise auf Standardelemente aus den Bereichen Möbelbau, Camping und sonstige Freizeitartikel zurückzugreifen. Bei der Suche nach einem Standardteil für das Scherentür-Scharnier konnte in Bezug auf Kosten und Leichtbauanforderungen nicht das richtige Produkt gefunden werden. Alle verfügbaren Lösungen sind auf wesentlich größere und schwere Türen ausgelegt (ca. Faktor 6-10). Somit wurde entschieden nur das Prinzip zu übernehmen und Material, Geometrie und Kinematik anzupassen, um eine adäquate Lösung entwickeln zu können. Aktuell befindet sich das erste Muster im Test und soll nach einigen konstruktiven Optimierungen in einer Mischung aus GFK-und Alubauweise über günstige zweidimensionale Wasserstrahlzuschnitte hergestellt werden.

3.1.1.3 Regenschutz und Scheiben

Wie in Phase 1 geschildert, soll es zum kostengünstigen Einstieg grundsätzlich eine Einstiegsvariante ohne Windschutzscheibe und Türen geben. Diese Variante bietet mit einer zeltähnlichen „Persinning“ aus flexiblen Stäben und wasserfesten Stoff, welche die Körper der beiden Passagiere vom Cockpit bis zur Brust bedecken, naturnahen und günstigen Fahrspaß. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass bei Regen und Wind grundsätzlich eine Regen- und Windfeste Oberbekleidung getragen wird. Die Lenkung wird nach dem Aufspannen der Persinning ebenfalls abgedeckt.

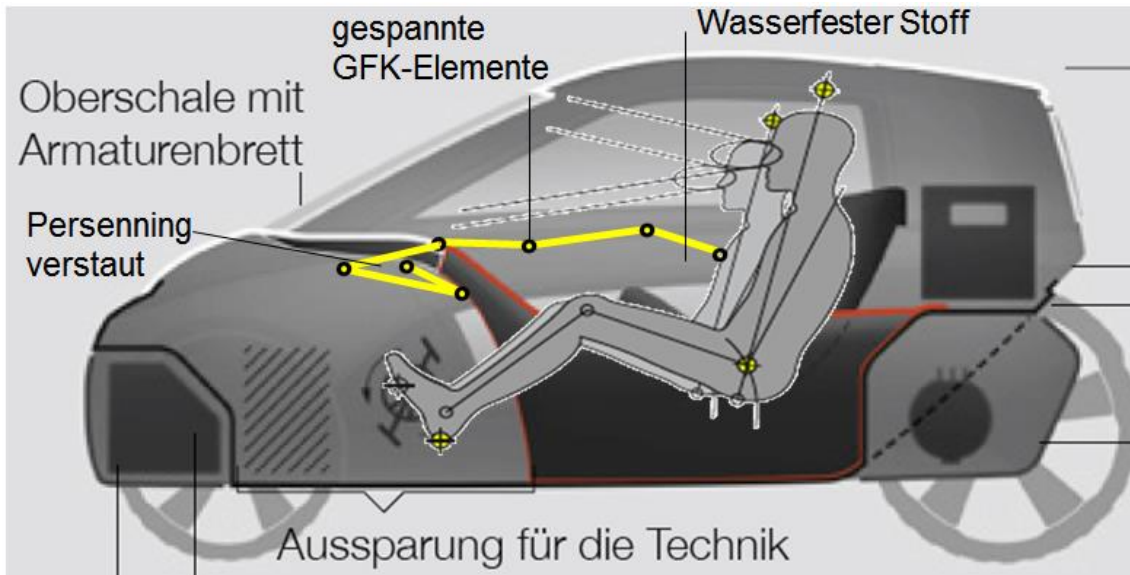


Abb. 32: Darstellung der einfaltbaren „Persinning“

Aus zeitlichen Gründen konnte der Entwurf konstruktiv nicht umgesetzt werden, erste Versuche mit Handmodellen auf Basis einer umgebauten „Wurzelzeltkonstruktion“ sind aber vielversprechend verlaufen.

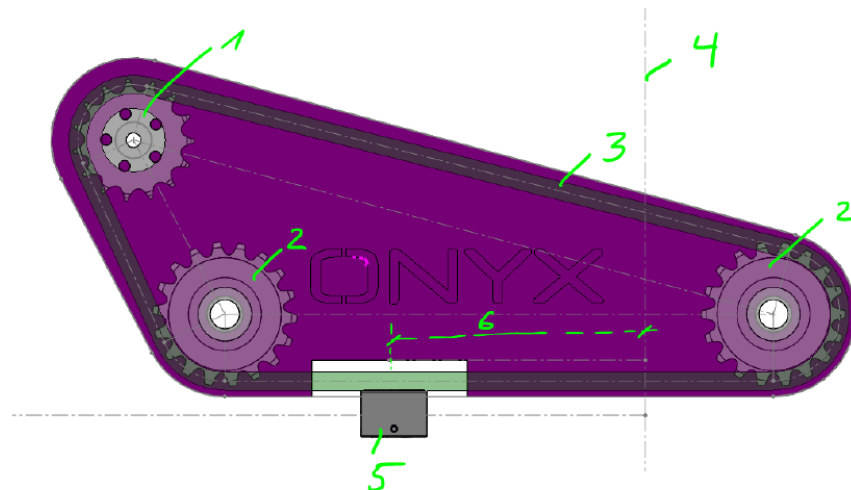
Je nach Wunsch kann aber das komplette Mirkomobil mit Türen und Scheiben ausgestattet werden. Zum aktuellen Zeitpunkt ist Kunststoff als Werkstoff für die Windschutzscheibe noch nicht zugelassen. Es wird aber aktuell davon ausgegangen, dass zur Markteinführung in 2017 der enorm kratzeste Plattenkunststoff Makrolon (Polycarbonat) im Rahmen der Leichtbauklasse zulassungsfähig ist. Somit kann bei einer Dichte von ca. $1,2 \text{ kg/dm}^3$ und Materialstärken von $2,5 - 4 \text{ mm}$ das komplette Fahrzeug mit einer resultierenden Masse von ca. 10 kg „verglast“ werden.

3.1.1.4 Fahrwerk & Lenkung

Im Rahmen der ersten Testfahrten in Phase 1 wurden erhebliche Mängel speziell bei der Lenkung festgestellt. Es galt die Fehler ausfindig zu machen und für Abhilfe zu sorgen. Es wurde herausgefunden, dass Kombination aus Fahrwerks- und Lenkungsteilen aus dem Velomobil- und Automobilbereich in „Phase 1“ die Anforderungen aufgrund der fehlenden Schnittstellentauglichkeit (z.B. Lenkgetriebe zu Lenkgestänge), nicht erfüllen können.

Es wurde entschieden grundsätzlich weiter auf günstige Standardteile aus dem Fahrradbereich zu setzen, aber eine auf unsere Anforderungen zugeschnittene Lösung zu entwickeln. Um die besondere Anforderung zu erfüllen, bei nur 25° Lenkeinschlag des umgebauten Fahrradlenkers den max. Lenkeinschlag und einen Wendekreis unter $8,5 \text{ m}$ zu erzielen, wurde auf eine Kettentrieblösung mit variabler Übersetzung zurückgegriffen.

Im Prinzip soll eine Kette die Drehbewegung in eine Linearbewegung übertragen. Die Kette wiederum ist auf einen Schlitten geschraubt, der auf einer Linearführung läuft, um ein Verbiegen der Kette unter Last zu verhindern. Dieser Schlitten wird über eine Schubstange und zwei Kugelköpfe mit der Lenkstange verbunden.



- 1: Kettenrad (Mädler 10221500) welches an der Lenkstange Befestigt wird.
 - 2: Umlenkräder (Mädler 14000200)
 - 3: Kette 1/2 x 1/8" mit 54 Glieder
 - 4: Fahrzeugmitte
 - 5: Schlitten für Linearschiene
 - 6: Neutralabstand Schlittenmitte zu Fahrzeugmitte (140mm)
- Maße für den Kettenantrieb:

Abb. 33: Prinzip des Lenkungskettentriebes

Grundsätzliche Überlegungen zur Berechnung der Geometrie & Kinematik:

- Die Mittlere Lenkstange muss einen Hub von +/- 20.5mm nach rechts und links erreichen
- Die Ausgleichsbewegung nach vorne und hinten beträgt +/- 7.1mm
- Durch die außermittige Aufhängung der Schubstange an den beiden Lenkwippen, beschreibt die Lenkstange zusätzlich einen Winkel bei max. Hub in eine Richtung von ca. 0.5° und läuft nicht parallel zur Querachse
- Das erschwert die mechanische Kopplung zwischen dem Schlitten und der mittleren Lenkstange.

Grundsätzliche Lösungsansätze:

- Der Schlitten wird zwangsweise über die Linearschiene geführt und erlaubt maximal eine Pendelbewegung. Wenn die Lenkstange über die Kugelköpfe verbunden wird, darf der Schlitten keine Pendelbewegung zulassen, da sich ansonsten die Kette verdrehen könnte.
- Wichtig ist, dass die Wirklinien von Kettenanbindung, Kugelkopfschubstange und mittlerer Lenkstange alle in einer Ebene liegen, um möglichst nicht noch ein zusätzliches Drehmoment einzubringen. (vgl. Abbildung unten "Seitenansicht")
- Die Zwischenstange mit Kugelkopf sollte horizontal und parallel zur Kette sowie der mittleren Lenkstange liegen. (vgl. Abbildung unten "Ansicht von Vorne")
- Die Kugelköpfe sollten mit Schrauben befestigt werden, nicht mit einschraubbaren Gewindebolzen. (Dauerfestigkeit)
- Der Schlitten benötigt einen Lenkansschlag. Vorzugsweise auf der Schiene einen elastischen Endanschlag vorsehen.
- Der Anschraubpunkt der Zwischenstange muss exakt in der Mitte der Lenkstange erfolgen

Über das Koppeln der Lenkstange mit dem Schlitten über die Zwischenstange entsteht bei dem Lenkausschlag durch die +/-7mm Vor-/Zurückbewegung der mittleren Lenkstange ein Winkel (delta) zwischen dem Schlitten und der Lenkstange. Der Winkel ergibt sich zu max. 2.9° zwischen mittlerer Lenkstange und Zwischenstange. Das führt bei Vollausschlag zu einer Verkürzung von 0.2mm im Axialschub und ist zu vernachlässigen.

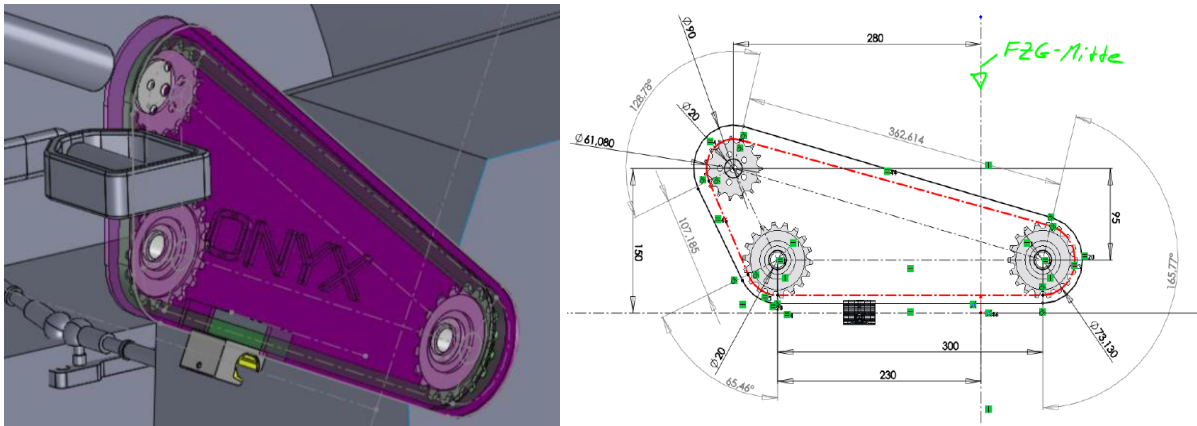


Abb. 34: Einbauposition im Fahrzeug, links: CAD, rechts: 2D Zeichnungsableitung

Parallel zur Optimierung der Lenkung wurde auch der Radträger vorne optimiert, so dass die Funktion verbessert sowie Herstellung, Montage und Wartung erleichtert werden konnten. In Kombination mit preiswerten Federdämpferelementen aus dem Moped- und Rollerbereich wurde somit im Rahmen der Entwicklungsphase eine preislich und technisch funktionierende Fahrwerks- und Lenkungslösung „vorne“ ausgearbeitet und getestet.

Das Konzept Hinterachse konnte aus Phase 1 übernommen werden, wobei für das Einstiegsmodell eine preiswerte Standardhinterachse mit integriertem Antrieb aus dem Rikscha-Bereich ausgewählt wurde. Zu dieser Lösung wird unter Antrieb weiter eingegangen.

Im Rahmen der Fahrwerks- und Antriebsoptimierungen war es in Phase 2 möglich das Fahrzeug im Geschwindigkeitsbereich über 40 km/h zu erproben. Bei Kurvenfahrten mit hohem Tempo und weiteren Erschwernissen wie Schlaglöcher oder provozierten Bremsen wurden die Aluminiumfelgen in Kombination mit den 45 km/h Fahrradreifen in Ihrem Grenzbereich belastet. Aufgrund der hohen Querkräfte für die Fahrradfelgen kam es mehrfach zum Versagen der Naben- und Felgenbettanbindung. Die Reifen wiesen einen relativ hohen Verschleiß auf, versagten aber nicht wie befürchtet indem sie auch beim „Driften“ im Felgenbett blieben.

Um den Problemen zu entgegnen und gleichzeitig mit minimaler Masse ausreichend sichere Räder zu vertretbaren Kosten bieten zu können, wurde entschieden die Fahrradbereifung beizubehalten und eine Querkraftoptimierte, geschlossenen Compositfelge zu entwickeln.

Diese Felge soll vordergründig die hohen Belastungen bei minimaler Masse (Ziel Hinterradfelge: < 2,3 kg vs. Smart-Stahlfelge mit ca. 6,5 kg) aushalten, aber auch einen neuen Designweg ebnen (geschlossenen und farbvariantenreich). Von der geschlossenen Geometrie profitiert auch die Aerodynamik, was sich bei höheren Geschwindigkeiten in Kombination mit der weitestgehend geschlossenen Seitenfläche in Verbrauchseinsparungen zeigen soll.

FELGENGESTALTUNG

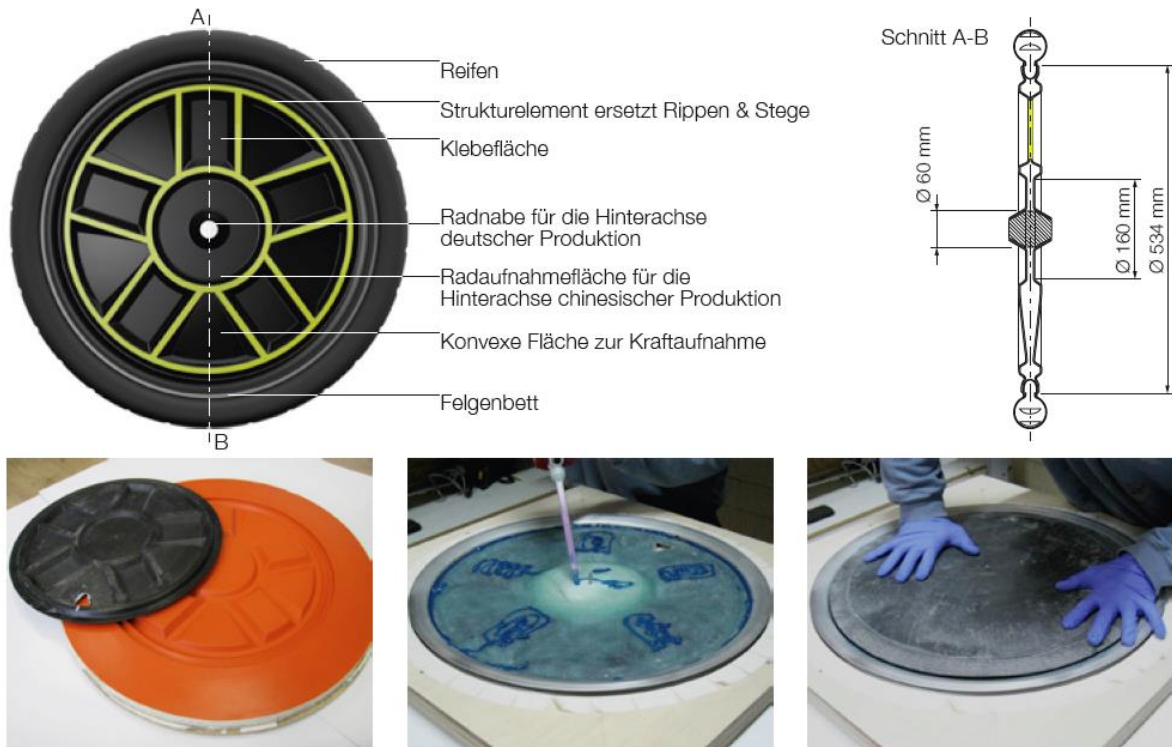


Abb. 35: Felhengestaltung und Fertigung der Composite-Hinterradfelge

Das Gewicht- und Kostenziel wird über die Herstellung von dünnen GFK-Aussenschalen im SMC-Verfahren und einem anschließendem Kleb- und Schäumprozess erreicht. Die in der oberen Zeichnung dargestellten konvexen Flächen bieten durch das Ausschäumen eine spezifisch hohe Steifigkeit durch die Sandwichbauweise. An den Klebeflächen entstehen monolithische Bereiche die für ausreichende Festigkeit, speziell im Bereich der Verschraubung sorgen. In der ersten Entwicklungsstufe werden die Prototypen noch aufgrund der relativ geringen Werkzeugkosten im Handlaminierverfahren hergestellt. Bei der Serienfertigung von > 200 Einheiten wird sich die Umstellung auf beheizte SMC-Werkzeuge wirtschaftlich lohnen und auch beim Thema Leichtbau durch verbesserte Faservolumen-gehalte Vorteile bringen.

3.1.2 Simulation und Ökobilanzierung

Um das technische Verhalten und das Fahrgefühl der Insassen vor der hochpreisigen Herstellung des Gesamtfahrzeugprototypen mit Monocoquestruktur optimal verstehen zu können, wurden neben den Tests am AGT auch Simulationen auf Basis der CAD-Daten durchgeführt. Diese Simulationen ermöglichen es in der virtuellen Welt Fehler aufzudecken und zu korrigieren.

3.1.2.1 Simulation Monocoque

Bei der Simulation des Monocoques steht die FE-Analyse zur Abschätzung des Verformungs- und Versagensverhaltens im Vordergrund. Mittels der lastgerechten Belegung der Faserverbundwerkstoffe in Kombination mit der Entwicklung einer lastgerechten Geometrie und Bauweise sowie der Materialkennwertvariation (Steifigkeit, Festigkeit sowie die Dichte können bei Compositewerkstoffen eingestellt werden) ist es möglich, nur so viel Masse wie nötig zu verbauen.

Jedoch benötigt man für belastbare Ergebnisse optimale CAD-Modelle, um anschließend mit einer feinen Elementvernetzung rechnen zu können. Da das Flächendesign wie zu Beginn beschrieben, aufgrund fehlender Erfahrung, nicht optimal konstruiert wurde, konnten noch keine vollständigen FE-Modelle aufgebaut und gerechnet werden.

Um erste Anhaltspunkte zum notwendigen Materialaufbau zu erhalten, wurden entscheidende Teilbereiche (z.B. Türbalken mit integriertem Seitenaufprallschutz) ausgewählt und belastungsspezifisch berechnet und ausgewertet. Hierzu wurden die Faserverbundspezifische CAE-Software-Lösungen „CATIA“ & „SIMULIA“ genutzt.

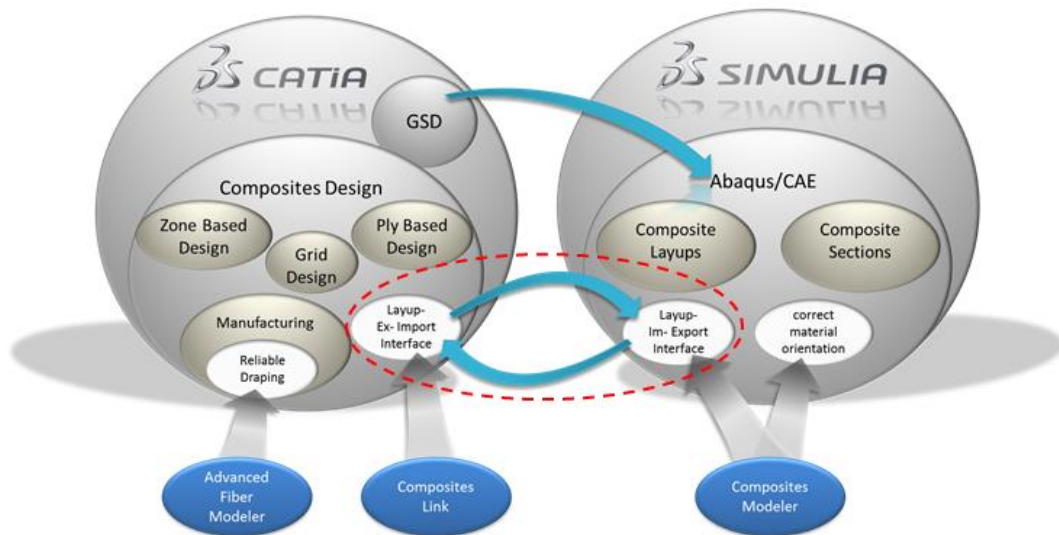
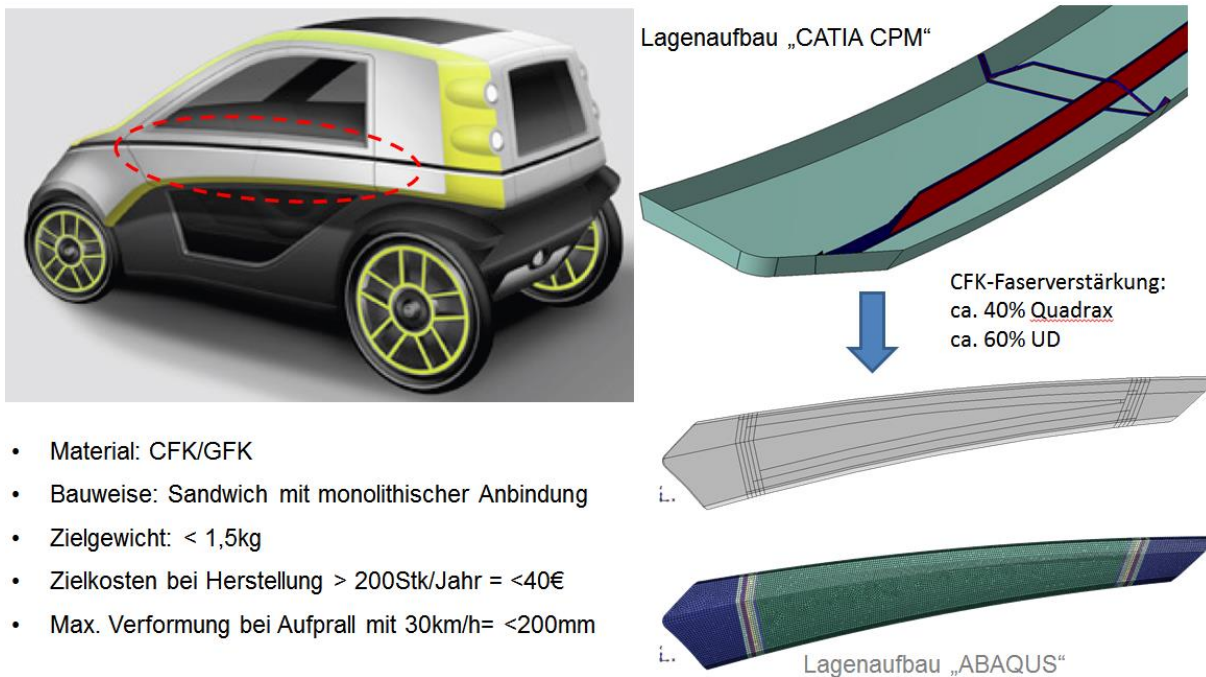


Abb. 36: Darstellung der Konstruktions- und Simulationssoftwarebausteine „CATIA“ & „SIMULIA“

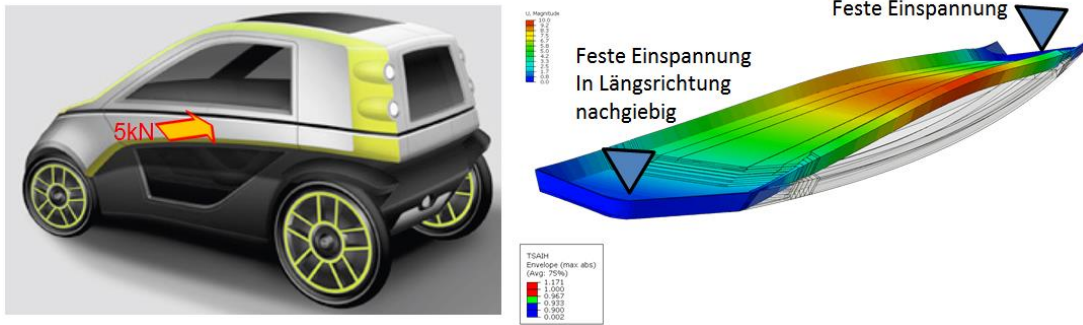
Am Beispiel des vereinfachten Türbalkens soll dargestellt werden wie die Entwicklungskette auf Basis von der Geometrie- und Materialkonstruktion in der CATIA-Softwareumgebung („GSD“ & „Composite Design“) in die Softwareumgebung „SIMULIA“ zur FE-Berechnung der Compositebauteile funktioniert.



- Material: CFK/GFK
- Bauweise: Sandwich mit monolithischer Anbindung
- Zielgewicht: < 1,5kg
- Zielkosten bei Herstellung > 200Stk/Jahr = <40€
- Max. Verformung bei Aufprall mit 30km/h= <200mm

Abb. 37: Composite-Türbalken Geometrischer Aufbau in CATIA und „vernetzt“ in SIMULIA/Abaqus

Es wurden für die Auslegung und Optimierung des Türbalkens 2 Simulationsmodelle aufgebaut: Das statische Modell bezieht sich auf die Annahme, dass die komplette Fahrzeugmasse inkl. der Insassen sich zentral auf dem Türbalken abstützt (z. B. Überschlag mit Punktlast auf einer Kante). Es soll eine Aussage über die Verformung und die Festigkeit des Aufbaus unter dem Gewichtsziel getroffen werden.



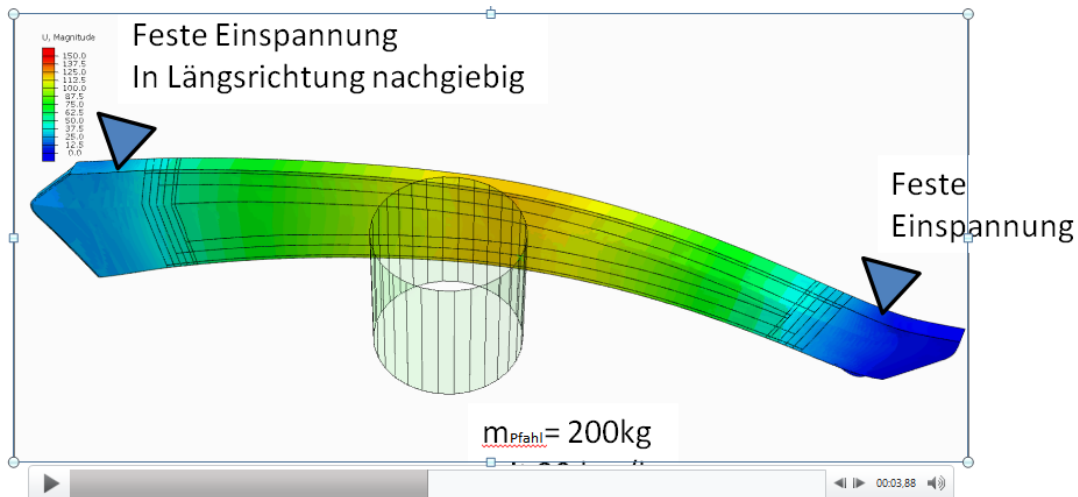
Ergebnis:

- 500kg können problemlos statisch getragen werden
- Durchbiegung bei etwa ca. 10 mm
- Spannungen in allen Richtungen unkritisch
- kein Versagen nach TSAI-HILL
- Masse ca. 3kg

→ Anpassung Geometrie & Reduzierung von Verstärkungslagen!

Abb. 38: Ergebnisdarstellung statischer Test „500 kg mittig“

Beim dynamischen Test wird ein ideal steifer Pfahl mit 200 kg Masse beschleunigt und kollidiert mit dem Fahrzeug (Seitencrash). Hier soll eine Aussage über die max. Eindringtiefe getroffen werden, um sicherzustellen, dass nur ein begrenztes Verletzungsrisiko besteht. Laut der L6e-Typgenehmigung ist diese Art von Nachweis nicht zu erbringen. Da wir uns aber im direkten Wettbewerb mit Kleinwagen befinden, soll nachgewiesen werden, dass zumindest beim urbanen Einsatz bis zu ca. 40 km/h ausreichender Schutz für Zusammenstöße dargestellt werden kann (z.B. beim Abkommen auf glatter Fahrbahn und Aufprall auf eine Straßenlaterne, der Crash mit einem SUV braucht nicht simuliert werden, da dieser ebenso fatal verlaufen wird wie z.B. beim 3 mal so schweren Twizzy).



Simulationsergebnis Pfahltest „Crash bei 30 km/h“

- Versagen nach TSAI-HILL fast überall festzustellen
- keine Aussage über die Resttragfähigkeit#
- Verformung bis zur 150 mm

→ Wiederholung der Simulation nach Anpassung des Lagenaufbaus

Abb. 39: Darstellung der Ergebnisse des dynamischen Pfahltests

Die Darstellung der Ergebnisse stellt einen Zwischenstand in der Entwicklung dar. Nach Optimierung des Monocoque-Flächenmodells soll eine Rechnung des Gesamtaufbaus eine optimale Einschätzung des Bauteil- und Materialverhaltens ermöglichen, um „gezielt leicht“ fertigen zu können.

3.1.2.2 Ökobilanzierung

Um das Hauptziel der Umweltrelevanz in Bezug auf die Energie- und Ressourceneffizienz des ONYX-E-Mobilkonzeptes nachweisen zu können, war es notwendig eine transparente Basis zu schaffen. Hierzu wurde der Ansatz der Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 140140 und 14044 weiter verfolgt und im Rahmen der Detailkonstruktion verfeinert. Diese Methode gibt einen Überblick über die möglichen Umweltauswirkungen, die bei der Produktion und dem Gebrauch von Produkten entstehen, indem diese quantitativ erfasst werden. Sie kann helfen, Verbesserungen in Hinblick auf die Umwelteigenschaften aufzuzeigen und, im Marketing eingesetzt, den Kunden beim Kauf von Produkten in Richtung einer Entscheidung für die Umwelt und Nachhaltiges Handeln positiv beeinflussen.

3.1.2.2.1 Ökobilanzierung dreier verschiedener Monocoque-Materialien

Die Ökobilanz-Studie gliedert sich in vier Phasen:

1. Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen einschließlich Systemgrenzen: In der Systemgrenze sollten alle wesentlichen Prozessmodule des Produkts einbezogen werden. Dazu sollten u.a. die Gewinnung der Rohstoffe, Herstellungsschritte, Transporte, verwendete Energieträger, anfallender Abfall und die Außerbetriebsetzung zählen. Die Systemgrenze sollte möglichst über den gesamten Lebenszyklus gezogen werden, um ein Verschieben von Umweltauswirkungen aus dem System heraus zu vermeiden und so die Bilanz zu verfälschen.
2. Die Sachbilanz-Phase: In ihr werden alle Input- und Outputdaten der einzelnen Prozesse im System zusammengetragen und anschließend auf die funktionelle Einheit bezogen. (DIN EN ISO 14040:2006 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, 2006)
Die ausgewählten Daten können an den Produktionsstandorten gesammelt werden, anderen Quellen entnommen oder aus diesen errechnet werden. (DIN EN ISO 14044:2006 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, 2006)
3. Wirkungsabschätzung: In der Phase der Wirkungsabschätzung müssen verbindlich Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle ausgewählt, den Sachbilanzergebnissen zugeordnet (Klassifizierung) und Wirkungsindikatorwerte berechnet werden (Charakterisierung). Optional kann noch eine Normierung erfolgen, die den Wirkungsindikatorwert zu anderen Referenzwerten ins Verhältnis setzt sowie eine Ordnung und Gewichtung. (DIN EN ISO 14040:2006 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, 2006)
4. Auswertung der Ergebnisse: Hier sollten Ergebnisse geliefert werden, die mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen übereinstimmen und die zur Ableitung von Schlussfolgerungen, Erläuterung von Einschränkungen und zum Aussprechen von Empfehlungen dienen.

Um den Ansatz aus „Phase 1“ zur Ressourcen- und Energieeinsparung über der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Hanffasern) und besonderen Leichtbauwerkstoffen (z.B. CFK) bewerten zu können, wurde in der Ökobilanzierung der Lebensweg dreier Monocoque-Varianten des ONYX E-Mobils verglichen. Die Variation besteht aus verschiedenen Faserverbundwerkstoffen, die in den Produktmodellen „Basismodell: günstig“ aus Glasfaserverbund, „Sportmodell: leicht“ aus Kohlefaserverbund und „Ökomodell: nachhaltig“ aus Hanffaserverbund wiedergefunden werden. Die Systemgrenze umfasst den gesamten Lebenszyklus (cradle to grave) mit Herstellung, Nutzung und Entsorgung. Die benötigte Energie zur Herstellung der Verbundwerkstoffe wurde bereits von (Möckesch, 2014) in Phase 1 der Entwicklung untersucht. Weitere Stoffflüsse zur Herstellung und Instandhaltung der Maschinen sowie Emissionen wie Abwärme und mögliche entweichende chemische Stoffe werden nicht betrachtet.

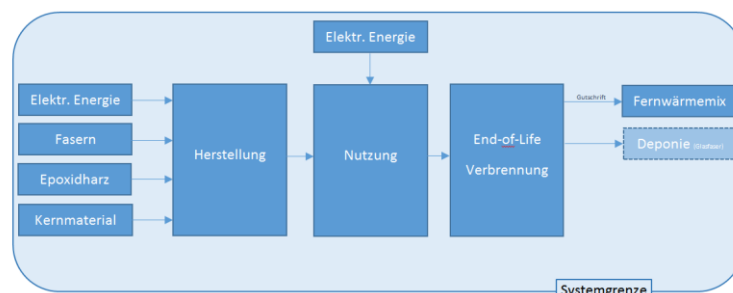


Abb. 40: Darstellung der Systemgrenze für die Bilanzierung der 3 Monocoque-Varianten

Die funktionelle Einheit wird auf je ein Monocoque festgelegt, welches variierende Massen besitzt, da je nach Fasertyp unterschiedliche Dichten, Steifigkeiten und Festigkeiten vorliegen aus denen spezifische Flächengewichte für das Gesamtbauteil entstehen. Die Flächengewichte beruhen in dieser Bilanzierung auf den ersten FEM-Berechnungsergebnissen sowie aus Erfahrungswerten beruhend auf Vorgängerprojekten wie z.B. dem „Wind Explorer“.

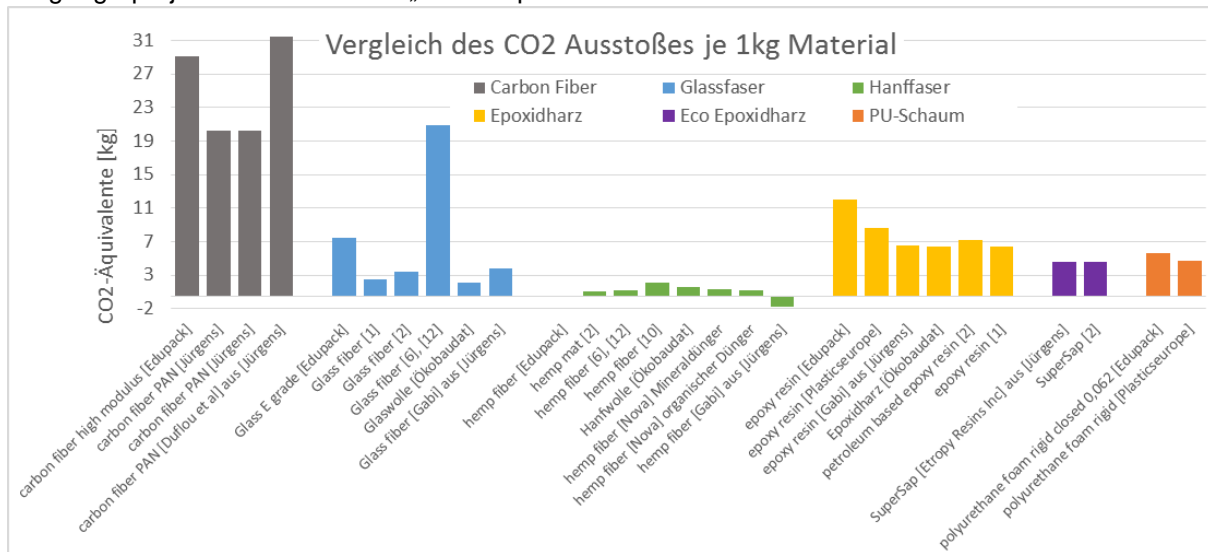


Abb. 41: Vergleich von Materialspezifischen CO₂-Äquivalenten auf Basis verschiedener Quellen

Als Bewertungsindikator für die Darstellung der Umweltrelevanz wurde vorläufig nur die Kategorie zum Treibhauspotential (Global Warming Potential → GWP) betrachtet, da diese auch im Automobilbereich als führende Kenngröße (CO₂) verwendet wird. Auf Basis der recherchierten Materialspezifischen CO₂-Äquivalente aus der Übersicht in Abb. 41 [4] und den ermittelten Werten in der Faserverbundwerkstoffproduktion [3] wurden über die kompletten Lebenszyklusphasen der 3 Monocoquevarianten Ökobilanzen erstellt.

In der Nutzungsphase wurden verschiedene Szenarien betrachtet. Zum einen wurde die Kilometerleistung des Fahrzeuges variiert (10.000 km und 100.000 km) und zum anderen der Unterschied untersucht, wenn der Akku des Fahrzeugs mit dem herkömmlichen deutschen Strommix aufgeladen wird oder einem Strommix aus erneuerbaren Energien, wie die Zusammensetzung in Deutschland laut dem Statistischen Bundesamt in 2014 war (Brutto Stromerzeugung, 2015). Dieser wird aus den Energiequellen Wind, Wasser, Biomasse, Photovoltaik und Hausmüllverbrennung gewonnen. Die Modellierung erfolgte in der Testversion der Software „Gabi“ durch eine neue Zusammensetzung des Strommixes mit den prozentualen Anteilen dieser Stromquellen aus erneuerbaren Energien. Da sich die Beschleunigungskraft proportional zur Masse ändert, wird auch beim Energieverbrauch ein proportionaler Zusammenhang zur Masse angenommen. Die dabei betrachtete Masse bezieht sich dabei nur auf das Monocoque, um einen Vergleich zu ermöglichen, indem von sonst gleichen Anbauteilen ausgegangen wird. Der Energieverbrauch wurde in Testfahrten mit dem aktuellen Aggregateträger ermittelt.

Die Entsorgung von Faserverbundwerkstoffen wird derzeit nur durch eine thermische Verwertung erfolgen. Ein stoffliches Recycling ist unter aktuellen technischen Gesichtspunkten für Großindustrielle Prozesse als (noch) nicht praktikabel anzusehen.

Die modellierte Lebensende-Phase nutzt die im „CES EduPack“ angegebenen Heizwerte und CO₂ Emissionen. Es bestände die Möglichkeit, einen Prozess zur elektrischen Energiegewinnung aus Abfall aus der Gabi-Datenbank zu benutzen. Allerdings würde hier ein durchschnittlicher CO₂-Ausstoß berechnet, der nicht auf die verschiedenen Materialien bezogen ist. Deshalb wurde hier ein eigener End-of-Life-Plan in Gabi erstellt, der den CO₂-Ausstoß des jeweiligen Faserverbundes und eine thermische Energiegutschrift beschreibt, entsprechend der Verbrennungsenergie laut EduPack Datenbank. Die thermische Energie aus der Verbrennung wird allerdings nicht zusätzlich zur Stromerzeugung eingesetzt, sondern als reine thermische Energie mit dem deutschen Fernwärmemix laut (Energiepreisentwicklung, 2015) verrechnet, da durch die Verbrennung des Monocoques im Entsorgungsfall andere Ressourcen wie z.B. Erdgas eingespart werden können. Diese Einsparung geht als Gutschrift mit in die Ökobilanz ein. Da Glasfaser keine thermische Verwertung zugeschrieben wird, wird in diesem Fall noch eine Entsorgung auf einer Deponie für die Fasern vorgesehen.

3.1.2.2.2 Ergebnisse und Fazit der vergleichenden Ökobilanz

Das Global Warming Potential (GWP) mit der Einheit Kilogramm CO₂-Äquivalente zeigt in allen Lebensphasen Unterschiede zwischen den Faserverbundarten. Beginnend mit der Basisvariante GFK entfällt auf die Herstellung insgesamt 447 kg CO₂-Äq., die Nutzung über 100.000km mit dem Standard Strommix 512 kg (auf das Monocoquegewicht entfallender Anteil) und für die Entsorgung 8 kg CO₂-Äq.. Die Nutzung von Ökostrom verringert die Emissionen der Nutzungsphase erheblich (53 kg CO₂-Äq.). Wenn das Emobil nur 10.000km zurücklegt, sind die Emissionen entsprechend um ein Zehntel niedriger (51 kg CO₂-Äq. im Strommix, 5 kg CO₂-Äq. im Ökostrommix) und die Herstellung nimmt größten Einfluss auf die Gesamtbilanz. In der Herstellung selber dominieren die Rohstoffe Harz (209 kg CO₂-Äq.) und Glasfaser (167 kg CO₂-Äq.), während der PU-Schaum (52 kg CO₂-Äq.) und die Fertigung (19 kg CO₂-Äq.) eher gering sind. Die Entsorgungsbilanz von GFK ist über alle Verbundmaterialien am besten, da die Glasfaser nicht verbrannt wird und somit keine CO₂-Emissionen entstehen, lediglich durch das Harz und das Kernmaterial. Die Lagerung der Fasern auf einer Mülldeponie wirken sich in der Wirkungskategorie GWP kaum aus.

In der Variante aus Hanffaser ergibt sich eine insgesamt geringere Treibhausgasproduktion. Die Herstellung liegt mit insgesamt 243 kg Produktion von CO₂-Äquivalente deutlich unter der von GFK. Dies liegt an der guten Klimabilanz der Hanffaser, die mit -4 kg der Atmosphäre zunächst CO₂ entnimmt. Durch das etwas geringere Gewicht des Hanfmonocoques muss auch etwas weniger Harz und Kernmaterial eingesetzt werden, was sich in der Abrechnung widerspiegelt (Harz 181 kg CO₂-Äq., PU-Schaum 46 kg). In der Nutzungsphase treten eben durch das geringere Gewicht auch geringere Emissionen auf (Strommix 100.000 km: 455 kg CO₂-Äq., Ökostrommix 100.000 km: 47 kg). In der Entsorgung liegt der Hanfverbund etwas höher als GFK, da im Gegensatz zur Glasfaser die Hanffaser verbrennt und CO₂ abgibt, das während des Wachstums aufgenommen wurde.

In der Herstellung des Kohlefaserverbundes nimmt die Kohlefaser den größten Anteil ein (515 kg CO₂-Äq., Harz 99 kg, Schaum 42 kg) und liegt damit allein noch über der gesamten Nutzungsphase. In der Herstellung ergibt sich durch die andere Fertigungsmethode durch Handlaminieren ein höherer Strombedarf und dadurch höhere Emissionen von 38 kg. In der Nutzungsphase schneidet das Kohlefaservermonocoque durch das geringste Gewicht am besten ab mit nur 331 kg CO₂-Äq. durch den Strommix bei 100.000 km bzw. 34 kg bei der Nutzung von Ökostrom. In der Entsorgung entstehen erneut hohe Abgaswerte durch die Verbrennung der Kohlefaser (26 kg).

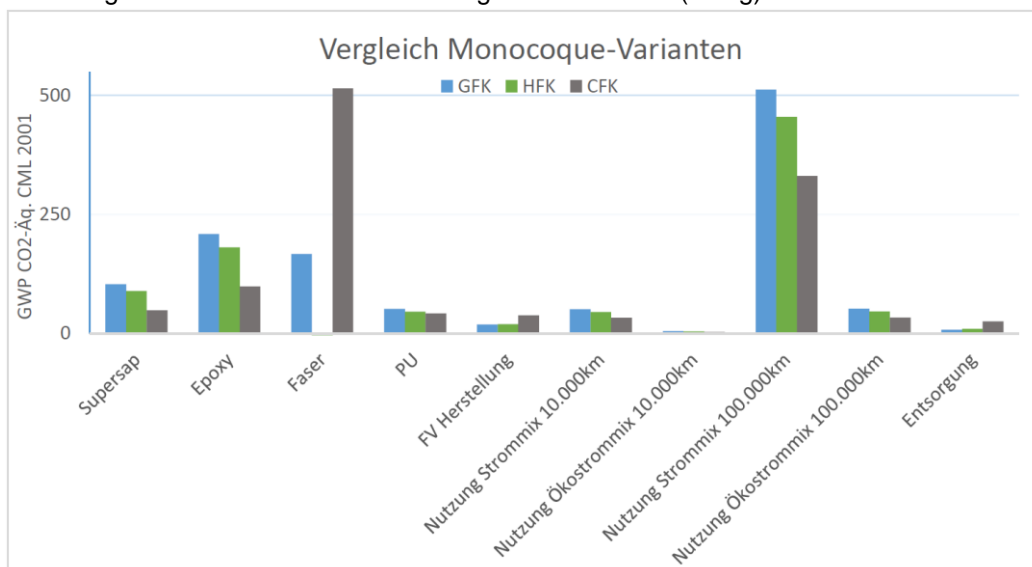


Abb. 42: Vergleich des Global Warmin (GWP) Potentials der untersuchten Monocoque-Varianten

Bei der Berechnung mit dem Standardstrommix und einer Laufleistung von 100.000km beläuft sich das gesamte Treibhausgaspotential bei GFK auf 967 kg, bei CFK auf 1051 kg und HFK auf 708 kg CO₂-Äq.. Das Glasfasermonocoque als Standard gesetzt, ergibt sich durch die Wahl der Hanffaservariante ein Vorteil von 27 %, während die CFK-Version 9 % höhere Emissionen verursacht.

Abbildung 43 zeigt die Anteile am GWP, wenn der Stromverbrauch der Nutzungsphase nicht nur auf das Monocoquegewicht sondern das Gesamtgewicht bezogen wird, wodurch sich natürlich ein höherer Stromverbrauch ergibt. In dieser Betrachtung entfallen nur 22 % auf die Herstellung, die Entsorgung entfällt quasi völlig und die Nutzungsphase nimmt 78 % ein. Wird allerdings Ökostrom als Energiequelle genutzt, ergibt sich wieder ein gänzlich anderes Bild: Die Herstellung trägt nun mit 73 % den

Hauptanteil und die Nutzungsphase hat nur 26% Einfluss (Abb. 44). Die Bilanz zur Herstellung der übrigen Fahrzeugkomponenten wie Achsen, Reifen, Motor etc. sind hier nicht enthalten!

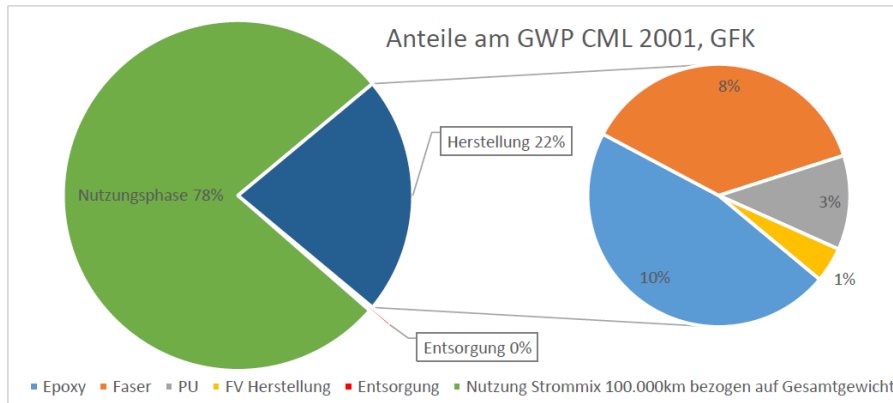


Abb. 43: Anteile am GWP (GFK-Monocoquevariante) Strommix

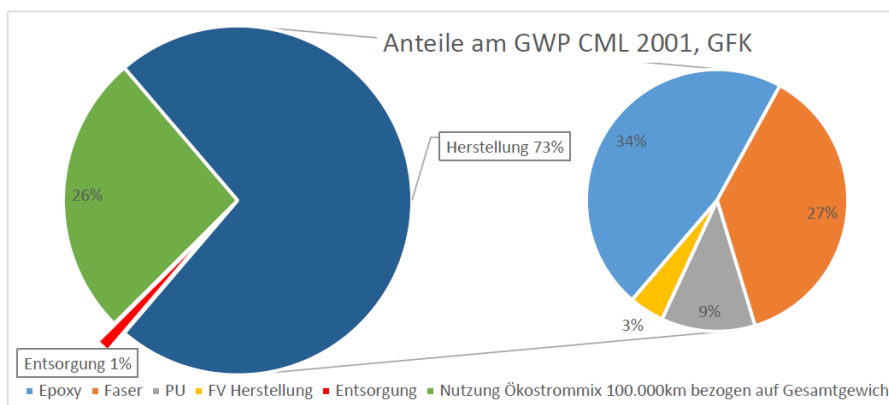


Abb. 44: Anteile am GWP (GFK-Monocoquevariante) Ökostrommix

Eine weitere entscheidende Frage bei der Auswertung war, ab welcher Laufleistung das Kohlefaser-monocoque seine Gewichtsvorteile in der Nutzungsphase gegenüber den beiden übrigen Varianten ausspielen kann. Zu Beginn im Diagramm Abbildung 45 zeigt sich das erwartete Bild: Durch Herstellung und Entsorgung hat das CFK-Monocoque die höchsten Werte, gefolgt von GFK und HFK. In der Gesamtrechnung ergibt sich erst ab 146.300 km ein Vorteil der Kohlefaser gegenüber der Glasfaser. Und erst ab 376.700 km kann die Kohlefaser die Nachteile in Herstellung und Entsorgung gegenüber der Hanffaser egalalisieren. Dabei sollte beachtet werden, dass die Laufzeit des Akkus bei weitem nicht auf solch eine Nutzungsdauer ausgelegt ist. Bei einer Reichweite von 25 km pro Akkuladung, optimaler Nutzung und einer Lebensdauer von optimistischen 5000 Ladezyklen ergibt sich eine rechnerische Höchstlebensdauer von 125.000 km. Danach muss der Akku ausgetauscht werden. Das emissionsärmste Betreiben des E-Mobils durch Kohlefaser liegt also weit außerhalb der angenommenen Distanz, die das Fahrzeug zurücklegen wird (hier mit 100.000 km gerechnet), und die etwa mit einem Akku zu erreichen ist.

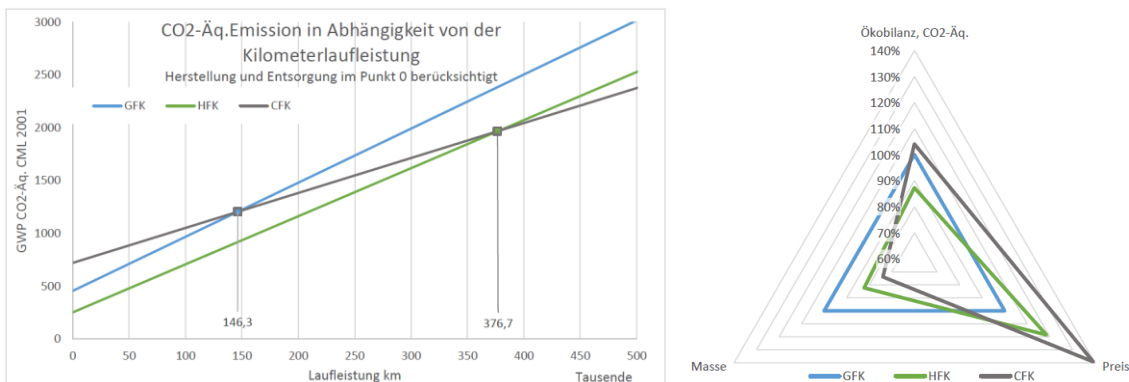


Abb. 45: li. CO₂ GWP in Abhängigkeit der km-Leistung ; re. Spannungsdreieck: Preise, Masse & GWP

Fazit zur Untersuchung der Monocoque-Varianten in Bezug auf die Umweltrelevanz:

Es konnte festgestellt werden, dass das Hanffasermonocoque als ökologisch sinnvollste Variante, bezogen auf das Treibhausgaspotential, anzusehen ist. Das Kohlefasermonocoque hat zwar in der Nutzungsphase die geringsten Emissionen, doch ist die Produktion im Vergleich zu den beiden anderen Faserverbundstoffen am umweltschädlichsten. Den Vorteil in der Nutzungsphase kann es gegenüber dem Glasfaserkonzept erst nach etwa 150.000 km und gegenüber der Hanffaservariante erst nach etwa 375.000 km gut machen. Da eine Laufleistung von 100.000 km angenommen wird, fällt das Einsparen des Stroms durch das geringere Gewicht der CFK-Version nicht ausreichend ins Gewicht. Eine entscheidende Erkenntnis ist der Einfluss des Strommixes auf die Gesamtbilanz. Der deutsche Ökostrommix emittiert nur etwa ein Zehntel der CO₂-Äquivalente des allgemeinen deutschen Strommixes. So hat der Strommix in der Fahrzeugvariante aus GFK einen Anteil von 78 % an den gesamten Emissionen. Durch den Einsatz des Ökostrommixes fällt dieser Anteil auf 26 % und die Herstellung dominiert das Treibhausgaspotential. Während der Produktion der Hanffaser fallen nur wenige Emissionen an, allerdings sind im Faserverbund noch Epoxidharz und ein Kernmaterial aus PU-Schaum enthalten, die im HFK den Großteil der Treibhausemissionen stellen. Durch den Einsatz eines biobasierten Harzes und ein Kernmaterial aus Kork oder Papierwaben könnte die Klimabilanz weiter verbessert werden.

Da die beschriebene Hanffasermonocoque-Variante auf Basis der sehr hohen Faserrohstoffkosten aktuell fast so hochpreisig ist wie die CFK-Variante und der größte „Umwelthebel“ über den beschriebenen Strommix wirkt, wurde entschieden zur Markteinführung das GFK-Monocoque umzusetzen und anzubieten. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Substitution von Klein-Pkw's für den Einsatz im urbanen Lebensraum durch die Alternative ONYX E-Mobil keine wirtschaftliche Hürde darstellt.

3.1.2.3 Ökobilanzierung zum Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen

In der Literatur gibt es verschiedene Studien, die die Unterschiede zwischen batteriebetriebenen und konventionellen Fahrzeugen in Hinblick auf die Umweltbelastungen untersuchen.

Althaus & Gauch [5] untersuchen die Auswirkungen von einem VW Golf, der elektrisch, als Plug-In-Hybrid, mit Biokraftstoff sowie fossilem Kraftstoff betrieben wird. Es handelt sich um eine cradle-to-grave Analyse und unterteilt das Fahrzeug in eine Antriebseinheit, die entsprechend variiert wird, und die restlichen Fahrzeugkomponenten. Als Ergebnis zeigt sich, dass das Abschneiden des Elektrofahrzeugs in erster Linie von dem verwendeten Strommix abhängt. Ein Betrieb mit Strom aus Kohlekraft hat demnach eine höhere Bewertung in vielen Wirkungsindikatoren. Im verwendeten Strommix aus der Schweiz (vorwiegend Wasser- und Kernkraft) schneidet das Elektrofahrzeug dagegen in acht von zwölf Kategorien besser ab (u. A. 0,09 kg CO₂-Äq./km) als Diesel und Benzinfahrzeuge (0,2 bzw. 0,25 kg CO₂-Äq./km). Das Hybrid-Fahrzeug schneidet dagegen in allen Kategorien (Strommix Schweiz) besser ab als das Elektrofahrzeug, da das Transportieren einer schweren Batterie vor allem auf kurzen Strecken große Nachteile bringt.

(Frischknecht R. , 2011) kommt zu einem ähnlichen Ergebnis: Wird das Elektroauto mit Strom aus einem Gaskraftwerk betrieben, steigen die Klimawirkungen über das Niveau von Benzin- und Dieselfahrzeugen. Mit dem Schweizer Strommix ergeben sich kaum Vorteile während nur der Betrieb mit Ökostrom die CO₂-Äq-Emissionen senken kann. Größten Anteil an der Klimawirkung der Elektrofahrzeuge hat die Batterieproduktion mit etwa einem Drittel. Auch bei der Primärenergie gibt es keinen nennenswerten Unterschied über alle Antriebsarten hinweg. In einer Vollaggregierenden Auswertung siegt das Dieselfahrzeug vor dem mit Ökostrom betriebenen Elektroauto. Nur durch konsequenten Leichtbau könnten die Klimawirkungen reduziert werden. Ein 550 kg leichtes Fahrzeug erzeugt so gegenüber dem 1320 kg schweren Dieselauto nur etwa 50 % der Treibhausgasemissionen wenn es ebenfalls mit Diesel betrieben wird und 35 % als Elektrovariante mit Strommix (CH) bzw. 30 % mit Ökostrom durch die mögliche Verringerung der Akkugröße auf Grund der Gewichtseinsparung.

3.1.2.3.1 Zieldefinition

Diese Ergänzung zur vorhergehenden Ökobilanz soll einen Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ziehen. Da zu dem ONYX Emobil noch keine Ökobilanz zum gesamten Fahrzeug vorliegt und eine Abschätzung über Literaturwerte nicht möglich ist oder sinnvoll erscheint, da die Materialzusammensetzung von anderen Leichtbaufahrzeugen stark unterschiedlich sein kann, kann nur eine Bilanzierung für die Nutzungsphase durchgeführt werden. Zusätzlich soll ein Vergleich mit dem VW eUp erfolgen, der als Konkurrenz am Markt der Elektrokleinautos anzusehen ist. Die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor werden durch einen anderen Konkurrenten, den Smart fortwo, repräsentiert.

3.1.2.3.2 Datengrundlage

Als Grundlage für die Verbrauchswerte dient beim Smart in der Diesel- und Benzinvariante jeweils der Durchschnitt, den Nutzer auf der Internetplattform Spritmonitor.de eintragen haben. Durch viele Eingaben ist so ein realistischerer Wert für den Verbrauch anzunehmen, als der vom Hersteller angegebene, der deutlich darunter liegt. Auch für den e-Up sind auf dieser Seite schon einige Werte eingegeben, die ebenfalls benutzt werden. Um den Verbrauch für das E-Mobil korrekt zu berechnen, wird die benötigte Leistung aus den Testfahrten auf das Gesamtgewicht der jeweiligen Fahrzeugvariante umgerechnet. Als Basis dient das GFK-Modell mit 190 kg. Durch das leichtere CFK-Monocoque ergibt sich hier ein Gesamtgewicht von 168 kg und für das HFK-Modell 183 kg.

Der Kraftstoff- bzw. Strom-Datensatz stammt aus der Gabi-Datenbank. Benzin und Diesel für den Geltungsbereich Deutschland sind sehr gut recherchiert und garantieren eine sehr hohe Datenzuverlässigkeit. Beide haben einen geringen Anteil an Biokraftstoff. Die gleiche Zuverlässigkeit gilt für den deutschen Strommix und den drauf basierenden Ökostrommix, der schon in der Ökobilanz oben genutzt wurde. Die bei der Fahrt durch die Verbrennung des fossilen Kraftstoffs entstehenden Emissionen werden durch den Gabidatensatz Gasoline driven, Euro 5, passenger car engine size up to 1,4l bzw. Diesel driven, Euro 5, passenger car engine size up to 1,4l beschrieben, der ebenfalls eine hohe Belastbarkeit bietet. Somit ist die Datenqualität insgesamt als sehr hoch anzusehen. Eine Auswertung mit der Methode CML 2001 ist daher auch über alle Wirkungskategorien möglich. Die eigentliche Berechnung erfolgt in Microsoft Excel. Der möglicherweise nötige Austausch der Akkus bei strombetriebenen Fahrzeugen wird nicht berücksichtigt. Generell ist mit einer Laufleistung der Akkus von 100.000 bis 150.000 Kilometern zu rechnen. Abriebemissionen durch Reifen und Bremsen sowie Infrastruktur durch Erneuerung von Straßen etc. werden nicht berücksichtigt.

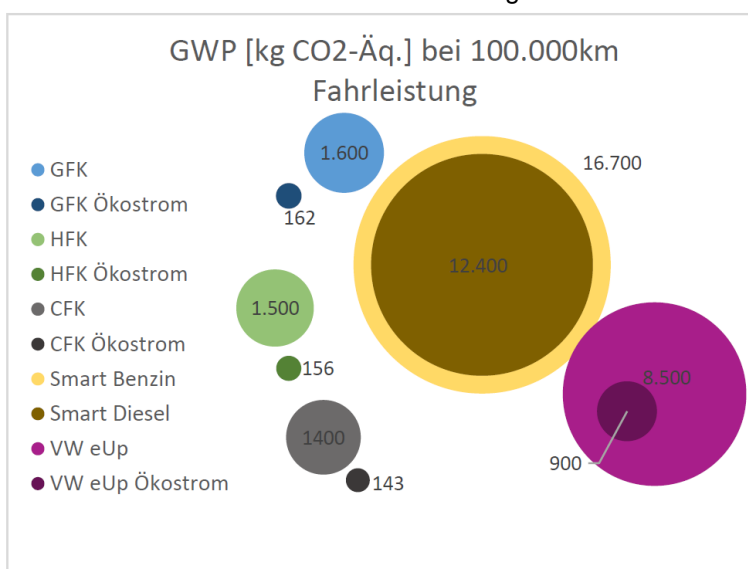


Abb. 46: Vergleich der Fahrzeuge und Antriebsarten in der Nutzungsphase; GWP

3.1.2.3.3 Ergebnis der vergleichenden Ökobilanzierung

Abbildung 46 zeigt die Auswertung der Ökobilanzierung der Nutzungsphase zwischen den verschiedenen Fahrzeugen und Antriebsarten. Es zeigt wieder den großen Einfluss der Stromart bei den Elektrofahrzeugen. Ergeben sich für das Emobil mit dem deutschen Strommix zwischen 1400 und 1600 kg CO₂-Äq. nach 100.000 km, ist der Ausstoß beim Laden der Akkus mit Ökostrom bei etwa einem Zehntel mit Werten zwischen 143 und 162 kg. Wie bereits in der vorangegangenen Bilanzierung weist das CFK-Modell die geringsten Emissionen in der Nutzungsphase auf, gefolgt vom HFK-Modell.

Der eUp hat auf Grund seines Gewichts wesentlich höhere Emissionswerte mit 8500 kg (Strommix DE) bzw. 900 kg (DE Ökostrom). Der Unterschied zum dieselbetriebenen Smart beträgt aber noch 3900 kg CO₂-Äq., der 12.400 kg aufweist. Am schlechtesten schneidet der Benzinzer mit 16.700 kg CO₂-Äq. ab. Aus diesem Vergleich kann entnommen werden, dass das Leichtbau- und Reichweitenkonzept des ONYX E-Mobils eine enorme Umweltrelevanz in Bezug auf herkömmliche Kleinfahrzeuge mit und ohne E-Antrieb aufweist. Im Rahmen der Weiterentwicklung soll nun die Datenbasis iterativ optimiert und aktualisiert werden, um einen ganzheitlichen und transparenten Vergleich für den kritischen Kunden zu ermöglichen.

3.1.3 Weiterentwicklung Fertigungskonzept

Wie schon im Abschnitt Design und Detailkonstruktion beschrieben wurde, ist es notwendig, die technischen Lösungen in Hinblick auf eine wirtschaftliche und qualitativ zuverlässige Fertigung hin zu überprüfen. Hierzu ist es notwendig, die Geometrie der Bauteile in Abstimmung mit den Zulieferern im Rahmen der Angebotsphase abzustimmen und den idealen Kompromiss zwischen Funktion, Leichtbau, ökologischer Fußabdruck, Herstellbarkeit und Kosten zu erarbeiten.

Mit Hinblick auf die Composite-Herstellungsverfahren (Vakuuminfusion und Faserspritzen) der Monocoque-Komponenten, welche durch ONYX oder die Partnerfirma vacopro hergestellt werden sollen, wurden folgende Randbedingungen auf Basis der Erfahrungen an den 1:1 und 1:3-Modellen an die Designentwicklung und Konstruktion weitergegeben:

- Minimalradien von $R=5\text{ mm}$ um Fehlstellen durch Lufteinschlüsse zu vermeiden, wodurch die Eigenschaften der Verstärkungsfasern durch ein provoziertes Abknicken in Bauteilkanten negativ beeinflusst werden.
- Entformungsschrägen von min. 2° in Entformungsrichtung, um zu gewährleisten, dass die Bauteile zerstörungsfrei entformt werden können.
- Max. 3-teilige Werkzeuge pro Monocoque-Komponente um die Werkzeugkosten sowie die Fertigungskosten in der späteren Montage und Demontage so gering wie möglich zu halten.
- Einbindung von umlaufenden Klebeflächen mit einer Überlappungslänge von $> 25\text{ mm}$ für die Verbindung der Monocoque-Komponenten untereinander. Dieses Maß ist aufgrund von Erfahrungen in unterschiedlichen Projekten als Vorgabe gesetzt worden, um eine ausreichende Festigkeit und hinreichende Positionierungsmöglichkeiten der Klebeverbindung zu gewährleisten.

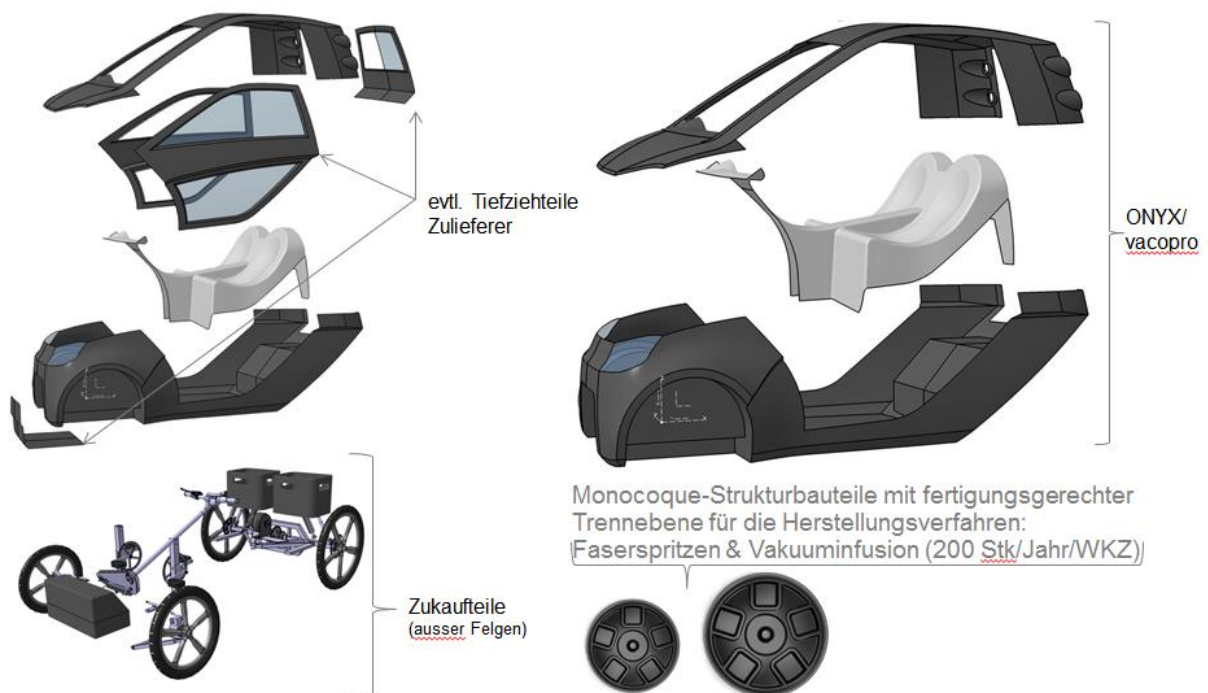


Abb. 47: Darstellung der Composite- Bauteile welche bei ONYX & vacopro gefertigt werden

Diese Randbedingungen wurden für die in Abb. 50 dargestellten Bauteile festgelegt und in der Konstruktion umgesetzt. Aktuell werden die Herstellbarkeit, Werkzeug- und Herstellungskosten aller Einzelkomponenten in enger Zusammenarbeit mit dem bestehenden Zulieferernetzwerk kalkuliert. Auf Basis unterschiedlicher Produktions- und Verkaufszahlen wird aktuell eine stückzahlbezogenen Herstellungsprozessübersicht abgeleitet. Hierbei sollen folgende Szenarien für jedes Bauteil untersucht werden:

1. Markteinführung 2017 mit bis zu 200 Stk. / Jahr (ca. 1 Fzg. / Tag)
2. Marktausbau 2017-2019 mit bis zu 1.000 Stk. / Jahr (ca. 5 Fzg. / Tag)
3. Low price- Variante ab 2020 mit > 50.000 Stk. / Jahr (ca. 250 Fzg. / Tag)

3.1.4 Elektronik und Akku

Bei der Weiterentwicklung der Elektronik und des Akkus ging es neben der wirtschaftlichen und technischen Betrachtung in Bezug auf Funktion und Leichtbau speziell um die Zulassungsfähigkeit der Einzelkomponenten in der Gesamtfahrzeugabnahme im Rahmen der L6e-Genehmigung.

3.1.4.1 Elektronik

Bei der Elektronik wurde das Hauptaugenmerk auf die Beleuchtungsentwicklung gesetzt. Die Beleuchtung gibt dem Fahrzeug das Gesicht und ist verantwortlich für den sicheren Betrieb bei allen Wetterlagen. Des Weiteren ist die Beleuchtung nach dem Antrieb der größte elektr. Verbraucher und somit ist es notwendig diese nicht nur preiswert, sondern möglichst effizient auszulegen, um die Reichweite nicht zu negativ zu beeinflussen.

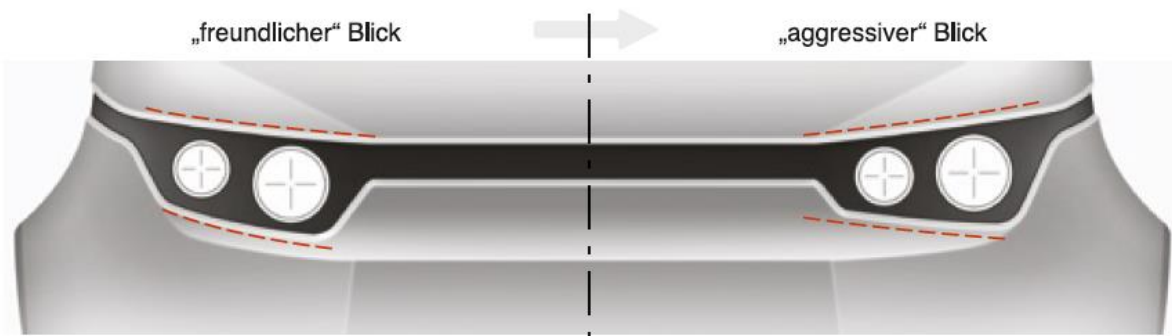


Abb. 48: Designvariationsmöglichkeiten durch die Beleuchtungsanordnung

Fahrzeuge der Klasse L6e mit einer Breite von über 1300 mm benötigen in der europäischen Union bei der Frontbeleuchtung die Hauptlichtfunktionen Abblendlicht, Fernlicht und Blinklicht. Bei der Heckbeleuchtung sind es die Schlussleuchten, die Bremsleuchten, die Rückfahrleuchte und das Blinklicht. Da jede Leuchtfunktion eine eigene ECE-Zulassung benötigt rechnet sich die Eigenentwicklung der Lichteinheiten erst bei großen Stückzahlen. Aus diesem Grund wurde entschieden, grundsätzlich das Design über die Nutzung von runden Beleuchtungselementen zu beeinflussen und somit immer auf die aktuell günstigste Variante zurückgreifen zu können.

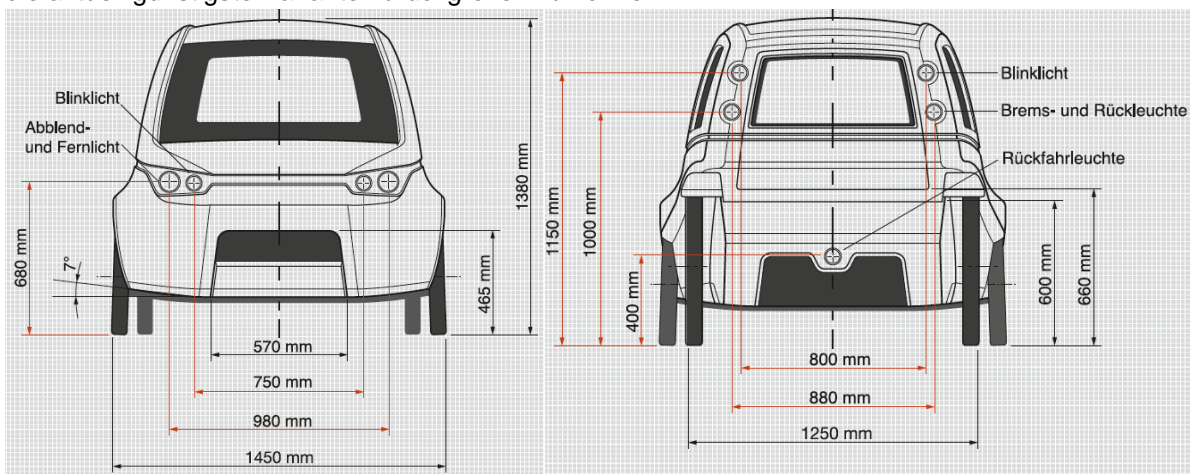
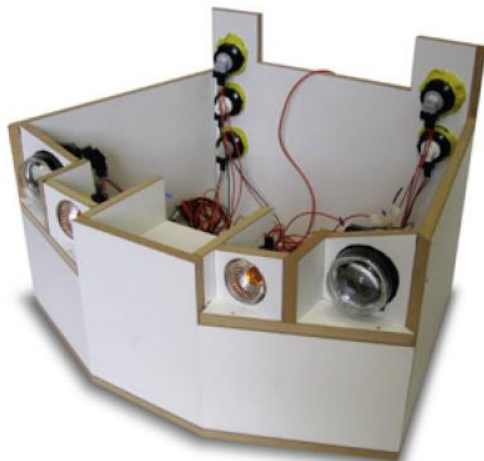


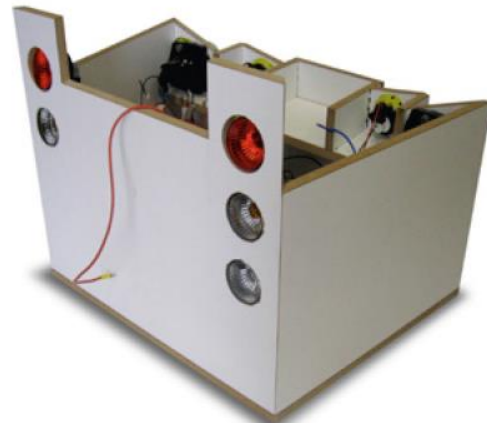
Abb. 49: Zeichnungsableitung zur zulassungsgerechten Positionierung der Beleuchtungselemente

Auf Basis der Monocoque-Konstruktion wurden die ausgewählten Bauteile in einem Funktionsmodell aus Holz eingebaut und getestet.

Bei diesem Aufbau wurde schon der für den ersten echten Monocoque-Prototypen ausgelegte Kabelbaum verbaut, so dass der Umbau und die Inbetriebnahme direkt nach Fertigstellung erfolgen kann.



FUNKTIONSAUFBAU FRONTLICHT



FUNKTIONSAUFBAU RÜCKLICHT

Abb. 50: Funktionsaufbau der Fahrzeugbeleuchtung inkl. kompletten Kabelbaum

3.1.4.2 Akku to go- Entwicklung

Für die erste reale Umsetzung des elektrischen Antriebsstrangs, wurde festgelegt, dass von Anfang an auch die Akku-Komponente Bestandteil der realen Tests sein soll. Anhand von ersten Berechnungen, die auf dem ersten verwendeten 500 W E-Motor basierten, wurde über die Motorkennfelder der entstehende Energieverbrauch hergeleitet. Die Zielsetzung war es, mit dem ersten Akku, so viele Fahrparameter wie möglich sammeln zu können, um in einer Folgeauslegung einen richtig angepassten Traktions-Akku herzuleiten.

Folgenden Grundgedanken führten zum Aufbau des ersten „Akko to go´s“:

- **Kapazitätsplanung**
Für das erste Funktionsmuster wurde sich für möglichst große und zugleich sichere Zellenauslegung entschieden. Als Kapazität wurden 15Ah, bei einer Niedervoltspannung von 48V Nennspannung gewählt. Der Niedervoltansatz stammt aus der Gesamtfahrzeugauslegung. Da auf unnötige Gleichspannungswandler verzichtet werden sollte, wurde der Akku auf die direkte Nennspannung ausgelegt. Dies bietet zugleich den Vorteil, dass sich das Gesamtsystem auch mit der Ladeschlussspannung unter der rechtlichen 60V Grenze befindet und so keine gesonderte elektrotechnische Ausbildung für z.B. einen Wartungsmechaniker zwingend vorausgesetzt wird. Als Zellchemie wurde sich zu Beginn auf eine möglichst sichere Zellbauweise gestützt. Die Lithiumeisenphosphat (LiFePO₄) Technologie bietet hier den richtigen Ansatz. Die Zellen wurden ohne Parallelschaltungen komplett in Reihe geschaltet.
- **Design**
Bei dem ersten Funktionsmuster wurde sich an einfachen und bereits vorhandenen Akkukomponenten vom gängigen Markt bedient und musste somit nur noch zusammen gebaut werden. Grundlage war es, von Anfang an, ein wenig fehleranfälliges System aufzubauen, da der Akku möglichst schnell Bestandteil der Fahrzeugtests war.
- **Lade-/ Entladekonzept**
Im ersten Schritt sollte der Akku nur außerhalb des E-Mobil geladen werden, damit das Laden am Laptop aufgezeichnet und beaufsichtigt werden kann. So konnte jederzeit das Laden beenden werden.
Das Ladegerät wurde entsprechend des CC-CV Ladeverfahren und für eine Normal- und eine spätere Schnellladung ausgewählt.
- **Temperaturmanagement**
In verschiedenen Testszenarien wurden beim Ladevorgang und vor allem beim Entladen die Temperaturen direkt an den Zellen gemessen und mitgeloggt, um den Akku bei kritischen Temperaturen abzuschalten.
Außerdem wurde mit diesen Daten analysiert, wo im Akku ein Temperaturstau entsteht, um bei dem nächsten Prototyp entsprechende Maßnahmen ergreifen zu können.

3.1.4.2.1 Die Komponentenauswahl

Das erste Akkusystem wurde aus folgenden Standardbauteilen gebaut:

- 16 LiFePO4 Zellen, mit entsprechenden Halterungen und Verbinder
- 16 Zellmodule, zur Überwachung des einzelnen Zellstatus
- Stromsensor
- Ladegerät
- Batteriemanagementsystem (BMS)
- Überlastsicherung
- Lastrelais
- Last-Steckeranschluss

Zum weiteren Aufbau wurde eine selbstentwickelte Platine mit einem DC/DC-Converter und einem Hilfsrelais entworfen, um zum einen die 12 V Betriebsspannung für das BMS und dem Lastrelais bereitzustellen und um zum anderen mit dem BMS und dem Hilfsrelais zusammen die Last schalten zu können.

Somit kann das BMS das Lastrelais ggf. abschalten, wenn z.B. die Lade-/ Entladeschlussspannung erreicht wurde, der Strom zu hoch ist oder eine kritische Temperatur erreicht wurde.

3.1.4.2.2 Inbetriebnahme, Prüfstandauslegung und Aufbau Elektronikkomponenten

Die 15Ah LiFePO4 Zellen wurden in 4 Viererblöcke zusammengeschaltet und in ersten Lade- und Entladeverfahren getestet. Da beim Laden mit hohen Strömen nicht die Kapazitätsgrenze der Zellen erreicht werden kann und somit die Reichweitentests verfälschen würden, wurde der Akku nur im Standardladeverfahren geladen und eine längere Ladezeit für das erste Funktionsmuster in Kauf genommen.

Anschließend wurde das gesamte System samt BMS in eine Hartplastikschale installiert.

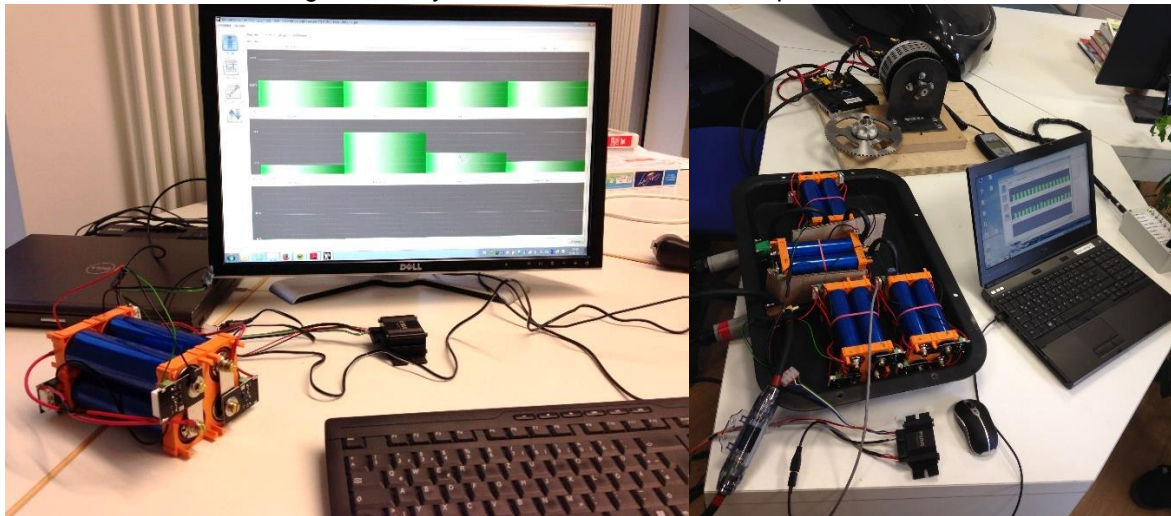


Abb. 51: Inbetriebnahme und Überwachung der ersten Zellpakete

Mit dem Entwicklungspartner Fa. iotec wurde ein Prüfstand mit dem 5 kW Motor (vorläufiger Motor für die Pedelec-Antriebsvariante) aufgebaut, um so das gesamte Akkusystem vor dem Einbau ins Fahrzeug zu testen. Hier konnten sowohl das Motorsteuergerät als auch das BMS auf die richtigen Stromstärken eingestellt werden.

Nachdem dies erfolgreich abgeschlossen wurde, konnte der Motor samt Akku in den Aggregateträger eingebaut und erste Fahrversuche durchgeführt werden.

3.1.4.2.3 Entwicklung Akku to go-Prinzip

Besonderer Anspruch war es den gesamten Akku neben dem eigentlichen Fahrzeugkonzept, einen eigenen mobilen Charakter zu geben. Der Akku sollte die Vorgabe erfüllen, diesen ortsunabhängig laden zu können. Der Anwender soll den Akku somit aus dem Fahrzeug entnehmen und an einer hausüblichen 230V Steckdose laden können. Für dieses Vorhaben wurden 2 Varianten entwickelt:

Variante 1:

Am Fahrzeug lässt sich im vorderen unteren Bereich eine Klappe öffnen, hinter welcher sich der Akku verbirgt. Dieser kann mittels eines Griffs herausgezogen werden und gleitet entlang der Führungsschienen aus dem Fahrzeug. Da das gesamte Akkugehäuse einem Trolley ähnelt, helfen die Trolley-Rollen beim Entnehmen. Ist der Akku aus dem Fahrzeug herausgezogen, kann er aufgerichtet werden und es lässt sich das Teleskopgestänge des Trolleygriffes ausfahren. Zum Laden wird nur noch ein einfaches Kabel mit einem Kaltgerätestecker benötigt, so wie es in der EDV für Rechner oder Notebooknetzteile üblich ist.

Auch beim Einstecken ins Fahrzeug muss der Akku nicht angehoben werden. Der Akku wird bei dieser Variante von vorne in Führungsschienen geschoben. Diese heben den Akku an und sorgen dafür, dass die Stecker auf der Hinterseite des Akkus in die Stecker des E-Mobil einrasten. Gleichzeitig wird eine Klemmvorrichtung aktiviert, die den Akku in die richtige Position hält.

Variante 2:

Bei dieser Variante wird, wie in Abb. 52, der Akku in eine Schublade gelegt, die mit dem Designelement und dem Crasheschutz nach vorne rausgezogen werden kann.

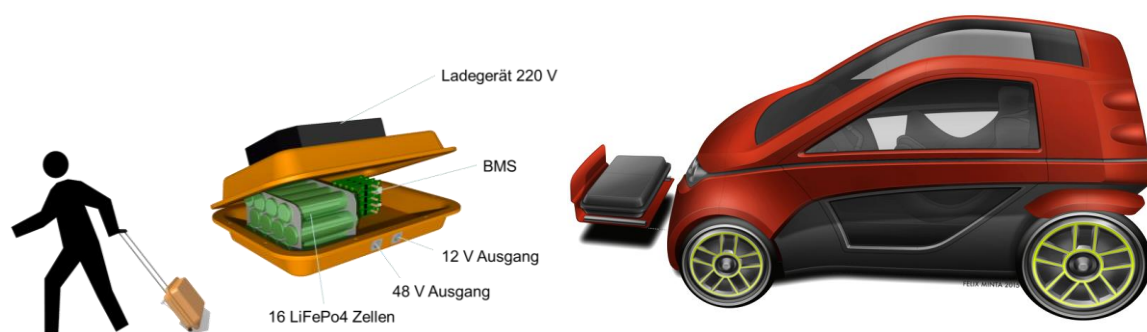


Abb. 52: Darstellung des „Akku to go“-Schubladenprinzips

Der Akku wird hier von oben in die Schublade in eine passgenaue Halterung gestellt und gleichzeitig werden die Stecker kontaktiert. Der Akku wird jetzt nur „nach oben“ gesichert.

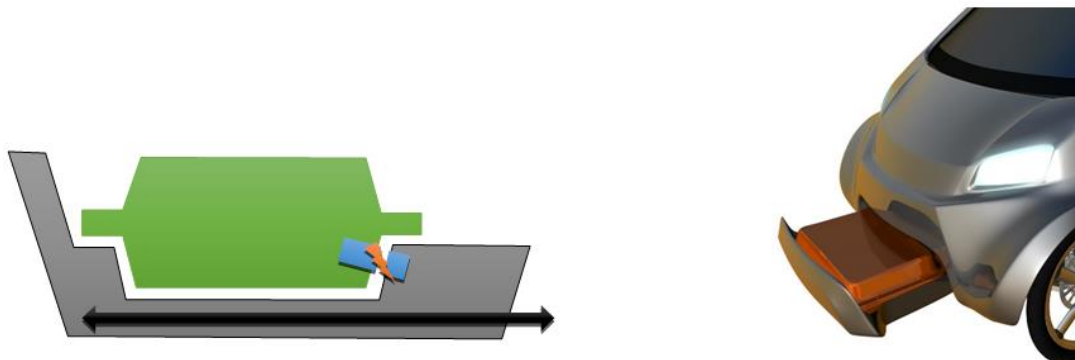


Abb. 53: Schnittansicht der Akku-Positionierung mit gleichzeitigem Andocken an das Fahrzeug

Der Vorteil bei der ersten Variante ist, dass man beim Anschließen des Akkus diesen kaum bzw. gar nicht anheben muss und somit auch für die ältere Generation sehr gut geeignet ist. Allerdings ist nicht zu 100% gewährleistet, dass der Akku ohne Spiel in der Führungsschiene sitzt und dadurch Kräfte auf den Stecker wirken könnten. Bei der zweiten Variante muss man den Akku zwar anheben, allerdings sitzt der Akku sehr passgenau in der Halterung und somit können keine Kräfte auf den Stecker wirken. Beide Varianten werden aktuell konzeptionell und in der Konstruktion weiterverfolgt, wobei im aktuellen Aggregateträger versucht wird, die jeweilige Einbausituation aus technischer und ergonomischer Sicht zu beurteilen.

3.1.4.2.4 Test und Optimierung der Elektronikkomponenten

Es wurden unterschiedliche Testszenarien mit verschiedenen Parameterbeeinflussungen durchgeführt, um den Verbrauch bzw. die Leistung, die das E-Mobil benötigt, festzustellen.

Um nach den verschiedenen Tests die verbrauchte Energie und die Ergebnisse vergleichen zu können, wurde per GPS Signal eine definierte Strecke aufgenommen.

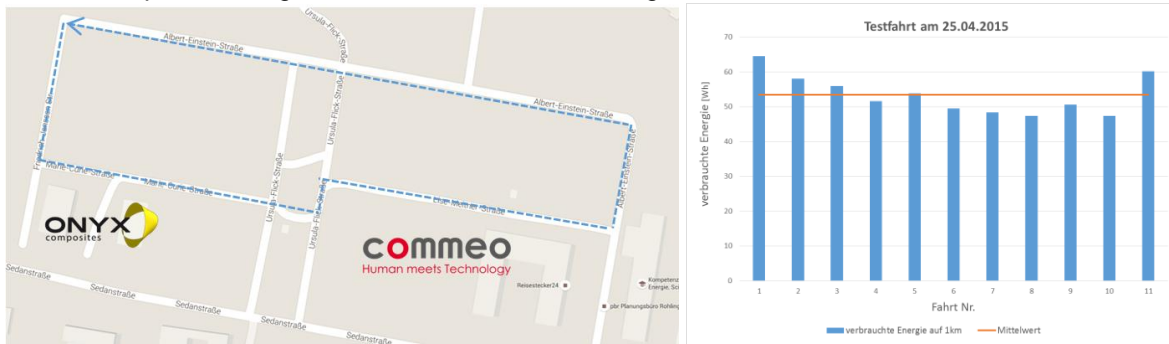


Abb. 54: li.: Teststrecke (ca. 950 m lang); re.: Darstellung der verbrauchten Energie/ km

Außerdem wurden vor jeder Testfahrt folgende Parameter festgehalten bzw. festgelegt:

- Reifendruck
- Reifenprofil
- Personen-/ Fahrzeug-/ Gesamtgewicht
- Fahrverhalten (z.B.: Energieeffizient, starke/langsame Beschleunigung, durchgehend gesamte Leistung abrufen)

Während der Fahrt wurde die Geschwindigkeit und die verbrauchte Energie aufgenommen und am Ende die gefahrenen Runden und somit die Strecke protokolliert (Siehe Anhang 6.2). So konnte nach der statistischen Auswertung genau sagt werden, wie viel Energie die aktuelle E-Mobil-Konfiguration pro Kilometer in den verschiedenen Testszenarien verbraucht hat. Derzeit liegt der AGT bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 51 Wh/km. Durch die folgenden aufgezeigten Potenziale ist es realistisch den Energieverbrauch unter die Zielanforderung von unter 40 Wh/km zu bringen:

Optimierungspotenziale in Bezug auf den Energieverbrauch sind:

- Anfahralgorithmus anpassen
- Leichtlaufeigenschaften steigern
- Gewichtsreduzierung (Der aktuelle AGT wiegt durch die Stahrohrbauweise über 220 kg)
- CW-Wert durch geschlossenes Monocoque und neues Felgendesign senken

Anfänglich wurden die Testfahrten mit dem kleinen Motor von 500W durchgeführt. Als sichergestellt war, das alles Fahrzeugseitige funktioniert, wurde der Motor und die Motorsteuerung gegen eine 5 kW- Variante (Pedelec-Antrieb) und eine 4 kW-Variante (Rikscha-Antrieb) getauscht. Die ausgewerteten Energieverbräuche wurden nun iterativ für die Fahrzeugoptimierung genutzt. Es konnten hierdurch z.B. das Leichtlaufverhalten des gesamten Antriebsstrang und des Fahrwerks geprüft und optimiert werden.

Mit diesen Ergebnissen ging es weiter in die Entwicklung des zweiten Prototyps, um eine Reichweite von 50km sicher unter dem Einsatz eines 4 kW E-Motors zu gewährleisten.

Bewertung Testergebnisse

Schon bei den ersten Lade- und Entladungen wurde deutlich, dass die LiFePO₄ Zellen für diese Anwendung in dem Akku nicht gut genug geeignet sind und für die nächsten Prototypen Zellen mit einer anderen Zellchemie ausgewählt werden müssen.

Dies hat folgende Gründe:

Die Ladeschlussspannung von den Zellen liegt zwar auch wie bei anderen LiFePO₄ Zellen bei 3,65 V, allerdings bauen speziell diese Zellen nach Erreichen der Ladeschlussspannung intern in einem chemischen Prozess Energie ab, bis die Ruhespannung von 3,35-3,4 V erreicht wurde. Somit geht wertvolle Energie verloren und die volle Kapazität kann nicht genutzt werden. Insgesamt macht das bei 16 Zellen in Reihe einen Spannungsabfall von ca. 4-4,8 V aus.

Außerdem driften die Zellen beim Laden und Entladen sehr stark auseinander. Deswegen müssen die Zellen beim Ladevorgang immer wieder „ausbalanciert“ werden, was eine deutlich längere Ladezeit zur Folge hat. Da der Balancestrom im Verhältnis zum Ladestrom zu klein gewählt wurde.

Ein weiterer Punkt ist, dass für eine Reichweite von 50 km die Kapazität auf 43 Ah aufgestockt werden muss. Allerdings war dies auch zu erwarten, da die erste Akkuauslegung auf einen 8-fach kleineren E-Motor ausgelegt war.

Des Weiteren müssen Stecker mit einer höheren Steckzyklenzahl verwendet werden, da die momentan verbauten schon erste deutliche Gebrauchsspuren hinterlassen haben. Diese waren zwar für hohe Ströme ausgelegt, jedoch nicht für permanentes Ein- und Ausstecken. Hierfür wurde bereits eine Serienlösung gefunden, welche aus einer anderen Anwendung übernommen werden kann.

Es muss auch ein neues Lastrelais eingesetzt werden, da das jetzige einen zu hohen Stromverbrauch hat und einen zu großen Bauraum einnimmt. Auch hier wurde bereits für die Zukunft ein neuartiges Lastrelais gefunden, welches der hohen Anforderung standhält.

3.1.4.2.5 Entwicklung Akku-t-go-Prototyp 2.0

Wie beschrieben wurde auf Basis der Testergebnisse die Kapazität auf 43 Ah erhöht. Der zweite Prototyp wurde komplett im CAD geplant, um den Bauraum so gering wie möglich zu halten.

Außerdem wurde bei der Zellentechnologie auf Lithium Nickel Cobald Aluminium (LiNiCoAl) Zellen gesetzt, da diese gegenüber LiFePO₄ eine wesentlich höhere Energiedichte haben. Dies spiegelt sich deutlich bei dem reinen Zellengewicht wieder. Die Zellen sind bei einer über 2,5-fachen höherer Kapazität mit 9,4 kg Gesamtmasse nur 1,7 kg schwerer als der 15 Ah Akku.

Bei der neuen Zellenauswahl wurde auf einen bereits fertig geschriebenen Algorithmus zurückgegriffen, der bei der Commeo entwickelt wurde und alle gängigen Zellchemien berücksichtigt. Dieser wurde berechnet unter Berücksichtigung der max. Spannung, dem max. Strom, die benötigte Energie, geringes Volumen, geringes Gewicht und die am besten geeignete Zelle mit der entsprechenden Verschaltung.

Somit wurden die Samsung 18650 29E mit einer Kapazität von 2900 mAh und einen max. Strom von 10 A ausgewählt. Um die Kapazität von 43 Ah zu erreichen, müssen somit 15 Zellen parallel geschaltet werden und für die Ladeschlussspannung von 58,8 V 14 Zellen mit á 4,2 V in Serie installiert werden. Somit ergibt sich eine Zellenverschaltung von 14S15P.

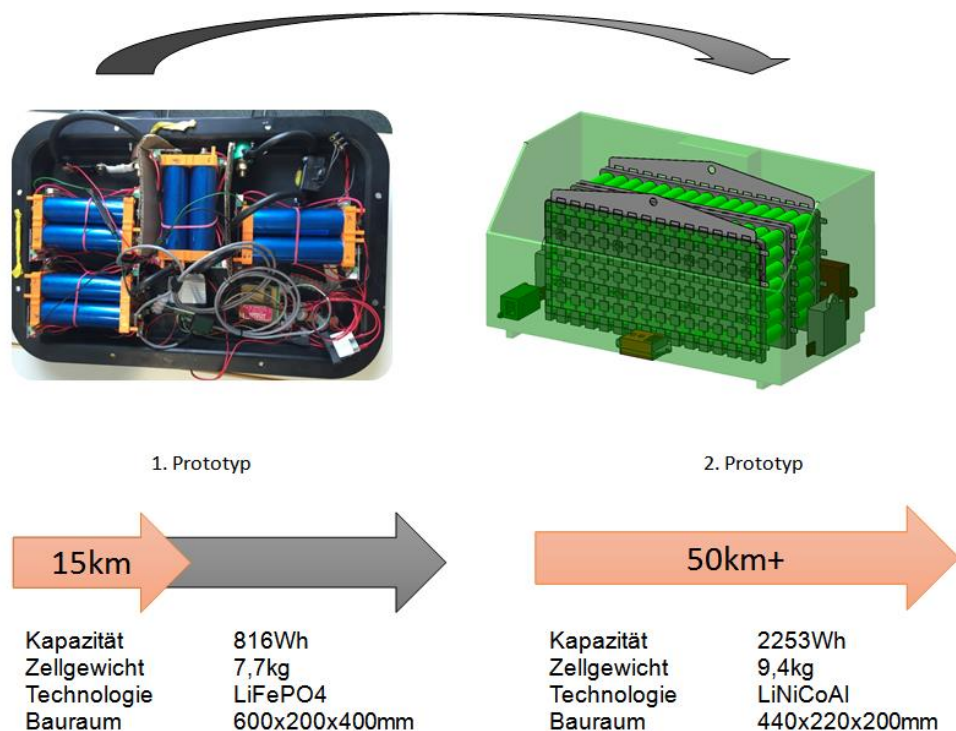


Abb. 55: Vergleich Akkuprototyp 1.0 vs. Akkuprototyp 2.0

Für die Überwachung des Akkus wurde angefangen ein neues BMS auszulegen, das kleiner und später wesentlich günstiger als vergleichbare ist. Außerdem hat dieses noch weitere gewünschte Funktionen, die uns bei anderen Batterie Management Systeme nicht zur Verfügung gestanden hätten.

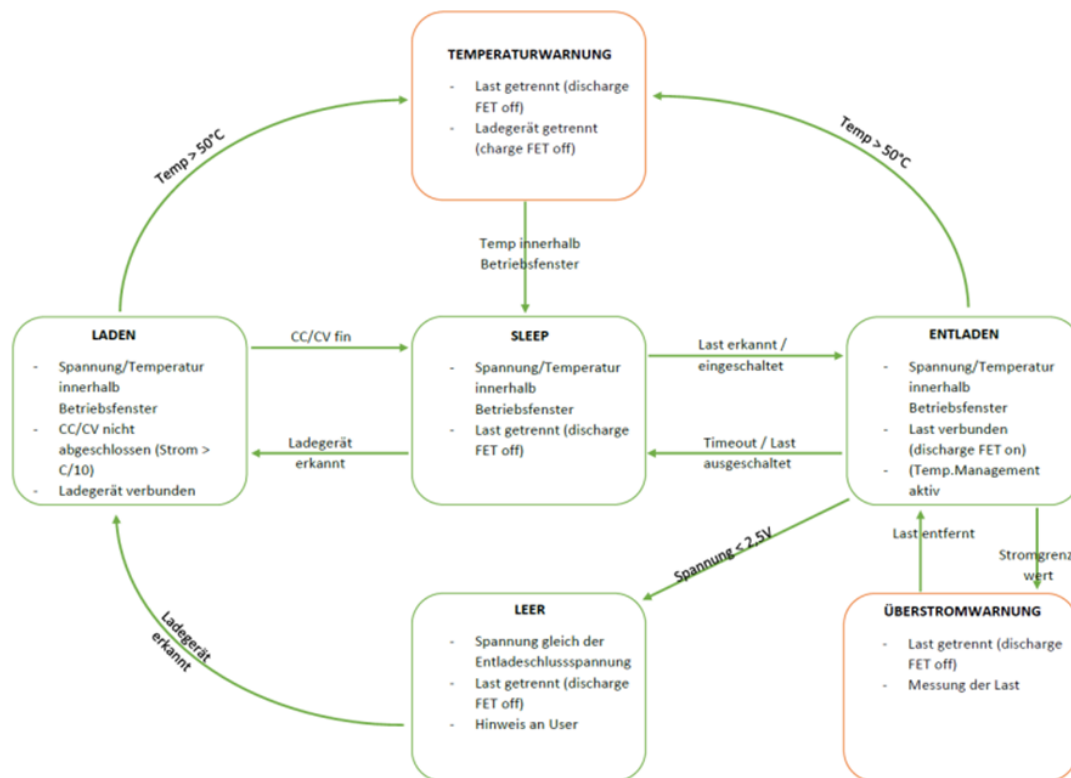


Abb. 56: Zustandsdiagramm zur Überwachung des Akkus

Um auf alle Zustände im Normal- und Fehlerfall reagieren zu können, wurde ein Zustandsdiagramm entwickelt, das mit in die BMS-Software implementiert werden soll.

Diese steuert auch das Zusammenspiel der einzelnen Akkukomponenten und kommuniziert via CAN-Protokoll mit der Motorsteuerung des E-Mobils.

Bei der Relaisentwicklung wird nun mit einem Hersteller zusammengearbeitet, der seine neuen Halbleiterrelais zur Verfügung stellt, um diese in der Praxis ausgiebig zu testen. Diese Relais können auch im Fehlerfall den Akku unter Last abschalten und sind dennoch durch die eingesetzte Halbleitertechnik wesentlich kleiner als die herkömmlichen Relais und haben einen deutlich geringeren Stromverbrauch.

Bei den Steckerkontakten wird ebenfalls auf eine neue, aber dennoch schon etablierte Technik gesetzt. Die einzelnen Stecker und Buchsen bestehen an den Kontaktflächen aus Lamellen, die mit min. 100.000 Steckzyklen hervorragend für den ständigen Aus- und Einbau des Akkus geeignet sind.

3.1.5 Prüfstand und Fahrversuche Antriebsvarianten 2-4 kW

Um speziell die Funktionseinheiten Akku und Antrieb testen zu können, wurden hierzu vor den Fahrversuchen im AGT Prüfstände aufgebaut. Anhand dieser Vorversuche konnten Konstruktionsfehler und Qualitätsmängel vor dem relativ aufwendigen Einbau in den AGT herausgefiltert und eliminiert werden. In der Abbildung 54 wird der Aufbau des Prüfstandes für die s.g. Pedelec-Antriebseinheit getestet. Diese Einheit bieten im Vergleich zur s.g. „China-Antriebvariante“ im Standardmodell die Möglichkeit, die Pedalkräfte über ein variables Schaltgetriebe (NuVinci, siehe Bericht Phase 1) und ein Differential direkt auf die Antriebswelle zu übertragen. Diese Lösung befindet sich noch in der Entwicklung, alternativ kann der Kunde sich in Bezug auf den Humanantrieb für das Aufladen des Akkus über einen Pedalgetriebenen Generator aktiv einbringen.

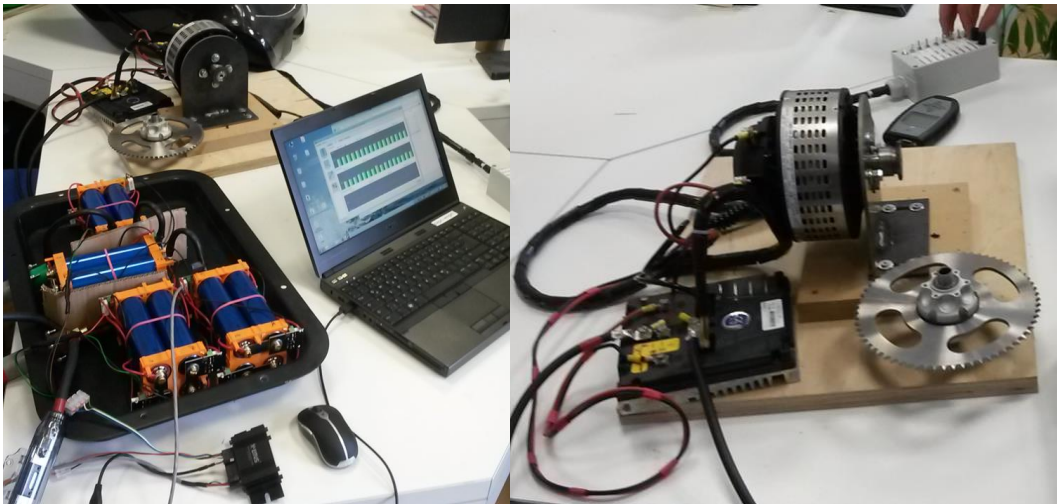
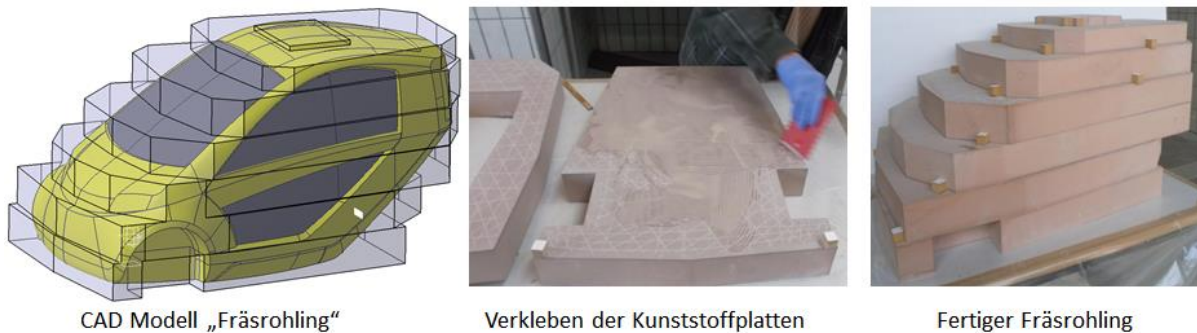


Abb. 57: Prüfstands Aufbau „Akku to go_1.0“ in Kombination mit 4 kW-Antrieb ohne Getriebe

3.2 Fertigung, Optimierung und Test Funktionsmodelle 1:3 und 1:1

Auf Basis der konstruktiven Weiterentwicklung wurde auch der AGT iterativ auf den aktuellen Stand gebracht. Im Rahmen der technischen und wirtschaftlichen Fragestellungen zur Compositefertigung wurde die Entscheidung getroffen, ein 1:3 GFK-Monocoque aufzubauen. Hierzu wurden die Daten des vorläufigen Monocoque-Konzeptes aus Phase 1 genutzt, um für die Weiterentwicklung die Erkenntnisse aus den Funktionsmodellen direkt nutzen zu können. In Abb. 55 wird die Herstellung des Positivmodellrohlings erläutert, welche auf Basis des CAD-Modells in Form der Monocoquegeometrie gefräst wurde.



CAD Modell „Fräsrohling“

Verkleben der Kunststoffplatten

Fertiger Fräsrohling

Abb. 58: Herstellung des Fräsrohlings für das 1:3 Positivmodell

Nachdem das Positivmodell feingeschliffen und als Musterzusammenbau für die optische Bewertung genutzt wurde, konnte auf Basis des Werkzeugkonzeptes mit dem Werkzeugbau begonnen werden. In den folgenden Abbildungen werden diese Arbeitsschritte dokumentiert:

- Ablaminieren von Werkzeuglosteilen vom Positivmodell
- Entformen der Losteile und Vorbereitung für die Bauteilfertigung
- Das Handlaminieren im zusammengebauten Werkzeug (Handlaminat wie im Werkzeugbau)
- Das Entformen des ersten 1:3 Funktionsmodells



Gefrästest 1:3 Modell lackiert



Laminieren eines Werkzeuglostteils



Entformte Losteile

Abb. 59: Arbeitsschritte Werkzeugbau für das 1:3 Monocoque

Über die Erfahrungen im Werkzeug- und Prototypenbau konnten die Fertigungskonzepte überprüft und optimiert werden. Prinzipiell konnte die Aussage getroffen werden, dass das Werkzeug- und Bauteilkonzept funktioniert. Für die wirtschaftliche Herstellung des 1:1 Monocoques wurden aber alle negativen Aspekte in Form von den zuvor beschriebenen Design- und Konstruktionsvorgaben zusammengetragen und als Richtlinie definiert.

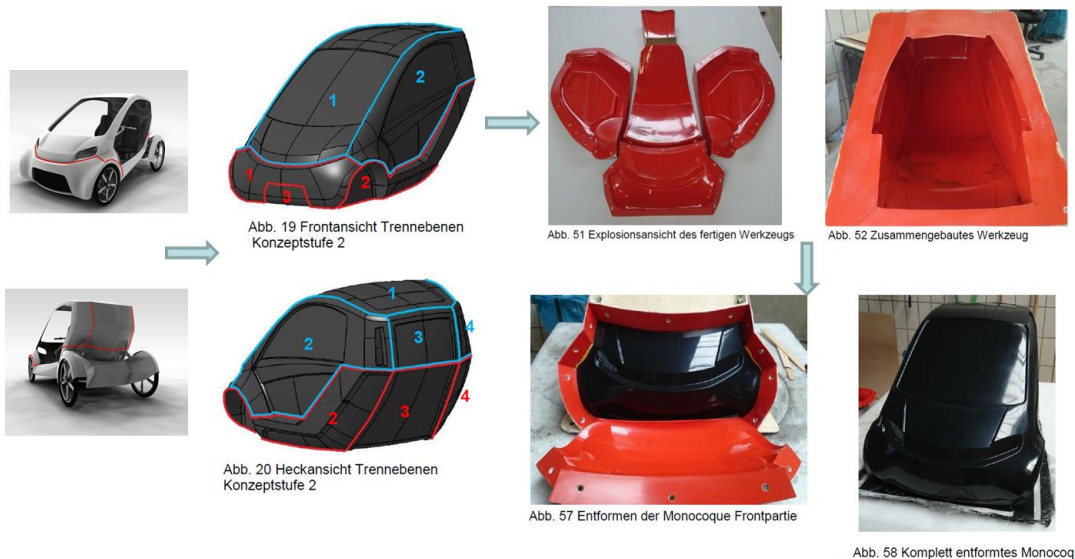


Abb. 60: Überblick der Fertigungsschritte zur Herstellung eines 1:3 GFK-Monocoques

Parallel wurde der 1:1 AGT auf die Design- und Konstruktionsanpassungen hin optimiert, um reale „Er-Fahrungen“ zu sammeln. Der optimierte AGT basiert grundlegend auf dem aus Phase 1 wobei das Exterieur komplett neu aufgebaut wurde, um den neuen Design- und Konstruktionsstand möglichst genau nachzubilden. In den Abb. 61 & 62 wird der „halbe“ Aufbau mit der 4 kW Rikscha-Antriebsvariante, den neuen Hinterrad-Compositefelgen und einem Solardach als Sonderausstattungsvariante gezeigt.



Abb. 61: Darstellung des AGT „Phase-2“



Abb. 62: li. Testfahrt mit Akku to go- Prototy; re. Test & Optimierung der Einstiegssituation

3.3 Marktpotentialabschätzung & Businessplan

Um das ONYX E-Mobilkonzept nicht am Markt vorbei zu entwickeln, wurde in Kooperation mit der Hochschule Osnabrück, Fakultät WiSo unter Leitung von Prof. Dr. D. Halstrup und M.A. J. Brouer im Rahmen von verschiedenen Projekten das Marktpotential analysiert. Die Berechnungen zu allen Abschätzungen werden in Form einer Exceldatei „Exeltool - Green Consulting“ im Rahmen der digitalen Berichtabgabe zur Verfügung gestellt. Parallel wurde auf Basis des kontinuierlichen Gewichts- und Kostenmanagements der in Phase 1 erstellte Businessplan aktualisiert.

3.3.1 Marktpotentialabschätzung

„Das Marktpotential umfasst die Gesamtheit aller möglichen Absatzmengen eines Marktes. Werden neue Märkte geschaffen, so besteht i.d.R. ein hohes, nicht ausgeschöpftes Marktpotential, das mit zunehmender Verbreitung der Produkte ausgefüllt wird. Im Zeitablauf kann das Marktpotential auch ausgeweitet werden, weil sich zunehmend neue Nachfrager für das Produkt als potenzielle Kunden interessieren.“ Vgl. Meffert, Heribert u.a. (2013): S.55.)

Um dieses Potential ganzheitlich zu erfassen, wurde ein 3-stufiges Verfahren zur Abschätzung durchlaufen:

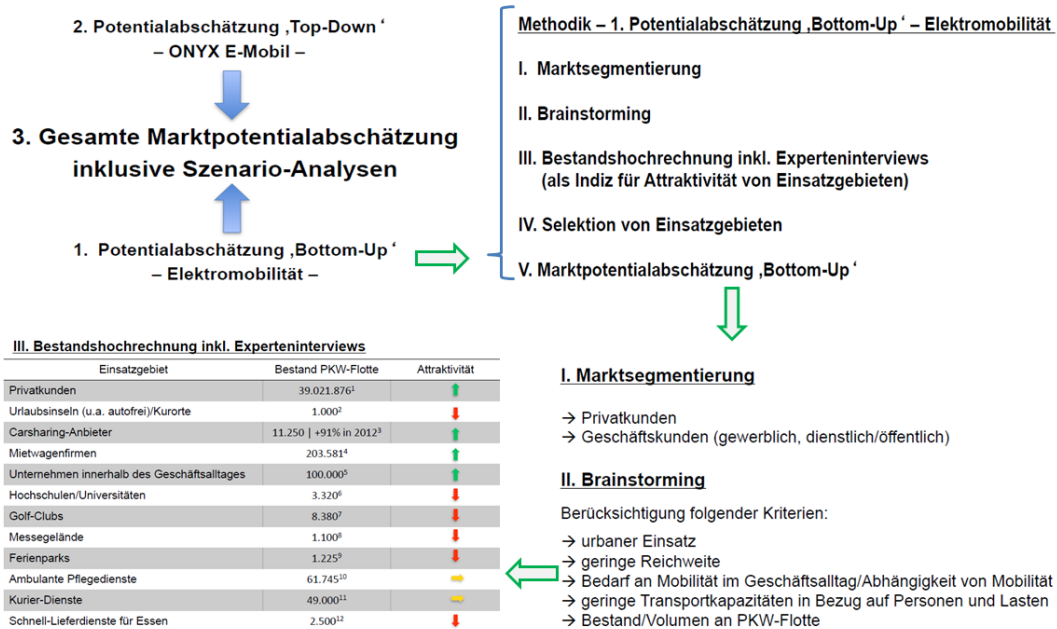


Abb. 63: Potentialabschätzung nach dem „Bottom-Up-Prinzip“

IV. Selektion von Einsatzgebieten

Einsatzgebiet	Bestand PKW-Flotte	Attraktivität
Privatkunden	39.021.876 ¹	↑
Urlaubsinseln (u.a. autofrei)/Kurorte	1.000 ²	↑
Carsharing-Anbieter	11.250 +91% in 2012 ³	↑
Mietwagenfirmen	203.581 ⁴	↑
Unternehmen innerhalb des Geschäftsalltages	100.000 ⁵	↑
Hochschulen/Universitäten	3.320 ⁶	↑
Golf-Clubs	8.380 ⁷	↑
Messegelände	1.100 ⁸	↑
Ferienparks	1.225 ⁹	↑
Ambulante Pflegedienste	61.745 ¹⁰	→
Kurierdienste	49.000 ¹¹	→
Schnell-Lieferdienste für Essen	2.500 ¹²	↓

V. Marktpotentialabschätzung ,Bottom-Up‘

Einsatzgebiet	Marktpotential 2015	Berechnung
Privatkunden	41.096	siehe Excel
CarSharing-Anbieter	703	siehe Excel
Mietwagenfirmen	21.405	siehe Excel
Unternehmen innerhalb des Geschäftsalltages	89.460	siehe Excel
Gesamt:	152.664	

Abb. 64: Das resultierende Marktpotential für die Elektromobilität nach Selektion



Methodik – 2. Potentialabschätzung ,Top-Down‘ – ONYX E-Mobil

- I. Festlegung der Kriterien nach Kundenwünschen
- II. Bestimmung der Substitute / Konkurrenz (Eingrenzung)
- III. Technische Spezifikationen und Preis der Konkurrenz in Preis-Leistungs-Absatz-Matrix
- IV. Berechnung der Durchschnittswerte einzelner Segmente
- V. Berechnung und Wertung der Faktoren
- VI. Ergebnisse

I. Festlegung der Kriterien nach Kundenwünschen

- Urbane Verkehr
- Grüne Technologie
- Günstige Fortbewegung

II. Bestimmung der Substitute / Konkurrenz (Eingrenzung)

- Kleinstwagen
- Direkte Konkurrenz
- E-Bikes
- E-Autos
- Hybridautos

- Direkte Konkurrenten (aus Benchmark in Phase 1)

- Bauartbedingt dem Onyx-Mobil sehr ähnlich
- Elektroantrieb, eventuell auch Pedalantrieb (Pedelec)
- Innovativ, urban, leicht



Abb. 65: Vorgehen bei der Top-Down-Abschätzung

III. Technische Spezifikationen (Leistung) und Preis der Konkurrenz in Preis-Leistungs-Absatz-Matrix

	A	B
1 Spezifikation:		ONYX
2		
3 Preis (€)		10.000
4 Kosten / 100 km (€)		1
5 Gewicht (kg)		100
6 Reichweite (km)		50
7 Fixe Kosten (€)		145
8 Höchstgeschwindigkeit (km/h)		45
9 Leistung (KW)		4
10 Sicherheitsfaktor		2
11 Innovationsfaktor		3
12 Komfort / Praxistauglichkeit		2
13 Umweltfaktor		3
14 Lade- / Betankungsinfrastruktur		2
15 Marktpräsenz		1

Abb. 66: Übersicht zur Technischen Spezifikation

Beispiel: Hybridautos

→ Meistverkaufte Hybridfahrzeuge 2013 laut KBA

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		Toyota Prius	Honda Civic Hybrid	Lexus RX 400 h	MB S 400 Hybrid	Toyota Yaris	Toyota Auris	Opel Ampera	Ø
2	Preis (€)	26800	22950	49750	86335	16950	23300	38620	37815,00
3	Kosten / 100 km (€)	8,25	9,6	15	11,85	6,9	7,8	9,6	9,86
4	Gewicht (kg)	1470	1343	2060	1925	1160	1385	1732	1582,14
5	Reichweite (km)	1154	1087	889	1029	802	885	520	909,43
6	Fixe Kosten (€)	770	770	900	900	770	770	770	807,14
7	Höchstgeschwindigkeit (km/h)	180	187	200	250	165	180	161	189,00
8	Leistung (KW)	60	73	200	225	74	100	174	129,43
9	Sicherheitsfaktor	3	3	3	3	3	3	3	3
10	Innovationsfaktor	3	3	3	3	3	3	3	3
11	Komfort / Praxistauglichkeit	3	3	3	3	3	3	3	3
12	Umweltfaktor	2	2	2	2	2	2	2	2
13	Lade- / Betankungsinfrastruktur	3	3	3	3	3	3	3	3
14	Marktpräsenz	2	2	2	2	2	2	2	2

Abb. 67: Schritt IV: Beispiel der Berechnung der Durchschnittswerte einzelner Segmente

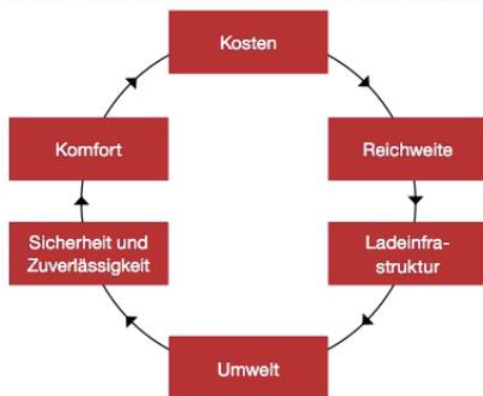
V. Berechnung und Wertung der Faktoren

	A	B	C	D	E	F
1	Spezifikation:	ONYX	Hybridautos	normal	kritisch	
2						
3	Preis (€)	10.000	37815,00	3,78	7,56	
4	Kosten / 100 km (€)	1	9,86	9,86	9,86	
5	Gewicht (kg)	100	1582,14	15,82	15,82	
6	Reichweite (km)	50	909,43	0,05	0,03	
7	Fixe Kosten (€)	145	807,14	5,57	5,57	
8	Höchstgeschwindigkeit (km/h)	45	189,00	0,24	0,24	
9	Leistung (KW)	4	129,43	0,03	0,03	
10	Sicherheitsfaktor	2	3	0,67	0,33	
11	Innovationsfaktor	3	3	1,00	1,00	
12	Komfort / Praxistauglichkeit	2	3	0,67	0,33	
13	Umweltfaktor	3	2	1,50	3,00	
14	Lade- / Betankungsinfrastruktur	2	3	0,67	0,33	
15	Marktpräsenz	1	2	0,5	0,5	
16						
17	Absatz 2013		26348			
18						
19	Faktoren			0,30	0,07	
20	Faktor x Absatz = Marktpotenzial			7776,07	1944,02	

Beispiel:
 Onyx kostet 10.000 €
 Hybrid kostet 37.815 €
 Onyx ist 3,78-mal so gut wie der Hybrid (hinsichtlich des Preises)

Abb. 68: Darstellung des Vorgehens bei der Berechnung und Wertung der einzelnen Faktoren

Kritische Faktoren beim Kauf von E-Mobilen



Quelle: PwC, Fraunhofer LBF, FH FFM (2011)

Studien belegen:

→ Gewisse Faktoren sind beim Kauf eines E-Mobils von besonderer Bedeutung

→ Faktoren werden in der Preis-Leistungs-Absatz-Matrix daher doppelt gewertet

Abb. 69: Schritt VI: Definition der kritischen Faktoren und Einstufung für die Bewertung

Theoretisches Gesamtpotential ohne Preis-Leistungs-Absatz-Matrix:

Kleinstwagen:	204.473
Direkte Konkurrenz:	3.500
E-Bikes:	450.000
E-Autos:	6.051
Hybridautos:	26.348

690.372 verkaufte Substitute in 2013

Gesamtpotential mit Preis-Leistungs-Absatz-Matrix bei gleicher Wertung aller Faktoren:

Kleinstwagen:	144.499
Direkte Konkurrenz:	31.998
E-Bikes:	11.352
E-Autos:	3.634
Hybridautos:	7.776

199.259 = Marktpotential „einfach“

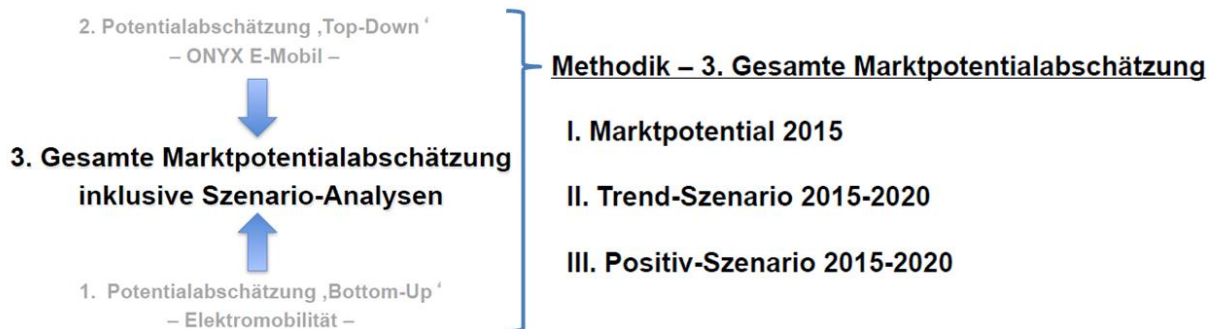
Abb. 70: Ergebnisdarstellung zum Gesamtpotential mit und ohne Berücksichtigung der P-L-A-Matrix

Werden die definierten kritischen Faktoren mit doppelter Wertung bei der Abschätzung Gesamtpotential mit Preis-Leistungs-Absatz-Matrix berücksichtigt, kann folgendes Marktpotential abgeleitet werden:

Kleinstwagen:	8.941	} Marktpotential
Direkte Konkurrenz:	31.998	
E-Bikes:	11.238	
E-Autos:	909	
Hybridautos:	1.944	

55.030 = Marktpotential ONYX E-Mobil

Bei der abschließenden Gesamtmarktpotentialabschätzung wurde ein möglicher Marktanteil im Jahr 2015 von 8% für das ONYX E-Mobil abgeschätzt, welches auf das ganzheitliche Marktpotential für den deutschen Elektromobilmarkt bezogen, ca. 12.000 Einheiten ergibt.



Privatkunden	Dienstfahrten	Carsharing	Mietwagen	Marktpotential Elektromobilität 2015
41.096	89.460	703	21.405	152.664

ONYX-Anteil	Marktpotential ONYX Mobil 2015
8%	12.169

Abb. 71: Methodik für die Gesamtmarktpotentialabschätzung und das ONYX E-Mobil-Potential 2015

Beim Trendszenario wurden die Steigerungen der Neuzulassungen von E-Mobilen im Zeitraum von 2009-2014 als Trend herangezogen. Dieses Vorgehen birgt natürlich enorme Zuwachsraten und lässt das Ziel der Bundesregierung, 2020 eine Million E-Fahrzeuge in Deutschland auf die Straße zu bringen noch halbwegs realistisch aussehen.

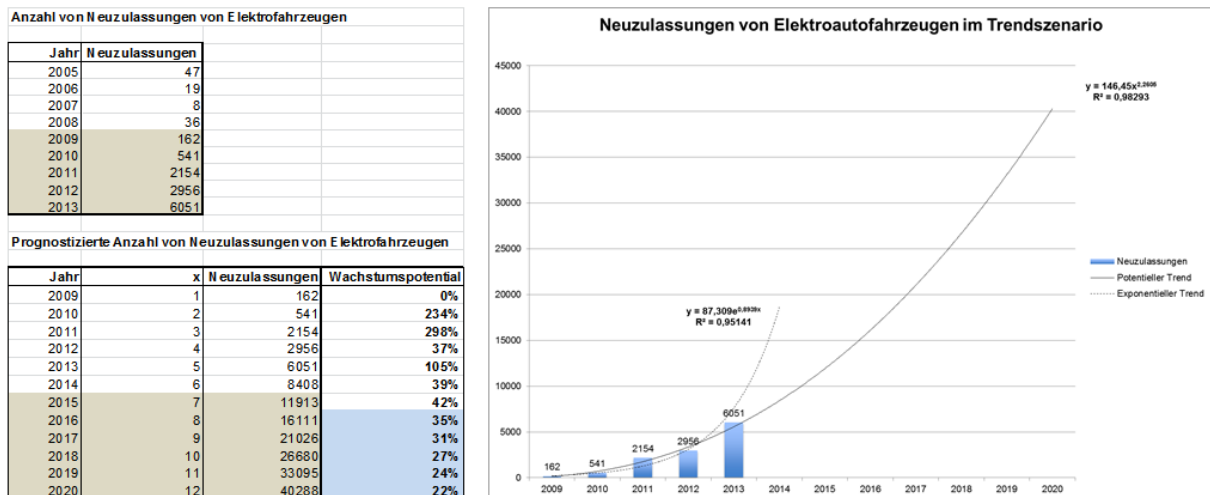


Abb. 72: Darstellung des Trendszenarios für die Neuzulassung von Elektrofahrzeugen

Bei der Entwicklung des Positivszenarios wurde davon ausgegangen, dass durch die globale und rasante Weiterentwicklung der Technologien für die Elektromobilität der Zukunft die heutigen finanziellen Nachteile bei der Anschaffung eines E-Mobils kompensiert werden können. Dieser Nachteil wird als Lücke bei der Betrachtung der Total Cost of Ownership (TCP-Lücke) bezeichnet. Die Entwicklung dieser aktuell bestehenden, aber zukünftig schrumpfenden, Lücke, z.B. unter Berücksichtigung der Anschaffung, der Wertminderung sowie der Entsorgungskosten, ergibt folgende Abschätzung:

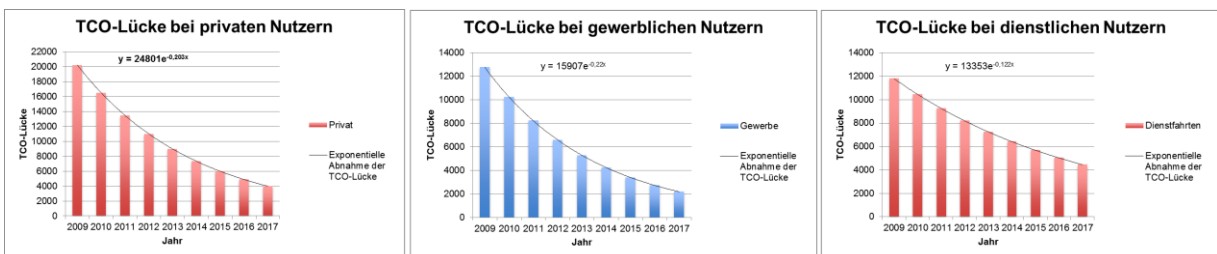


Abb. 73: Berücksichtigung der TCO-Lückenentwicklung für verschiedene Nutzergruppen

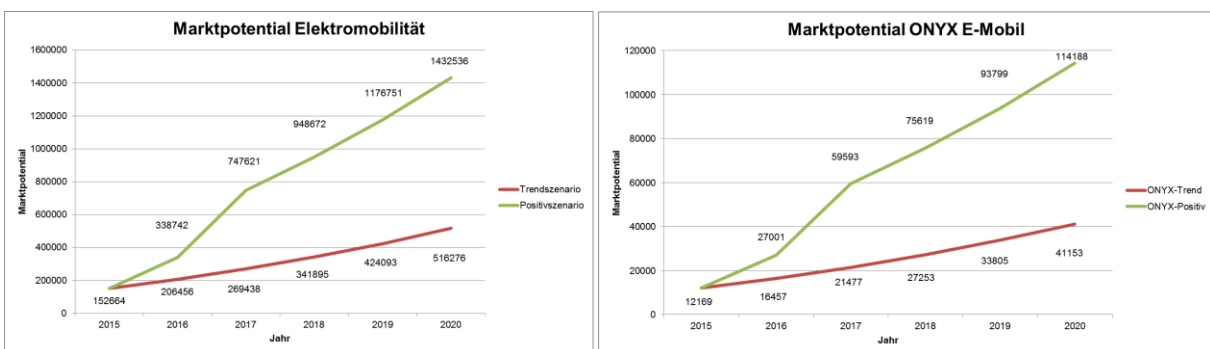


Abb. 74: Darstellung der abgeleiteten Marktpotentiale für den Gesamtmarkt und das ONYX E-Mobil

3.3.2 Zielpreisdefinition

Als Kalkulationsansatz wurde der Zielpreis auf Basis der Benchmarkrecherche und der Marktpotentialabschätzung für die günstigste Version der Einstiegsvariante mit $VK_{\text{Kunde}} = 8.900 \text{ €}$ festgesetzt. Mit einer Händlermarge inkl. der Abdeckung der Vertriebstätigkeiten von 25% auf den VK_{ONYX} wurden somit Herstellungskosten von 4.483 € und eine Marge von 1.000 € plus 500 € für die Aftersales-Aktivitäten für die Standardvariante als Kalkulationsgrundlage und Entwicklungsvorgabe fixiert. Die 500 € für die Aftersales-Aktivitäten sollen bei Nichtausschöpfung in die Produkt- und Prozessoptimierung fließen, um bei entsprechender Marktnachfrage die Produktionszahlen steigern zu können. Der resultierende Businessplan für den Zeitraum 2017-2019 wird im Antrag für „Phase 3“ kommuniziert.

Pos.	Kostenrechnung ONYX E-Mobil "Preisschnapper; Basis > 200 Stk./Jahr"	
1.	Materialkosten ONYX Bauteile (GFK Monocoque & Heckverkleidung)	300 €
2.	Teilekosten Zukaufteile inkl. Akku 30km Reichweite	2.633 €
3.	Betriebliche Fixkosten pro Einheit	1.550 €
4.	Herstellungskosten Standard Variante "Preisschnapper"	4.483 €
5.	After-Sales-Kosten (Gewährleistungen, Optimierungen, Beratung...)	500 €
6.	Marge ONYX	1.000 €
7.	VK ONYX	5.983 €
8.	Händlermarge inkl. Vertriebskosten und Onlinemarketing= 25%	1.496 €
9.	Händlernettopreis	7.479 €
10.	MwSt.	1.421 €
11.	Verkaufspreis Endverbraucher inkl. 19% MwSt.	8.900 €

Abb. 75: Übersicht Kostenrechnung ONYX E-Mobil Standardvariante "Preisschnapper"

3.3.3 Vermarktungskonzept

Wie bei jedem Fahrzeug wird es auch beim ONYX E-Mobil eine Aufpreisliste geben, um das Fahrzeug individuell nach Kundenwunsch ausstatten zu können. Neben der Antriebstechnologie, den Türen- und Regenschutzvarianten, wird es auch eine Auswahl an farblichen Gestaltungsmöglichkeiten geben. Aktuell wird ein Online-Konfigurationssoftwarekonzept erarbeitet, welches die Ausstattungswahl online ermöglicht und als Output eine 3D-PDF Datei mit VK-Preis ausgibt. Auch interessierten Händler wird vorgegeben Bestellungen nur über das Online-System abzuwickeln, um die Auslastung- und Lagerhaltung ideal mit einem vernetzten ERP-System organisieren zu können. Des Weiteren ist es möglich durch diese Vorgehensweise die ersten Fahrzeuge direkt bzw. online zu vertreiben, um so die Mehrkosten beim Produktionsstart durch den Wegfall der Händlermarge zu kompensieren.



Abb. 76: Darstellung des Online-Konfigurationssoftwarekonzeptes inkl. Bestellsystem

Um alle Entwicklungsparameter (Umweltrelevanz, Fahrzeugmasse, Fahrzeugkosten) sowie die Variantenkonfiguration mit den Anforderungen an die spätere Serienfertigung zu verknüpfen, wurde als Vorläufer zum zukünftig geplanten ERP System eine Datenbank erstellt.

Mittels dieser Datenbank kann kontinuierlich der Projektfortschritt in Bezug auf die o.g. Zielparameter eingepflegt und überwacht werden. Somit sind die Entwicklungsfortschritte- und Ergebnisse objektiv bewertbar und die Herausforderungen zur jeweiligen Zielerreichung klar und Variantengenau definiert. Am Beispiel der Auswertungen des Modells „Preisschnapper“ in den Abb. 80 & 81 wird deutlich wie z.B. Die Einzelmassen- und Kosten dargestellt werden können und anschließend nach dem Paretoprinzip die entsprechenden „Treiber“ identifiziert werden können.

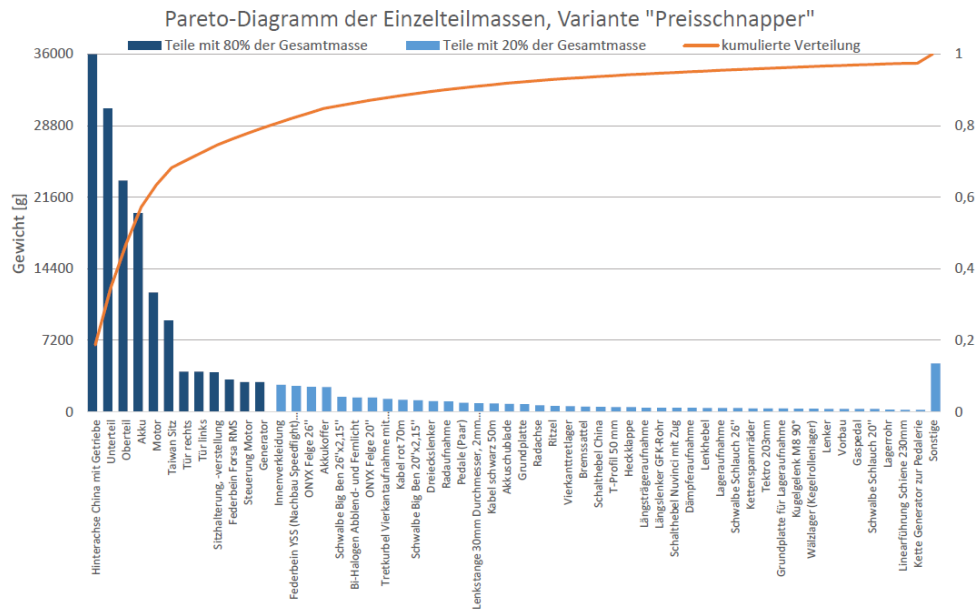


Abb. 77: Paretoauswertung der Bauteilbezogenen Massen der Variante Preisschnapper

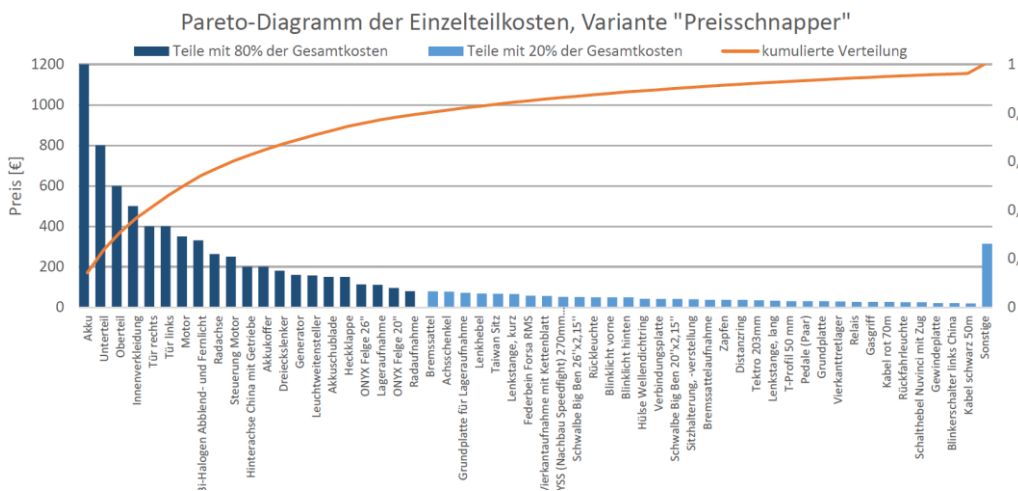


Abb. 78: Paretoauswertung der Bauteilbezogenen Kosten der Variante Preisschnapper

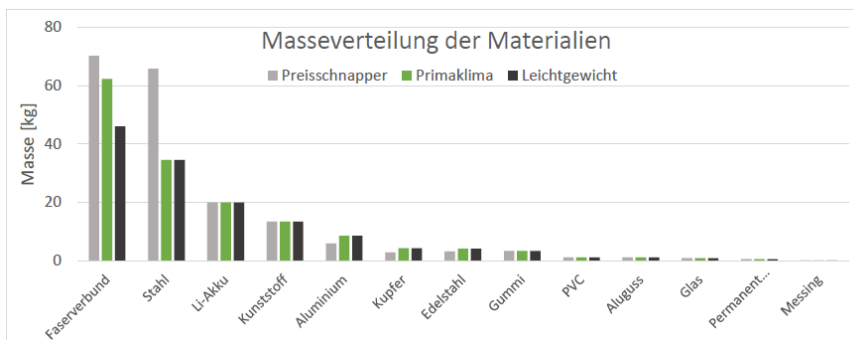


Abb. 79: Darstellung der Material-Massenverteilung in Bezug auf die 3 Monocoquevarianten

4 Fazit

Im DBU Förderprojekt Phase 2-„Weiterentwicklung eines ultraleichten E-Mobils für den urbanen Einsatz“ mit dem Az. 30693-2 wurde von den Projektpartnern ein E-Mobilitäts-Konzeptfahrzeug weiter entwickelt. Dieses Fahrzeug wurde als Bindeglied zwischen der aktuellen PKW-Dominanz auf fossiler Energiebasis im urbanen Lebensraum und der zukünftigen überregionalen E-Mobilität aufbauend auf die Phase 1- Konzepte weiter ausgearbeitet.

Die im Projektplan (siehe Anhang 6.1) kommunizierten Vorhabensziele wurden größtenteils erreicht und anschaulich sowie nachvollziehbar durch die Formulierung und Überprüfung der bewertbaren Zielparameter „Umweltrelevanz“, „Technische Umsetzbarkeit“, „Marktrelevanz“ und „Wirtschaftliches Potential“ dokumentiert.

Der übergeordnete Zielparameter hinsichtlich der Umweltrelevanz ist der zu Projektbeginn formulierte „Nutzlastfaktor“ von 1,5 (Verhältnis Nutzlast zu Eigengewicht des Fahrzeuges), welcher durch das Potential des Leichtbaus mit Faserverbundwerkstoffen und des Ansatzes eines Minimalfahrzeuges zumindest durch die CFK- Monocoque-Variante technisch möglich ist.

Jedoch wird durch die Verwendung z.B. hochpreisiger CFK- Werkstoffe, oder ultraleichter Akku-Zellen und Antriebseinheiten das wirtschaftliche Potential stark eingeschränkt und somit parallel auch die Umweltrelevanz negativ beeinflusst. Denn nur über die Anzahl der substituierten Verbrennungs-PKW im urbanen Lebensraum können die anvisierten Ressourcen- und Energieeinsparungen dargestellt werden.

Will man mit diesem Projekt einen signifikanten Hebel zur Umweltrelevanz in Bewegung setzen, geht dies allein über den preiswerten Einstieg, welcher auf Basis der Untersuchungen nur durch den Einsatz von GFK-Werkstoffen und der Verwendung von Standardbauteilen z.B. für die Antriebseinheit (Beispiel: Rikscha-Antriebslösung) möglich ist. Dieser Kompromiss lässt das Fahrzeuggewicht anwachsen, womit nur noch ein Nutzlastfaktor von ca. 1,1-1,2 möglich ist, aber über die günstigeren Bauweise kann das dargestellte Marktpotential im Preissegment <10.000 € besser ausgeschöpft werden kann.

Nimmt man die Erkenntnisse der Ökobilanzierung hinzu, dass die Energieeinsparungen zu aktuellen E-Mobil-Kleinwagen durch die teilweise 5-fach geringere Masse bis zu 80% ergeben, ist es nachvollziehbar und logisch, die vielversprechende GFK-Variante weiter zu verfolgen.

Somit wird empfohlen das GFK-Fahrzeugkonzept „Preisschnapper“ nun hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit weiter zu optimieren und im Rahmen eines zulassungsfähigen Prototyps die technische Machbarkeit endgültig real umzusetzen und im Rahmen der fertigungsgerechten Detailkonstruktion den Weg zum „echten“ Prototyp zu ebnen.

Nur über diesen Prototyp basieren auf der Composite-Monocoquebauweise, mit der einmaligen Energieeffizienz und dem sowohl hervorstechendem aber auch individuellen Design kann der Weg für eine Marktdurchdringung bereitet werden. Denn es gilt, den zukünftigen und sehr kritischen Kunden und jetzigen Klein-PKW-Nutzer das hier entwickelte Fahrzeugkonzept erfahrbar zu präsentieren und somit Überzeugungsarbeit in den Köpfen zum aktuellen urbanen Mobilitätverhalten zu leisten.

5 Literaturverzeichnis

- [Ste14] Steinbach, M.: Statistik: *Zahlen, Daten & Fakten Elektromobilität*. 1. Version, Erstellt von: Steinbach Engineering, 2014
- [Jue14] Jürgens, F. Masterthesis. *Ökologische Bewertung von Bauteilen im Automotive-Bereich am Beispiel einer Heckklappe aus Biowerkstoffen*. Hannover, 04.07.2014
- [Moe14] Möckesch, R. Bachelorarbeit. *Hanffaserverstärkte Kunststoffe als ökonomische und ökologische Alternative für Strukturbauteile in der Faserverbundindustrie*. Münster: FH Münster, 19.08.2014
- [Lan15] Langenberg, J. Wissenschaftliches Praxisprojekt an der Frankfurt University of Applied Sciences im FB2: Informatik und Ingenieurwissenschaften, Studiengang Maschinenbau: *Digitale Mock up-Generierung zur Bauraum- und Strukturanalyse eines ultraleichten E-Mobils und Ökobilanzierung für drei Monocoque-Varianten aus FVK*. Frankfurt, 10.06.2015
- [Alt10] Althaus, & Gauch. *Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen*. Dübendorf: Empa, 2010

6.2 Protokollbeispiel einer 10 km-Testfahrt mit dem AGT

Fahrt Nr.	Reifendruck [bar]	Gewicht Personen	Gewicht Fahrzeug	Gesamtgewicht [kg]	Geschwindigkeit [km/h]	Strecke [km]	Energiestand davor danach	verbrauche Energie [Wh]	verbrauchte Energie auf 1km [Wh]	verbrauchte Energie auf 40km [Wh]	
1	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2514 2574	60	64,5	2580,6	
2	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2574 2628	54	58,1	2322,6	
3	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2628 2680	52	55,9	2236,6	
4	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2680 2728	48	51,6	2064,5	
5	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2728 2778	50	53,8	2150,5	
6	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2778 2824	46	49,5	1978,5	
7	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2824 2869	45	48,4	1935,5	
8	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2869 2913	44	47,3	1892,5	
9	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2913 2960	47	50,5	2021,5	
10	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	2960 3004	44	47,3	1892,5	
11	4x 3bar	150	212	362	25-30	0,93	3004 3060	56	60,2	2408,6	
						Summe:	10,23		546	53,4	2134,9
*es wurde Energieeffizient gefahren: vor den Kurven ausgerollt und nicht mit voller Leistung beschleunigt											