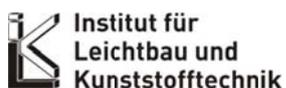


Schlussbericht Nr.: 1/A278/15

SCHLÜSSELTECHNOLOGIEN FÜR DIE NÄCHSTE GENERATION DER ELEKTRO-FAHRZEUGE „E-GENERATION“

Teilvorhaben: Leichtbau und Klimatisierung



Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. Werner Hufenbach (ILK)

**Projektteam: Prof. Dr.-Ing. C. Felsmann (IET)
Dr.-Ing. R. Böhm; Dr.-Ing. F. Adam (ILK)
Dr.-Ing. M. Knorr (IET)
Dipl.-Ing. A. Liebsch; Dipl.-Ing. T. Weber (ILK)
Dipl.-Ing. J. Luft; Dr.-Ing. M. Andrich (ILK)
Dipl.-Ing. M. Kutzt (ILK)**

Projektnummer / 16N11872

Förderkennzeichen:

Seiten: 85

Abbildungen: 61

Tabellen: 9

Anlagen: -

Datum: 06/2015

Förderungszeitraum: 01.01.2012 - 31.12.2014

Schlussbericht zum Verbundprojekt „e-generation“

Zuwendungsempfänger:	TU Dresden <ul style="list-style-type: none">- Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik- Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung
Förderkennzeichen:	16N11872
Vorhabensbezeichnung:	Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Elektrofahrzeuge „e-generation“, Teilvorhaben Leichtbau und Klimatisierung
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2012 - 31.12.2014

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Der aufgrund der hohen gegebenen Leichtbaugrade für E-Fahrzeuge besonders interessante Einsatz von Faser-Verbund-Kunststoffen birgt bei sicherheitsrelevanten Strukturen in Fahrwerk und Karosserie besondere Herausforderungen: Für den Einsatz in hochbelasteten Strukturen, wie z.B. Fahrwerks- oder Crashbauteilen muss zunächst eine grundlegende Methodik zur Schadensprädiktion und Bewertung entwickelt werden, um einen Serieneinsatz darstellen zu können. Eine Bewertung mittels Simulation und Berechnung muss dabei, je nach Anwendungsfall, sowohl hinsichtlich der Betriebsfestigkeit im Fahrzeuglebenszyklus (Fahrwerk) als auch hinsichtlich der Strukturfestigkeit, des Verformungsverhaltens und Versagens im Crash-Lastfall (Karosserie) möglich sein. Des Weiteren sollen die Fertigungsprozesse für thermoplastische endlosfaserverstärkte Kunststoffe für zukünftige kosteneffiziente Großserienanwendungen weiterentwickelt werden.

Bei den spezifischen Anforderungen hinsichtlich des statischen und hochdynamischen Strukturverhaltens ist kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) mit duroplastischer Matrix durch seine Sprödigkeit, die langen derzeit noch nicht großserientauglichen Fertigungsprozesse sowie die hohen Materialkosten für biegebelastete, im Crash plastisch deformierende Bauteile weniger geeignet. Demgegenüber zeichnen sich beispielsweise Organobleche (Gewebe mit thermoplastischer Matrix, meist mit Glasfaser) ebenfalls durch höchste spezifische Festigkeiten, aber gleichzeitig sehr hohe Schlagzähigkeit, gutmütiges Versagensverhalten und hohes elastisches Energieaufnahmevermögen aus bei zugleich vergleichsweise niedrigen Fertigungskosten. Hybride Bauweisen, bei denen Organobleche mit Metall (z. B. Stahl) oder Kunststoff (z. B. LFT-Spritzguss oder -pressen) kombiniert werden, versprechen großes Leichtbaupotenzial mit hoher Funktionsintegration (akustische Abschottung, Wärmedämmung, elektrische Isolierung, NVH, ...) bei gleichzeitiger Verbesserung der Crashesicherheit.

Im Teilprojekt Leichtbau sollen aufbauend auf der Grundlagenarbeit zur methodischen Gestaltung neuer Leichtbau-Fahrzeugkonzepte (AP 7.1) die Methodenentwicklung zur simulativen Bewertung und Vorhersage des Strukturverhaltens faserverstärkter Thermoplaste und deren wirtschaftliche Umsetzung in hoch belasteten Karosserie- (AP 7.2) und Fahrwerksstrukturen (AP 7.3) untersucht werden. Die folgenden drei Arbeitspakete setzen diese Ziele durch Transfers wissenschaftlicher Erkenntnisse in den Industrieinsatz um.

Die Abbildung 2 zeigt schematisch die Vernetzung der Arbeitsziele zum Erreichen der Hauptziele „Reduktion des Energiebedarfs“ und Reduktion der Kosten für ein Elektrofahrzeug.

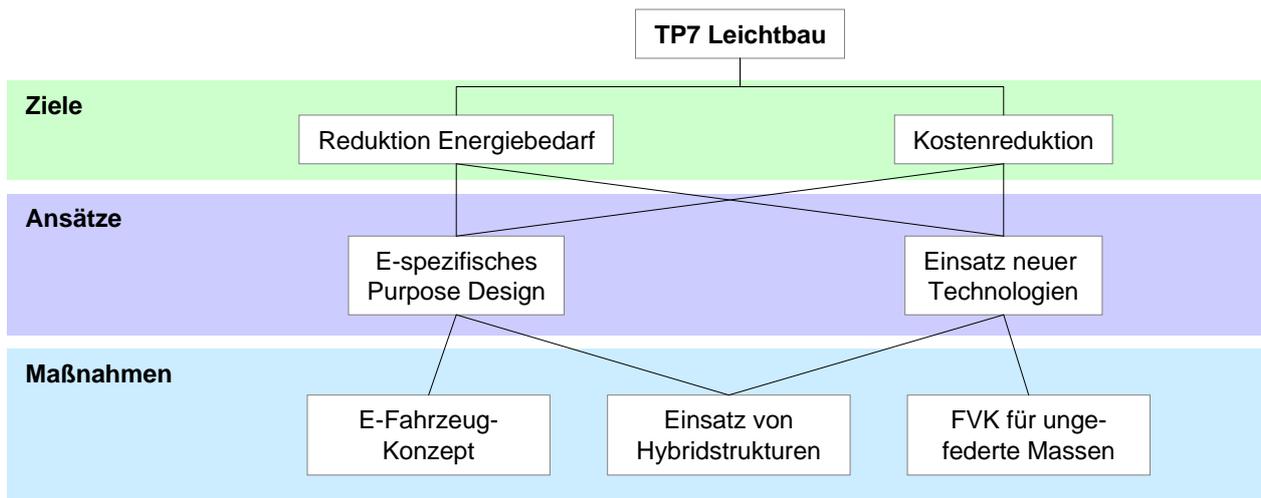


Abbildung 2: Lösungskonzept Leichtbau

AP 7.1 Konzeptleichtbau im Gesamtfahrzeug

Im Arbeitspaket 7.1 sollen, ausgehend von einem parallel bei der Porsche AG im Aufbau befindlichen Methodenbaukasten zur Fahrzeugkonzeption, die grundlegenden Zusammenhänge zwischen elektrischem Antriebskonzept, Fahrzeugkonzept und masseabhängigen Fahrzeugeigenschaften analysiert und methodisch nutzbar gemacht werden. Hierfür sollen zunächst die gegenüber konventionellen Antrieben differenzierten Anforderungen des Elektroantriebs an das grundlegende Fahrzeugkonzept erfasst und beschrieben werden. Ziel ist die Identifikation der maßgeblichen Stellhebel zur Beeinflussung des Systemgewichts Elektroantrieb und davon abhängigen Sekundärmaßnahmen. Darauf basierend sollen im Rahmen des Teilprojektes exemplarisch ein E-spezifisches Purpose-Design entwickelt werden, dass eine Integration des Elektroantriebs als ganzheitliches Optimum im Sinne des Leichtbaus ermöglicht. Neben dem im Gesamtprojekt betrachteten Fahrzeug Porsche Boxster sollen darüber hinaus auch zukünftige elektromobile Nutzungsprofile einbezogen werden. Im Hinblick auf die zukünftig steigende Bedeutung des Elektroantriebs ist es darüber hinaus erforderlich, die Bestandteile des Gesamtsystems E-Fahrzeug auf weitere Optimierungspotenziale hin zu untersuchen.

AP 7.2 Integrative Sicherheitsstrukturen zum Batterie- und Insassenschutz bei E-Fahrzeugen

Durch eine Analyse der auslegungsrelevanten Crashlastfälle soll in enger Abstimmung mit TP 0 und AP 7.1 der Handlungsbedarf im Bereich der passiven Sicherheit ermittelt werden, der sich

durch das Mehrgewicht des Elektroantriebs gegenüber einem konventionellen Antrieb ergibt. Dabei sollen sowohl die Intrusionen und Belastungen der Insassen als auch die spezifischen Anforderungen an den Schutz der Batterie berücksichtigt werden. Insbesondere das Mehrgewicht der Batterie wird die Karosseriestruktur stärker belasten als bei einem konventionell angetriebenen Fahrzeug. Aufbauend auf diesen elektromobilitätsspezifischen Analyseergebnissen soll ein Bauteil bzw. eine Baugruppe der Karosserie ausgewählt werden, und ein Konzept zur modularen Substitution durch eine neuartige hybride Multi-Material-Leichtbaustruktur mit textilverstärkten thermoplastischen Kunststoffen erarbeitet werden. Durch diese neuartige, elektromobilitätsspezifische Sicherheitsstruktur soll das Strukturverhalten des E-Fahrzeugs im Crash signifikant verbessert werden. Dank dieser integrativen Sicherheitsstruktur in Hybridbauweise, die zielgerichtet die Vorteile unterschiedlicher Werkstoffe miteinander kombiniert, soll trotz erhöhter Lastanforderungen das Gewicht der entsprechenden Rohbau-Komponenten reduziert werden.

Durch intensive Grundlagenuntersuchungen zu reproduzierbaren Fertigungstechniken mit kurzen Zykluszeiten und die Entwicklung geeigneter Simulationsmethoden zur rechnerischen Vorhersage des Strukturverhaltens der neuartigen Leichtbaustruktur im Crash wird der Grundstein zur industriellen Anwendbarkeit für zukünftige Elektrofahrzeuge gelegt.

Aufbauend auf dem erarbeiteten Leichtbaukonzept soll die neuartige Sicherheitsstruktur mit Hilfe der in den Grundlagenuntersuchungen erarbeiteten Fertigungsrichtlinien und Simulationsmethoden auf die auslegungsrelevanten Lastfälle hin optimiert und detailliert ausgearbeitet werden. Schließlich sollen im Rahmen von Fertigungsstudien Demonstratorbauteile der neuartigen Sicherheitsstruktur hergestellt, in Komponentenversuchen validiert und in Abstimmung mit TP0 in das e-generation Fahrzeug implementiert werden.

AP 7.3 Reduzierung der ungefederten Massen

Mit Hilfe von Faserverbund-Strukturen sollen bisher unerschlossene Leichtbaupotenziale im Bereich der ungefederten Massen erschlossen werden. Für den sicheren Kundenbetrieb sollen hierzu das Schädigungs- und Degradationsverhalten erforscht und schadenstolerante Konstruktionen entwickelt werden. Mit den beschriebenen Maßnahmen wird das konkrete Ziel verfolgt, im Radmodul (Federbein, Radträger, Bremse und Rad) gegenüber der ersten Generation (Boxster E) weitere Gewichtspotenziale von 20 %, d.h. -26 kg, bei gleichzeitiger Kostenreduzierung um 50 % zu realisieren. Eine dabei berücksichtigte Neudimensionierung der Bremsanlage ist Bestandteil des Teilprojekts 6, da dort die ganzheitliche Betrachtung des Bremssystems erfolgt.

AP 5.1 Reduktion Energieverbrauch

Die Beiträge der TU Dresden zur Fahrzeugklimatisierung konzentrieren sich auf das Arbeitspaket 5.1. Die Analyse von Maßnahmen aus dem Niedrigenergiehaus-, Passivhaus- und Nullenergiehaus soll bauphysikalische Möglichkeiten zur Reduzierung des Energiebedarfs und effizienter Methoden zum Heizen und Kühlen aufzeigen, die für eine Fahrzeugkabine als Vorlage dienen und in geeigneter Weise übernommen werden können. Außerdem wird eine situationsabhängige Energiebedarfs- und Angebotsanalyse durchgeführt. Daraus lässt sich ein Maßnahmenkatalog ableiten. Durch Ersatzversuche können fehlende Daten ergänzt bzw. in Vorversuchen die Effizienz der vorgeschlagenen Methoden bewertet werden. Alle Daten fließen in ein Simulationsmodell für die Fahrzeug-

kabine ein, das mit verschiedenen Abstraktionsstufen Langzeit- und Kurzzeitprognosen für den Klimatisierungsbedarf und den dafür erforderlichen energetischen Aufwendungen liefern kann. Unter Nutzung der Daten der benachbarten Teilprojekte wird ein Gesamtkonzept zur Klimatisierung abgeleitet.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) liegen langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der beanspruchungsgerechten Konstruktion, Auslegung und Fertigung von Mehrschicht- und Textilverbunden für komplexe Rahmen- und Flächentragwerke vor [[1]-[6]]. So sind etwa bei industriennahen Forschungsvorhaben Pkw-Anbauteile in Verbundbauweise (Haube, Heckklappe, Dach), die Tragstruktur eines Faserverbund-Leichtbau-Fahrkorbes, kohlenstofffaserverstärkte Getriebegehäuse für Hochleistungsantriebe und ein Leichtbauaktuator für Luftfahrtanwendungen konstruiert, simuliert, gefertigt und erfolgreich erprobt worden [[7]-[10]].

Für die konstruktive Auslegung faserverstärkter Leichtbaustrukturen wurden am ILK erweiterte analytische und numerische Methoden zur Berechnung von Mehrschichtsystemen aus anisotropen Einzellagen entwickelt, die den Entwurfsprozess stark beschleunigen [[11]-[13]]. Für die Untersuchung zusätzlicher konstruktiver Besonderheiten wie z. B. der werkstoffmechanischen Kompatibilität unterschiedlicher Materialkomponenten bei Hybridstrukturen sowie der konstruktiven Ausführung von Krafeinleitungsbereichen und Kerbausschnitten stehen eigens entwickelte problemspezifische analytische und numerische (FE-) Berechnungskonzepte zur Verfügung [[14],[15]].

Darüber hinaus beschäftigt sich das ILK langjährig mit der Detektion von Defekten und Schädigungen in Faser- bzw. Textilverbundstrukturen und deren Einfluss auf das Tragverhalten [[16]-[18]].

Textilverstärkte Thermoplastverbundstrukturen aus Hybridgarnen waren Gegenstand von Forschungsprojekten der DFG-Forschergruppe 278 „Textile Verstärkungen für Hochleistungsrotoren in komplexen Anwendungen“ und werden weiterführend im SFB 639 „Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen“ behandelt [[1],[14]]. Im Rahmen eines angeschlossenen Transferbereichs werden die im SFB gewonnenen Erkenntnisse exemplarisch direkt in seriengerechte Technologiedemonstratoren umgesetzt. Ein sehr erfolgreiches Beispiel hierfür ist eine Pkw-Sitzschale, bei der durch gezielte Kombination von endlos- und langfaserverstärktem Polypropylen die Tragfähigkeit der Serien-Stahl-Variante bei halber Bauteilmasse und gleichem Kostenniveau erreicht wurde [19].

In Bezug auf Teilprojekt 5 sind einerseits die Arbeiten zu nennen, die sich mit der Optimierung von heizungs- und raumluftechnischen Anlagen beschäftigen. Dabei spielen die Wärmeübergabe im Innenraum und die Regelung eine besondere Rolle. Zu beiden Forschungsgebieten sind zahlreiche Studien angefertigt und Forschungsprojekte bearbeitet worden, exemplarisch sei auf [20], [21], [22] verwiesen. Andererseits ist das letztendliche Ziel, die thermische Behaglichkeit bei verschiedenen anlagentechnischen Konfigurationen und Randbedingungen zu sichern. Einen sehr guten Überblick zu den Aktivitäten in diesem Bereich liefert [23] für den Heizfall und [24] für den Kühlfall.

Um effektiv und gezielt den Aufenthaltsbereich der Nutzer von Innenräumen mit frischer Luft zu versorgen, ist die Kenntnis der Lüftungseffektivität notwendig. Speziell für den instationären Fall wurde dazu eine Theorie und ein Berechnungsverfahren entwickelt, siehe z. B. [25].

Viele der aufgeführten Forschungsarbeiten sind mittels Kombination von Messungen und Simulationen durchgeführt worden. Der Schwerpunkt lag dabei oft auf der Anwendung von Gebäude- und Anlagensimulation, teilweise auch gekoppelt mit Strömungsberechnungen für verschiedene Innenräume. Auf diese Weise lassen sich sehr realistische Szenarien des Zusammenspiels von baulicher Hülle, technischer Anlage und Raumluftrömung analysieren bzw. vorhersagen, wie beispielsweise in [26] angegeben. Zusammen mit Partnern sind aber auch mathematische Details der Berechnung von Innenraumströmungen in den Blick genommen worden, siehe z. B. [27].

Ein besonderes Augenmerk wurde darauf gerichtet, das Zusammenspiel aller Komponenten als Gesamtsystem zu bewerten. Von den zahlreichen Veröffentlichungen sei hier nur [28] angeführt.

Literatur:

- [1] Hufenbach, W.; Böhm, R.; Kroll, L.; Czulak, A.: Braided composite pipe elements for applications in chemical apparatus engineering. 15th International Conference on Composite Materials (ICCM-15), Durban, 27. Juni - 1. Juli 2005, (auf CDROM)
- [2] Hufenbach, W.; Gude, M.; Ebert, Chr.: Hybrid 3D-textile reinforced composites with tailored property profiles for crash and impact applications. 12th European Conference on Composite Materials (ECCM-12), 29. August - 01. September 2006, Biarritz, (auf CD-ROM)
- [3] Hufenbach, W.; Adam, F.; Helms, O.; Ulbricht, A.: Verbindungssysteme für Leichtbaustrukturen aus endlosfaserverstärkten Thermoplasten. 13. Paderborner Symposium Fügetechnik, Paderborn, 29. - 30. November 2006, S. 143-153
- [4] Adam, F.: Zum anisotropen Strukturverhalten mehrschichtiger Flächenverbunde als Leichtbautragwerke. Dissertation: Technische Universität Dresden, 1999
- [5] Grüber, B.: Beitrag zur Strukturanalyse anisotroper Schichtverbunde mit elastischen Einschlüssen und Bolzen. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2004
- [6] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.; Helms, O.; Ulbricht, A.; Grothaus, R.: Integrative Rohrgewinde in Wickeltechnik für hochbeanspruchte Verbindungen bei Leichtbaustrukturen. VDI-Berichte, (2005), Nr. 1903, S. 301-316
- [7] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.; Helms, O.; Seung, T.: Beanspruchungsgerechte Krafteinleitungen für Luftfahrt-Hydraulikaktuatoren in Faserverbund-Leichtbauweise. Konstruktion, (2006), H.3, S. 71-74
- [8] Hufenbach, W., Kroll, L.; Helms, O.: Leichtbaustrukturen in Mischbauweise. Kunststoffe, 94 (2004) 10, S. 296-299
- [9] Gude, M.; Hufenbach, W.: Leichtbau in der Aufzugstechnik - Der textile Fahrkorb. Tagungsband 10. Dresdner Leichtbausymposium, 22. - 24. Juni 2006.

- [10] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.: Residual stresses and deformation behaviour of un-symmetric composites. Proceedings of the International Conference „Engineering Polymers and Composites“, Ustron (Polen), 6.-9. Oktober 1998, Bd. II, S. 185-192
- [11] Hufenbach, W.; Zhou, B.: Solutions for an anisotropic, finite plate with an elastic inclusion and a loaded boundary. Composite Structures 52 (2001) 2, S. 161-166
- [12] Koch, I.: Modellierung des Ermüdungsverhaltens textilverstärkter Kunststoffe. Dissertation: Technische Universität Dresden, 2010
- [13] Ebert, C. : Werkstoffmechanische Modellierung von textilverstärkten Thermoplastverbunden unter hochdynamischer Beanspruchung. Dissertation: Technische Universität Dresden, 2010
- [14] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.; Langkamp, A.: Design and failure analysis of multi-stable textile reinforced lightweight structures. Proceedings of the European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing, Toulouse, 11.- 13. Dezember 2002 (auf CD-ROM)
- [15] Hufenbach, W.; Gude, M.; Ebert, Chr.: Hybrid 3D-textile reinforced composites with tailored property profiles for crash and impact applications. 12th European Conference on Composite Materials (ECCM-12), Biarritz, 29.08.-01.09.2006 (auf CD-ROM)
- [16] Hufenbach, W.; Gude, M.; Langkamp, A.; Andrich, M.: Failure Behaviour of Textile Reinforced Composites under Dynamic Loading ECCM-11, 31. Mai - 03. Juni 2004 (auf CD-ROM)
- [17] Hufenbach, W.; Gude, M.; Ebert, Chr.; Langkamp, A.: Analysis of the failure behaviour of 3D-textile reinforced composites under crash and impact loads. 15th International Conference on Composite Materials (ICCM 15), 27.06.-01.07.2005, Durban, South Africa (auf CD-ROM)
- [18] Böhm, R. : Bruchmodebezogene Beschreibung des Degradationsverhaltens textilverstärkter Verbundwerkstoffe. Dissertation: Technische Universität Dresden, 2008
- [19] Hufenbach, W.; Modler, N.; Krahl, M.; Hornig, A.; Ferkel, H.; Kurz, H.; Ehleben, M.: Leichtbausitzschalen im Serientakt - Integrales Bauweisenkonzept. Kunststoffe 100 (2010) 5, S. 56-59
- [20] Richter, W., Seifert, J.: Zur Anordnung von freien Heizflächen in Gebäuden mit höherem Wärmeschutzniveau - Eine Analyse aus wärmephysiologischer und energetischer Sicht. Universitätsjournal der TU Dresden, 2007
- [21] Seifert, J., Richter, W., Guzek, G.: Raumtemperaturregelkreis - Regeleinrichtungen für heizungstechnische Anlagen. EuroHeat&Power, 04/2008
- [22] Felsmann, C., Henze, G. P., May-Ostendorp, P., Corbin, C. D.: Regelalgorithmen für Mixed-Mode-Gebäude. Gesundheitsingenieur 131 (2010) Heft 4
- [23] Richter, W.: Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Heizperiode; Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden 2003, ISBN 3-86509-013-3

- [24] Richter, W.: Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Sommerlicher Kühlbetrieb, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden 2007, ISBN 978-3-88261-068-0
- [25] Gritzki, R., Rösler, M., Richter, W.: Vorhersage und Analyse natürlicher Lüftungsvorgänge. Bauphysik 29 (2007), 21-26
- [26] Gritzki, R., Perschk, A., Richter, W., Rösler, M.: Gekoppelte Simulation zur Spezifikation von Heiz- und Kühlkörpern. Bauphysik 31 (2009), 51-55
- [27] Lube, G., Knopp, T., Rapin, G., Gritzki, R., Rösler, M.: Stabilized finite element methods to predict ventilation efficiency and thermal comfort in buildings, Int. J. Numer. Meth. Fluids 2008; 57:1269–1290
- [28] Felsmann, C., Seifert, J., u. a.: Ganzheitlicher energetischer Vergleich von Heizungsanlagen für NEH. TU Dresden – Forschungsbericht im Auftrag des BMWi, PT Jülich, 2005.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Folgenden werden die Abschnitte des Arbeitsplans der TU Dresden beschrieben, die zum Erreichen der Projektziele notwendig waren.

Tabelle 1: Planung der Teilarbeitspakete

AP	Thema	Aufwand	
		Mannmonate	Sachkosten [T€]
AP 5.1 Reduktion des Energieverbrauches		24	85
5.1.1	Theoretische Vorbetrachtungen <ul style="list-style-type: none"> • Analyse der Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs in der Architektur (insbes. der Entwicklung von Niedrigenergiehäusern) und Ableitung der Übertragbarkeit auf elektrische Fahrzeuge • Theoretische Ausarbeitung eines Maßnahmenkatalogs zur Effizienzsteigerung und Bedarfsreduktion • Abbildung des Fahrzeuginnenraums, der Karosserie sowie des Heiz- und Kältemittelkreislaufs in einer thermischen Simulationsumgebung zur Einbindung in die Energiemanagementsimulation des 	14,5	0,0

5.1.3	<p>Hardwareaufbau + Erprobung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Überprüfung und Optimierung der in AP 5.1.1 definierten Maßnahmen in Komponenten-Ersatzversuchen (Hardware) und in einem Dummy-Fahrzeug • Ableitung eines Gesamtkonzeptes unter Beachtung des Gesamtfahrzeugpackage • Abgleich der Simulationsergebnisse aus AP 5.1.1 mit den realen Messwerten 	9,5	85
AP 7.1 Konzeptioneller Leichtbau		0	0,0
7.1.6	<p>Handlungsfelder für die Zukunft</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung der Projektpartner bei der Entwicklung einer Methodik zur Identifikation von zu entwickelnden Technologien, die eine Konzeptänderung ermöglichen • exemplarische Validierung der Wirksamkeit der erarbeiteten Handlungsfelder anhand Demonstrator-Bauteile im Rahmen des Teilprojekts 	0	0,0
AP 7.2 Integrative Sicherheitsstrukturen zum Batterie- und Insassenschutz bei E-Fahrzeugen		121	502,4
7.2.2	<p>Grundlagenuntersuchungen zu funktionsintegrativen Sicherheitsstrukturen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von Fertigungsprozessketten mit kurzen Zykluszeiten für endlosfaserverstärkte Thermoplaste • Gezielte Beeinflussung des Stoffschlusses bei Hybridstrukturen aus endlos- und kurzfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoff mit metallischen Verstärkungen • Erstellung geeigneter Materialmodelle zur Crash-Berechnung thermoplastischer Strukturbauteile mit Endlosfaserverstärkung (Fokus: Dehnrateneinfluss, Nachbruchverhalten): Anwendung in AP 7.2.6 	47,0	92,8

7.2.3	<p>Konzeptentwicklung einer elektromobilitätsspezifischen Sicherheitsstruktur</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mitwirkung bei der Entwicklung eines Konzepts zur Funktion und Grobgeometrie der neuartigen, elektromobilitätsspezifischen Sicherheitsstruktur • Entwicklung und Bereitstellung experimentell abgesicherter Verbindungs- und Krafteinleitungskonzepte für Hybridbauteile 	2,25	29,0
7.2.5	<p>Konstruktive Auslegung der neuartigen, elektromobilitätsspezifischen Sicherheitsstruktur in Form eines Demonstrator-Bauteils</p> <ul style="list-style-type: none"> • Konstruktive Gestaltung bezüglich der Hauptlastfälle in enger, iterativer Abstimmung mit AP 7.2.6 • Detaillierte Konstruktion unter Berücksichtigung einer maximalen Funktions- und Teileintegration sowie Integration in die umgebende Karosseriestruktur • Fertigungsgerechte Detailkonstruktion 	5,25	0,0
7.2.6	<p>Simulation der neuartigen, elektromobilitätsspezifischen Sicherheitsstruktur in Form eines Demonstrator-Bauteils</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mitwirkung bei der Implementierung von Materialkarten aus AP 7.2.2 zur Crash- und Steifigkeitsberechnung der Sicherheitsstruktur unter Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit, der Anisotropie und des Schädigungs- und Versagensverhaltens bei Crash • Mitwirkung bei der Berechnung der neuartigen, elektromobilitätsspezifischen Sicherheitsstruktur als Einzelkomponente 	9,0	2,1

7.2.7	<p>Aufbau der Prozesskette und Fertigungsstudien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Konzeption der Fertigungsstrecke und des Werkzeugsystems • Erarbeitung notwendiger Funktionalitäten des Werkzeugsystems (Temperierungskonzepte, Prozessparameterfenster, ...) • Beauftragung zur Konstruktion und Fertigung des Werkzeugsystems • Aufbau der Prozessstrecke • Fertigungsstudien mit dem Ziel einer kostengünstigen Umsetzung für mittlere und große Stückzahlen (Prozessparameteroptimierung) • Fertigung der neuartigen, elektromobilitätsspezifischen Demonstratorbauteilen der Sicherheitsstrukturen 	31,5	320,9
7.2.8	<p>Experimentelle Untersuchungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Quasistatische und hochdynamische Versuche an Einzelkomponenten der elektromobilitätsspezifischen Sicherheitsstrukturen • Auswertung der experimentellen Untersuchungen und Validierung der Simulationsmethoden 	26,0	57,5
AP 7.3 Reduzierung der ungefederten Massen		118	505,0
7.3.1	<p>Entwicklung schadenstoleranter Bauteilkonzepte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von werkstofflich-konstruktiven Konzepten zur Gewährleistung einer hohen Schadenstoleranz bei Fahrwerkskomponenten anhand eines Lastenheftes inkl. Inserteinbettung z.B. Radlager, Schrumpfung, Quellverhalten usw. • Auswahl eines geeigneten Materialsystems zur Gewährleistung der mechanischen, medialen und thermischen Anforderungen auf Basis grundlegender experimenteller und analytischer Untersuchungen 	5,4	0,0

7.3.2	<p>Prinzipuntersuchungen an Prüfkörpern</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fertigung von bauteilnahen Probekörpern • Grundlegende Untersuchungen zu den Schädigungsmechanismen infolge praxisrelevanter Schädigungen (homogene Schädigung: Ermüdung; inhomogene Schädigung: z.B. Steinerschlag) • Entwicklung von Schadensüberwachungsmethoden und Schädigungsanalysen mittels Prüftechnik für Prüfung in der Produktion/Prozess und im Service/Wartung/Werkstatt 	38,8	334,6
7.3.3	<p>Modellierung des Schädigungsverhaltens</p> <ul style="list-style-type: none"> • Adaption und Verfeinerung von numerischen Methoden zur verbundangepassten Schadensprädiktion • Erarbeitung von Schädigungsmodellen 	33,0	1,2
7.3.4	<p>Konstruktion, Prozessauslegung, Fertigung- und Bauteilprüfung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Konstruktive Auslegung und numerische Simulation der FVK-Strukturbauteile (Komponente FB-Radträgereinheit und Balgfeder) • Fertigungsgerechte Gestaltung der Faserverbundstrukturen • Wiss. Unterstützung bei der Prozessauslegung • Wiss. Unterstützung bei der Fertigung von FVK-Strukturbauteilen 	20,35	0,0
7.3.5	<p>Validierung der Berechnungsmodelle und Methoden sowie Funktionsnachweis des Gesamtsystems</p> <ul style="list-style-type: none"> • Validierung der konstruktiv-technologischen Konzepte mittels umfangreicher experimenteller Untersuchungen an den FVK-Strukturbauteilen • Experimentelle Validierung und Optimierung der modellbasierten Schädigungsrechnung • Mitwirkung bei der konstruktiven Optimierung und Fertigung von Zsb.-Federbeinmodulen unter Berücksichtigung der Ergebnisse zu den Schädigungsmechanismen und zur Schadensprädiktion 	15,0	169,2

7.3.6	Kostenanalyse <ul style="list-style-type: none">• Untersuchung und Kostenanalyse der presstechnischen Serienfertigung der FVK-Strukturbauteile, Identifikation von Kostentreibern	5,45	0,0
-------	--	------	-----

7.2.8	Experimentelle Untersuchungen	26,0	57,5			
7.3	Reduzierung der ungefederten Massen	118	505,0			
7.3.1	Entwicklung schadenstoleranter Bauteilkonzepte	5,4	0,0			
7.3.2	Prinzipuntersuchungen an Prüfkörpern	38,8	334,6			
7.3.3	Modellierung des Schädigungsverhaltens	33,0	1,2			
7.3.4	Konstruktion, Prozessauslegung, Fertigung- und Bauteilprüfung	20,35	0,0			
7.3.5	Validierung der Berechnungsmodelle und Methoden sowie Funktionsnachweis des Gesamtsystems	15,00	169,2			
7.3.6	Kostenanalyse	5,45	0,0			

Meilensteinplanung

Meilensteinplan

2011	2012				2013				2014		
4. Q	1. Q	2. Q	3. Q	4. Q	1. Q	2. Q	3. Q	4. Q	1. Q	2. Q	3. Q
			△ Ende Grundlagen- / Konzeptphase Teilprojekte			△ Abbruchmeilenstein: Ziel Effizienz durch Simulation bestätigt Ziel Kosten im Konzept bestätigt			△ Start Erprobung Funktions- erprober Ges. Fzg. Applikation Release 1 komplett		

Meilensteine Gesamtvorhaben

Ende Grundlagen- / Konzeptphase Teilprojekte

- Die unterschiedlichen Lösungswege für die einzelnen Komponenten und deren Zusammenarbeit im Gesamtfzg. sind untersucht und auf max. 2 reduziert.
- Das Lastenheft Gesamtfahrzeug beschreibt Funktionen, Bauräume, Gewichte für die Komponenten und das Packagekonzept des Aggregateträgers.
- Für das Thema Baukasten/Kostenreduktion ist ein Umsetzungskonzept erarbeitet.

Abbruchmeilenstein: Ziel Effizienz durch Simulation bestätigt, Ziel Kosten im Konzept bestätigt

- Neuer Fahrzyklus definiert, Simulationsmodell funktionsfähig
 - Komponenten und Gesamtfahrzeug simulationsfähig ausgearbeitet
- ⇒ Simulationsergebnisse lassen die Erfüllung der Effizienzziele zu Projektende erwarten.
- Matrix für Baukasten erarbeitet, für die einzelnen Komponenten sind Maßnahmen zur kostengünstigen Herstellung erarbeitet
- ⇒ Erste Abschätzungen der erwarteten Kostenreduktionen aus Baukasten und Komponenten-fertigung lassen die Erfüllung der Kostenziele zu Projektende erwarten.

Start Gesamtfahrzeug-Erprobung, Applikation Release 1 komplett

- Der Aggregateträger 1 ist fertig aufgebaut und grundsätzlich in Betrieb genommen.
- Die einzelnen Komponenten sind appliziert und arbeiten erwartungsgemäß zusammen.
- Für einen geregelten Versuchsbetrieb erforderliche Sicherheitsversuche (Dauerlauf, Abnahme Fahrwerksysteme etc.) sind bestanden.

Meilensteine Teilvorhaben

Meilenstein Ende Grundlagen-/Konzeptphase:

- Werkstoff ausgewählt
- Bauteil- und Fertigungskonzept definiert
- Maßnahmenkatalog Klimatisierung erstellt
- Vereinfachtes Simulationsmodell zur Klimatisierung abgeleitet, Eingangsdaten und Randbedingungen in Abstimmung mit neuem Fahrzyklus generiert

Abbruchmeilenstein:

Ziel Effizienz durch Simulation bestätigt

Ziel Kosten im Konzept bestätigt

- Bauteilsteifigkeit, -festigkeit und -gewicht simulativ bestätigt
- Erreichbarkeit Kostenziel bestätigt
- Verbessertes Klimatisierungskonzept Fahrzeugkabine durch Simulation bestätigt

Meilenstein Start Erprobung Funktionserprober Ges. Fzg. Applikation Release 1 komplett

- Bauteilsteifigkeit und -festigkeit durch Prüfstandsversuche bestätigt
- Bauteile für die Erprobung im Fahrzeug liegen vor
- Gesamtkonzept Klimatisierung mit Anlagentechnik abgestimmt und bestätigt

1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

Neuartige Multimaterial-Konzepte, bei denen die Eigenschaften und Vorteile der verschiedenen Werkstoffe beanspruchungs- und funktionsgerecht eingesetzt werden, versprechen einen entscheidenden Fortschritt in Richtung wirtschaftlicher Umsetzung.

Eine effiziente Konstruktion und Fertigung von Leichtbaustrukturen für unterschiedliche technische Anwendungen erfordert eine durchgängige methodische Vorgehensweise. Speziell für die Entwicklung von Leichtbau-Produkten aus Faserverbundwerkstoffen ist jedoch die bei isotropen, homogenen Materialien übliche serielle Festlegung von Gestalt und Herstellungstechnologie oft nicht zielführend. Denn bei Faserverbundstrukturen müssen sowohl die Werkstoff- als auch die Bauteilkonstruktion sowie die Gestaltung des Fertigungsprozesses synchron erfolgen, was eine parallel ausgerichtete und interaktive Vorgehensweise bei der Konstruktion erfordert [[29], [30]]. Hierfür ist ein hohes interdisziplinäres Know-how notwendig, das die gesamte Entstehungskette – vom Filament zum Bauteil – umfasst [[31], [32]].

Für den Bereich textiler Verbundwerkstoffe liegt jedoch der Fokus der bisherigen Forschungsaktivitäten auf Einzeluntersuchungen, die singuläre Problemfelder innerhalb der Wertschöpfungskette vom Textil über das Einzelbauteil zum funktionalen Gesamtsystem abhandeln [[33]-[36]]. So ist etwa auf dem Gebiet neuartiger textiler Verbundwerkstoffe in den vergangenen Jahren insbesondere die Weiterentwicklung der Herstellungsprozesse vorangetrieben worden [[37]-[43]]. Dies geschah jedoch vorrangig mit dem Ziel einer effizienteren Prozessgestaltung sowie einer Verbesserung der erreichbaren Bauteilqualität. In [[33], [44]] wird etwa ein Direktverfahren vorgestellt, das relativ hohe Materialdurchsätze aufgrund der direkten Verpressung von eingelegten Basistextilien und zugeführter Thermoplastschmelze zu Organoblechen erlaubt. Bei Klein- und Mittelserien bietet sich die Verwendung von Thermoplastfolien oder sogenannten Prepregformen an [[45]-[47]]. Diese Verfahren zur Herstellung von Organoblechen erzeugen ebene Halbzeuge mit hoher Qualität, die in anschließenden Prozessschritten wie Halbzeugaufheizung und -formgebung zu gekrümmten Bauteilen verpresst werden [48]. Demgegenüber entfällt in der Prozesskette des SFB 639 die Herstellung konsolidierter Halbzeuge, da hier endkonturnahe Textilien auf Basis thermoplastischer Hybridgarne verwendet und unmittelbar mittels Heißpressen zu Bauteilen verarbeitet werden [[49],[50]], wodurch eine im Vergleich zu klassischen Verfahren höhere Energieeffizienz des Herstellungsprozesses erreicht werden kann.

Die Fertigung von dickwandigen Faserverbundstrukturen erfolgt derzeit meist im Flugzeugbau und bei der Rotorblattfertigung von Windenergieanlagen. Branchenbedingt sind hier

deutlich geringere Stückzahlenszenarien im Gegensatz zu der hier angestrebten Stückzahl im Fahrzeugbau. Daher sind gängige Faserverbundtechnologien wie etwa das RTM- oder Autoklavverfahren nur bedingt übertragbar.

Die technologische Umsetzung der Multimaterialsysteme ist darüber hinaus gekennzeichnet durch eine Vielzahl von Fügestellen, die in den Materialkombinationen, den Wandstärkeverhältnissen, den Fügestellengeometrien und den thermisch-medialen Einsatzverhältnissen stark variieren. Insbesondere bei den artfremden Werkstoffpaarungen und großen Wandstärken sind grundlegende Fragestellungen zum statischen, zyklischen und hochdynamischen Tragverhalten sowie zur Schlussart und Lösbarkeit zu beantworten. Darüber hinaus sind aber auch Lösungskonzepte etwa bezüglich Wärmeausdehnungsverhalten, Korrosion und Reparatur zu erarbeiten.

Für die Erarbeitung textilverbundgerechter Bauweisen müssen die Erkenntnisse aus der Entwicklung werkstoffangepasster Fertigungs- und Fügeverfahren sowie Funktionalisierungsmethoden systematisch zusammengeführt und in Form von Konstruktionshinweisen aufbereitet werden. Erste Ansätze zur Ableitung derartiger allgemeingültiger Gestaltungsregeln für textilverstärkte Thermoplastverbunde finden sich in [51]. Weitere grundlegende Konstruktions- und Gestaltungshinweise für Faserverbundwerkstoffe beinhalten etwa die VDI-Richtlinie 2014, das HSB-Strukturhandbuch, das MIL-Handbuch sowie der Leitfaden des SPP 1123 [[52]-[56]]. In diesen Konstruktionsrichtlinien wird im Wesentlichen auf die Werkstoffgruppen der klassischen faserverstärkten sowie ausgewählter textilverstärkter Verbunde mit duromeren Matrixsystemen eingegangen. Für die neuartigen Thermoplastverbunde aus Hybridgarn sind erste Ansätze zur Entwicklung entsprechender Konstruktions- und Gestaltungshinweise durch das Teilprojekt D4 des SFB 639 erarbeitet worden [57].

Zahlreiche Firmen, wie zum Beispiel peguform, faurecia, Jacob Kunststofftechnik, A.C.S, Polytec Composites Sweden, CIE Automotive, Sortira sowie Inoplast fertigen schon heute Tragstrukturen in langfaserverstärkten Thermoplasten für Serienfahrzeuge. Die Bauteile können kostengünstiger als herkömmliche Komponenten bei gleichzeitig besseren Schwingungs- und Crasheigenschaften hergestellt werden [[58],[59]]. Hierbei erfolgt jedoch eine Konzentration auf die Optimierung des LFT-Pressverfahrens. Der Einsatz von endlosfaserverstärkten Thermoplasten wird derzeit unter dem Gesichtspunkt der Großserientauglichkeit kaum gezielt untersucht, obgleich diese noch junge Werkstoffgruppe ein sehr hohes Leichtbaupotential mit sich bringt. Im Rahmen des fertigungsorientierten BMBF-Programms „Neue Materialien – Matech“ wurde innerhalb des Forschungsprojektes „SMART PART“ ein „Tailored-LFT-Verfahren“ entwickelt, mit dem Fahrzeugkomponenten während der Herstellung durch Glasfaser-Polypropylen-Gewebe lokal verstärkt werden. Ein Ergebnis dieses Projektes ist ein Frontendmontageträger, dessen Gewicht gegenüber der ursprünglichen Stahlkonstruktion um 30 % und gegenüber der Hybridkonstruktion um 10 % verringert werden konnte [60].

Tragwerke aus endlosfaserverstärkten Thermoplasten wurden in der Initiative COMPOSIT im fünften europäischen Rahmenprogramm untersucht. Hier lag der Schwerpunkt jedoch auf

der Herstellung und Berechnung elementarer Basisstrukturen mit vereinfachten Berechnungsansätzen ohne Berücksichtigung der allfälligen Versagens- und Schädigungsmechanismen [61].

Für viele derartige Fragestellungen sind Konzepte erarbeitet worden bzw. befinden sich in der Grundlagenforschung. Dabei ist aber festzustellen, dass viele Untersuchungen, Normen und Richtlinien vorrangig Verbindungen von dünnwandigen Strukturen betrachten. Eine direkte Übertragbarkeit auf die hier meist vorliegenden dickwandigeren Strukturen ist nur eingeschränkt gegeben. Insbesondere beim artfremden Fügen von Verbundwerkstoffen mit Metallen besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Zwar gibt es erste Lösungsansätze vor allem aus der Luftfahrtindustrie und dem Windenergieanlagenbau, sie sind aber aufgrund anderer Stückzahlenszenarien nur bedingt übertragbar. Hier soll das geplante Verbundvorhaben mit seinen grundlegenden fügetechnischen Untersuchungen die vorhandene Wissenslücke schließen.

Die Klimatisierung von Fahrzeugkabinen ist ein aktueller Forschungsgegenstand. Die Arbeiten sind dabei nicht auf Straßenfahrzeuge begrenzt, auch für Schienen- und Luftfahrzeuge sind die Aufgabenstellungen sehr ähnlich. Hauptaugenmerk gilt dabei der thermischen Behaglichkeit der Insassen, siehe z.B. [62]. Dabei ist zu beachten, dass es deutliche Unterschiede bei der Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Fahrzeugkabinen im Vergleich zu Innenräumen von Gebäuden gibt [63]. Auch das unmittelbare Behaglichkeitsempfinden der Insassen geht viel stärker in die Bewertung ein, siehe z. B. [64]. Neben umfangreichen Messungen sind auch bei der Entwicklung von Simulationsmodellen große Fortschritte zu verzeichnen, was z. B. in [65] eindrucksvoll dargestellt ist. Es soll jedoch an dieser Stelle nicht verschwiegen werden, dass die Strukturen der sich einstellenden Raumluftrömung nach wie vor intensiver Forschungsarbeiten bedürfen, siehe dazu z.B. [66].

Literatur:

- [29] Haldenwanger, H.-G.: Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von PKW-Rohkarosserien. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1997
- [30] Helms, O.: Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für neuartige Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise. Dissertation, TU Dresden, 2006
- [31] Hufenbach, W.; Adam, F., Krahl, M.: Research of the Melting Performance by Processing Textile-Reinforced Thermoplastics. Fachkolloquium der Shanghai Automotive Association, Shanghai, 19. Oktober 2005
- [32] Hufenbach, W.; Adam, F.: Textilverstärkte Composites mit polymerer, metallischer und keramischer Matrix - Einsatzstrategien im Leichtbau. 2. MATERIALICA Composites-Kongress, München, 12. Oktober 2006
- [33] Blinzler, M.: Werkstoff- und prozessseitige Einflussmöglichkeiten zur Optimierung der Oberflächenqualität endlosfaserverstärkter thermoplastischer Kunststoffe. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2002
- [34] Schlottermüller, M.; Schledjewski, R.; Mitschang, P.: Influence of process parameters on residual stress in thermoplastic filament-wound parts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2004.
- [35] Schmachtenberg, E.; Strohäcker, J.: Durable thermoplastic sandwich panels for various composite applications. S.A.M.P.E. journal, SAMPE, Covina, CA., 2006, vol. 42, no1, ISSN 0091-1062, S. 24-27
- [36] Müller, N.; Ehrenstein, G. W.: Leichtbaueigenschaften von tragenden Kunststoffkomponenten mit integraler Schaumstruktur. Society of Plastics Engineers, Annual Technical Conferences, Technical Papers / 2003 / 200306 04652, CA Konferenz-Einzelbericht (C).
- [37] Schmachtenberg, E.; Schulte-zur-Heide, J.; Meyer-Noack, S.; Fischer, K.; Strohäcker, J.; Lippe, D.; Stauber, R. / BMW, München, DE: Effizienzsteigerung durch verbesserte Prozesse. Faserverstärkte Kunststoffe auf dem Weg zur Großserie. Internationales Kunststofftechnisches Kolloquium, 23 / 2006 / 200607 03912 CA Konferenz-Einzelbericht (C).
- [38] Ehleben, M.; Schürmann, H.: Manufacturing of centrifuged continuous fibre-reinforced precision pipes with thermoplastic matrix. Composites science and technology (Compos. sci. technol.), vol. 66, no.15, S. 2601-2609, Elsevier, Oxford, 2006.
- [39] Henninger, F. H.: Beitrag zur Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten. Disserta-

- tion, Technische Universität Kaiserslautern, Maschinenbau und Verfahrenstechnik, 2005
- [40] Huschens, R.: Konzept einer Metall-Kunststoff-Hybrid-Heckklappe. Tagungsband 9. Dresdner Leichtbausymposium, 16. - 18. Juni 2005
 - [41] Bütje, R.; Schouten, M.: Textile Fertigung von Leichtbaukomponenten in der Luftfahrt. Tagungsband 9. Dresdner Leichtbausymposium, 16. - 18. Juni 2005
 - [42] Skawinski, O.: All-Thermoplastic Composite Sandwich Panels - Part I: Manufacturing and Improvement of Surface Quality. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, (2004), Vol. 6, No. 5, 399-421
 - [43] Hufenbach, W.; Adam, F., Täger, O.; Krahl, M.: Development of advanced melting processes for efficient molding of textile-reinforced composites using thermoplastic hybrid yarns. *Proceedings of the 27th SAMPE Europe International Conference*, Paris, 27. - 29. März 2006, S. 448-453
 - [44] Mitschang, P.; Blinzler, M.; Wöginger, A.: Processing technologies for continuous fibre reinforced thermoplastics with novel polymer blends. *Composites Science and Technology*, 2003
 - [45] Mayer, C.; Wang, X., Neitzel, M.: Macro- and Micro-Impregnation Phenomena in Continuous Manufacturing of Fabric Reinforced Thermoplastic Composites. *Composites Part A*, 29A, S. 783-793, 1998
 - [46] Mayer, C.; Stadtfeld, H.: Verfahren zum Herstellen von Prepregs. Deutsches Patent DE 19734417 C, erteilt 09. August 1997
 - [47] Stolze, R.: Imprägnierungstechniken für Aramid- und Kohlenstofffaserverstärkte Thermoplaste. *Kunststoffe*, 78 (1988) 2, S. 126-131
 - [48] Nowacki, J.: Prozessanalyse des Umformens und Fügens in einem Schritt von gewebeverstärkten Thermoplasten. *IVW Schriftenreihe, Kaiserslautern*, Band 24, 2001
 - [49] Hufenbach, W.; Täger, O.; Adam, F.; Modler, N.; Krahl, M.; Renner, O: Advanced Manufacturing Techniques for Textile-Reinforced Thermoplastic Composites considering Piezo-Ceramic Actuators. *12th International Scientific Conference on the Contemporary Achievements in Mechanics, Manufacturing and Materials Science CAM3S'2006, Zakopane*, 27. - 30. November 2006
 - [50] Roscher, K.-U.; Fischer W.-J.; Landgraf, J.; Pfeifer G.; Starke, E.: Sensor Networks for Integration into Textile-Reinforced Composites. *TRANSDUCERS'07, The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 10. - 14. Juni 2007
 - [51] Schmachtenberg, E.; Mannigel, M.: Auslegung von Bauteilen aus gewebeverstärkten Thermoplasten: Schnittstellen-Definition. *Kunststoffe*, 94 (2004) 4, S. 57-60

- [52] VDI-Richtlinie 2014: „Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff- Verbunden“, Blatt 1-3
- [53] N. N.: HSB-Handbuch Struktur Berechnung – Berechnungsunterlagen für strukturelle mechanische Auslegungen und Analysen in der Luft- und Raumfahrt. Luftfahrt-Technisches Handbuch, IASB, Ausgabe A, 2001
- [54] N. N.: The Composite Materials Handbook-Mil 17. Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Pennsylvania, 17604 U.S.A., 1999
- [55] Hufenbach, W. (Ed.): Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus. Leitfaden des DFG-Schwerpunktprogramms 1123
- [56] Hufenbach, W.; Adam, F.; Gude, M.: Automotive Lightweight Structures with high Function-Integration through novel Textile-Reinforced Thermoplastics. InnoCar-Body, Bad Nauheim, 12. Juni 2007, S. 57-70
- [57] Tourse, S.: TWINTEX - Demonstrator. www.saint-gobainvetrotex.com/pdf/twintex_demonstrator.pdf, Chambéry Cedex, 2004
- [58] N. N.: Der Instrumententafelträger in Hybridbauweise aus GMT/Stahl gewinnt den SPE® Innovation Award, Er weist bessere NVH- und Crash-Werte bei geringerem Gewicht und niedrigeren Kosten auf. www.quadrantcomposites.com/pdf/spe%202004_d_221204.pdf, Lenzburg, 2004
- [59] N. N.: Faserverbundwerkstoffe. www.ict.fraunhofer.de/deutsch/scope/pt/pt_faser.pdf, Pfinztal
- [60] Brooks, R.: Automotive Side Impact Protection Using Thermoplastic Composites. COMPOSIT workshop on “The Crashworthiness of Composite Transportation Structures”, Crowthorne, 2002, www.compositn.net/Downloads/Presentation%20-%20Crashworthiness%20-%20Nottingham%20-%206pp.pdf
- [61] Hufenbach, W.; Grüber, B.; Langkamp, A.; Lepper, M.; Kroll, L.: Advanced calculation methods for notched hybrid composites with textile-reinforced polymers. *Journal of Plastics Technology*, 3 (2007)
- [62] Martinho, N. A. G.; Silva, M. C. G.; Ramos, J. A. E.: Evaluation of thermal comfort in a vehicle cabin. *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part D: J. Automobile Engineering* (2004)
- [63] DIN 1946 Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen. Beuth Verlag Berlin, 2006
- [64] Streblov, Rita: Thermal sensation and comfort model for inhomogeneous indoor environments. PhD-theses, RWTH Aachen, 2010
- [65] Müller, D.; Schmidt, M.; Otto, S.; Gores, I.; Markwart, M.: Fully Automated Simulation Process for Comfort Predictions in Aircraft Cabins. *Proc. of Indoor Air 2008*

- [66] Ebert, A.; Resagk, Ch., Thess, A.: Experimental study of temperature distribution and local heat flux for turbulent Rayleigh-Benard convection of air in a long rectangular enclosure. Int. Journal of Heat and Mass Transfer 51, 4238-4248, 2008

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

2 Ergebnisdarstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse

Nachfolgend sind die wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse der beiden Forschungsstellen der TU Dresden dargestellt. Dem Institut für Energietechnik (IET), Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung obliegt die Bearbeitung der Zielstellungen des AP 5 „Klimatisierung“; das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) ist verantwortlich für die Arbeitsschwerpunkte des AP 7 „Leichtbau“.

2.1.1 Klimatisierung (AP 5 – IET)

2.1.1.1 Maßnahmen aus der Architektur

Hinsichtlich der Verminderung des Transmissionswärmebedarfs zeigt der Vergleich der Entwicklung in der Architektur mit typischen Wärmedurchgangskoeffizienten von Fahrzeugteilen entsprechend der Abbildung 1 die signifikanten Unterschiede. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die zunehmende Verwendung von Hochleistungsdämmstoffen, wie Aerogel oder Vakuumdämmpanelen zu nennen, die bereits bei geringer Dicke hohe Wärmeleitwiderstandswerte aufweisen.

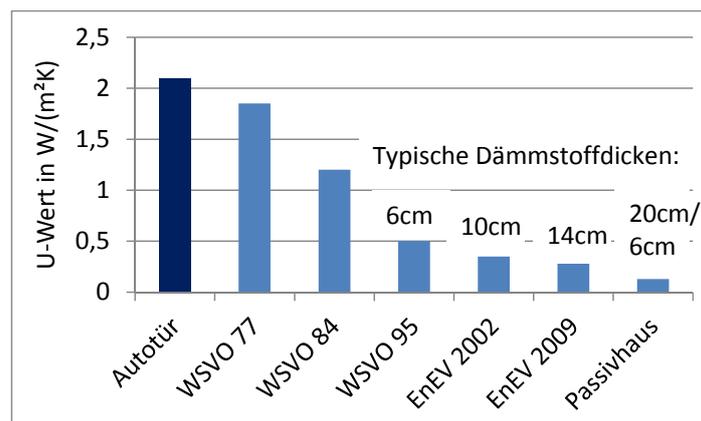


Abbildung 1: Entwicklung der Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenwänden im Vergleich zu einer Fahrzeugtür

Wie die Abbildung 2 verdeutlicht, sind auch im Bereich der Verglasungen große Differenzen im Stand der Technik für den Wärmeschutz zwischen Gebäuden und Fahrzeugen zu ver-

zeichnen. Dies gilt insbesondere aufgrund der hohen äußeren konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bei Fahrzeugen infolge der Anströmung bei der Fahrt.

Neben den oben beschriebenen passiven Maßnahmen, welche eine Reduktion des Energiebedarfs anstreben, können auch die zur Bedarfsdeckung verwendeten technischen Anlagen einen Beitrag zur Senkung des Energieaufwandes leisten. Bezogen auf den Untersuchungsschwerpunkt und die Bilanzgrenzen innerhalb des Teilprojektes sollen die Heiz- und Klimatisierungssysteme jedoch nicht in der Gesamtheit im Detail betrachtet werden, sondern eine Fokussierung auf die kontrollierte bzw. maschinelle Lüftung erfolgen. Getrieben durch die zunehmende Gebäudedichtheit, hohe energetische Anforderungen und das steigende Komfortbedürfnis nimmt die Bedeutung der kontrollierten Wohnungslüftung zu. Bei sehr geringen Energiebedarfswerten, wie z.B. im Passivhaus, ist es in Verbindung mit einer Lüftungsanlage teilweise möglich, gänzlich auf ein weiteres Heizsystem zu verzichten. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine Wärmerückgewinnung mit hohen Wärmerückgewinnungsgraden. Für Wohnungslüftungsgeräte werden typischerweise Kreuzstrom-Plattenwärmeübertrager eingesetzt, mit denen Wärmerückgewinnungsgrade höher als 0,85 realisiert werden können.



Abbildung 2: Vergleich typischer Kennwerte von Verglasungen von Gebäude und Fahrzeug

2.1.1.2 Maßnahmenkatalog zur Effizienzsteigerung

Mit einer stationären Energiebilanz der Fahrzeugkabine lassen sich im Vorfeld der Simulationsrechnungen zunächst Potentiale von Einzelmaßnahmen entsprechend der Tabelle 2 und Abbildung 3 unter stationären Bedingungen abschätzen.

Tabelle 2: Variantenbezeichnung und mögliche Energieeinsparung für ausgewählte Optimierungsmaßnahmen, stationäre Betrachtung, $\theta_a = -5^\circ\text{C}$

Variante	Maßnahme	Einsparung	
		einzel	Fahrzeug
B	Basis	-	-
V1	Windschutzscheibe Polycarbonat	15%	4%
V2	Seitenscheibe Doppelverglasung	89%	14%
V3	Türen gedämmt 20mm Aerogel-Matte	74%	4%
V4	Verdeck, verbesserte Membran	40%	5%
V5	Maßnahmen V1 - V4 kombiniert	-	27%
V6	50% Umluft oder WRG	-	32%
V7	80% Umluft oder WRG	-	51%
V8	Alle Bauteile und 50% Umluft	-	50%

Die Daten verdeutlichen, dass eine Reduzierung der Transmissionswärmeverluste auch zu verringerten Entlüftungsverlusten führt, da der zur Temperierung erforderliche Luftmassenstrom sinkt. Je nach Anteil am Gesamtverlust wirken sich die einzelnen Maßnahmen unterschiedlich stark aus. Über die Scheiben fallen in der Basisvariante hohe Wärmeverluste an. Somit bieten Maßnahmen in diesem Bereich ein großes Einsparpotential. Die Verwendung von Polycarbonat als Material für die Windschutzscheibe führt zu einer Gesamteinsparung von 4%, obwohl die Reduktion des Transmissionswärmeverlustes mit 15% vergleichsweise gering ausfällt. Durch eine Doppelverglasung der Seitenscheiben lässt sich mit 14% die höchste Einsparung gegenüber der Basisvariante durch eine Einzelmaßnahme erzielen. Die Türen haben in der Basisvariante bereits einen relativ guten (hohen) Wärmeleitwiderstand, so dass die Auswirkung auf das Gesamtfahrzeug mit 4% Energieeinsparung durch Dämmung der Türen gering ist.

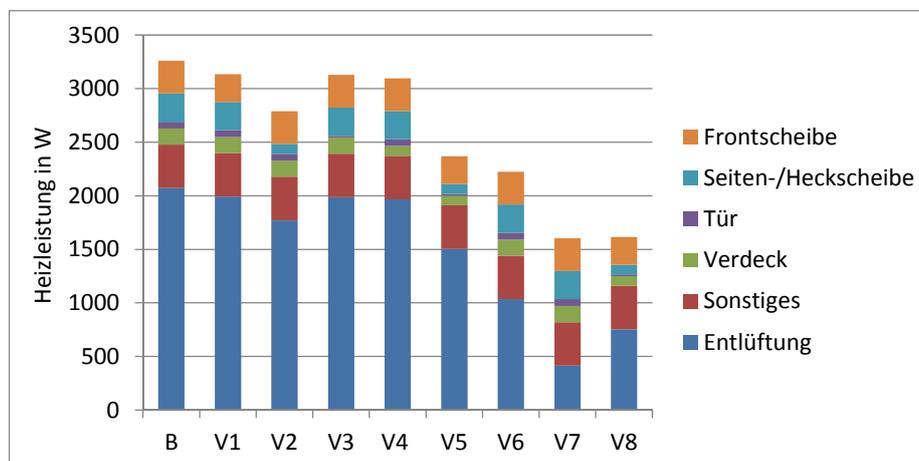


Abbildung 3: Einzelanteile und Gesamtwert der Heizleistung für die Maßnahmen zur Energieeinsparung ($\Delta a = -5^\circ\text{C}$)

Die deutlichste Reduktion des Energiebedarfs lässt sich durch die Verringerung der Entlüftungsverluste, bei Nutzung einer Wärmerückgewinnung oder durch einen teilweisen, feuchtgeregelten Umluftbetrieb der Fahrzeugbelüftung erzielen. Bereits ein 50%iger Umluftanteil bewirkt eine größere Energieeinsparung als die Kombination aller Wärmedämmmaßnahmen an der Karosserie. Gelingt es, die Entlüftungsverluste um 80% zu reduzieren, so kann insge-

samt die Hälfte der anfallenden Heizleistung eingespart werden. Hierbei ist anzumerken, dass die Luftvolumenströme im Fahrzeug typischerweise in Größenordnungen liegen, die selbst bei sehr hohen Umluftanteilen noch eine gute Frischluftversorgung der Kabine sicherstellen.

2.1.1.3 Untersuchungsmethodik und Simulationsmodelle

Die Bewertung der möglichen Maßnahmen zur Verminderung des Heizenergieaufwandes erfolgt auf Basis komplexer, wechselseitig gekoppelter Simulationsmodelle. Die hier genutzten Modelle bieten den Vorteil, dass vergleichende Betrachtungen unter stets identischen Randbedingungen durchgeführt werden können und dass eine umfangreiche Parametervariation möglich ist. Somit lässt sich eine Vorauswahl geeigneter Optimierungsmaßnahmen finden, die dann in einem weiteren Schritt direkt an Versuchsfahrzeugen umgesetzt und messtechnisch analysiert werden können.

Für die analytischen und numerischen Untersuchungen werden zwei Simulationsmodelle mit jeweils unterschiedlichem Detaillierungsgrad verwendet. In einem ersten Modell wird die energetische und wärmephysiologische Bewertung mit dem numerischen Simulationsprogramm TRNSYS-TUD durchgeführt. Dieses Programm wurde ursprünglich für die gekoppelte Gebäude- und Anlagensimulation konzipiert und im beschriebenen Forschungsprojekt an die spezifischen Anforderungen der Simulation einer Fahrzeugkabine angepasst. Die Modelle zur Beschreibung der opaken Bauteile und der Verglasung wurden für den Gebäudebereich in einer Vielzahl von Projekten getestet und validiert und werden zudem am Institut für Energietechnik der TU Dresden stetig weiterentwickelt. Zunächst werden die Simulationsrechnungen für einen integralen Lufttemperaturknoten in der Kabine durchgeführt. Um den im Fahrgastraum auftretenden lokalen thermischen Effekten Rechnung zu tragen, wird die Geometrie der Fahrzeugkabine sehr hoch aufgelöst. Dies geschieht durch eine Vielzahl ebener Drei- und Vierecksflächen entsprechend Abbildung 4.

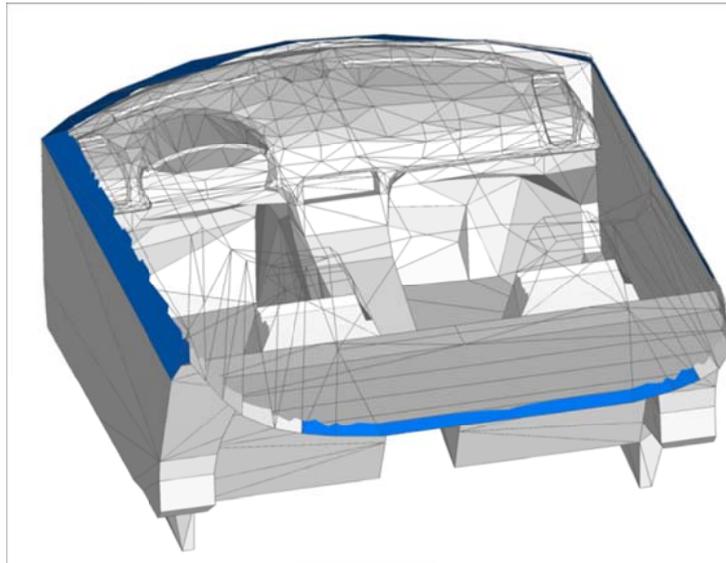


Abbildung 4: Geometrisches Modell der Fahrzeugkabine (Schnittdarstellung ohne Dach)

Das Modell ermöglicht eine sehr detaillierte Berechnung des langwelligen Strahlungswärmeaustauschs über Flächen-zu-Flächen Einstrahlzahlen und somit räumlich hoch aufgelöste Aussagen zur Empfindungstemperatur in allen Bereichen der Kabine. Die Simulationen auf Basis von TRNSYS-TUD erfolgen instationär, wobei sowohl Aufheizphasen bei stehendem Fahrzeug als auch Zeitabschnitte mit bewegtem Fahrzeug Berücksichtigung finden.

Als zweites Modell wird das oben beschriebene geometrische Modell mit dem Strömungssimulationsprogramm ParalleINS über einen wechselseitigen Randbedingungs austausch innerhalb einer parallelen virtuellen Maschine gekoppelt. Im Weiteren wird dieses Modell als Feldmodell bezeichnet. Die wichtigsten Programmeigenschaften sowie die grundsätzliche Funktionsweise der Kopplung mit TRNSYS-TUD können der Abbildung 5 entnommen werden. Sowohl zwischen den Programmkomponenten als auch innerhalb der Strömungssimulation mit ParalleINS wird mit nichtüberlappender Gebietszerlegung gearbeitet.

Letztlich ermöglicht die Einbindung von ParalleINS in die Simulationsumgebung die Berücksichtigung aller in der Kabine relevanten thermischen, hygri schen und lüftungsspezifischen Einflüsse. Im aktuellen Modell wurden beispielsweise alle Lüftungsöffnungen des Fahrzeugs mit ihren anteiligen, zeitlich variablen Volumenströmen, Einströmrichtungen (infolge verstellbarer Lamellen) und Eintrittstemperaturen modelliert. Zudem erfolgte die Einbindung einer Transportgleichung zur Feuchteberechnung, da dies für die Modellierung der Umluftregelung zwingend erforderlich ist.

Als Bilanzzeitraum wird der ARTEMIS-Zyklus verwendet. Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen liegt den Simulationen ein kombinierter Zyklus zu Grunde, der erst einen Stadtanteil mit realistischen Beschleunigungen (4,5 km), dann einen Landstraßenanteil (17,3 km) und abschließend einen Autobahnanteil (29,5 km) enthält. Für die Autobahnfahrt wird die Variante mit höherer Geschwindigkeit bis max. 150 km/h gewählt.

Bezüglich des Energiebedarfs für Beheizung und Klimatisierung beeinflusst die Fahrgeschwindigkeit insbesondere den äußeren Wärmeübergang. Dieser Einfluss fand durch den Einsatz spezieller geschwindigkeitsabhängiger äußerer Wärmeübergangskoeffizienten Berücksichtigung.

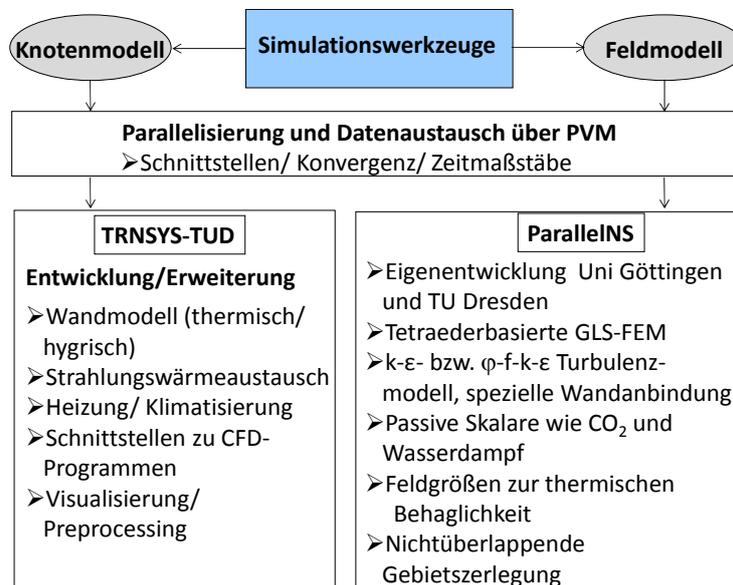


Abbildung 5: Grundfunktionen und Kopplungsmechanismus von Knoten- und Feldmodell

2.1.1.4 Validierung

Zur Validierung der hier vorgestellten Modellansätze dienen Messungen der Aufheizphase des den Untersuchungen zugrundeliegenden stehenden Fahrzeugs bei klar definierten Anfangs- und Umgebungsbedingungen (Die Start- und Umgebungstemperatur betrug -3 °C). Hierzu erfolgte im Vorfeld der Messungen die Ausstattung des Fahrzeugs mit einem Fahrer-Dummy und einer Vielzahl von Temperatursonden an unterschiedlichsten Positionen, speziell im Bereich der Auslässe, der Frontscheibe und im Umfeld des Dummys. Für die Messung selbst wird die Lüftung des Fahrzeugs bei laufendem Motor auf eine definierte Lüftungsstufe gestellt. Die sich daraus ergebende Aufheizung des Fahrzeugs wird anhand der Temperatursensoren über einen Zeitraum von ca. 45 min protokolliert. Zusätzlich kommt zur Validierung der Messdaten und zur Protokollierung der Oberflächentemperaturen der Kabine eine Thermokamera zum Einsatz.

Im Rahmen der gekoppelten Referenzsimulation werden sämtliche installierten Sensoren an exakt den Installationsorten abgebildet (vgl. Abbildung 6). An den Zuluftgittern werden neben den fahrzeugspezifischen Zuluftvolumenströmen die gemessenen Luft Eintrittstemperaturen vorgegeben, alle weiteren geometrischen Eigenschaften des Fahrzeugs entsprechen denen des Messobjekts. Die Simulation wird ebenfalls gekoppelt über einen Simulationszeitraum von 45 min durchgeführt. Im Anschluss erfolgt der Vergleich zwischen den Sensordaten von Messung und Simulation, siehe Abbildung 7 und Abbildung 8.

Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass das Zeitverhalten sowie die Endwerte nach 45 min von der Simulation grundsätzlich gut bestätigt werden. Tendenzen für hohe Temperaturen (Kopf) oder geringe Temperaturen (Oberschenkel) werden in der Simulation analog zu den Messergebnissen berechnet. Trotz teilweise an einigen Messstellen auftretender Differenzen kann das Simulationsmodell im Ergebnis der Validierungsmessung als geeignet zur Nachbildung der Strömungsverhältnisse in der Kabine eingeschätzt werden.

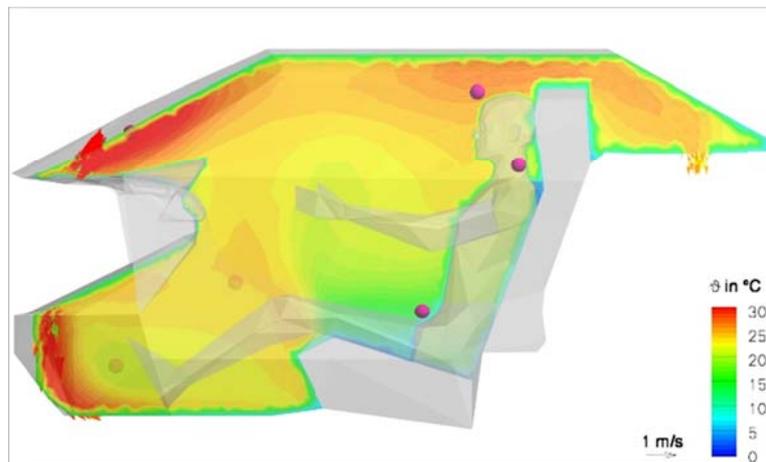


Abbildung 6: Längsschnitt durch die Kabine mit Sensorpositionen und Temperaturverteilung

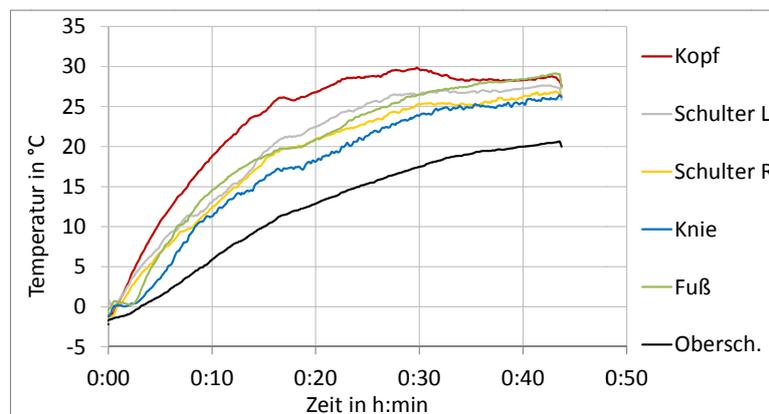


Abbildung 7: Temperaturen am Personendummy – Messergebnisse

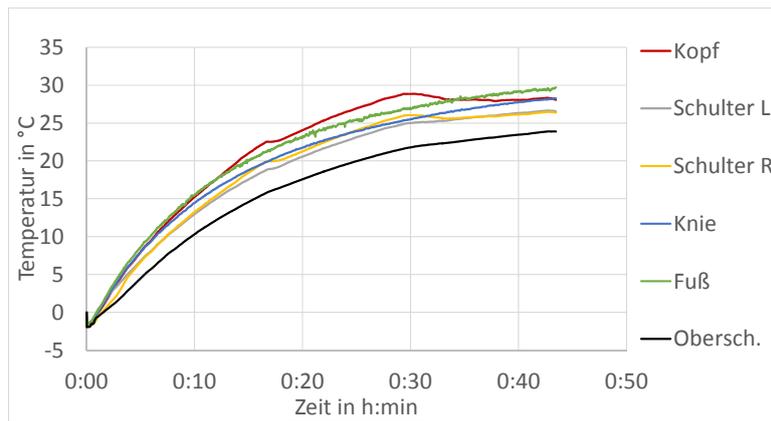


Abbildung 8: Temperaturen am Personendummy – Ergebnisse CFD-Simulation

2.1.1.5 Nachweis der Energieeinsparung - Kombinationsvarianten

Aufbauend auf der Analyse einzelner Maßnahmen werden nachfolgend mehrere Maßnahmen kombiniert und deren Auswirkungen energetisch bewertet. Es wird dabei folgende Unterteilung vorgenommen

- Basis: Vergleichsmaßstab als Bezugswert zur Berechnung der Energieeinsparung
- Variante 1: Mögliche Umsetzung im Versuchsfahrzeug
 - 1a) Grundkonfiguration
 - 1b) Mit Standlüftung im Sommerbetrieb
 - 1c) Mit Vorkonditionierung
 - 1d) Mit ECO Modus
- Variante 2: Bewertung Simulation, mittelfristige Umsetzung möglich
- Variante 3: Bewertung Simulation, Bestimmung des Maximalpotentials

Eine vollständige Matrix mit der Definition der Varianten ist in Tabelle 3 angegeben. Gegenüber der Basisvariante zeichnet sich die Variante 1 durch eine Infrarot-reflektierende Frontscheibe, eine Dämmung der Tür und eine Umluftregelung im Heizbetrieb mit einem Feuchtesensor aus. Die Variante 2 enthält weitere Maßnahmen, deren Umsetzung mittelfristig als möglich erachtet wird. Die Variante 3 repräsentiert das Maximalpotential, welches sich aus der Kombination möglichst vieler relevanter Einzelmaßnahmen ergibt.

Die Abbildung 9 verdeutlicht die Energieeinsparung durch Umsetzung der Kombinationsvarianten für den Winterfall. Bereits mit der Variante 1a lässt sich, maßgeblich verursacht durch die Umluftregelung, eine hohe Einsparung von 26 % erzielen. Durch eine Vorkonditionierung (Variante 1c) steigert sich die Einsparung deutlich auf 39%. Der ECO-Modus (Variante 1d) mit einer Leistungsbegrenzung bewirkt ebenfalls eine signifikante zusätzliche Energieeinsparung. Dabei sind jedoch die Einschränkungen hinsichtlich der Wärmephysiologie mit in die

Betrachtung einzubeziehen. Zudem ist zu beachten, dass infolge der Leistungsbegrenzung im ECO-Modus verglichen mit der Variante 1a ein deutlich geringerer Umluftanteil realisiert werden kann.

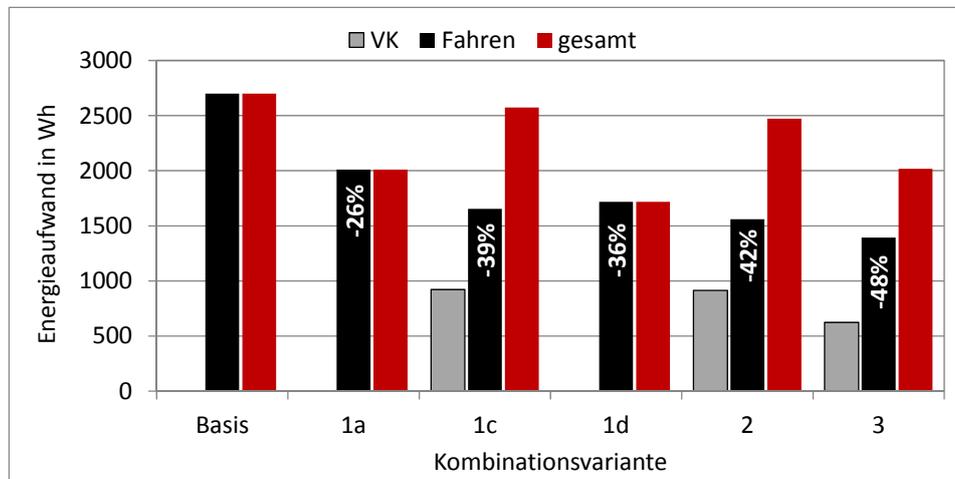


Abbildung 9: Energetische Kennwerte der Kombinationsmaßnahmen, kombinierter Artemis-Zyklus, $\vartheta_a = -5^\circ\text{C}$ (Variante 3 ohne Strahlungsheizung)

Mit der Variante 2, welche neben der Umluftnutzung und Vorkonditionierung wesentlich durch weitere Maßnahmen zu Verringerung des Wärmedurchgangs durch die Karosserie geprägt ist, kann gegenüber der Variante 1c nur noch eine geringe Zunahme der Energieeinsparung erreicht werden. Das Hauptpotential durch die Umluftegelung ist bereits ausgeschöpft. In Variante 3 reduziert sich infolge des hohen Umluftanteils insbesondere der Bedarf für die Vorkonditionierung. Der Bedarf während des Fahrbetriebs reduziert sich ohne Strahlungsheizung gegenüber der Variante 2 nur geringfügig.

Tabelle 3: Matrix der Kombinationsvarianten

Kategorie	Maßnahme	Basis	1a	1b	1c	1d	2	3
1.	Vorkonditionierung							
1.1	2kW/ 30min/ 0% Umluft							
1.2	2kW/ 30min/ 50% Umluft				x		x	
1.3	2kW/ 30min/ 100% Umluft							x
1.4	4kW/ 15min/ 0% Umluft							
1.5	4kW/ 15min/ 50% Umluft							
1.6	4kW/ 15min/ 100% Umluft							
2.	Verglasung							
2.1	Polycarbonat-WSS						x	x
2.2	Polycarbonat Seitenscheiben							
2.3	Seitenscheiben mit Doppelverglasung							x
2.4	IR-reflektierende Beschichtung WSS		x	x	x	x	x	x
2.5	Schaltbare Scheiben							
3.	Rohbau							
3.1	Dämmung Tür 2cm innen						x	x
3.2	Dämmung Tür 2cm außen							
3.3	Dämmung Tür 5cm außen		x	x	x	x	x	x
3.4	Dämmung Fußbereich/ Unterboden							x
3.5	Verdeck mit erhöhtem Wärmeleitwiderstand							x
3.6	Lackierung mit IR-reflektierendem Lack							
3.6	Lackierung in heller Farbe	x	x	x	x	x	x	x
3.7	Verdeck in heller Farbe						x	x
4.	Strahlungsheizung							
4.1	Ausstattung Basis							x
4.2	Ausstattung maximal							
5.	Regelung							
5.1	ECO-Modus (Für gesamtes Fahrzeug mit Reaktion des Klimasystems auf (Gesamtfahrzeugbetriebsmodus)					x	x	x
5.2	Zwei Zonen-Klimatisierung mit Reaktion auf Belegung Beifahrersitz							
5.3	Umluft im Heizbetrieb (mit Feuchtesensor)		x	x	x	x	x	x
6.	Photovoltaik							
6.1	PV-Zellen auf Front- und Heckdeckel zur Standlüftung (für Sommerfall)			x				

Die energetischen Ergebnisse für die Klimarandbedingung 35°C fast die Abbildung 10 zusammen. Grundsätzlich ergeben sich geringere energetische Konsequenzen als bei der Klimarandbedingung -5°C, da in der Basisvariante bereits mit einem hohen Umluftanteil gerechnet wird, welcher in den Kombinationsvarianten nicht weiter erhöht wird. In Variante 1a kompensieren sich die positiv und negativ auf den Energiebedarf wirkenden Effekte und es ergibt sich keine Energieeinsparung.

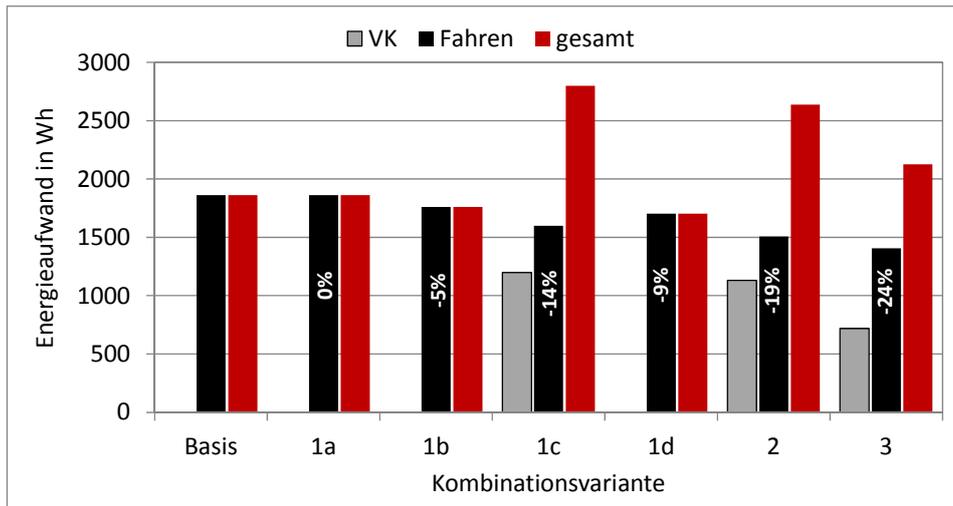


Abbildung 10: Energetische Kennwerte der Kombinationsmaßnahmen, kombinierter Artemis-Zyklus, $\vartheta_a = 35^\circ\text{C}$

Infolge einer Standlüftung (Variante 1b) kann die Aufheizung der Kabine während der Standphase deutlich von einer Maximaltemperatur von $48,7^\circ\text{C}$ auf eine Maximaltemperatur von $40,1^\circ\text{C}$ reduziert werden. Neben den verbesserten wärmephysiologischen Verhältnissen bei Fahrtbeginn ergibt sich dadurch eine Verringerung des Energiebedarfs während des Fahrens um 5%. Erfolgt eine Vorkonditionierung (Variante 1c), kann analog dem Winterfall beim Fahren deutlich Energie eingespart werden. Die zusätzlich für die Vorkonditionierung aufgewendete Energie ist jedoch anteilig höher als beim Heizen, da bereits beim Vorkonditionieren viel Energie für die Entfeuchtung benötigt wird. Durch eine Leistungsbegrenzung auf 2000 W entsprechend der Variante 1d ergibt sich eine Bedarfsminderung von 9%.

Wie die Ergebnisse für die Variante 2 zeigen, steigt durch zusätzliche Maßnahmen an der Karosserie die Einsparung gegenüber der Variante 1c nur vergleichsweise gering. Eine Einsparung von 24% während des Fahrens gegenüber dem Basisfall ergibt sich in der Maximalvariante 3. Insbesondere lässt sich bei dieser Variante auch der Bedarf für die Vorkonditionierung durch eine vollständige Umluftnutzung deutlich reduzieren.

2.1.1.6 Gesamtbewertung Jahr

Wie im vorhergehenden Abschnitt dargestellt, erfolgte der Nachweis der energetischen Kennwerte für festgelegte Klimarandbedingungen. Nachfolgend soll ein Verfahren zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das gesamte Jahr angegeben werden. Hierfür können statistisch aufbereitete Wetterdaten verwendet werden. Im Gebäudebereich ist hierfür die DIN 4710 gebräuchlich, welche eine tageszeitunabhängige Gewichtung der Temperaturen vornimmt. Die FAT-Schriftenreihe 224 bezieht darüber hinaus die Häufigkeit der Nutzung von Fahrzeugen mit in die die Wichtung der Außentemperaturen ein. Wie die Abbildung 11 zeigt, lässt sich die im Jahresverlauf auftretende Außentemperatur grundsätzlich in drei Bereiche wie folgt einteilen:

- Bereich I: Heizen, $\vartheta_a < 5^\circ\text{C}$
- Bereich II: „Reheat“-Betrieb (Entfeuchten über Kühler u. Wiederaufheizen), $5^\circ\text{C} < \vartheta_a < 20^\circ$
- Bereich III: Kühlen, $\vartheta_a > 20^\circ\text{C}$

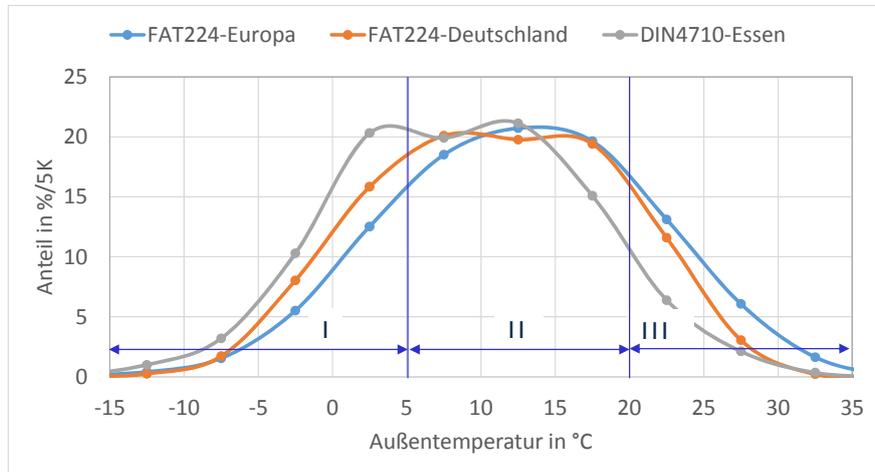


Abbildung 11: Statistische Häufigkeitsverteilungen der Außentemperatur für verschiedene Standorte

Unter Verwendung der statistischen Verteilung der Außentemperatur nach FAT224 und der Simulationsergebnisse der Heizleistung die mittlere Energieeinsparung für ein Jahr berechnen. Entsprechend der in Abbildung 12 dokumentierten Kennwerte zeigt sich, dass die absolute Einsparung für den Bereich I und auch für den gesamten Heizbetrieb unter den Werten für $\vartheta_a = -5^\circ\text{C}$ liegt.

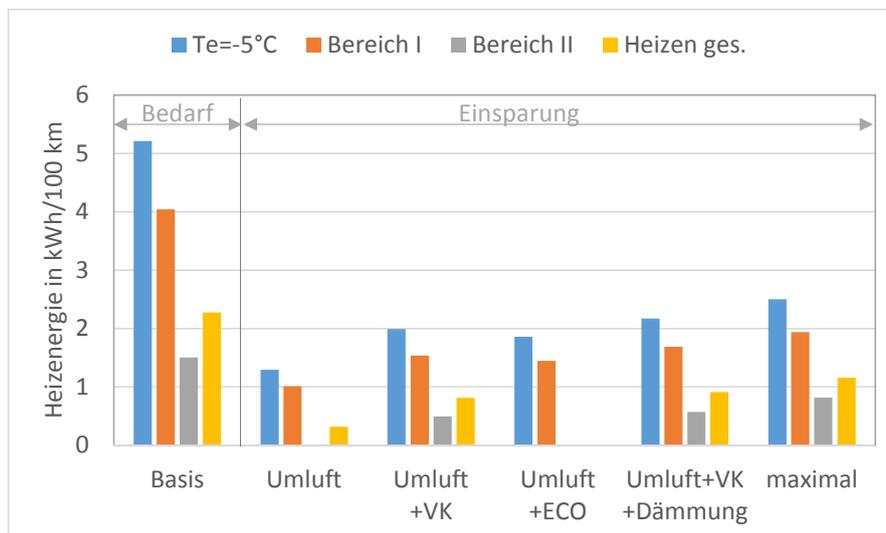


Abbildung 12: Energiebedarf und Energieeinsparung für die Klimabereiche I und II, Heizen

2.1.1.7 Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchung wurden Maßnahmen zur Energieeinsparung aus der Architektur analysiert und deren Übertragbarkeit auf das Fahrzeug bewertet. Durch Potentialabschätzungen mit einem Bilanzmodell konnte ein Maßnahmenkatalog erarbeitet werden. Im Ergebnis zeigt sich, dass durch aktive, die Lüftung betreffende Maßnahmen ein hohes Einsparpotential erschlossen werden kann. Aber auch die Kombination mehrerer passiver, die Fahrzeughülle betreffende Maßnahmen führt zu hohen Energieeinsparmöglichkeiten.

Für weiterführende Bewertungen wird die dynamische Simulation mit dem Programm TRN-SYS-TUD verwendet. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die kombinierte Nutzung von Knotenmodell und CFD-Simulation für die energetische Bewertung einer Fahrzeugkabine prinzipiell sehr gut geeignet ist. Als Modellparameter für das Knotenmodell sind insbesondere die inneren Wärmeübergangskoeffizienten schwierig zu ermitteln, da sie direkt mit den lokalen Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturverhältnissen an den Bauteiloberflächen verknüpft sind. Eine an die Umfassungskonstruktion angekoppelte CFD-Simulation, stellt eine elegante Methode zur Lösung dieses Problems dar. Auf diese Weise lassen sich zudem sämtliche relevanten physikalischen Einflussgrößen, wie die detaillierten Feuchte- und Zuluftverteilungen in die Untersuchungen einbinden. Zudem ist man in der Lage, aus den gekoppelten Simulationen verbesserte Modellparameter für den Einsatz des schnelleren und deutlich weniger komplexen / aufwendigen Knotenmodells bereitzustellen. Ein Vergleich mit den Daten einer Validierungsmessung zeigt, dass das Simulationsmodell gut geeignet ist, die komplexen physikalischen Zusammenhänge in Fahrzeugkabinen nachzubilden.

Die Bewertung einzelner Einflussfaktoren mit der Simulation bestätigt im Wesentlichen die Ergebnisse der Potentialanalyse. Zusätzlich können mit der Simulation dynamische Aspekte untersucht werden, so dass Resultate zum Einfluss der Vorkonditionierung auf Temperaturdynamik und Energiebedarf vorliegen. Insgesamt ermöglicht die Vorkonditionierung eine deutliche Energieeinsparung während des Fahrens. In der Gesamtbilanz ist jedoch der zusätzliche Aufwand der Vorkonditionierung zu berücksichtigen. Tendenziell sind aus Sicht der Reichweitenerhöhung längere Vorkonditionierungsphasen mit geringerer Leistung gegenüber einer kurzen Vorkonditionierung mit hoher Leistung günstiger zu bewerten, da eine bessere Durchwärmung der speicherwirksamen Massen erfolgt.

In einem weiteren Schwerpunkt wird zur Verringerung der Entlüftungsverluste ein Algorithmus zur Regelung des Umluftanteils in Abhängigkeit der Feuchte in der Kabine entwickelt und getestet. Die nachgewiesenen Energieeinsparungen sind dabei stark von den jeweiligen Randbedingungen (Außenluftzustand, Feuchtequellen im Fahrzeug, Fahrgeschwindigkeit) abhängig. Die analytisch nachgewiesenen, hohen relative Energieeinsparungen durch aktive Maßnahmen können aber prinzipiell bestätigt werden.

Aus den Einzelmaßnahmen werden Kombinationsvarianten erstellt, welche verschiedene Abstufungen der technischen Änderungen am Fahrzeug beinhalten. Für die Variante „Mögliche Umsetzung im Versuchsfahrzeug“ kann für eine Außentemperatur von -5°C eine Be-

darfsreduktion von 26 Prozent ohne Vorkonditionierung und von 36 Prozent mit Vorkonditionierung nachgewiesen werden. Die maximale Bedarfsreduktion von 48 Prozent ergibt sich für die Variante „Maximalpotential Simulation“.

Insgesamt konnte mit den geschaffenen Simulationsmodellen im Rahmen des hier vorgestellten Teilprojekts ein wesentlicher Beitrag zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs von Elektrofahrzeugen und somit zum Gesamtziel des Verbundprojekts „e-generation“ geleistet werden.

2.1.2 Konzeptioneller Leichtbau (AP 7.1 – ILK)

In Absprache mit dem Projektkoordinator Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG sind die Forschungsinhalte des Teilprojektes 7.1 in das Teilprojekt 0 verschoben worden. Daher sind hierzu vom ILK keine Forschungsarbeiten durchgeführt worden.

2.1.3 Batterie- und Insassenschutz (AP 7.2 – ILK)

Im nachfolgenden Unterpunkt werden die am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der TU Dresden innerhalb des Berichtszeitraums durchgeführten Arbeiten im AP 7.2 vorgestellt. Die Durchführung der Tätigkeiten erfolgte dabei in Kooperation mit dem Projektpartner Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG.

2.1.3.1 Festlegung der Fertigungstechnologie

Im Rahmen umfangreicher konzeptioneller Betrachtungen alternativer Prozessrouten zur Herstellung von hochbelastbaren Leichtbaustrukturen aus faserverstärkten Thermoplasten wurde aufgrund der hohen geometrischen Gestaltungsfreiheit eine kombinierte Bauweise aus profil- und schalenartigen Grundelementen favorisiert. Technologischer Vorteil ist darüber hinaus die Möglichkeit, dass die Bauteilfertigung in einem hochintegrativen Prozess von Ur- und Umformen sowie Fügen realisiert werden kann. Die Profilpreformen sollen mittels Flechten eines Hybridgarns hergestellt werden. Die schalenartigen Grundelemente sollen mittels Spritzguss stoff- und/oder formschlüssig an die Profile angebunden werden.

Als Zielbauteil wurde seitens des Projektpartners ein Leichtbau-Batterieträger ausgewählt, welcher aus einem thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbund-(FKV)-Hohlprofil, einer mittels Spritzgießen angebundenen Batterieträgerplattform sowie metallischen Konsolen zur Bauteilbefestigung besteht (Abbildung 13). Die Herstellung des Batterieträgers erfolgt in einem integrativen, zweischrittigen Fertigungsverfahren. Herausragende Entwicklungsziele stellen dabei die Entwicklung einer hochintegrativen Leichtbaustruktur in Hybridbauweise, die Konzeptionierung einer werkstoffangepassten Prozesskette, die Charakterisierung von ausgewählten Materialien sowie die Herstellung des Demonstratorbauteils dar.

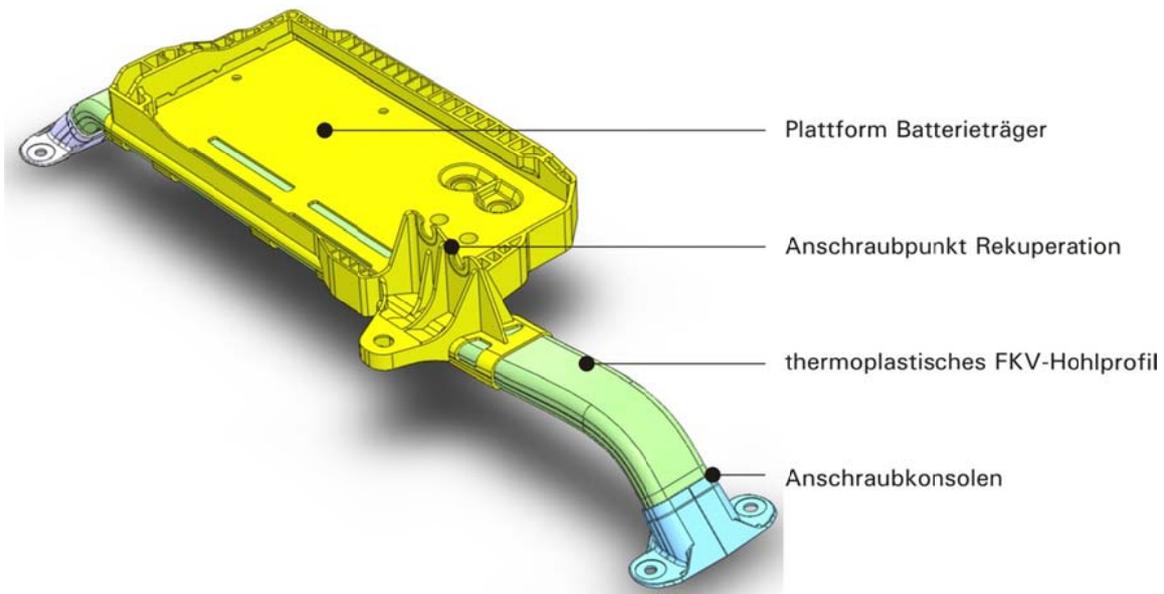


Abbildung 13: Batterieträger in thermoplastischer Hybridbauweise

2.1.3.2 Materialauswahl

Die profilartigen Elemente der Tragstruktur sollen unter Berücksichtigung von Leichtbau-, Taktzeit-, Kosten- und Recyclingaspekten aus Hybridgarn, bestehend aus Glasfaser und Polyamid 6, mittels Flechten und anschließendem Konsolidieren gefertigt werden. Das gewählte Hybridgarn wird von der Firma Glasseide Oschatz GmbH bezogen und besteht aus der E-Glas-Faser EC 300 - PA29 und einem Polyamid-6-Multifilamentgarn.

Für die flächigen Elemente wie etwa Rippen und lokale Verstärkungen wird dagegen ein langfaserverstärkter Thermoplast (LFT), ebenfalls bestehend aus Polyamid 6 und Glasfaser, gewählt. Als Spritzgussmaterial wurde „GVL-5H HP“ der Firma EMS-CHEMIE HOLDING AG mit einer Faserlänge von 12 mm gewählt.

2.1.3.3 Konzeption von Versuchswerkzeugen

LFT-Plattenwerkzeug

Für die Herstellung der LFT-Probekörper wurde ein Spritzgieß-Werkzeug konzipiert, welches es ermöglicht Platten mit unterschiedlicher Wandstärke herzustellen. Die Materialcharakterisierung des LFT-Spritzgießmaterials erfordert eine genaue Kenntnis der Faserorientierung in den Probekörpern. Eine gerichtete, weitgehend parallel zur Fließrichtung ausgebildete Faserorientierung stellt sich bei einem gleichmäßigen Massestrom über die gesamte Plattenbreite ein, was mittels einer definierten Fließbehinderung am Randbereich der Platte erreicht wird.

Zur geometrischen Optimierung der Probenplatte sowie Dimensionierung der Fließbehinderung wurde daher zunächst eine Füllsimulation mit der Analysesoftware Autodesk Moldflow

durchgeführt. Ergebnis der Analyse ist, neben der Vorhersage der sich einstellenden Faserausrichtung in Abhängigkeit von den geometrischen Randbedingungen, die Ermittlung geeigneter Prozessparameterfenster beim Spritzgussprozess (Tabelle 4).

Tabelle 4: Prozessparameter für LFT-Plattenherstellung

Parameter	Platte Zugproben	Platte Druckproben
Plattendicke	3 mm	5 mm
Fläche für Probenentnahme	200 x 300 mm ²	
Spritzdruck max.	169,9 MPa	51,4 MPa
Zuhaltekraft max.	8625 kN	3146 kN
Füllzeit	4,2 s	6,8 s
Verringerung Plattendicke am Staubalken	1,25 mm	2 mm

Abbildung 14 zeigt das gleichmäßige Fortschreiten der Fließfront, welche eine hohe Orientierung der Fasern in der Probenplatte zur Folge hat. Der Ausrichtungstensor liegt im relevanten Plattenbereich bei $> 0,9$ (Abbildung 15).

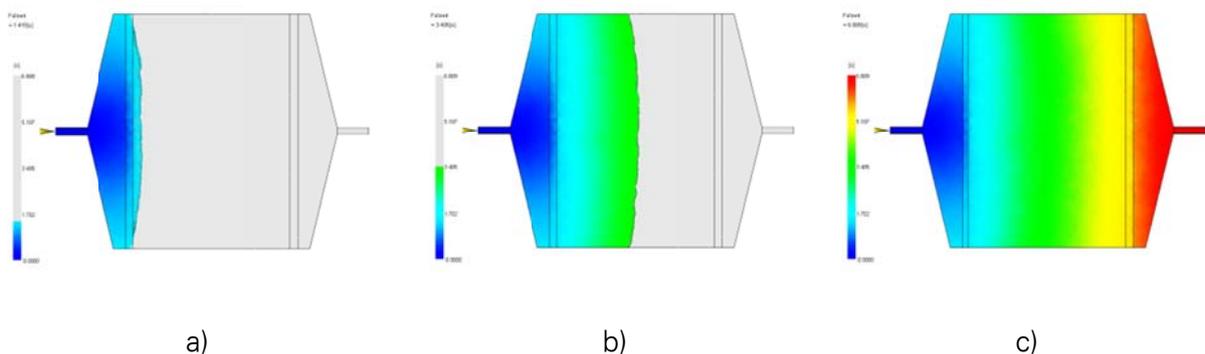


Abbildung 14: Füllbild: a) nach 1,4 s; b) nach 3,4 s; c) nach 6,0 s

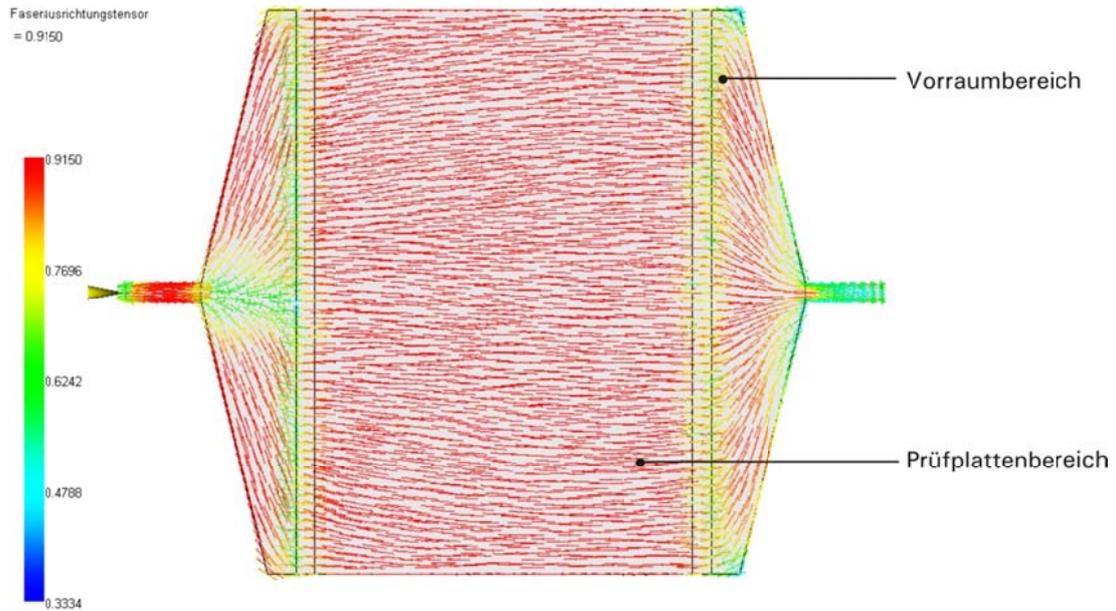


Abbildung 15: Faserausrichtungstensor in Probenplatte

Mithilfe der optimierten Plattengeometrie ist ein Werkzeugeinsatz konstruiert worden, welcher in eine am ILK vorhandene Stammform eingesetzt werden kann (Abbildung 16).

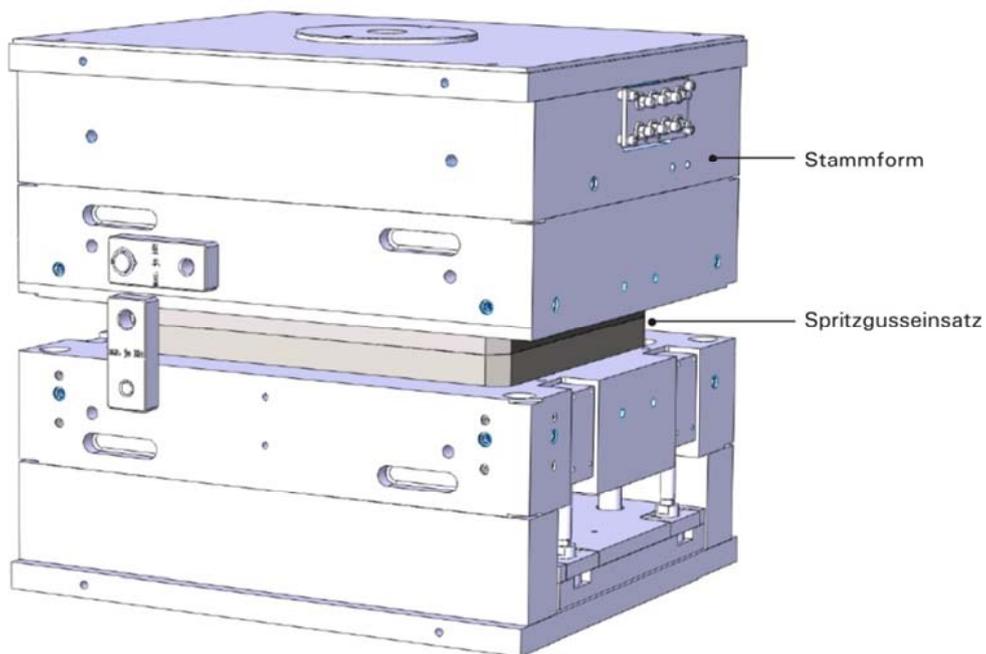


Abbildung 16: Stammform mit Platteneinsatz

Abbildung 17 zeigt das auskonstruierte Spritzgusswerkzeug im Schnitt. Die Kavität ist entsprechend der Füllsimulation ausgeformt. Für die Realisierung einer gleichmäßigen Fließfront und somit einer gerichteten Faserorientierung werden Staubalken (3) verwendet. Diese

behindern zunächst das Fließen der Schmelze in den Prüfplattenbereich, wodurch sich diese im Vorraumbereich der Kavität ansammelt und nach dessen Füllung quasilinearer Fließfront über den Plattenbereich ausbreitet (vgl. Abbildung 14). Die Realisierung von unterschiedlichen Plattendicken erfolgt über Distanzplatten (7), welche unter die Anspritzplatte (6) montiert werden. Die Differenzierung des Kavitätseinsatzes in Spritz- und Distanzplatte hat zum Vorteil, dass für verschiedene Wandstärken nur angepasste Distanzplatten benötigt werden. Diese müssen im Gegensatz zur Anspritzplatte keine polierte und gehärtete Oberfläche besitzen, wodurch eine kostengünstige Anfertigung möglich ist. Die Temperatur- und Drucküberwachung erfolgt mittels zweier Infrarot-Temperatur-Druck-Sensoren, welche in (9) eingesetzt werden. Diese nehmen wie konventionelle Sensoren auch den Werkzeugdruck auf, messen jedoch die Schmelzetemperatur direkt auf deren Oberfläche mittels Infrarot. Um ein Ausbeulen der Kavität infolge der geminderten Werkzeugwandstärke im Bereich der Sensoren zu vermeiden, wird ein Einsatz (1) in den Sensorbaureaum montiert. Es sind zwei Angussstellen vorgesehen, die es ermöglichen bei weiterführenden Versuchen Fließnähte zu untersuchen. Weithin sind in den Staubalken (3) Fließwiderstände in Form von Stauschrauben (4) vorgesehen. Somit können auch Untersuchungen an Bindenähten durchgeführt werden.

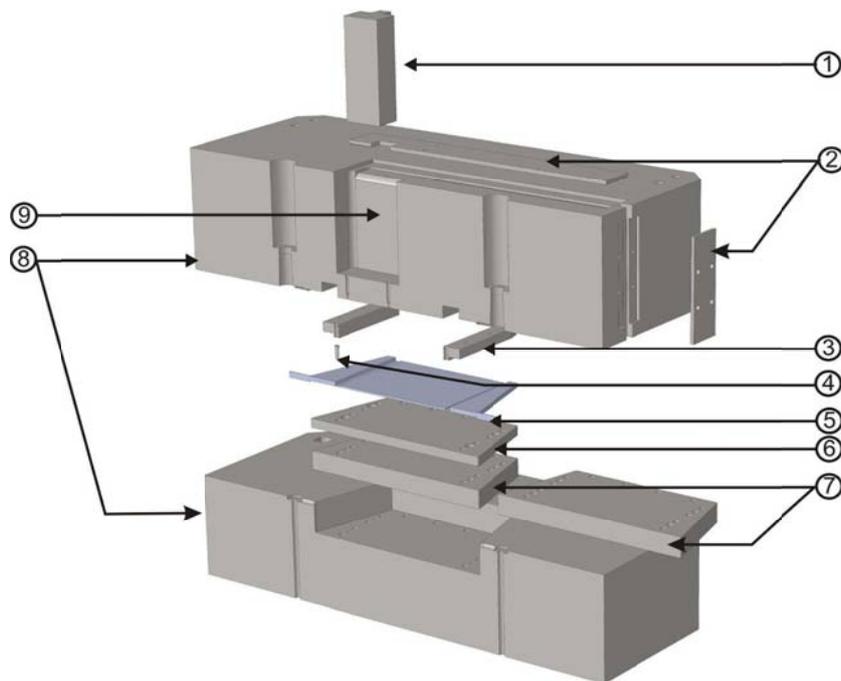


Abbildung 17: Spritzgusswerkzeug (Explosionsdarstellung); 1: Stabilisierender Einsatz für Sensoreinbaureaum, 2: Abdeckplatten Kabelkanal, 3: Staubalken, 4: Stauschraube, 5: Prüfplatte, 6: Anspritzplatte, 7: Distanzplatte, 8: Spritzgusswerkzeug, 9: Bauraum zur Sensoraufnahme



Abbildung 18: Spritzgießwerkzeug zur Herstellung von langfaserverstärkten Platten mit gerichteter Faserorientierung

Versuchswerkzeug Sternform

Im Rahmen des Vorhabens wurde außerdem ein Prüfkörperwerkzeug entwickelt, mit dem innerhalb eines komplexen Probekörpers mehrere Versuche zur Bestimmung von Materialeigenschaften, Grenzschichteigenschaften und technologischen Einflussgrößen abgeleitet werden können. Das Werkzeug wurde ebenfalls als Einsatz für die bereits genannte Stammform konstruiert, um die Kosten für den Werkzeugbau zu reduzieren. Technologisch sollte sowohl die Fertigung im Spritzgießverfahren als auch im Fließpressverfahren ermöglicht werden, weshalb um die Bauteilgeometrie umlaufend eine Tauchkante vorgesehen wurde.

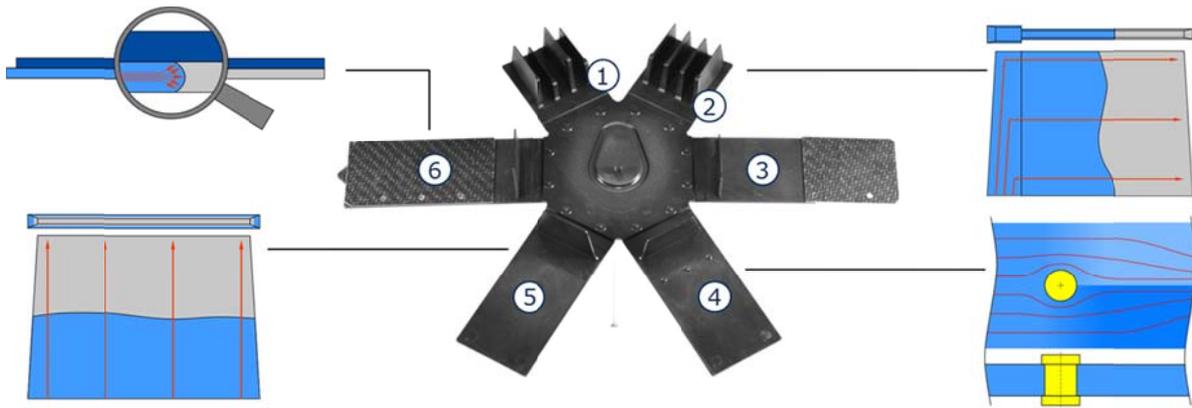


Abbildung 19: Komplexprobekörper

Der Komplexprobekörper (Abbildung 19) ist aufgeteilt in einen zentralen Angussbereich, der als Verteiler der Formmasse dient, und sechs radial verlaufenden Armen, die die benötigten Probekörpergeometrien abbilden. In Bereich (1) kann das Füllverhalten längs angeströmter Rippen unterschiedlicher Höhe, in Bereich (2) das von Rippen mit verschiedenen Entformungsschrägen untersucht werden. Ergänzend finden sich in den Bereichen (3) bis (6) längs angeströmte Rippen unterschiedlicher Geometrie. In (3) können Einleger aus Metall oder textilverstärkten Thermoplasthalbzeugen überlappend angespritzt werden. Daraus entnommene Probekörper dienen der Durchführung von Zugscherversuchen. Im Bereich (4) können optional Inserts eingebracht und umspritzt werden, wobei sich auch dahinter entstehende Bindenähte untersuchen lassen. Der Arm (5) stellt eine ebene Platte zur Entnahme beliebiger Probekörpergeometrien, wie etwa Schulterstäben, dar. In (6) können Einleger, etwa aus Metallblech oder Organoblech flächig überflutet werden. Aus diesem Bereich entnommene Streifenprobekörper eignen sich für die Durchführung von DCB-Versuchen zur Charakterisierung des Mode-II-Verhaltens der Grenzschicht. Vor jedem dieser Arm befindet sich ein Staukasten, um die Ausbreitungsrichtung und somit die Faserorientierung der Formmasse zu homogenisieren. Eine Füllstudie mit vergleichender Moldflow-Simulation belegt die gleichmäßige Formfüllung (Abbildung 20). Die Staukasten können bei Bedarf durch Sperrbalken ersetzt werden, um beim Spritzgießen die dahinter liegende Kavität zu verschließen.

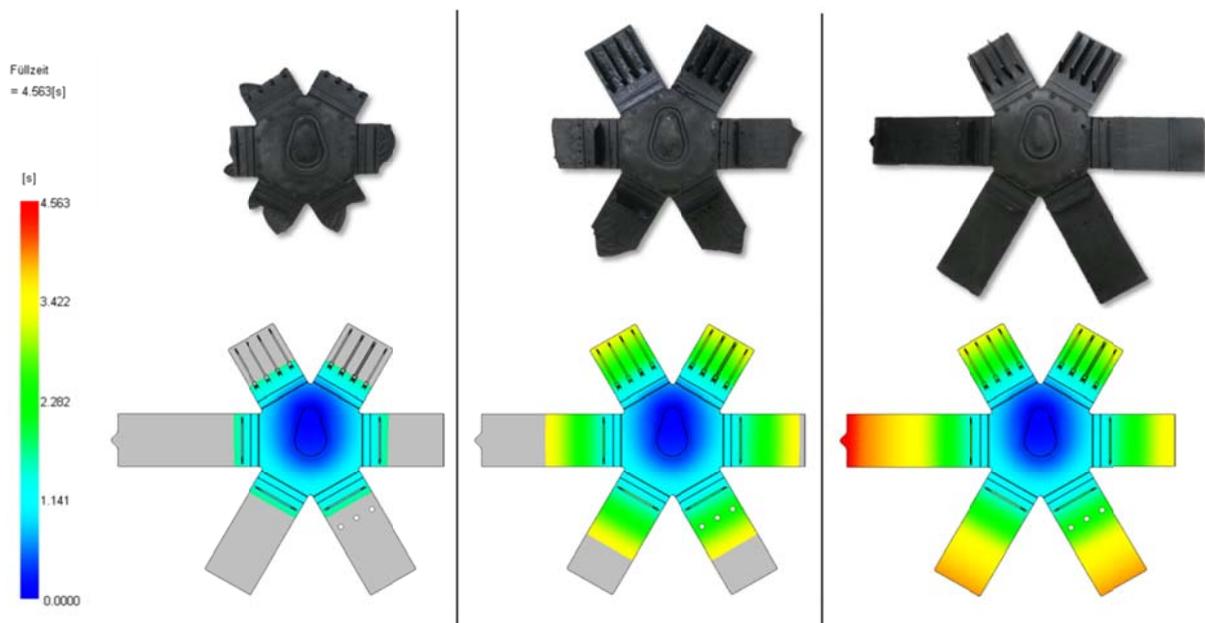


Abbildung 20: Füllstudie des Sternwerkzeuges

Für die Herstellung des Komplexprobekörpers soll eine Vielzahl von unverstärkten und vor allem verstärkten Kunststoffen zum Einsatz kommen (z.B. PP, PE, PA6, PA66, PPA, PPS, PBT, PEI, u.a.). Der Werkzeugeinsatz wird daher mittels Heißwasser bis mindestens 160°C temperiert. Der Einsatz enthält zwei Sensoren zur Prozesstemperatur- und -drucküberwachung sowie zusätzlich 4 Temperatursensoren zur Überwachung der Werkzeugtemperatur. Diese dienen der Qualitätssicherung des Fertigungsprozesses sowie der Ermittlung verfahrensspezifischer Spritzparameter.

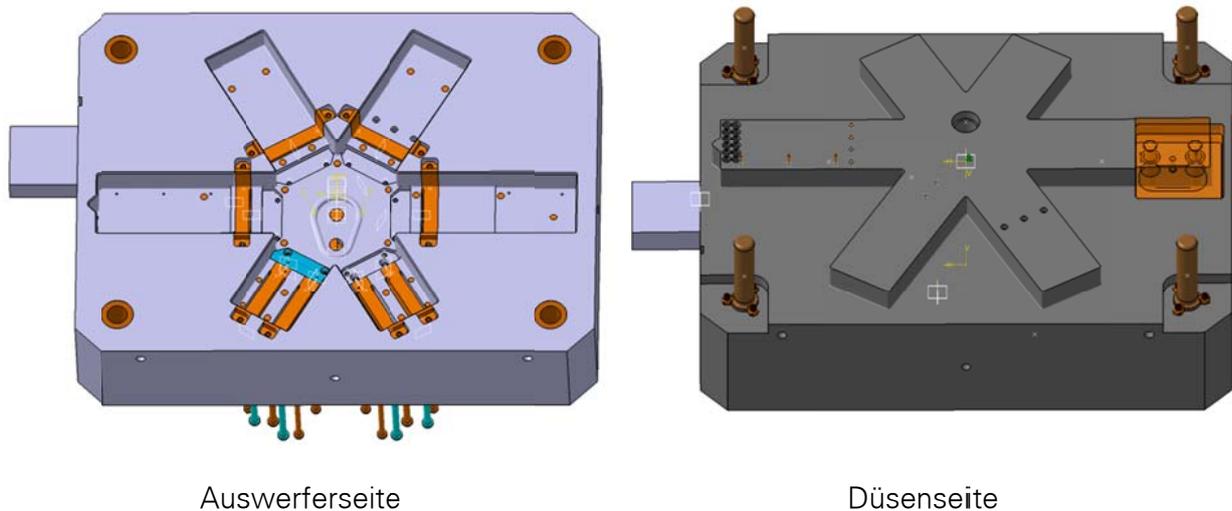


Abbildung 21: Formeinsätze des Sternwerkzeuges

2.1.3.4 Materialcharakterisierung

Die im Teilprojekt 7.2 zu entwickelnde und umzusetzende Tragstruktur wird in einer thermoplastischen Hybridbauweise gefertigt. Die hierbei verwendeten Materialien wurden umfangreichen Untersuchungen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Einsatztemperatur unterzogen.

Hybridgarn

Das thermoplastische FKV-Hohlprofil wird in einem Schlauchblasprozess aus einer Hybridgarn-Preform (Glasfaser/Polyamid 6, 50% Faservolumengehalt) hergestellt. Die Ermittlung der mechanischen Kennwerte des konsolidierten Hybridgarns erfolgte an einem definierten textilen Aufbau, welcher in Abstimmung mit dem Projektpartner Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG festgelegt wurde. Die Herstellung des Laminats erfolgte mittels der Flechttechnologie. Hierbei wurden Flechtschläuche der Einzelschichten hergestellt, geschichtet abgelegt (Abbildung 22) und im Autoklaven miteinander verpresst. Es wurde ein triaxialer Aufbau bestehend aus $\frac{2}{3}$ $\pm 45^\circ$ -bidirektional (BD) Köpergeflecht und $\frac{1}{3}$ unidirektional (UD)-Anteil gewählt. Aus den so entstandenen Platten wurden Prüfkörper mittels Wasserstrahlschneiden entnommen.



Abbildung 22: Triaxialer FKV-Aufbau; Festlegung der Fertigungstechnologie

Die durchgeführten Prüfungen sind in Tabelle 5 aufgeführt. Abbildung 23 zeigt exemplarisch den Einfluss der Temperatur auf die Zugfestigkeit. Hierbei ist außerdem deutlich der Einfluss der UD-Schichten auf die Zugfestigkeit des Verbundes zu erkennen.

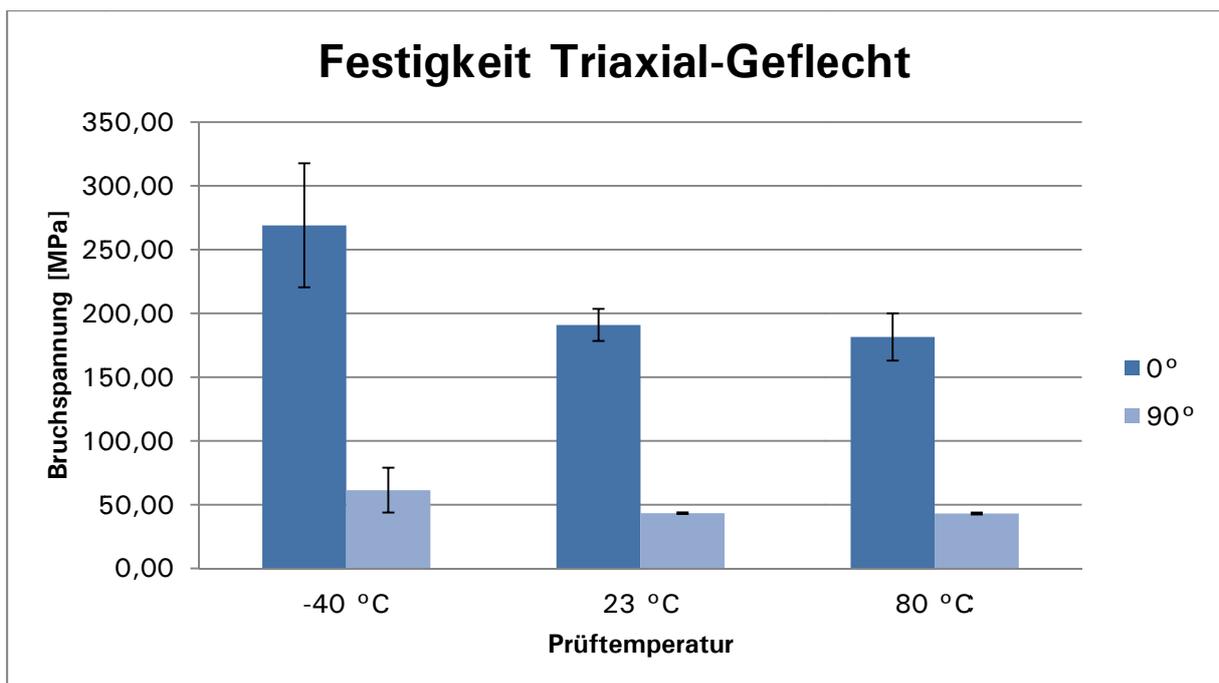


Abbildung 23: Zugfestigkeit des Triaxialgeflechts in Abhängigkeit der Temperatur und der Belastungsrichtung

Langglasfaserverstärkter Thermoplast (LFT)

Mit dem Spritzgießwerkzeug (Abbildung 18), welches im ersten Berichtszeitraum konstruiert und gefertigt worden ist, wurden Platten unterschiedlicher Dicke hergestellt, aus denen

Prüfkörper für die Charakterisierung der mechanischen Kennwerte gewonnen wurden. In Tabelle 5 sind die durchgeführten Versuche zusammengefasst.

Abbildung 24 zeigt repräsentativ für die durchgeführten Versuche die Festigkeiten der Spritzgießkomponente (Langglasfaser, Polyamid 6 + Polyamid 66, Fasergehalt 50%) unter Temperatureinfluss. Weiterhin ist die richtungsabhängige Festigkeit der Prüfkörper zu erkennen. Das Konzept zur Herstellung von Platten mit gerichteter Langfaserorientierung, welches bei der Konstruktion des Spritzgießwerkzeuges verfolgt worden ist, konnte hierdurch verifiziert werden.

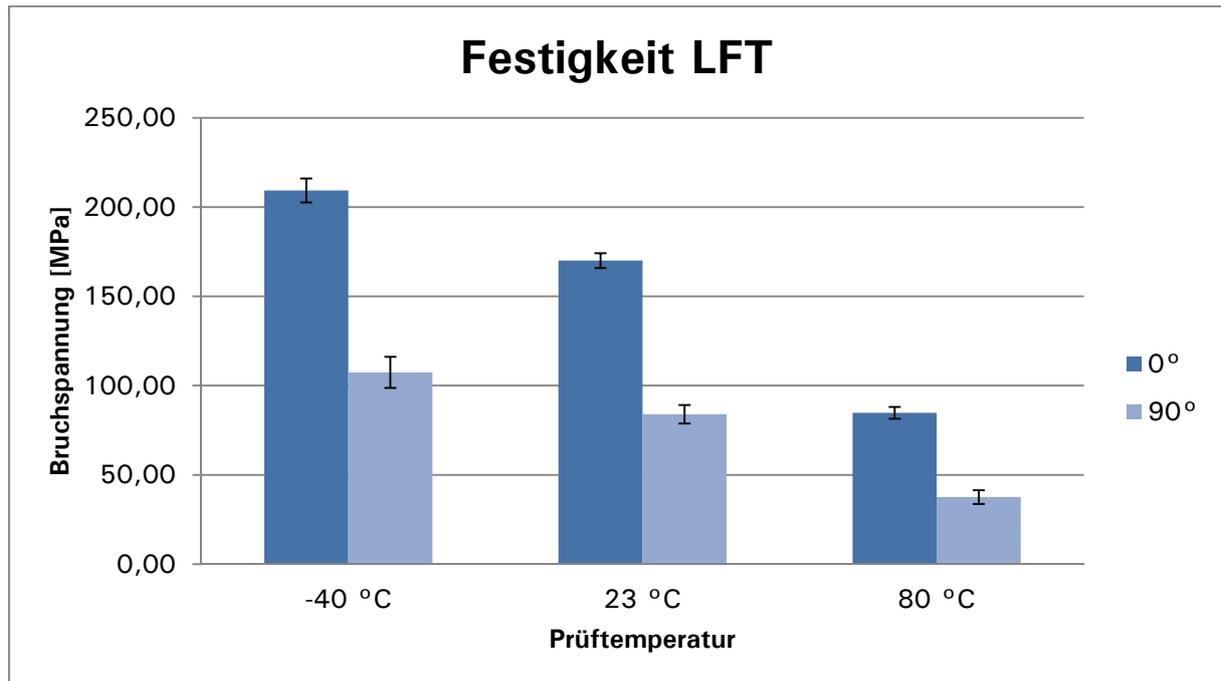


Abbildung 24: Zugfestigkeit der LFT-Spritzgießkomponente in Abhängigkeit der Temperatur und der Belastungsrichtung

Tabelle 5: Prüfprogramm quasistatische Prüfungen; Triaxialprüfkörper und LFT-Prüfkörper

Belastungs-art	Prüf-temperatur [°C]	Belastungs-richtung	Norm	Kennwerte Triaxialgeflecht			Kennwerte LFT		
				Elastizitäts-/Schub-modul [GPa]	Zug-/Schub-festigkeit [MPa]	Bruchdehnung/Schubver-zerrung [%]	Elastizitäts-/Schub-modul [GPa]	Zug-/Schub-festigkeit [MPa]	Bruchdehnung/Schubver-zerrung [%]
Zug	-40	0°	DIN EN ISO 527	15,8	269	2,19	16,3	209	1,55
	-40	90°		6,1	61	3,10	9,0	107	1,27
	23	0°		12,1	190	1,89	14,6	170	2,48
	23	90°		3,8	43	4,49	7,8	84	2,05
	80	0°		11,7	181	1,70	6,9	84	2,62
	80	90°		3,7	43	4,75	2,4	37	4,20
Druck	23	0°	DIN EN ISO 14126	13,6	120	1,43	13,4	251	11,70
	23	90°		5,8	70	2,47	7,8	166	14,24
Schub	23	0°	ASTM D 5379	5,3	52	0,33	2,2	76	0,13
	23	90°		3,9	37	0,45	2,0	71	0,13
Biegung	23	0°	DIN EN ISO 14125	5,3	112	4,51	14,3	281	2,81
	23	90°		4,6	90	5,05	5,3	110	4,57

Anbindungsfestigkeit von LFT und Hybridgarn

Neben den mechanischen Kennwerten der Einzelkomponenten ist die Festigkeit der Verbindung zwischen dem thermoplastischen FKV-Hohlprofil und der Spritzgießkomponente eine wesentliche Kenngröße. Hierbei kann durch das Anschmelzen der Matrix im oberflächennahen Bereich eine stoffschlüssige Verbindung hergestellt werden. Zur Charakterisierung dieser Festigkeit wurden Anspritzversuche durchgeführt, bei denen ein Organoblech, bestehend aus der gleichen Faser-Matrix-Kombination wie das spätere Hohlprofil, auf unterschiedliche Temperaturen vorgewärmt und anschließend angespritzt wurde. Bei den nachfolgenden Zugversuchen wurden die Verbindungsfestigkeiten geprüft. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Rippenfußgeometrie auf der Verbindungsfestigkeit getestet. Es konnte evaluiert werden, dass ein Vorwärmen des anzuspritzenden Hohlprofils notwendig ist, wenn die rechnerische Auslegung der Bauteilstruktur über den Formschluss hinaus eine stoffschlüssige Verbindung der Komponenten erforderlich macht. Dabei werden bis zu einer Oberflächentemperatur von 130 °C noch relativ hohe Verbindungsfestigkeiten erzielt.

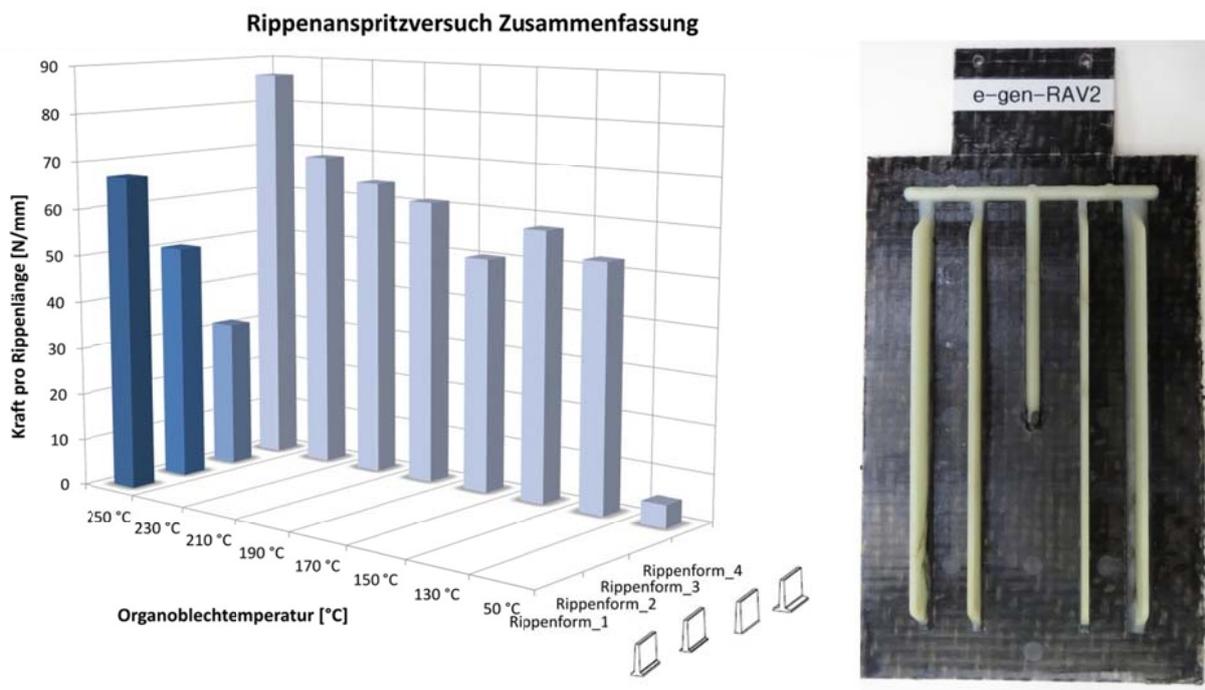


Abbildung 25: links: Ergebnisse Rippenabzugsversuche; rechts: Organoblech mit angespritzten Rippen

Bauteilversuche zur Validierung der Struktursimulationen

Die Struktursimulationen zur Auslegung des Batterieträgers wurden durch den Projektpartner Porsche durchgeführt. Hierzu wurden durch Porsche die ermittelten Materialkennwerte in Werkstoffmodelle überführt. Für die Validierung der Kennwerte wurden numerische Simulationen an Ersatzstrukturen durchgeführt. Dabei wurde das Hohlprofil des Batterieträgers zwei verschiedenen Biegeprüfungen unterzogen (Abbildung 26). Hierfür wurde das

Hohlprofil im Konsolierwerkzeug des Endbauteils (s. Abschnitt 2.1.3.7) gefertigt und in zwei Teile geschnitten, wobei ein Teil des Profils in einem Drei-Punkt-Biegeversuch geprüft wurde und der zweite Teil in einem sogenannten Kragarmversuch.

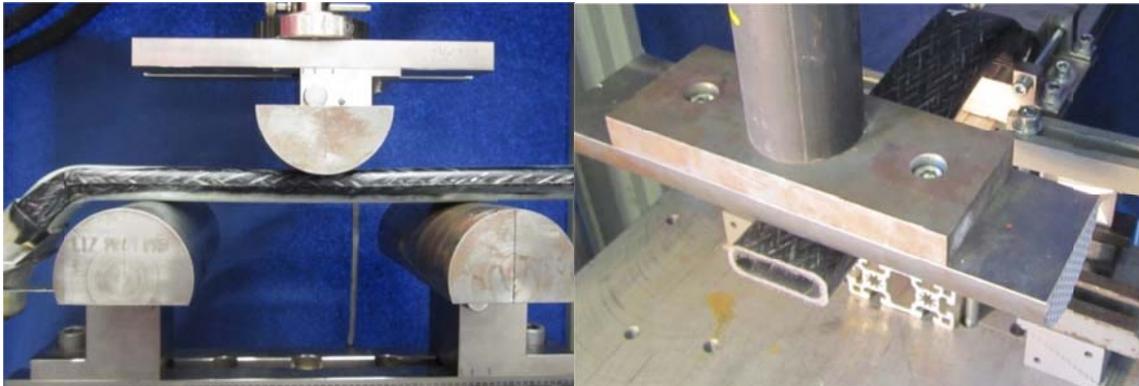


Abbildung 26: Drei-Punkt-Biegung des Hohlprofils (links), Kragarmbiegung des Hohlprofils (rechts)

Abbildung 27 zeigt repräsentativ die ermittelten Kraft-Weg-Kurven aus einer Drei-Punkt-Biegeversuchs. Es ist zu erkennen, dass das Verformungsverhalten der Struktur in drei Bereiche unterteilt werden kann. Im ersten Bereich kommt es zu einem annähernd linearen Anstieg der Durchbiegung unter Belastung. Nach dem Bruch des Hohlprofils schließt sich der zweite Bereich an, der durch ein stark streuendes Nachbruchverhalten geprägt ist. Die Streuung des Nachbruchverhaltens verringert sich im dritten Bereich wieder. Es kann an der Kurve gesehen werden, dass das Hohlprofil nach dem Bruch weiterhin Kraft aufnehmen und sich dabei stark verformen kann. Durch dieses gutmütige Nachbruchverhalten kann sich der Batterieträger während eines Crashes nach Eintritt des Initialversagens mit der umgebenden Struktur weiter verformen. Dabei kann das Halten der Batterie weiterhin gewährleistet werden.

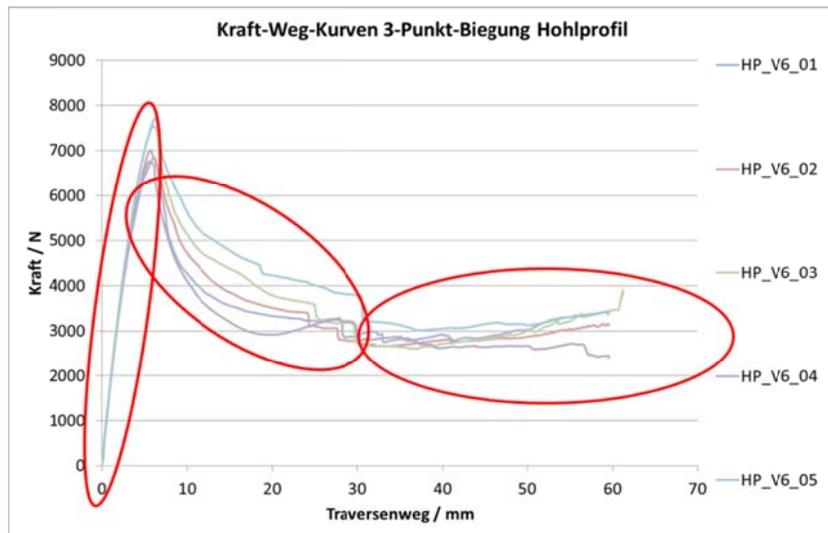


Abbildung 27: Kraft-Weg-Kurven einer Drei-Punkt-Biegung des Hohlprofils

2.1.3.5 Voruntersuchungen zur Verarbeitung von Hybridgarn

Zur Ermittlung der technologischen Einsatzgrenzen bezüglich erreichbarer Bauteilgeometrien hoher Reproduzierbarkeit sind Untersuchungen zum Flechten von Hybridgarnen und anschließendem Konsolidieren mittels des Schlauchblasverfahrens durchgeführt worden. Abbildung 28 zeigt ein aus dem Hybridgarn gefertigtes vierlagiges Demonstrator-Bauteil, welches unterschiedliche Querschnittsgeometrien und Umlenkungen aufweist und das hohe Gestaltungspotential der fokussierten Technologie eindrucksvoll demonstriert.

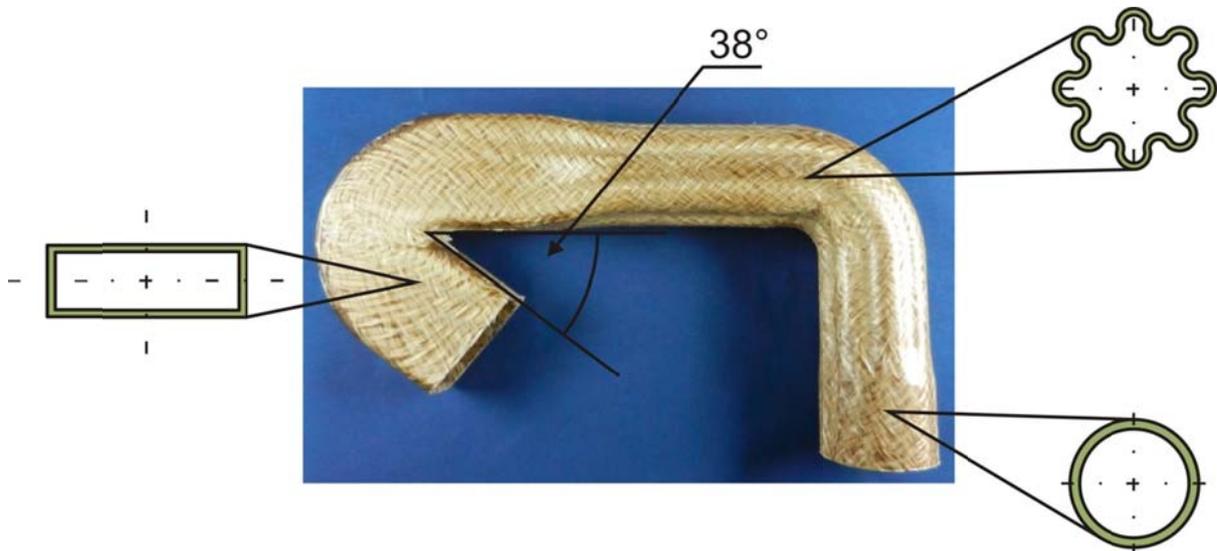


Abbildung 28: Demonstratorbauteil mit verschiedenen Querschnitten

2.1.3.6 Werkzeugkonzept Batterieträger

Für die technologische Umsetzung und Fertigung der Tragstruktur wurde ein in Abbildung 29 dargestellter zweistufiger Prozess entwickelt.

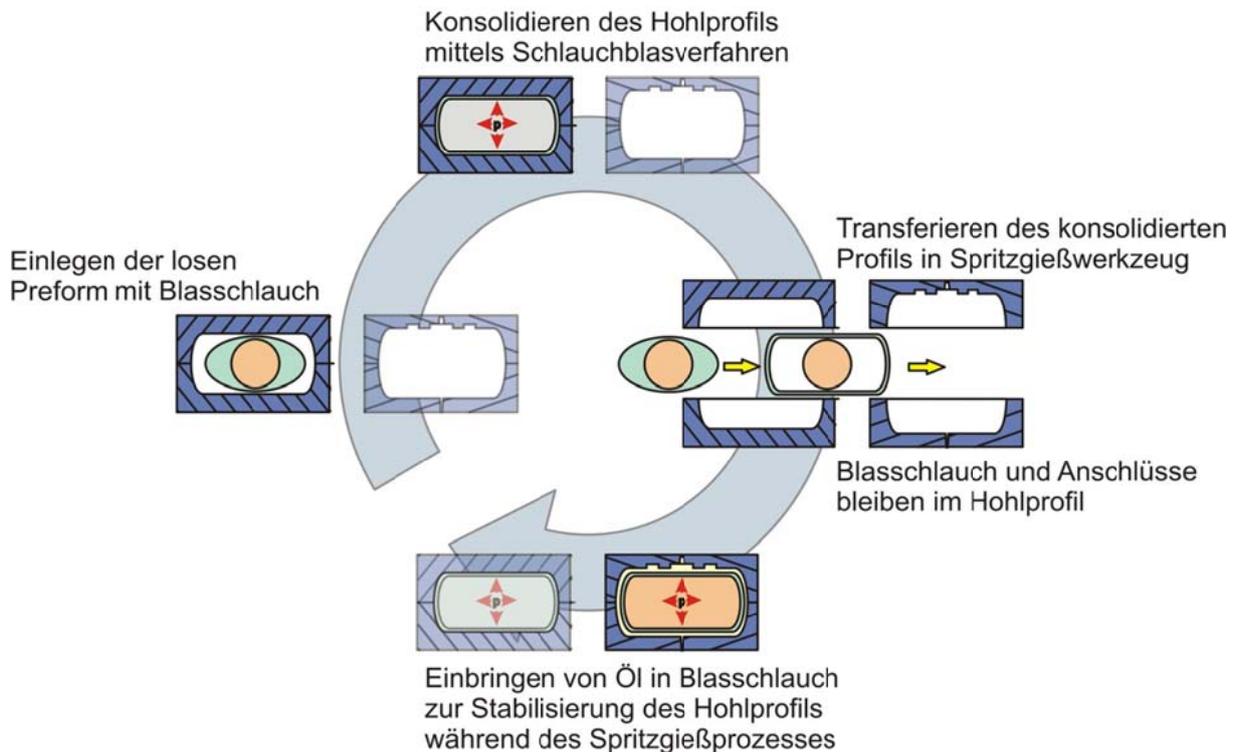


Abbildung 29: Werkzeugkonzept zur Fertigung eines thermoplastischen Hohlprofils mit einer im Spritzgießprozess angebundenen Funktionsfläche

Zunächst wird eine Preform aus Hybridgarn mittels Flechttechnologie hergestellt und im Schlauchblasprozess konsolidiert. Da die Preform zusammen mit den Anschraubkonsolen in das Schlauchblaswerkzeug eingelegt wird, kann in diesem Prozessschritt zusätzlich zur Formgebung des Profils auch die Verbindung mit den Konsolen erfolgen. Für die Erzielung einer stoffschlüssigen Verbindung werden die Konsolen mit einem Haftvermittler vorbehandelt. Das konsolidierte Hohlprofil wird im nächsten Schritt in das Spritzgießwerkzeug eingelegt und umspritzt. Da während des Spritzgießvorganges Druckbelastungen von bis zu 500 bar auf das Profil wirken, muss dieses zur Vermeidung des Kollabierens gestützt werden. Hierfür wurden Vorversuche durchgeführt, die die Machbarkeit des Hohlprofilumspritzens belegen (Abbildung 30). In dem hier entwickelten Prozess wird das Profil mit einer Flüssigkeit gefüllt und so gegenüber den Spritzgießdruck stabilisiert. Es wurden dazu Konsolen entworfen (Abbildung 31), welche sowohl für den Schlauchblasprozess als auch für das Stützen des Profils verwendet werden können. Der für das Schlauchblasen notwendige, mediendichte Silikonschlauch wird nachfolgend als dichtender Liner beim Befüllen des Profils mit Öl verwendet. Bei einem späteren Serienprozess kann so der Umrüstaufwand verringert werden.



Abbildung 30: Demonstrator zum Umspritzen von konsolidierten Hohlprofilen

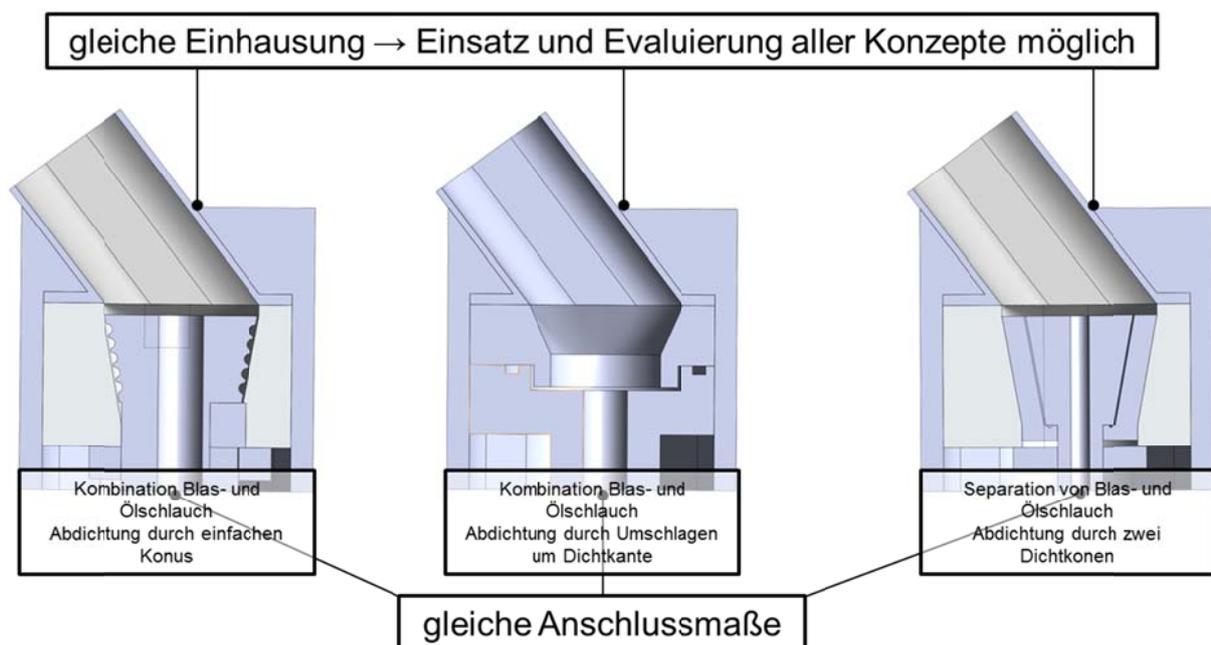


Abbildung 31: Entwicklung verschiedener Konzepte zur Abdichtung des profilstabilisierenden Fluids im Spritzgießprozess

Zur Validierung des mit dem Werkzeugbauer entwickelten Angusskonzeptes des Spritzgießwerkzeuges wurden umfangreiche Füllsimulationen durchgeführt (Abbildung 32). Ziel der Simulationen war die Abschätzung der notwendigen Füllzeit in Abhängigkeit der Druckobergrenze von 500 bar. Eine Erhöhung des Spritzgießdruckes muss vermieden werden, da die Ventile des Werkzeuges, welche das stützende Fluid absperrern, nur bis 700 bar belastbar sind und eine zusätzliche Sicherheit eingehalten werden soll. Zusätzlich wurde die Struk-

tur hinsichtlich der Ausbildung von Binde- und Fließnähten in hochbelasteten Bauteilbereichen untersucht. Die Ergebnisse der Füllsimulation wurden im Nachhinein mit Füllstudien am realen Werkzeug verglichen.

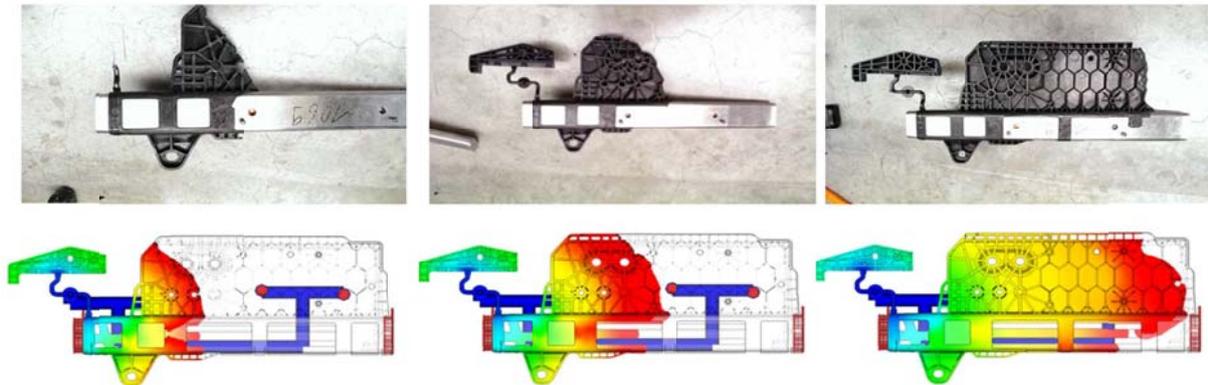


Abbildung 32: Füllstudie (oben) und Vorhersage des Füllverhaltens mittels Moldflow

2.1.3.7 Fertigung Batterieträger

Konsolidieren Hohlprofil

Die Fertigung des Hohlprofils erfolgte entsprechend dem Werkzeugkonzept im Schlauchblasprozess. Hierfür wurde ein Aluminium-Werkzeug konstruiert und gefertigt, welches für einen variothermen Betrieb ausgelegt ist (Abbildung 34). Zunächst wurde die Preform aus Hybridgarn geflochten und über einen Blasschlauch aus Silikon gezogen. Anschließend wurde um die Preform eine Haftvermittlerfolie gewickelt und die Aluminiumkonsolen zur Anbindung an die Fahrzeugstruktur wurden über die vorbereitete Preform gesteckt.



Abbildung 33: Vorbereitete Preform mit Haftvermittler, Aluminiumkonsole, Blasschlauch

Im nächsten Arbeitsschritt wurden die Preform und die Aluminiumkonsolen in das Werkzeug drapiert. Der Anschluss des Blasschlauchs wurde über die prozessbegleitenden Dichtkonsolen realisiert (s. Abschnitt 2.1.3.6). Im anschließenden Konsolidierprozess wurde die Preform über den Blasschlauch mit einem Druck von 5 bar an die Werkzeuginnenkontur gepresst. Unter Wärmezufuhr wurde der Thermoplast aufgeschmolzen und die Preform imprägniert.

Durch Abkühlen des Werkzeuges erstarrte die Matrix und das fertige Hohlprofil konnte dem Werkzeug entnommen werden.



Abbildung 34: Preform in Konsolidierwerkzeug

Umspritzen Hohlprofil

Das konsolidierte Hohlprofil wurde mit den prozessbegleitenden Dichtkonsolen im nächsten Prozessschritt dem Spritzgießwerkzeug zugeführt, in welchem es umspritzt wurde. Das dafür notwendige Spritzgießwerkzeug wurde in enger Zusammenarbeit mit der Firma Krumpholz konzipiert. Die Konstruktion und Fertigung des Werkzeuges wurde komplett durch Krumpholz durchgeführt.

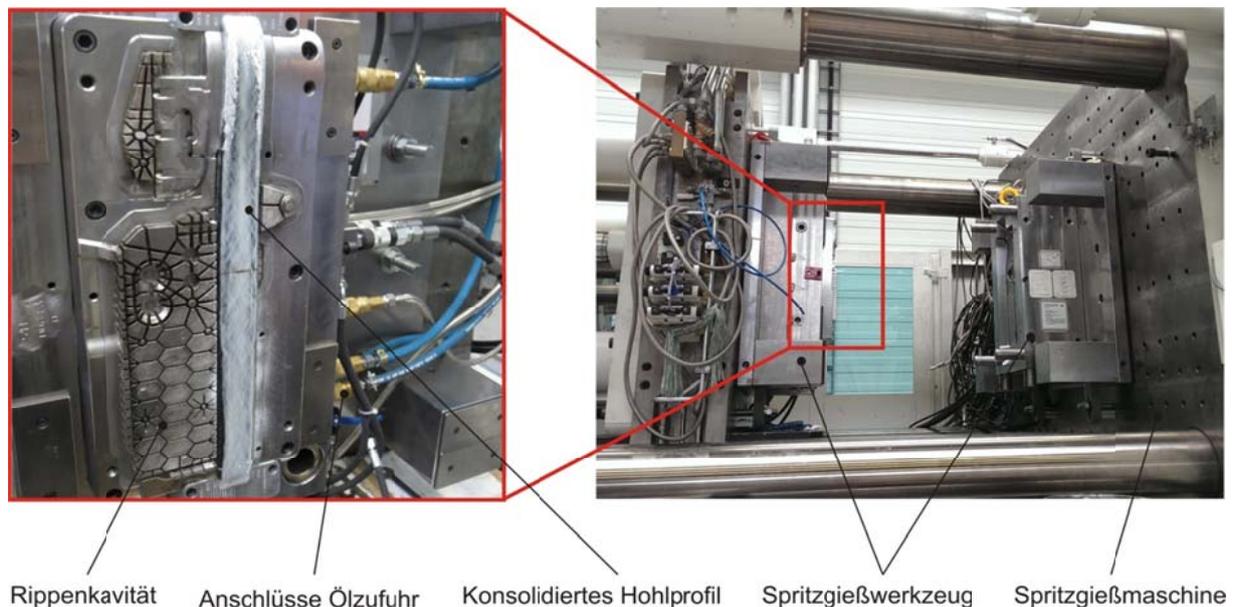


Abbildung 35: Spritzgießwerkzeug

Die Erfahrungen aus den Vorversuchen hinsichtlich der Notwendigkeit des Profilabstützens während des Umspritzens wurden bei ersten Versuchen bestätigt. Abbildung 37 (links) zeigt, wie ein ungestütztes Profil während des Umspritzens kollabiert. Es wurden daher zwei Stützkonzepte fokussiert und am Batterieträger getestet. Zum einen sollte das Hohlprofil mittels eines inkompressiblen Fluids gestützt werden. Hierfür kann das Profil im Spritzgießwerkzeug

über die prozessbegleitenden Konsolen mit Öl oder anderen Flüssigkeiten gefüllt werden. Die Versuche zeigten, dass ein einfaches Einfüllen der Flüssigkeit nicht ausreicht, um das Profil schadungsfrei zu umspritzen. Abbildung 36 verdeutlicht den Effekt, der dabei auftritt. Der lokal auf das Profil einwirkende Spritzgießdruck wird in einen globalen Fluidinnendruck umgewandelt. Dadurch wird das Hohlprofil an die Werkzeugwand gedrückt. Bei ungefüllten Kavitätsbereichen wird das Profil in diese hineingepresst, wodurch zum einen die Kavität teilweise verstopft wird und das Profil nicht vollständig umspritzt werden kann. Außerdem kann es in Bereichen der Kanten der Kavität zu Faserbrüchen des Hohlprofils kommen.

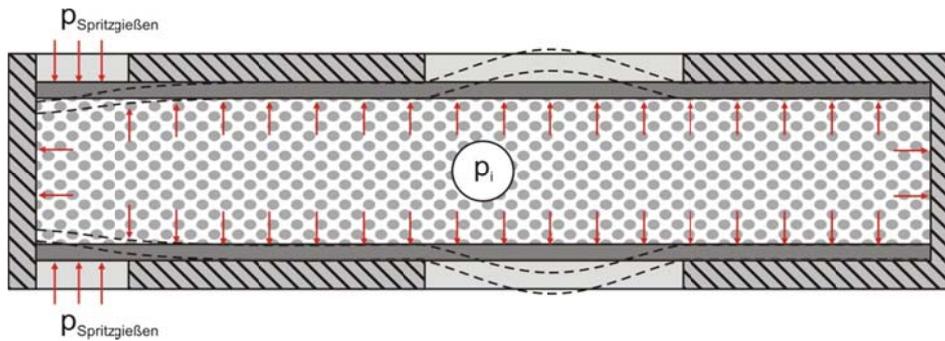


Abbildung 36: Druckumlagerung beim Umspritzen von fluidgefüllten Hohlprofilen

Das zweite in dem Projekt untersuchte Stützkonzept beinhaltet das Abstützen des Profils durch rieselfähige Partikel. Diese werden in das Profil eingefüllt, bevor das Profil in das Spritzgießwerkzeug eingelegt wird. Die prozessbegleitenden Konsolen schließen dabei die Partikel in dem Profil ein und verhindern deren Austreten bei den weiteren Prozessschritten. Abbildung 37 zeigt, dass es mit dieser Stützmethodem möglich ist, das Hohlprofil schadungsfrei zu umspritzen. Nach dem erfolgreichen Umspritzen lassen sich die Partikel durch öffnen der Konsolen problemlos und rückstandsfrei aus dem Hohlprofil entfernen.



Abbildung 37: Kollabiertes Hohlprofil (links), schadungsfrei umspritztes Hohlprofil (rechts)

2.1.3.8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Neben der Materialprüfung und der technologischen Umsetzung des Batterieträgers wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die in dem Projekt vorangetriebene Weiterentwicklung und Ergänzung der Herstellung von thermoplastischen Hohlprofilen mittels Schlauchblasen durchgeführt. Dabei wurde zunächst ein Prozessschema entwickelt (Abbildung 38). Die wesentlichen Schritte, die in einem solchen Prozess abgearbeitet werden müssen sind

1. Flechten der Preform,
2. Trocknen der Preform,
3. Konsolidieren mittels Schlauchblasen,
4. Zuführen des Hohlprofils in einen Puffer bzw. Zwischenspeicher,
5. Oberflächenvorbehandlung des Hohlprofils (Erwärmen oder Aufbringen eines Haftvermittlers),
6. Einlegen des Profils in die Spritzgießmaschine
7. Einfüllen des Stützmediums
8. Umspritzen des Hohlprofils,
9. Entnahme des Hohlprofils,
10. Nacharbeiten (Entgraten, Entnahme der prozessbegleitenden Konsolen, Entfernen des Stützmediums)

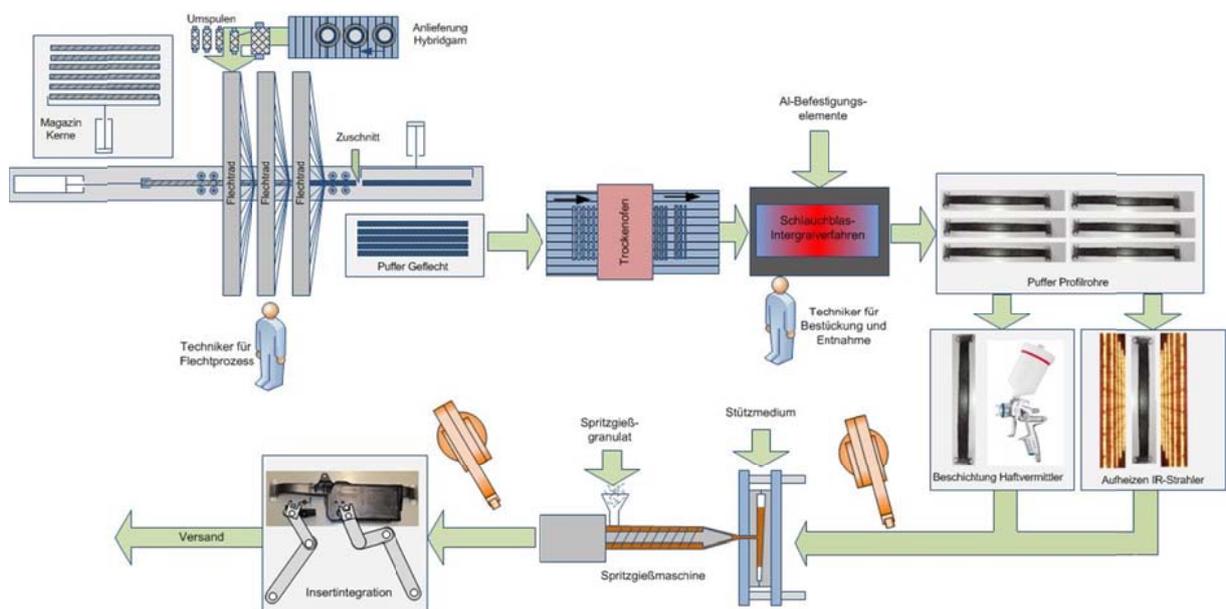


Abbildung 38: Prozessschema für die Herstellung des Batterieträgers

Ausgehend von diesem Prozessschema wurde eine Kostenkalkulation für den Prozess durchgeführt. Dabei wurden zwei Szenarien betrachtet, bei denen entweder 55.000 Träger pro Jahr oder 65.000 Träger pro Jahr gefertigt werden sollen. Die Betrachtung beinhaltet keine Berücksichtigung von Immobiliennebenkosten, Infrastruktur, Lager-, Transport- und

Versandkosten. Die Randbedingungen für die Betrachtungen sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Randbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Posten	Kosten
Abschreibung	7 a
Instandhaltungskosten [% vom Jahresinvest]	10%
Personalkosten Werker	70 €/h
Energiekosten	0,15 €/KWh
Raumkosten	7,50 €/m ²
Zinssatz	2,375 %/a
Arbeitstage	230 d
Stunden pro Schicht (exkl. Wartung + Bestückung)	7 h/Schicht
Materialgemeinkosten	5 %
Restfertigungsgemeinkosten	10 %
Materialpreis Hybridgarn	6,50 €/kg
Materialpreis LFT	6,95 €/kg
Masse Hohlprofil	900 g
Masse Plattform	1271 g
Verschnitt/Ausschuss Spritzgießen	3 %
Verschnitt/Ausschuss Flechten	7 %
Anschaffungskosten Umspulmaschine	15.000 €
Anschaffungskosten Flechtmaschine	100.000 €
Anschaffungskosten Trockungsstation	100.000 €
Anschaffungskosten Konsolidierstation	50.000 €
Anschaffungskosten Station zur Randschichtbehandlung	100.000 €
Anschaffungskosten Spritzgussmaschine	885.000 €
Anschaffungskosten Spritzgieß-Werkzeug	170.000 €
Anschaffungskosten Handling	60.000 €

Die Betrachtungen wurden sowohl für einen 1-Schicht-, einen 2-Schicht- als auch einen 3-Schichtbetrieb durchgeführt. Die so berechneten Bauteilkosten sind in Abbildung 39 dargestellt.

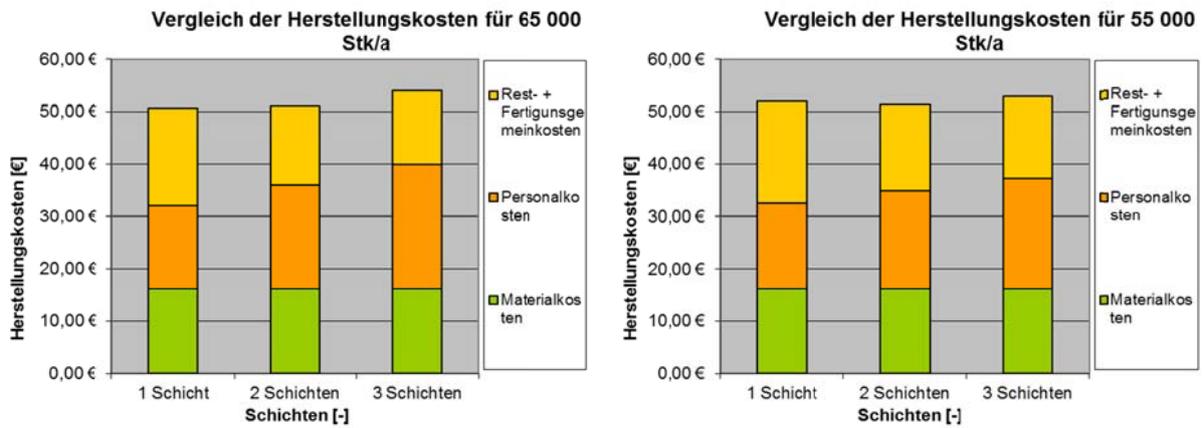


Abbildung 39: Kosten pro Bauteil

2.1.4 Reduzierung der ungefederten Massen (AP 7.3 – ILK)

Ein wesentliches Ziel des Verbundprojektes „e-generation“ ist die Reduzierung der Fahrzeugmasse. Einen wichtigen Beitrag soll dabei die Entwicklung eines neuartigen Federbeins in Faserverbundbauweise im Rahmen des AP 7.3 leisten. Da es sich hierbei um einen Bestandteil der ungefederten Massen am Fahrzeug handelt, ist durch eine Gewichtsreduktion einerseits von einem signifikant geringeren Energieverbrauch je eingespartem Kilogramm auszugehen, andererseits ist ein deutlicher positiver Einfluss auf den Fahrkomfort zu erwarten. Entgegen dem ursprünglich im Vorhaben vorgesehenen Fahrzeugträger „Boxter E“ mit der Zielvorgabe, die Masse um 20% gegenüber dem Serienstand zu verringern, bei einer gleichzeitigen Kostenreduktion um 50%, ist im Konsortium der Volkswagen „Up!“ als Modulträger definiert worden, da hier auf Grundlage der Stahlbauweise im Serienstand ein höheres Leichtbaupotential zu erwarten war, bei gleichzeitig geringeren mechanischen Fahrlasten. Die ursprünglich vorgesehene Berücksichtigung der Integration der neu dimensionierten Bremsanlage aus Teilprojekt 6 entfällt somit. Stattdessen muss die Aufnahme von Standard-Bremssätteln ermöglicht werden.

2.1.4.1 Entwicklung eines Federbeinradträgers in Faserverbundbauweise

Der Federbein-Radträger erfüllt als zentrales Bauteil im Bereich der Radaufhängung folgende wesentliche Funktionen:

- Stützung und Führung des Rades,
- Übertragung von Stößen durch Fahrbahnunebenheiten an das Federbein,
- Abstützung der Bremse.

Die dabei auftretenden Lasten sind vom assoziierten Projektpartner Volkswagen AG mit Schnittlasten an den Anbindungspunkten des Federbein-Radträgers in Form einer Lastfalltabelle definiert worden. Die Positionen der Anbindungspunkte im Raum sollen denen des Referenzbauteiles entsprechen.

Es wurden drei grundsätzliche Tragwerkskonzepte betrachtet, eine einschalige offene Bauweise, eine zweischalige geschlossene Bauweise und eine zweischalige offene Bauweise, wobei die Schalen jeweils aus endlosfaserverstärkten flächigen Halbzeugen (Organobleche) bestehen. Jedes dieser Konzepte kann durch zusätzliche Verrippungen aus kurz- oder langfaserverstärkten Thermoplasten versteift werden. Die Anbindung des konventionellen Bremssattels muss aufgrund der hohen auftretenden Temperaturen und mechanischen Lasten durch einen metallischen Adapter umgesetzt werden.

Als Grundlage für die Konstruktion, die durch den Projektpartner ZF Friedrichshafen AG mit Unterstützung des ILK getragen wird, wurde eine Topologieentwicklung unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Bauraumes mit Hilfe des FE-Systems Hyperworks durchgeführt. Das Modell bildet sämtliche Lastfälle der Lastfalltabelle ab. Anhand der resul-

tierenden Lastpfade kann die erforderliche Geometrie und Materialstärke der Außenschale abgeschätzt werden. Dabei wurde deutlich, dass insbesondere bei der Anbindung des Dämpferrohres der gesamte zur Verfügung stehende Bauraum ausgenutzt werden muss. Um die weitere Detailkonstruktion beim Projektpartner ZF Friedrichshafen AG zu unterstützen, wurden am ILK Topologieoptimierungen des zur Verfügung stehenden Bauraumes durchgeführt im Inneren der Organoblechschalen durchgeführt. Hiermit konnten die optimalen Positionen der Rippen innerhalb der vorher definierten Schalen bestimmt werden, um das globale und lokale Verformungsverhalten der Federbeinradträgers auf die gegebenen Randbedingungen zu optimieren. Des Weiteren wurde für den in Abbildung 42 gezeigten Radträgerentwurf mit Hilfe der Topologieoptimierung ein gewichtsoptimaler Bremssatteladapter abgeleitet.

Zur Erzielung einer hohen Produktivität bei geringen Herstellungskosten stellt die Auswahl und materialgerechte Anpassung geeigneter Fertigungsverfahren einen zentralen Aspekt zur Zielerfüllung des Projekts dar. Dabei erweisen sich insbesondere das Spritzgießen und Fließpressen in Kombination mit einer Organoblechumformung als hochproduktive Verfahrensintegration zur Herstellung thermoplastischer Faserverbundbauteile, da hier auch der Fügeprozess zwischen den unterschiedlichen Faserverbundausgangskomponenten direkt vorgenommen werden kann. Bei der Erarbeitung der Tragwerkskonzepte wurde deshalb ein ganzheitlicher Entwicklungsansatz verfolgt, welcher neben der Erfüllung aller mechanischen Anforderungen auch eine effiziente Herstellbarkeit gewährleistet.

Auf Basis der Vorbetrachtungen wurde als Vorzugskonzept für die Umsetzung eines Federbein-Radträgers in Faserverbundbauweise mit thermoplastischer Matrix eine offene zweischalige Bauweise mit Verrippung identifiziert. Die Schalen bestehen aus endlosfaserverstärktem thermoplastischen Kunststoff und werden aus ebenen Halbzeugen (Organoblechen) warmumgeformt. Die Umformung erfolgt im Spritzgießwerkzeug, sodass an das plastifizierte Organoblech Rippen aus glasfaserverstärktem Kunststoff angespritzt werden können, welche die Schalen aussteifen. Als besonderes Merkmal des erarbeiteten Konzeptes ist ein zweistufiges Fertigungsverfahren zu nennen, welches sich dadurch auszeichnet, dass in einem ersten Prozessschritt die innen liegende Schale umgeformt sowie hinterspritzt wird und diese anschließend als Einlegeteil für einen zweiten Prozessschritt dient. In diesem wird die außen liegende Schale umgeformt und durch Anspritzen weiterer Rippen mit der Innenschale stoffschlüssig verbunden, wodurch ein nachträglicher Fügeprozess der Schalen entfällt. In Abbildung 40 ist schematisch der Fertigungsprozess für den Federbeinradträger von der Halbzeuggbereitstellung bis zur Montage dargestellt.

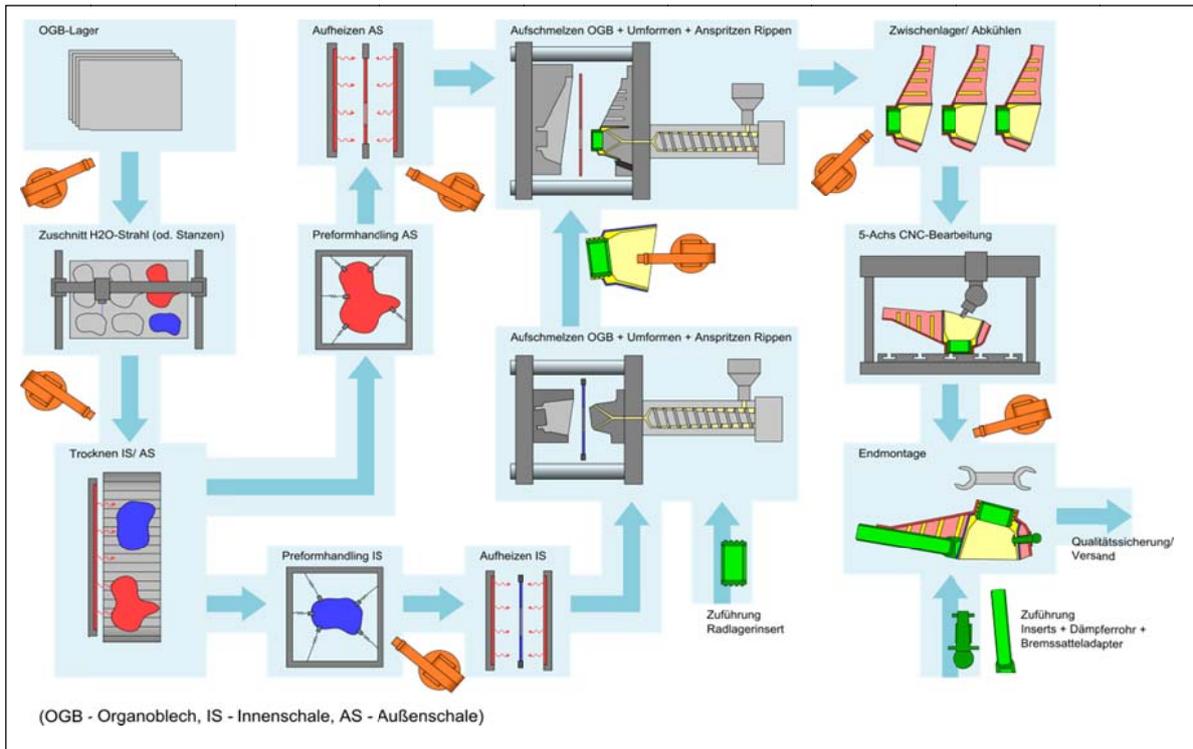


Abbildung 40: Prozesslayout für die Fertigung des Federbeinradträgers

Die Abstützung des Bremssattels sowie die Einleitung der Bremskraft erfolgt über einen verschraubten metallischen Bremssatteladapter. Ein ebenfalls verschraubtes Dämpferrohr dient der Führung eines Upside-Down-Dämpfers sowie der Einleitung der Federkraft über den Federteller. In Abbildung 41 ist der Entwurf eines derartigen Federbeinradträgers dargestellt. Die detaillierte Auskonstruktion und Bewertung dieses Bauweisenentwurfes erfolgte durch die ZF Friedrichshafen AG.

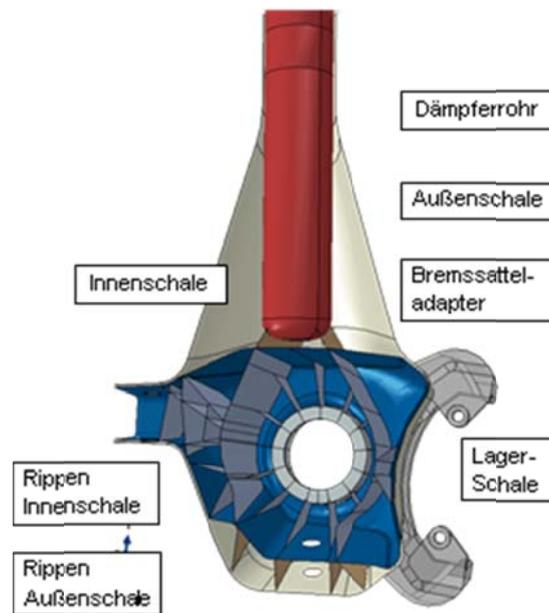


Abbildung 41: Konzept des Federbeinradträgers

Darüber hinaus wurde am ILK für das Alternativkonzept „zweischalige geschlossene Bauweise“ ein CAD-Entwurf für eine vergleichende Bewertung erstellt. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass der Federbeinradträger aus zwei Formhälften bestehend aufgebaut, welche jeweils aus einer Organoblechschale bestehen und mit optimal angeordneten Rippen versehen sind. Die radzugewandte Formhälfte beinhaltet dabei das Radlagerinsert, welches direkt im Herstellungsprozess in die Form eingelegt und umspritzt wird. Im Gegensatz zum Vorzugskonzept ist hier ein zweiter Prozessschritt zur Montage der beiden Formhälften und Einbringung des Dämpferrohres erforderlich. Für die Montage sind an beiden Formhälften umlaufende Fügeflansche vorgesehen, die klebtechnisch verbunden werden können. In Abbildung 42 ist der Federbeinradträgerentwurf detailliert abgebildet.

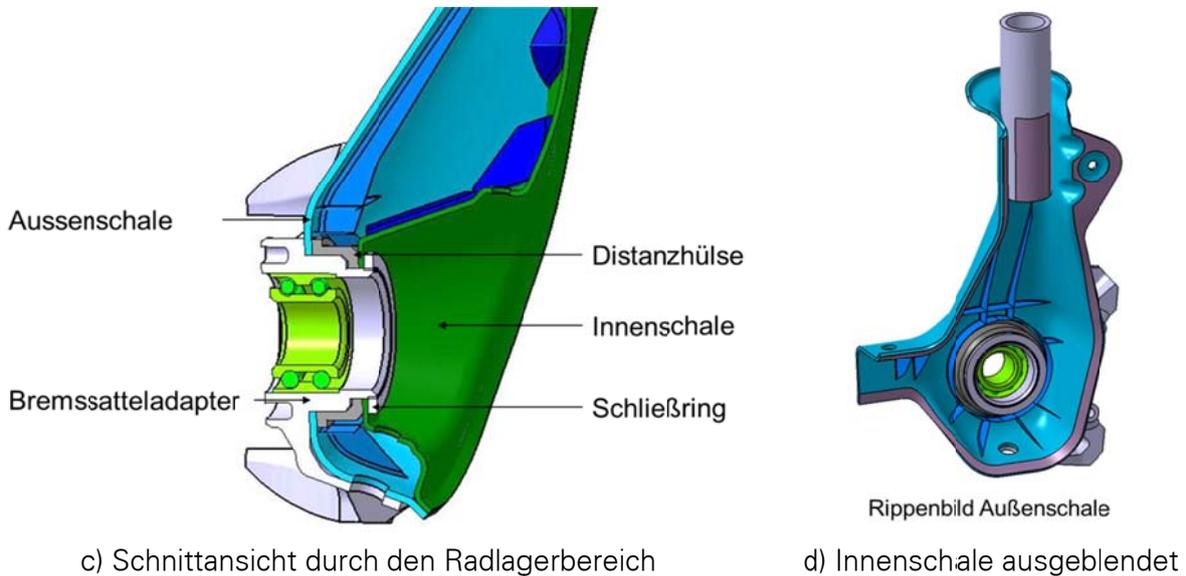
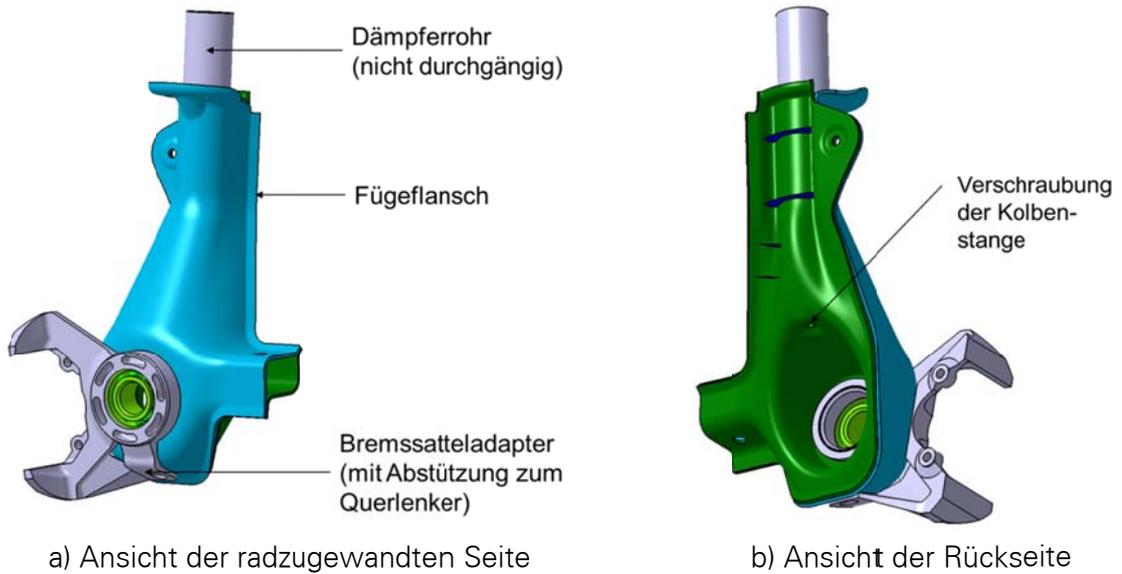


Abbildung 42: Federbeinradträgerentwurf der geschlossenen zweischaligen Bauweise

Umfangreiche numerische Untersuchungen ergaben, dass mit dieser zweischaligen geschlossenen Bauweise und den gewählten Materialien die erforderlichen Lastfälle nicht abgebildet werden können, wobei vor allem in der Klebstoffschicht der Fügeflansche zwischen den beiden Halbschalen versagenskritische Spannungen auftreten können. Gleichzeitig konnte jedoch gezeigt werden, dass eine geschlossene zweischalige Bauweise bei einer Organoblechdicke von 5 mm sehr gute Steifigkeitswerte für die Betriebslastfälle bietet. Die Bewertung aller im TP 7.3 erstellten Varianten oblag der ZF Friedrichshafen AG.

Einen weiteren Beitrag zur werkstoffgerechten Auslegung des Federbeinradträgers stellen Drapiersimulationen der Innen- und Außenschale dar, welche am ILK konstruktionsbegleitend durchgeführt wurden (Abbildung 43). Die Ergebnisse dienen der Bewertung und geo-

metrischen Anpassung der Organoblechschalen mit dem Ziel, Scherwinkel zu begrenzen und Faltenbildung bei der Umformung zu vermeiden.

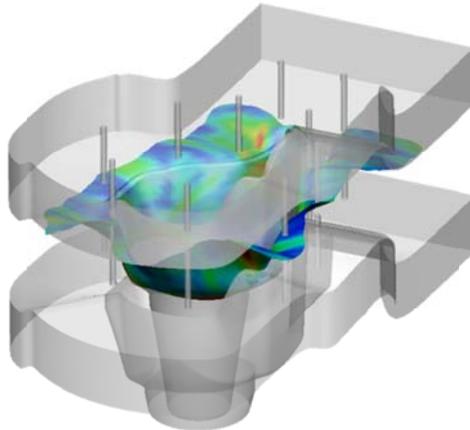


Abbildung 43: Simulation des Umformvorganges der Organoblechschalen

Die fertigungstechnische Erprobung der Hybridbauweise aus endlosfaserverstärkten Schalenstrukturen mit angespritzten versteifenden Rippen und Lasteinleitungselementen mit dem in Abschnitt 2.1.4.2 ausgewählten und charakterisierten Werkstoffen erfolgte in Abstimmung mit den Projektpartnern ZF Friedrichshafen AG und Porsche AG anhand eines am ILK verfügbaren Werkzeuges, da die Erreichung der Kostenziele für den entwickelten Federbeinradträger mit den derzeit markterhältlichen Materialien nicht nachgewiesen werden konnte. Es wurden Schalenstrukturen in FKV-Hybridbauweise aus Organoblechen und angespritzten Rippen gefertigt. Die Organobleche wurden vor dem Einlegen in einem Infrarotstrahlerfeld plastifiziert und über ein mechanisches Greifersystem an einem Industrieroboter in das Spritzgießwerkzeug transferiert. Die Drapierung des Organobleches erfolgte durch die Schließbewegung des Werkzeuges. Aus den gefertigten Schalenstrukturen wurden durch Wasserstrahlschneiden Teilbereiche entnommen, welcher im Anschluss unter Dreipunktbiegebelastung in einer Universalprüfmaschine geprüft wurden. Dieses Bauteil und die daran durchgeführten Versuche dienen als Grundlage für die Validierung der in 2.1.4.5 dargestellten Simulationemethode.

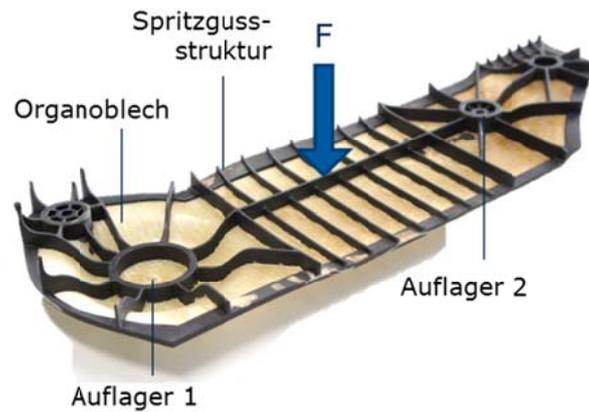


Abbildung 44: Schalenstruktur in FKV-Hybridbauweise

2.1.4.2 Materialauswahl und Materialcharakterisierung

Der zu entwickelnde Federbeinradträger in thermoplastischer Faserverbundbauweise ist im Fahrbetrieb zahlreichen Medien ausgesetzt, welche eine Degradation der Matrixmaterialeigenschaften verursachen können. Für die Auswahl eines geeigneten Matrixsystems wurden deshalb endlosglasfaserverstärkte Prüfplatten in der im Projekt beschafften Laborpresse hergestellt und anschließend die daraus entnommenen Probekörper in den vom assoziierten Projektpartner Volkswagen AG vorgegebenen Medien entsprechend den Prüfnormen eingelagert und geprüft. Um insbesondere die Degradation der Matrix nach Einlagerung zu charakterisieren, wurde eine $\pm 45^\circ$ Faserorientierung in den Streifenproben gewählt, da hier die matrixdominierten Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte das Verhalten der Probekörper maßgeblich beeinflussen. Darüber hinaus musste auch der Einfluss des Konditionierungszustandes (trocken, beschleunigte Konditionierung nach DIN EN ISO 1110, wassergelagert) sowie der Umgebungstemperatur im Betriebstemperaturbereich -40°C bis 80°C auf die Materialeigenschaften erfasst werden. Die Versuche orientieren sich an der DIN EN ISO 14129.

Bei den untersuchten Matrixsystemen handelt es sich um Thermoplaste mit vergleichsweise hoher Glasübergangstemperatur (Tabelle 7), um ein möglichst konstantes Verhalten des Faserverbundwerkstoffes über ein weites Temperaturspektrum (-40°C bis 80°C) zu gewährleisten. Lediglich Polyamid 6 (PA6) weist eine Glasübergangstemperatur auf, welche innerhalb des relevanten Betriebstemperaturbereichs liegt. Es dient als Vergleichsmaterial, da es sich um ein etabliertes Matrixsystem für zahlreiche technische Anwendungen von thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen handelt.

Tabelle 7: Matrixmaterialien

Matrixmaterial	Verarbeitungstemperatur	Glasübergangstemperatur
PEI	320-400°C	220°C
PA6	~240°C	50-60°C (trocken)
PPS	~320°C	90°C
PPA	~330°C	130°C

In Absprache mit der Volkswagen AG wird ein Matrixmaterial dann als ungeeignet betrachtet, wenn eine Abweichung der Kennwerte nach der Einlagerung von 50% oder mehr auftritt.

Tabelle 8: Medieneinlagerung

Einlagerung	Spezifikation	Einlagerungsdauer [h]	Einlagerungsklima
Normklima	-	-	23°C / 50% rLF
feucht	DIN EN ISO 1110	Bis Sättigung	70°C / 62% rLF
trocken	Im Exsikkator	Bis Massekonstanz	23°C
Salzsprühnebel	DIN EN ISO 9227	720	80°C
Warmlagerung	-	1000	120°C
Felgenreiniger	-	72	60°C
Kühlflüssigkeit	CT 12++	72	80°C
Motor- konservierung	Motorplast	72	80°C
Motoröl	Supertronic 0W-40	72	80°C
FAM-B	Prüfflüssigkeit nach DIN 51604-2	72	60°C
Scheiben- reiniger	Antifrost&Klarsicht	72	60°C
Kaltreiniger	Unikal Plus	72	80°C
Fett	Lithiumfett Konsis- tenzklasse II	500	80°C
Brems- flüssigkeit	DOT4HP	72	80°C
Dämpferöl	Titan SAF 1579EU	500	80°C

Die Prüfmedien und Einlagerungsbedingungen sind in Tabelle 8 dargestellt. Die Prüfung selbst erfolgt bei Normklima (23°C, 50% rel. Luftfeuchtigkeit (rLF)). Die Reihenfolge der Einlagerungsmedien in der Tabelle entspricht den nachfolgenden Balkendiagrammen (Abbildung 45 bis Abbildung 48).

In den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 45 bis Abbildung 48) sind die Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte in +/- 45°-Faserorientierung dargestellt. Relevant sind dabei nicht die Absolutwerte, sondern die relativen Abweichungen zur Referenz bei Normklima.

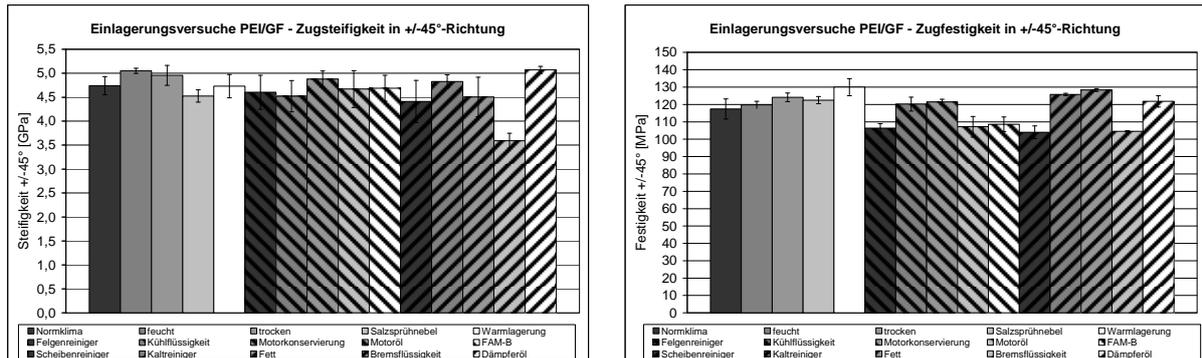


Abbildung 45: Steifigkeit und Festigkeit PEI/GF

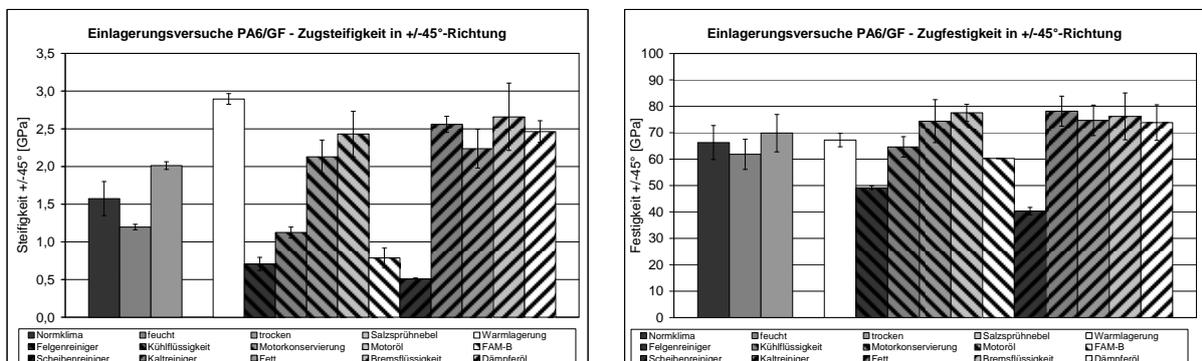


Abbildung 46: Steifigkeit und Festigkeit PA6/GF

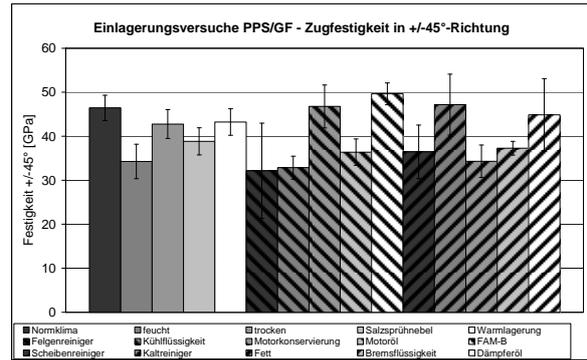
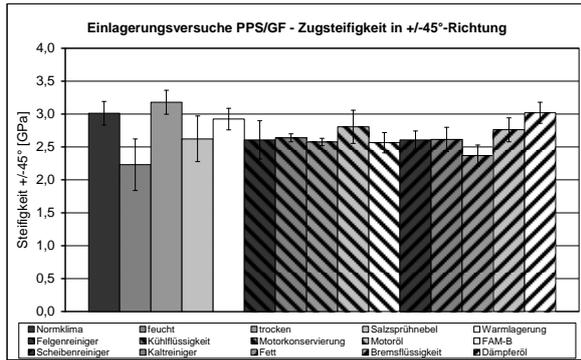


Abbildung 47: Steifigkeit und Festigkeit PPS/GF

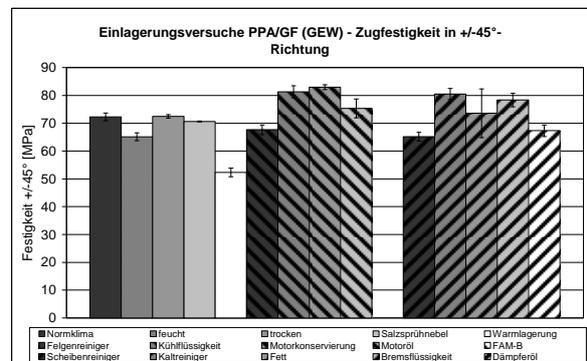
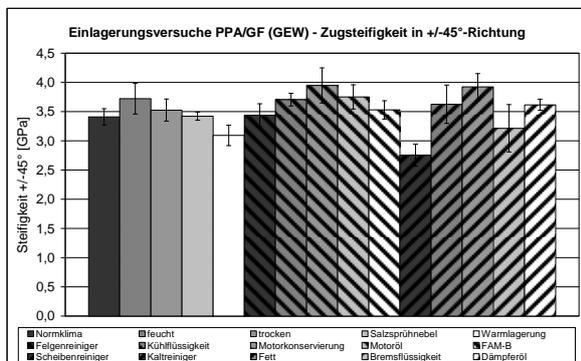


Abbildung 48: Steifigkeit und Festigkeit PPA/GF

Die Ergebnisse der Prüfungen zeigen, dass für die Matrixmaterialien PEI, PPS und PPA die Anforderungen erfüllt werden. Lediglich Polyamid 6 (Abbildung 46) zeigte eine große Abweichung der Kennwerte vom Referenzwert Normklima nach der Einlagerung, wobei sowohl eine signifikante Erhöhung (überwiegend bei öligen Einlagerungssubstanzen), als auch eine starke Verringerung von Steifigkeits- und Festigkeitskennwerten über das Kriterium von 50% hinaus auftreten. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden Rahmen weiterführender Materialuntersuchungen endlos-, lang- und kurzfaserverstärkte Materialien mit PPA-Matrix betrachtet, da diese einen guten Kompromiss zwischen Medien- und Temperaturbeständigkeit und Kosten bieten. Zudem sind am Markt bereits zahlreiche Typen von PPA-basierten Kurz- und Langglasfasergranulaten für die Verarbeitung im Spritzgießprozess erhältlich, welche sich mit den textilverstärkten PPA-Halbzeugen kombinieren lassen und hervorragende mechanische Eigenschaften aufweisen.

An zwei verschiedenen Typen von glasfasergewebeverstärkten Organoblechen (PPA-Matrix, 45% Faservolumengehalt) wurden in quasistatischen Zug-, Druck- und Schubversuchen statische Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte im relevanten Betriebstemperaturbereich von -40°C bis 80°C bestimmt. Ergänzend wurden hochdynamische Zugversuche in Faserrichtung

und in $\pm 45^\circ$ zur Faserrichtung bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten und Temperaturen von 23°C und 80°C durchgeführt, um die Dehnratenabhängigkeit der Materialkennwerte zu bestimmen. Anhand von zyklischen Zugversuchen wurden das Degradationsverhalten der Verbundsteifigkeiten sowie das Auftreten von plastischen Dehnungen bei -40°C , 23°C und 80°C ermittelt. Exemplarisch ist in Tabelle 9 eine Übersicht der ermittelten mechanischen Kennwerte für ein Organoblechmaterial angegeben. Anhand dieser Materialkennwerte sowie der zugrunde liegenden Versuchsdaten wurden Materialkarten für die FE-Simulation in ABAQUS erstellt.

Tabelle 9: Glasfaserverstärktes PPA-Organoblech - mechanische Eigenschaften

Kennwert	Symbol	Einheit	Temperatur		
			-40°C	23°C	80°C
Steifigkeitskennwerte					
Zug-E-Modul in Faserrichtung 1	E_{1t}	[GPa]	28,6	24,7	24,7
Druck-E-Modul in Faserrichtung 1	E_{1c}	[GPa]	24,0	24,0	21,4
Zug-E-Modul in Faserrichtung 2	E_{2t}	[GPa]		25,4	
Schubmodul in plane nach DIN EN ISO 14129	G_{12}	[GPa]	5,0	4,3	3,0
Schubmodul in plane nach ASTM D7078	G_{12}	[GPa]	5,2	4,3	2,9
Biegemodul in Faserrichtung	E_b	[GPa]		20,1	
Querkontraktionszahl in plane	ν_{12}	[-]		0,10	
Festigkeitskennwerte					
Zugfestigkeit in Faserrichtung 1	σ_{1tB}	[MPa]	562	426	309
Druckfestigkeit in Faserrichtung 1	σ_{1cB}	[MPa]	-404	-402	-287
Zugfestigkeit in Faserrichtung 2	σ_{2tB}	[MPa]		399	
Schubfestigkeit Bruch nach DIN EN ISO 14129	$\tau_{12,B}$	[MPa]	106	91	76
Schubfestigkeit $\gamma_{12}=5\%$ nach DIN EN ISO 14129	$\tau_{12,5}$	[MPa]	77	61	42
Schubfestigkeit $\gamma_{12}=10\%$ nach DIN EN ISO 14129	$\tau_{12,10}$	[MPa]	88	69	50
Schubfestigkeit Bruch nach ASTM D 7078	$\tau_{12,B}$	[MPa]	159	127	98
Schubfestigkeit $\gamma_{12}=5\%$ nach ASTM D 7078	$\tau_{12,5}$	[MPa]	89	68	44
Schubfestigkeit $\gamma_{12}=10\%$ nach ASTM D 7078	$\tau_{12,10}$	[MPa]	99	72	46
Biegefestigkeit in Faserrichtung	σ_b	[MPa]		585	

Des Weiteren wurden ergänzend Schwingversuche unter Schwellbeanspruchung an den Organoblechmaterialien bei unterschiedlichen Lastniveaus durchgeführt, um einen Grenzwert für die zulässigen Spannungen des Federbeinradträgers im Betrieb abzuschätzen. Die Grenzlastspielzahl von 106 Lastwechseln konnte dabei nur bei einer Oberspannung von 80 MPa erreicht werden. Bei allen Versuchen war jedoch ein deutlicher Abfall der Steifigkeit in Belastungsrichtung zu verzeichnen, welcher auf das Auftreten von Schädigungen vor allem in den Grenzschichten zwischen Fasern und Matrix zurückzuführen ist. Bei allen Spannungshorizonten konnte ein Versagen nach ca. 21% Reduktion des Sekantenmoduls beobachtet werden, der je nach Lastniveau zwischen $6 \cdot 10^3$ und $5 \cdot 10^5$ Lastspielen erreicht wurde.

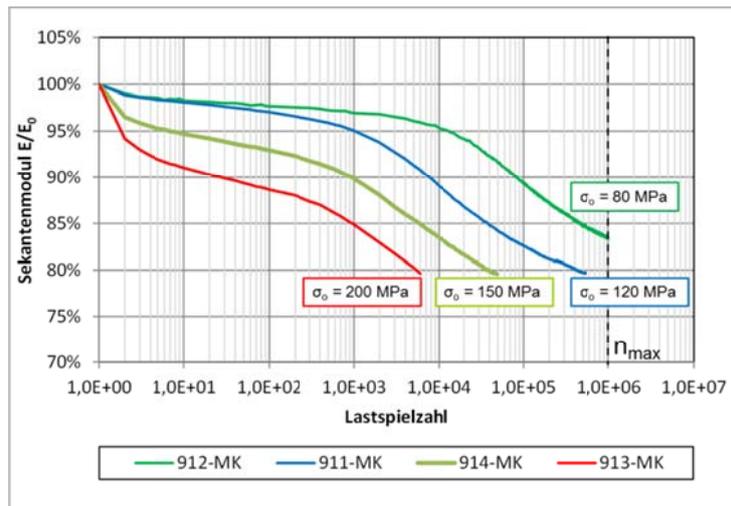


Abbildung 49: Schädigung und Degradation des E-Moduls von GF-PPA-Organoblechen unter zyklischer Belastung

Aufgrund der gewählten Schalen-Rippen-Bauweise wurde für die Spritzgießbereiche der Federbeinradträgerstruktur ein geeignetes Spritzgießmaterial ausgewählt und umfassend charakterisiert. In einem Materialscreening wurden die in Abbildung 50 aufgeführten Spritzgießmaterialien in einachsigen Zugversuchen an gespritzten Schulterstäben bei verschiedenen Temperaturen und Konditionierungszuständen geprüft. Für den späteren Einsatz als Strukturelement im Federbeinradträger ist eine über den Einsatztemperaturbereich möglichst konstante Steifigkeit des Spritzgießmaterials erforderlich. Die Materialien Zytel HTN51G50, Grivory HTV-5H1 und HT-FE6145 konnten die Anforderung am besten erfüllen und wurden für weitere Untersuchungen ausgewählt. Die mechanischen Kennwerte der betrachteten Materialien sind in Abbildung 50 und Abbildung 51 zusammen gefasst.

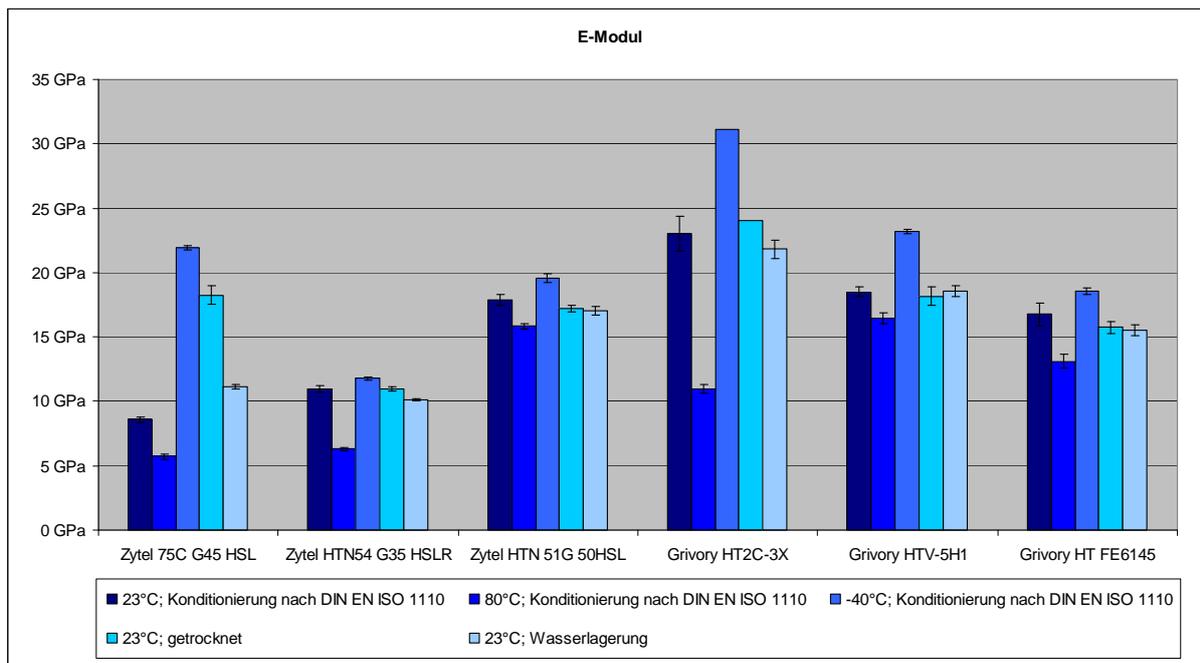
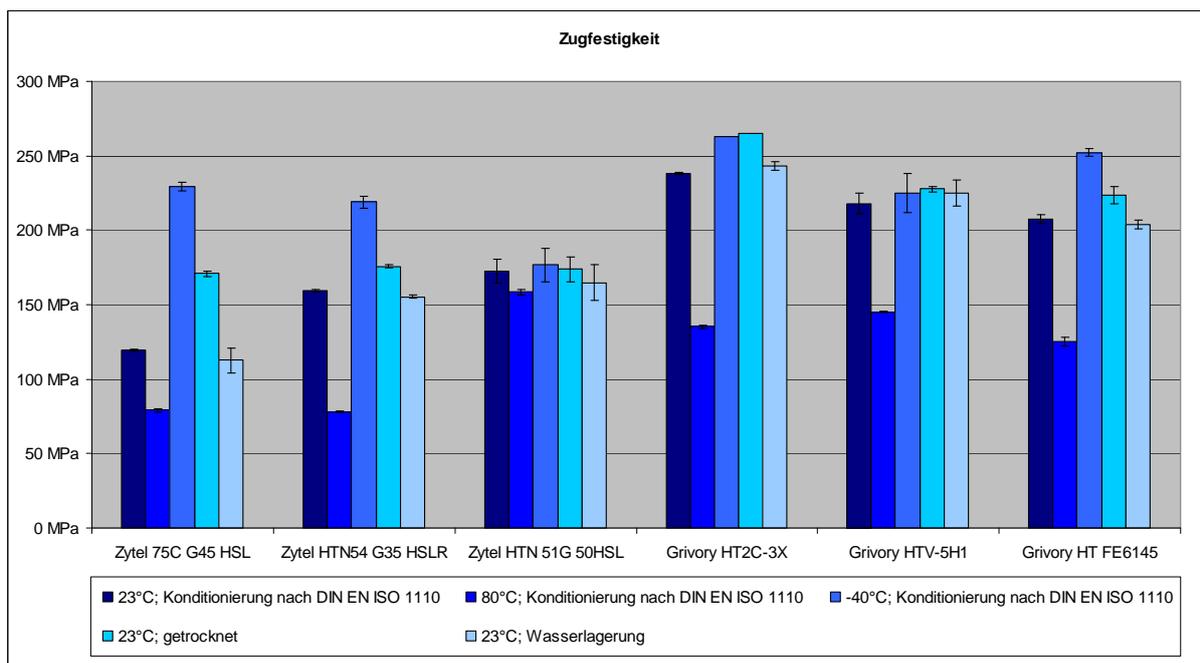
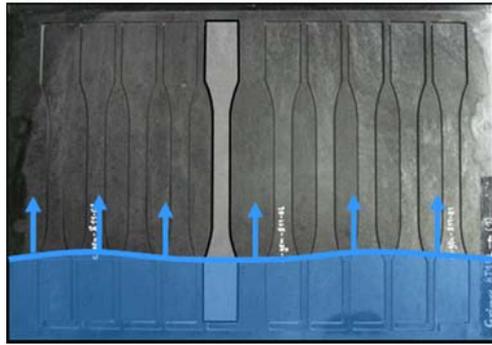


Abbildung 50: Zug-E-Modul ausgewählter PPA-Spritzgießwerkstoffe

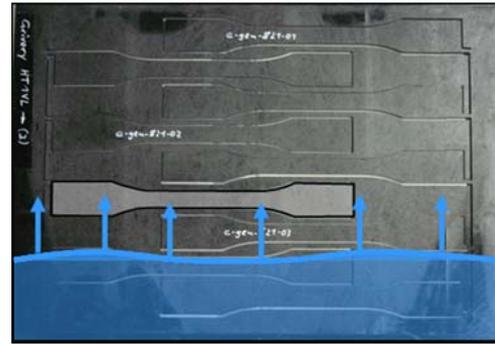


2.1.4.3 Abbildung 51: Zugfestigkeiten ausgewählter PPA-Spritzgießwerkstoffe

Mit dem in 2.1.3.3 dargestellten Spritzgießwerkzeug für die Herstellung ebener Platten können durch Wasserstrahlschneiden beliebig orientierte Probekörper entnommen werden und somit die Eigenschaften parallel und senkrecht zur Faserrichtung untersucht werden.



Faserorientierung parallel



Faserorientierung senkrecht

Abbildung 52: Zugprobekörperentnahme aus gespritzter Platte

Es zeigte sich, dass die Elastizitätsmoduln senkrecht zur Faserrichtung im Durchschnitt 45% geringer sind als in Faserrichtung. Die Verringerung der Zugfestigkeiten beträgt bei den betrachteten Werkstoffen durchschnittlich 73%. Diese Erkenntnisse können bei der Simulation der Federbeinradträgerstruktur mit Hilfe von Moldflow-Simulationen und anisotropen Materialmodellen für die Spritzgießbereiche berücksichtigt werden. Die sich ergebenden Diskrepanzen bezüglich der in Abbildung 50 und Abbildung 51 dargestellten Prüfergebnisse von direkt gespritzten Schulterstabprobekörpern sind differenziert zu bewerten und kritisch zu betrachten, da hierbei die Beeinflussung der Kennwerte durch abweichende Herstellung und Probekörperentnahme noch nicht hinreichend erforscht sind. Darüber hinaus wurden Kriechversuche parallel und senkrecht zur Faserrichtung durchgeführt.

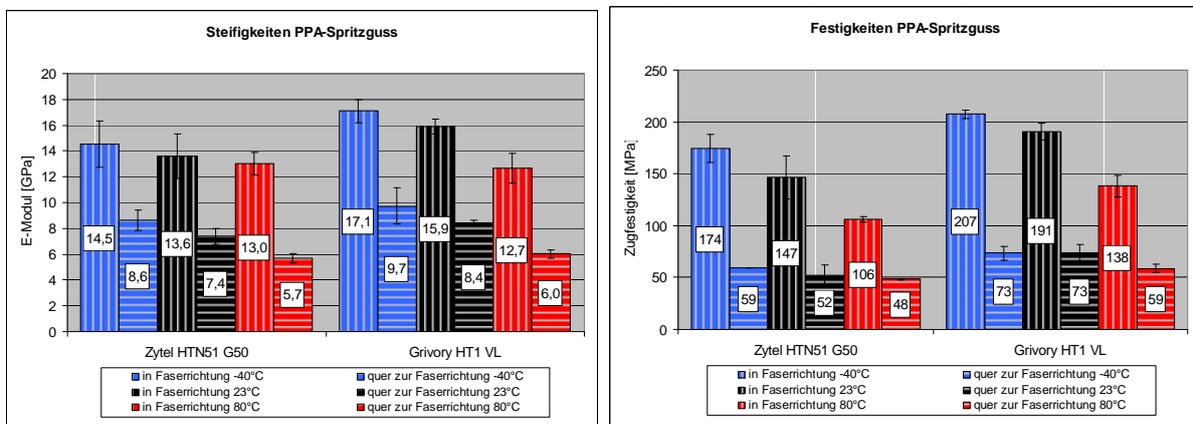


Abbildung 53: Richtungsabhängige Eigenschaften von PPA-Spritzgießmaterialien

Die generierten Daten dienen als Grundlage der Kalibrierung von Materialmodellen für Finite-Elemente-Simulationen des Federbeinradträgers.

Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Charakterisierung der Grenzschichten sowohl zwischen den Einzellagen der Organobleche durchgeführt, um das Delaminationsverhalten beschreiben zu können. Hierzu wurden die Versagensformen Mode-I und Mode-II in Dual-Cantilever-Beam-(DCB) bzw. End-Notched-Flexure-(ENF)-Versuchen bestimmt und entspre-

chende Energiefreisetzungsraten ermittelt. Für die Auswertung der Dehnungsmessung wurde speziell für die ENF-Versuche eine neue optische Auswertemethode zur Bestimmung des Rissfortschritts auf Basis des Grauwertkorrelationsverfahrens erfolgreich erprobt (Abbildung 54).

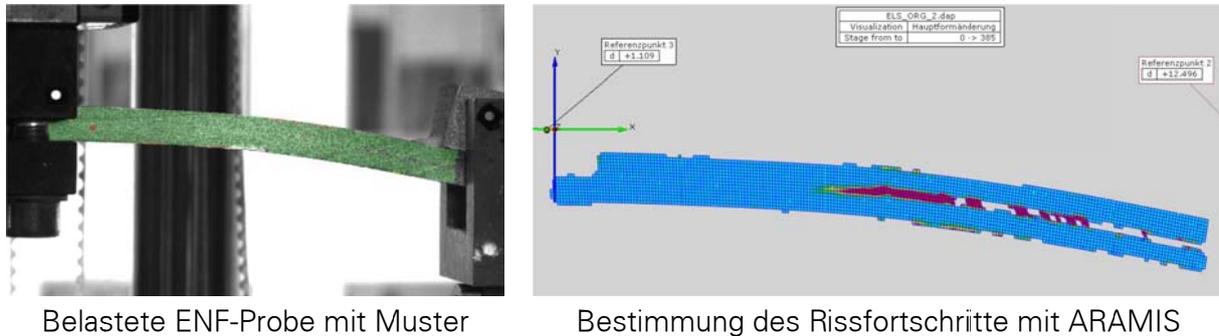


Abbildung 54: ENF-Versuche mit optischer Auswertung des Rissfortschrittes

Für die Bewertung von Impactvorgängen, welche bei Faserverbundstrukturen im Fahrwerksbereich etwa durch Steinschlag erfolgen können, und den daraus hervorgehenden intra- und interlaminaren Schädigungen wurde im Rahmen des Vorhabens ein Fallwerk angeschafft, mit welchem definierte Impact-Energien eingeleitet werden können. Die gewünschte Energie wird durch eine definierte Masse und eine definierte Fallhöhe des Impaktors auf die eingespannte, zu prüfende Struktur aufgebracht. Die Durchführung von Compression-after-impact(CAI)-Versuchen erlaubte Rückschlüsse auf die Verbundfestigkeit nach verschiedenen hohen Schlagbeanspruchungen durch eine anschließende Druckprüfung. Dabei konnte bei Impactereignissen senkrecht zur Oberfläche mit einer Energie von bis zu 20 J keine Verbundschädigung nachgewiesen werden, die auf Probekörperebene ein unmittelbares Totalversagen unter Betriebsbelastungen zur Folge hätte.



Fallwerk



Eingespannte Probe

Abbildung 55: Compression After Impact Versuch im Fallwerk

Insgesamt wurden im Rahmen des Vorhabens ca. 1000 Versuche zur Charakterisierung der eingesetzten Materialien durchgeführt, wodurch ein hervorragendes Materialverständnis und ein signifikanter Wissensgewinn erreicht werden konnten.

2.1.4.4 Technologische Voruntersuchungen

Für die konstruktive Auslegung von Schalen-Rippen-Strukturen ist die Kenntnis der Anbin-
dungsfestigkeit zwischen Organoblech und Spritzgießmaterial erforderlich. In Rippenabzug-
versuchen wurden an PPA-Organobleche angespritzte Rippen mit unterschiedlichen Rippen-
fußgeometrien auf ihre Abzugfestigkeit hin untersucht. Dabei beeinflusst die Oberflächen-
temperatur des Organobleches beim Anspritzen die Qualität der Anbindung signifikant. Eine
vollflächige stoffschlüssige Verbindung des Rippenfußes mit dem Organoblech ist nur durch
Aufschmelzen der Oberfläche zu erreichen. Bei Oberflächentemperaturen unterhalb von
200°C während des Anspritzens konnte keine stoffschlüssige Verbindung zwischen Orga-
noblech und Rippe nachgewiesen werden. In dieser Beziehung unterscheidet sich das Ma-
terial hinsichtlich der Verarbeitung deutlich von dem in 372.1.3 beschriebenen glasfaserver-
stärkten Polyamid 6.

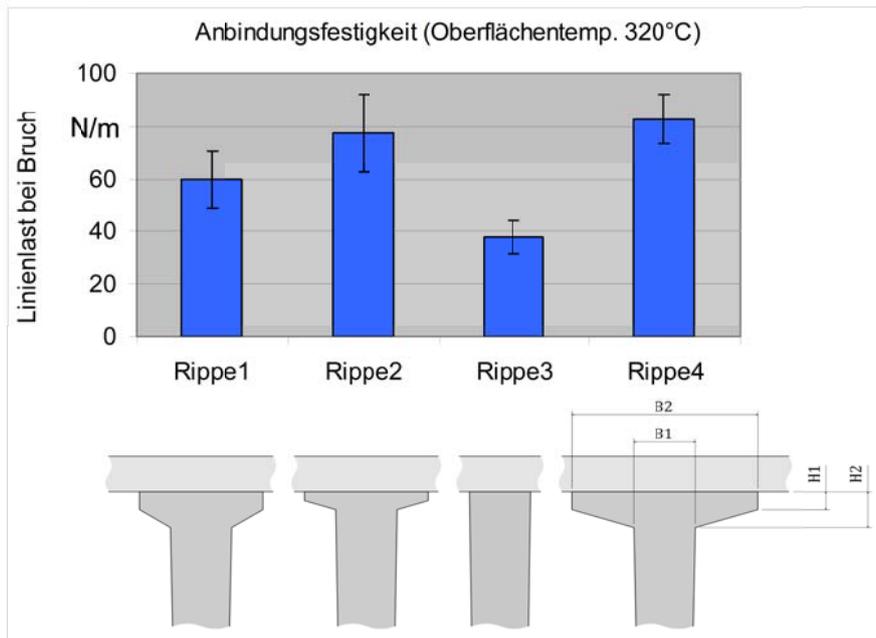


Abbildung 56: Anbindungsfestigkeiten von GF-PPA-Rippen auf GF-PPA-Organoblech

Für den Fertigungsprozess des Federbeinradträgers bedeutet dies, dass die Innenschale als Einleger für den zweiten Prozessschritt vor dem Anspritzen nochmals plastifiziert werden muss.

Zusätzlich zu den Thermoplastischen Verbundwerkstoffen wurden im Rahmen der Bauteilentwicklung konstruktive Lösungen betrachtet, welche zusätzlich metallische Strukturelemente beinhalten. Für die Verbindung dieser verschiedenen Werkstoffgruppen wurde unter anderem auch die Möglichkeit einer klebtechnischen Fügung untersucht. FE-Simulationen dieser Federbeinradträgervarianten ergaben, dass für die definierten Überlastfälle eine Zugscherfestigkeit von circa 12 MPa erforderlich ist. Am ILK wurden daher Versuche zum klebtechnischen Fügen von Faserverbundwerkstoffen mit PPA-Matrix durchgeführt. Es wurden Zugscherfestigkeitsuntersuchungen von Acrylat-, Epoxi-, und Methacrylatklebstoffen an Überlappungsklebung durchgeführt. Mit Methacrylatklebstoffen konnten dabei die höchsten Zugscherfestigkeiten gemessen werden. In vertiefenden Klebeversuchen wurde anschließend der Einfluss der Oberflächenbehandlung für Verklebungen von glasfaserverstärkten PPA-Organoblechen, glasfaserverstärktem PPA-Spritzgussmaterial und Aluminium (Magsimal 59), sowie der Kombinationen dieser Werkstoffe untersucht (Abbildung 57).

Verklebungen, bei denen einer oder beide Fügepartner aus glasfaserverstärktem PPA in Form von Organoblechen oder Spritzguss bestehen, weisen dabei jedoch Festigkeiten auf, die bei tiefen oder erhöhten Temperaturen die erforderliche Werte nicht erreichen. Eine Verbesserung der Verklebung durch eine Vorbehandlung (Kugelstrahlen, Plasmastrahlen) konnte nicht nachgewiesen werden, die Streuung der Festigkeitswerte verringert sich jedoch.

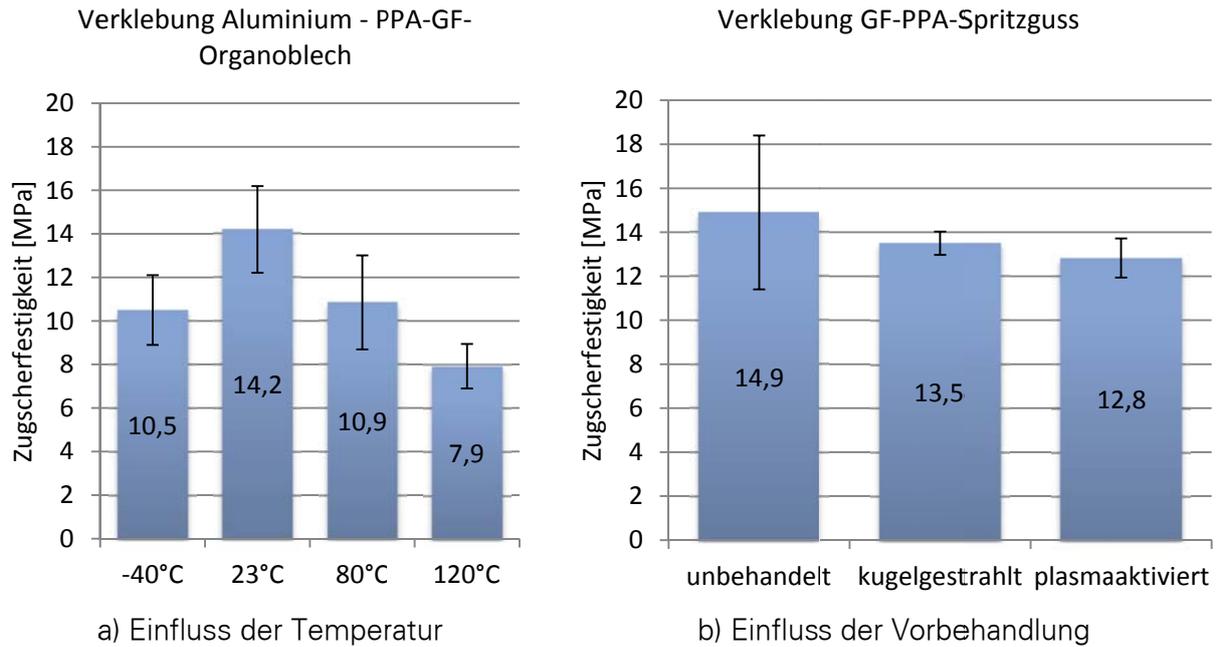


Abbildung 57: Verklebung von GF-PPA mit Methacrylatklebstoff

Radführungskräfte werden am Federbeinradträger durch zweiseitige Bolzenverbindungen in den Faser-Kunststoff-Verbund eingeleitet. Um die übertragbaren Lasten zu ermitteln, wurden Bolzenauszugsversuche an glasfaserverstärkten PPA-Organoblechen durchgeführt. Die Kraftübertragung erfolgte formschlüssig durch Lochleibungsdruck mit kombiniertem Kraftschluss durch axial vorgespannte Druckscheiben. Durch eine angepasste Konturierung der Auflagefläche der Druckscheiben konnte eine größere Energiefreisetzung bis zum Versagen der Bolzenverbindung erzielt werden.

2.1.4.5 Modellierung des Schädigungsverhaltens

Um den hohen mechanischen Anforderungen an die zu entwickelnden Bauteile in Faserverbundbauweise in Bezug auf hohen Leichtbaugrad und optimaler Materialausnutzung Rechnung tragen zu können, bedarf es eines genauen Verständnisses der Werkstoffeigenschaften sowie deren Abbildung mithilfe zuverlässiger Simulationswerkzeuge. Gerade für crash- und impactbelastete Strukturen wie das zu entwickelnde Federbein-Radträgermodul sind faserverstärkte Kunststoffe bisher nicht im Serieneinsatz, da die Auslegung derartiger Strukturen detaillierte Kenntnisse zum Materialverhalten erfordert und klassische, in kommerziellen FE-Programmen implementierte Materialmodelle nicht alle relevanten Versagensmechanismen abbilden können.

Für die Beschreibung des Verhaltens textilverstärkter Verbundwerkstoffe wurde am ILK ein neuartiges Materialmodell entwickelt, welches neben bruchmodenabhängigen Versagenskriterien auch die Aspekte Schadensevolution, Dehnratenabhängigkeit und Delamination berücksichtigt. Damit ist dieses Materialmodell für die Simulation von Crash- und Impactvor-

gängen geradezu prädestiniert. Im Rahmen des Projektes „e-generation“ konnte anhand der am ILK durchgeführten Untersuchungen zur Materialauswahl darüber hinaus die Temperaturabhängigkeit als relevante Einflussgrößen auf Schädigungsmechanismen identifiziert werden, deren Berücksichtigung für die vollständige Beschreibung des Materialverhaltens textilverstärkter Thermoplaste erforderlich ist. Die Kennwerte für dieses Materialmodell wurden durch eine Vielzahl an quasistatischen und dynamischen Versuchen bei verschiedenen Temperaturen ermittelt.

Das verwendete Materialmodell basiert auf der richtungsabhängigen Beschreibung des orthotropen elastischen Verhaltens in 3D-Solid-Elementen. Des Weiteren werden in den drei Materialhauptachsen Zugversagen und Druckversagen sowie Schubversagen in der Laminebene und senkrecht zur Laminebene berücksichtigt. Die Beschreibung des Materialversagens umfasst ein Kriterium zur Versagensinitiierung, die Degradation der Materialeigenschaften sowie ein Kriterium für das Totalversagen. Dabei werden die Spannungen in den beschriebenen Materialhauptachsen $\sigma_i^{(+/ -)}$, τ_{ij} anhand eines diffusen Schädigungswertes $\hat{R}_{diff,i}^{(+/ -)}$ bewertet. Sobald das Kriterium

$$H^{\dot{n}} = \left(\frac{\sigma_1^{(+)}}{\hat{R}_{diff,1}^{(+)}} \right)^{\dot{n}} + \left(\frac{\sigma_1^{(-)}}{\hat{R}_{diff,1}^{(-)}} \right)^{\dot{n}} + \left(\frac{\sigma_2^{(+)}}{\hat{R}_{diff,2}^{(+)}} \right)^{\dot{n}} + \left(\frac{\sigma_2^{(-)}}{\hat{R}_{diff,2}^{(-)}} \right)^{\dot{n}} + \left(\frac{\sigma_3^{(+)}}{\hat{R}_{diff,3}^{(+)}} \right)^{\dot{n}} + \left(\frac{\sigma_3^{(-)}}{\hat{R}_{diff,3}^{(-)}} \right)^{\dot{n}} \\ + \left(\frac{\tau_{12}}{\hat{R}_{diff,12}} \right)^{\dot{n}} + \left(\frac{\tau_{13}}{\hat{R}_{diff,13}} \right)^{\dot{n}} + \left(\frac{\tau_{23}}{\hat{R}_{diff,23}} \right)^{\dot{n}} \geq 1$$

erreicht ist, wird eine richtungsabhängige Degradation der Steifigkeiten initiiert. Analog erfolgt die Beschreibung des Totalversagens über das Versagenkriterium

$$F = \left(\frac{\sigma_1^{(+)}}{\hat{R}_{disk,1}^{(+)}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_1^{(-)}}{\hat{R}_{disk,1}^{(-)}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_2^{(+)}}{\hat{R}_{disk,2}^{(+)}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_2^{(-)}}{\hat{R}_{disk,2}^{(-)}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_3^{(+)}}{\hat{R}_{disk,3}^{(+)}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\sigma_3^{(-)}}{\hat{R}_{disk,3}^{(-)}} \right)^{\dot{m}} \\ + \left(\frac{\tau_{12}}{\hat{R}_{disk,12}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\tau_{13}}{\hat{R}_{disk,13}} \right)^{\dot{m}} + \left(\frac{\tau_{23}}{\hat{R}_{disk,23}} \right)^{\dot{m}} = 1$$

mit Bezug auf die diskreten richtungsabhängigen Festigkeiten $\hat{R}_{disk,i}^{(+/ -)}$. In der Folge wird das Element gelöscht, das heißt, die Elementsteifigkeiten werden auf einen pauschalen Restwert reduziert und tragen nicht mehr zur Übertragung von Kräften im FE-Modell bei. Auf die Berücksichtigung des Nachbruchverhaltens wurde aufgrund des überwiegend spröde versagenden Materialverhaltens verzichtet. Die Degradation der Elementsteifigkeiten erfolgt durch Schädigungsevolutionsfunktionen, für die im Rahmen des Vorhabens verschiedene mathematische Ansätze getestet wurden. Durch einen Tangens-Hyperbolicus-Ansatz konnte das Verhalten dabei am besten abgebildet werden:

$$\phi_i(H_i) = \tanh[\beta_i(H_i - H_i^0)^{\kappa_i}]; i = 1..9$$

Mit Hilfe logarithmischer Skalierungsfunktionen bietet das verwendete Modell zudem die Möglichkeit, viskose Effekte, welche vor allem beim matrixdominierten Schubverhalten auftreten, zu berücksichtigen, indem die Elementsteifigkeiten, die diffusen sowie die diskreten Festigkeiten entsprechend skaliert werden. Zur Verifizierung des Materialmodells wurden zunächst Ein-Elemente-Tests mit einachsigen Spannungszuständen durchgeführt, um Fehler bei der Kennwertermittlung oder in den erarbeiteten Materialkarten auszuschließen. In Abbildung 58 sind die Ergebnisse von Ein-Elemente-Tests nach der Kalibrierung der dehnratenabhängigen Skalierungsfunktionen unter Schubbelastung sowie grau hinterlegt die Versuchskurven bei gleichen Dehnraten dargestellt.

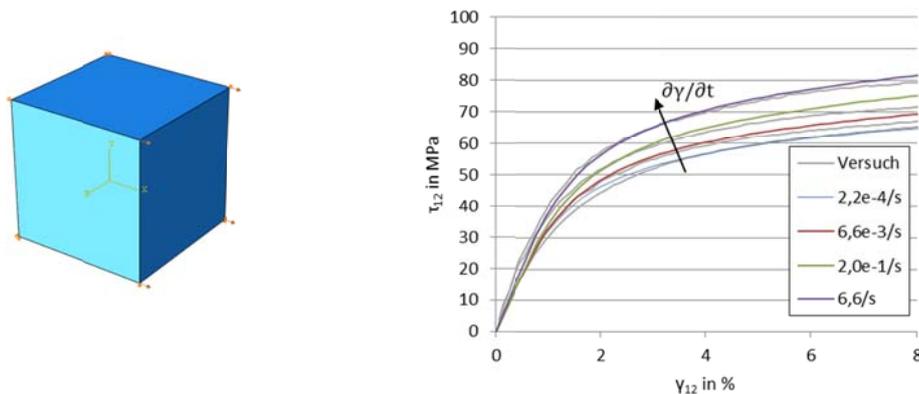


Abbildung 58: Ein-Elemente-Test mit verschiedenen Dehnraten

Im Anschluss wurde ein detailliertes Modell der in 2.1.4.1 beschriebenen Schalenstruktur in FVK-Hybridbauweise erstellt. Sowohl die flächige Organoblechstruktur als auch die angespritzten Rippen werden dabei durch 3D-Volumenelemente repräsentiert (Abbildung 59).

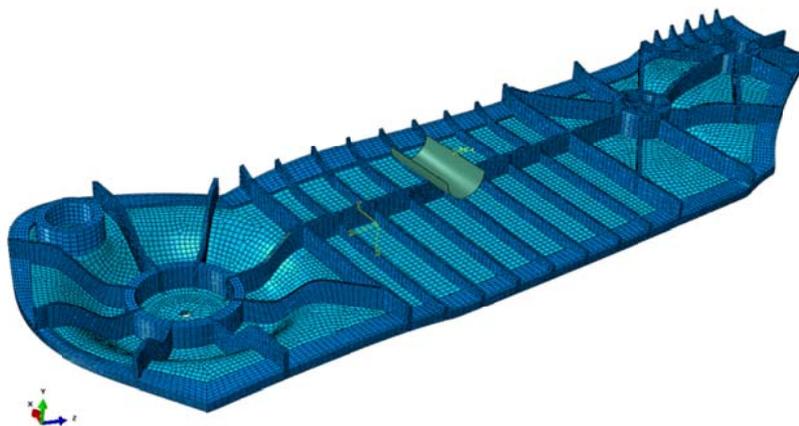


Abbildung 59: FE-Modell der Schalenstruktur in FVK-Hybridbauweise

Zwischen den Elementen des Spritzgussmaterials und denen des Organobleches wurde ein Kontakt mit Kohäsivverhalten definiert, welcher nach Überschreiten einer Versagensspan-

nung sukzessive entsprechend einer richtungsabhängig definierten Energiefreisetzungsrates versagt. Mit diesem Modellierungsansatz konnte das lokale Versagen der Rippen und Rippenanbindung sehr gut nachgebildet werden, wie exemplarisch in der Abbildung 60 gezeigt wird.

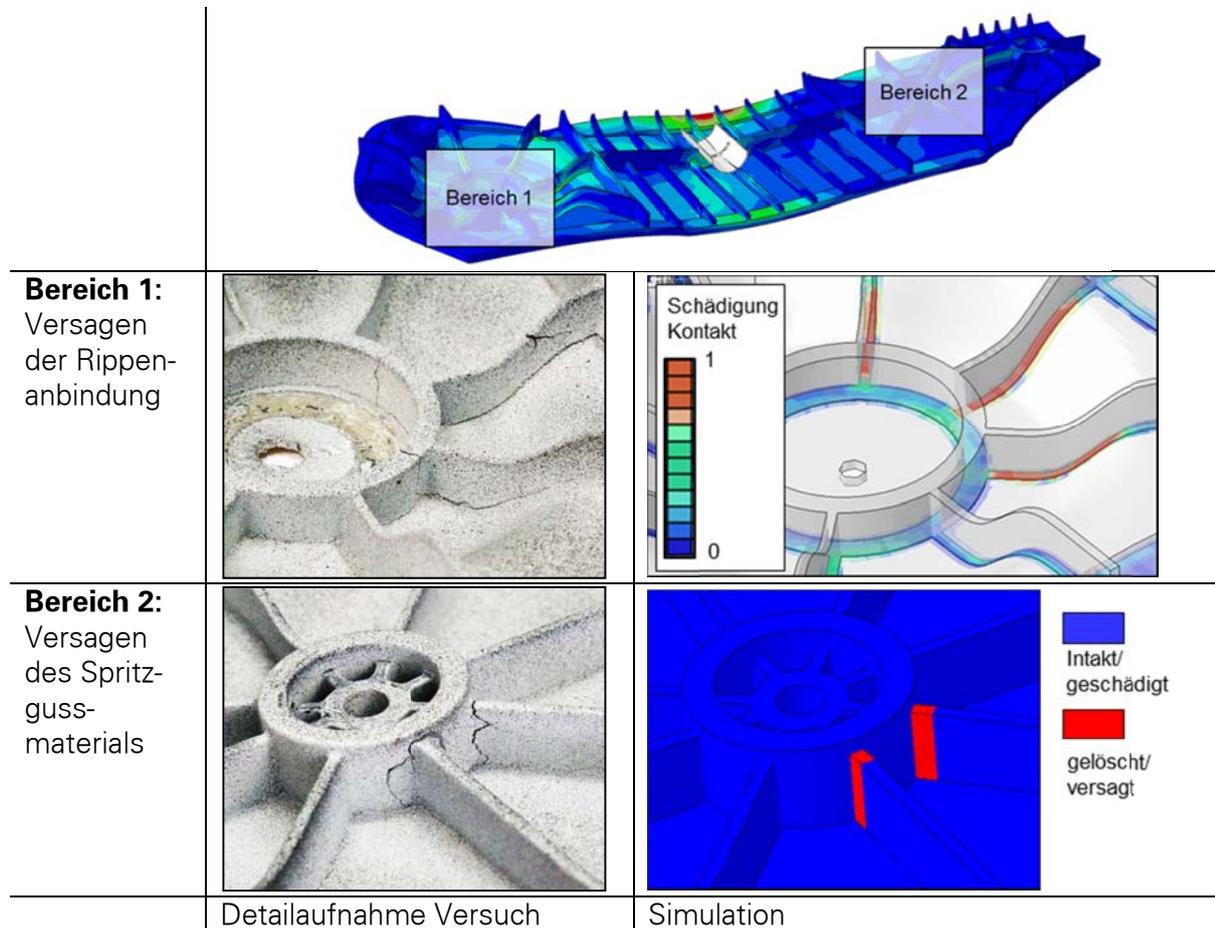


Abbildung 60: Vergleich der Versagensbilder aus Versuch und Simulation

Eine Gegenüberstellung der experimentell und numerisch ermittelten Kurvenverläufe für das Kraftsignal des Stempels über der Eindringtiefe zeigt in Abbildung 61 exemplarisch für eine ausgewählte Konfiguration eine sehr gute Übereinstimmung. Der gewählte Modellierungsansatz ist also für die numerische Abbildung des Versagensverhaltens von FKV-Strukturen mit den hier untersuchten Materialien sehr gut geeignet.

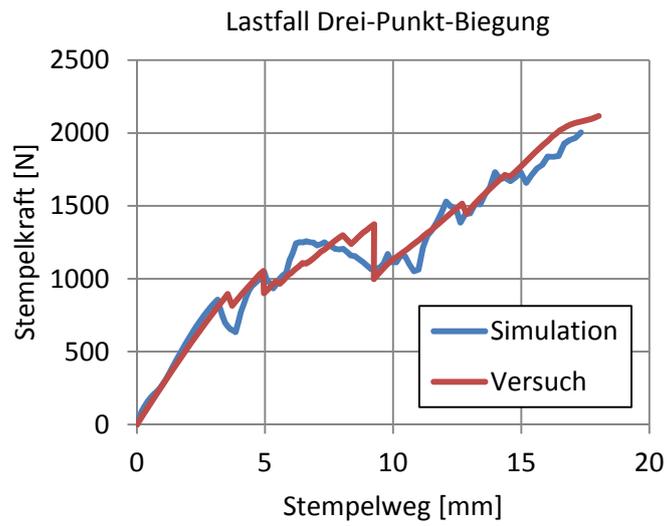


Abbildung 61: Drei-Punkt-Biegung der Schalenstruktur in Versuch und Simulation

3 Verwertungsplan

Folgende Angaben ergänzen den „Erfolgskontrollbericht“.

3.1 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Leichtbaulösungen erleben bereits heute als Antwort auf steigende Anforderungen im Fahrzeugbau hinsichtlich Energieverbrauch und Fahrzeugdynamik eine große Nachfrage. Insbesondere im Bereich der Elektromobilität zeichnen sich Bauteillösungen unter vielfachen Einsatz von Faserverstärkungen ab. Die innerhalb des Forschungsprojekts erarbeiteten Grundlagen und Technologien hinsichtlich des Materialverständnisses, der werkstoffgerechten Fertigung sowie der energieeffizienten Klimatisierungskonzepte schaffen Kompetenzen bei allen beteiligten Partnern und befähigen zur wirtschaftlichen Nutzung dieser neuen Werkstoffklasse.

Die wissenschaftliche Verwertung durch die beteiligten Projektpartner ILK und IET erfolgte mittels Transfer in studentische Ausbildung sowie durch die Initiierung neuer Forschungsfelder. So konnten beispielsweise in TP7.2 wissenschaftliche Handlungsfelder identifiziert werden, welche für die zukünftige Nutzung von funktionalisierten Hohlstrukturen in weiteren Forschungsvorhaben bearbeitet werden. Der direkte Transfer in die Lehre erfolgte durch die Vermittlung der innerhalb des Projekts gewonnenen Erkenntnisse in Lehrveranstaltungen und schafft die Basis für zukünftige Anwendungen durch Verankerung innovativer Ansätze bei den Ingenieuren von morgen.

Die in TP5 erzielten Ergebnisse hinsichtlich einer Umluftregelung konnten in die Versuchsfahrzeuge integriert werden. Mit der Simulation erarbeitete Resultate werden gezielt in die Umsetzung, z.B. bei der Parametrierung der Regler, integriert. Weiterführend können Messergebnisse aus dem realen Fahrbetrieb mit den numerischen Ergebnissen verglichen werden. Die im Rahmen des Projektes vorgenommenen Modellerweiterungen im Strömungsprogramm Parallel NS ertüchtigen das Programm zur Bearbeitung von Problemen in mobilen Anwendungen und ermöglichen entsprechende Projektaquise. Neben der Nutzung zur Weiterentwicklung von Mess- und Simulationsmethoden steht die innerhalb des Projektes gebaute Ersatzkabine auch für studentische Praktika zur Verfügung.

Weiterhin wurde in TP7.2 eine repräsentative Bauteilstruktur entwickelt, welche beispielsweise für Messeauftritte genutzt wird. Der Technologiedemonstrator zeigt die Möglichkeiten thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe bezüglich Formgebungsfreiheit und Funktionsintegration bei gleichzeitiger Erfüllung hoher mechanischer Anforderungen und ist somit ein wichtiger Baustein innerhalb des wissenschaftlichen Verwertungskonzeptes und zur Akquise neuer Forschungspartner.

Auch die in TP7.3 erlangten Kenntnisse zur Auslegung, Konstruktion und Fertigung von Fahrwerkskomponenten in FKV-Hybridbauweise können direkt in die industrielle Anwendung

einfließen, sobald durch eine veränderte Marktsituation eine Erreichung der Kostenziele zulässt.

3.2 Während der Durchführung des FE-Vorhabens dem AN bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine relevanten FE-Ergebnisse bekannt.

3.3 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der FE-Ergebnisse nach § 16

Patente:

Es wurde innerhalb des AP 7.3 eine Patentanmeldung vorgenommen (Deutsche Patentanmeldung Nr. 10 2013 209 987.8 „Radträgeranordnung für ein Kraftfahrzeug“).

Innerhalb AP 5 befindet sich eine gemeinsame Erfindung mit den Projektpartnern Porsche AG und Mahle-Behr GmbH in Anmeldung. Titel: „Thermoelektrizitätsanordnung für den Einsatz in einem Kühlsystem eines Kraftfahrzeuges sowie Kühlsystem mit einer derartigen Thermoelektrizitätsanordnung“.

Veröffentlichungen:

N. Modler, M. Krahl, A. Liebsch, J. Maaß, M. Stegelmann, C. Garthaus; *Innovative Spritzgießprozesse zur Realisierung funktionsintegrativer Leichtbaustrukturen - Thermoplastische Hohlstrukturen für Elektromobilitätsanwendungen*; VDI-Jahrestagung Spritzgießen 2015; 10.–11. Februar 2015; Baden-Baden

N. Modler, W. Hufenbach, J. Maaß, A. Liebsch, J. Troschitz, C. Vogel; *Werkstoffgerechte Fügesysteme für Strukturbauweise in Mischbauweise - Material-adapted joining systems for structural components in multi-material design*; 7. Chemnitzer Karosseriekolloquium; 8.-9. Oktober 2014; Chemnitz

A. Liebsch, N. Andricevic; *Entwicklung eines neuartigen Batterieträgers in thermoplastischer Faserverbund-Hybridbauweise*; Carbon Composites Magazin (1/2015)

J. Luft; M. Krahl; *Effiziente Fertigungstechnologien für hybride Thermoplast-Leichtbaustrukturen*; VDMA-Tagung Technologien und Prozesse; 26.03.2015; Schweinfurt

N. Andricevic, A. Liebsch; *Funktionalisieren von Hohlprofilen in thermoplastischer Faserverbundbauweise mittels Spritzgießen*; Bewerbung AVK-Preis 2015 Kategorie: Innovative Prozesse bzw. Verfahren

M. Knorr, R. Gritzki; M. Rösler, C. Felsmann; *Echtzeitfähige wechselseitige gekoppelte thermisch-hygrische Strömungs- und Kabinensimulation zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs in PKW*; BauSIM 2014; 23. September 2014; Aachen

Geplante Veröffentlichungen:

A. Liebsch, J. Maaß, N. Andricevic, M. Geuther, F. Adam, W. Hufenbach, M. Gude; *Thermoplastische Faserkunststoff-Hybridbauteile im Automobilbau – Entwicklung eines Batterie-trägers*; Kunststoffe (09/2015)

A. Liebsch, J. Maaß, N. Andricevic, M. Geuther, F. Adam, W. Hufenbach, M. Gude; *Thermoplastic fibre-polymer hybrid components for the automotive sector – development of a battery mount*; Kunststoffe International (09/2015)

Studentische Arbeiten:

T. Weinkauf; *Untersuchungen zur Grenzschichtphänomenologie von thermoplastischen Textilverbunden mit im Spritzgießprozess angeformten Rippen*; Großer Beleg; 27.02.2015

T. Seifert; *Charakterisierung der interlaminaren Eigenschaften von Faserverbunden unter quasistatischer Mode-II-Belastung*; Großer Beleg; 19.12.2014

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Elektrofahrzeuge „e-generation“, Teilvorhaben Leichtbau und Klimatisierung	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. Werner Hufenbach (ILK) Prof. Dr.-Ing. C. Felsmann (IET) Dr.-Ing. R. Böhm (ILK), Dr.-Ing. F. Adam (ILK); Dr.-Ing. M. Knorr (IET) Dipl.-Ing. A. Liebsch (ILK); Dipl.-Ing. T. Weber (ILK); Dipl.-Ing. J. Luft (ILK) Dr.-Ing. M. Andrich (ILK); Dipl.-Ing. M. Kutzt (ILK)	5. Abschlussdatum des Vorhabens Dezember 2014
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Holbeinstraße 3, 01307 Dresden TU Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung (IET), Helmholtzstr. 14, 01069 Dresden	9. Ber. Nr. Durchführende Institution 1/A278/15
	10. Förderkennzeichen 16N11782
	11. Seitenzahl 85
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 66
	14. Tabellen 9
	15. Abbildungen 61
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) VDI/VDE Innovation+Technik GmbH	
18. Kurzfassung	
19. Schlagwörter Elektromobilität, Klimatisierung, Faser-Kunststoff-Verbunde, Hybridbauweise	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Key technologies for the next generation of electric vehicle "e-generation" Subprojects lightweight design and climatisation	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr. h.c. Werner Hufenbach (ILK) Prof. Dr.-Ing. C. Felsmann (IET) Dr.-Ing. R. Böhm (ILK), Dr.-Ing. F. Adam (ILK); Dr.-Ing. M. Knorr (IET) Dipl.-Ing. A. Liebsch (ILK); Dipl.-Ing. T. Weber (ILK); Dipl.-Ing. J. Luft (ILK) Dr.-Ing. M. Andrich (ILK); Dipl.-Ing. M. Kutzt (ILK)	5. end of project December 2014
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) TU Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Holbeinstraße 3, 01307 Dresden, Germany TU Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung (IET), Helmholtzstr. 14, 01069 Dresden, Germany	9. originator's report no. 1/A278/15
	10. reference no. 16N11782
	11. no. of pages 85
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 66
	14. no. of tables 9
	15. no. of figures 61
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) VDI/VDE Innovation+Technik GmbH	
18. abstract	
19. keywords electromobility, climatisation, fiber reinforced plastic, hybrid design	
20. publisher	21. price