



Kurzbericht zum Forschungsprojekt

CoSiCra

**Entwicklung und Verifikation
einer Composite-Simulations-
methodik zur Vorhersage des
Crashverhaltens von hoch
belasteten Fahrzeugstrukturen**

Gefördert vom Wirtschaftsministeriums Baden-
Württemberg mit Mitteln der Landesstiftung
Baden-Württemberg





Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Fahrzeugkonzepte
 Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich
 Institutsdirektor
 Pfaffenwaldring 38-40
 D-70569 Stuttgart, GERMANY
 Tel +49 (0)711/6862-256
 Fax +49 (0)711/6862-258

Dipl.-Ing. Gundolf Kopp
 Institut für Fahrzeugkonzepte
 Tel +49 (0)711/6862-593
 Fax +49 (0)711/6862-258
 E-Mail gundolf.kopp@dlr.de

Dipl.-Ing. Martin Holzapfel
 Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung
 Tel +49 (0)711/6862-679
 Fax +49 (0)711/6862-227
 E-Mail martin.holzapfel@dlr.de

Titel	Entwicklung und Verifikation einer Composite-Simulationsmethodik zur Vorhersage des Crashverhaltens von hoch belasteten Fahrzeugstrukturen
Schlüsselwörter	CoSiCra, Faserverbund, Crash, Simulation
Zugänglichkeit	Kurzbericht (Öffentlichkeit)
Autoren	Gundolf Kopp und Martin Holzapfel
Mit Beiträgen von	Projektpartnern
Dateiname	CoSiCra__Abschlussbericht_Kurzfassung__FINAL.doc
Zuletzt gespeichert von	Martin Holzapfel
Zuletzt gespeichert am	26.01.2010 19:25:00
Gedruckt am	04.02.2010 12:41:00



Kurzbericht

Zielsetzung des Leitprojektes „Entwicklung und Verifikation einer Composite-Simulations-methodik zur Vorhersage des Crashverhaltens von hoch belasteten Fahrzeugstrukturen“ war die verbesserte Nachbildung crashbelasteter Strukturen aus Faserkunststoffverbundwerkstoffen durch komplexere Modellansätze im Rahmen der Entwicklung und Verifikation einer Simulationsmethodik. Das Projekt unter der Leitung des DLR Instituts für Fahrzeugkonzepte wurde vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg mit Mitteln der Landesstiftung Baden-Württemberg gefördert. Projektpartner waren das DLR Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung, die Advanced Composite Engineering & Manufacturing GmbH, die Audi AG, die Dynamore GmbH, die ESI GmbH und die Dr.-Ing. h. c. F. Porsche AG.

Einleitung

Die Notwendigkeit zur Einsparung von Ressourcen erzwingt bei allen Arten von Fahrzeugen konsequent angewandten Leichtbau. Daher besteht auch unter der Berücksichtigung von erhöhtem Kostenaufwand ein Interesse, hoch belastete Komponenten oder Strukturen aus Faserkunststoffverbund (FKV) in realen Fahrzeugen einzusetzen. Eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz dieser Werkstoffe ist jedoch ein gutes insbesondere gewichtsspezifisch deutlich verbessertes Absorptionsverhalten unter Crashbelastung im Vergleich zu den bisher eingesetzten überwiegend metallischen Werkstoffen. Unter gewissen Voraussetzungen erreichen FKV ein Absorptionsvermögen, welches das der metallischen Werkstoffe um das Doppelte oder mehr übertrifft. Voraussetzung für den Einsatz in der Serie ist jedoch die genaue Vorhersage des Verhaltens von Strukturen aus FKV unter Crashbelastung mit numerischen Berechnungsverfahren. Werkstoffmodelle für metallische Werkstoffe, welche nach Erreichen der Streckgrenze durch plastifizierendes und verfestigendes Verhalten gekennzeichnet sind, lassen sich nicht auf FKV-Werkstoffe übertragen. Dies liegt daran dass neben einem insgesamt spröden Werkstoffversagensverhalten von FKV das für ein gutes Absorptionsverhalten notwendige ‚Crushing‘ mit einer hohen Werkstoffdegradation verbunden ist, welche zudem mit einer sehr starken Fragmentierung einhergeht. Diese reale Fragmentierung wird auf absehbare Zeit nicht numerisch nachbildbar sein. Daher sind zur Berechnung entsprechende Ersatzmodelle notwendig, die neben den klassischen mechanischen Werkstoffkennwerten zusätzliche Steuerparameter für die jeweiligen Modellierungsansätze zur Beschreibung des Crashverhaltens benötigen. Zur systematischen Erarbeitung von Kennwerten und Steuerparametern für den Einsatz und die Weiterentwicklung verbesserter Ersatzmodelle ist eine verifizierte Methodik erforderlich.

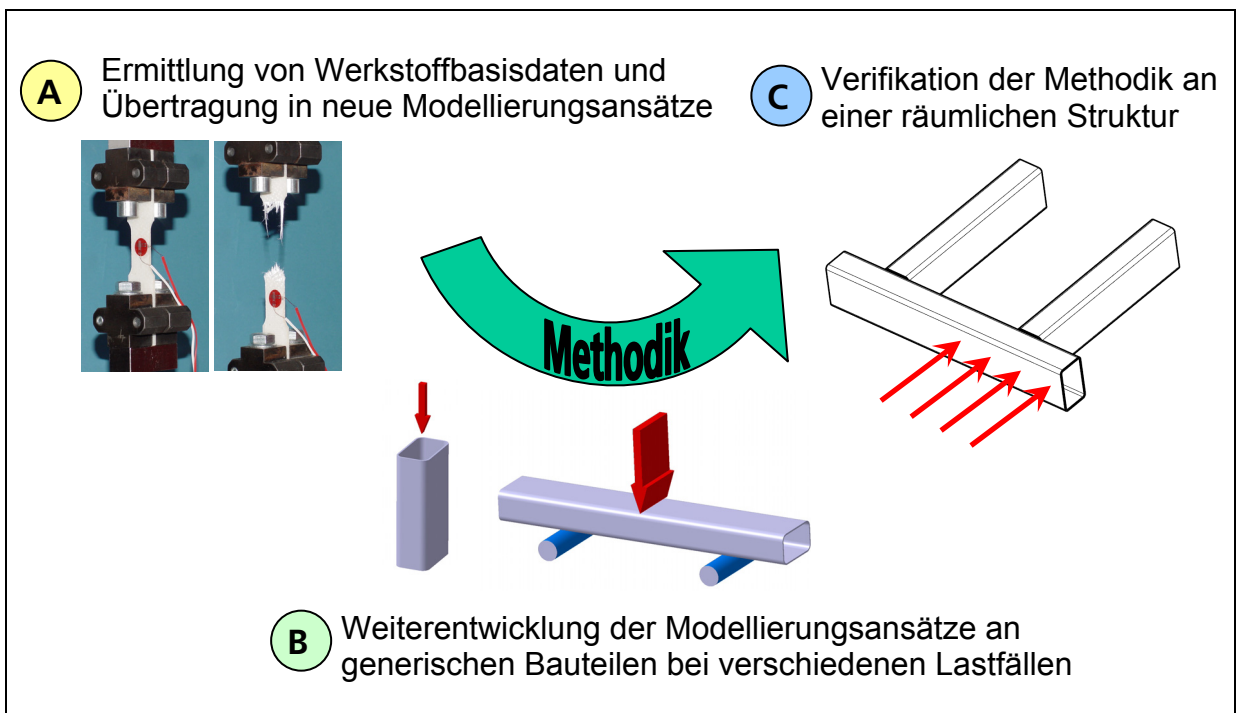
Zielsetzung und Durchführung

Das Leitprojekt CoSiCra hat zum Ziel, eine Methodik zu entwickeln, die es zum einen ermöglicht, mit Hilfe geeigneter Prüfungen an Proben und generischen Bauteilen die für numerische Modellansätze benötigten Kennwerte und Parameter experimentell zu ermitteln. Zum anderen müssen diese auf der jeweiligen Entwicklungsstufe in die numerischen Modellansätze einfließen und dort überprüft sowie kalibriert werden. Dies beinhaltet nach der Modifikation auch eine ‚Rekalkulation‘ in den vorhergehenden

Seite 3

Arbeitsebenen, damit sichergestellt ist, dass in der Endstufe nicht mit Datensätzen gearbeitet wird, die z.B. bei der Simulation auf Probenebene zu abstrusen Ergebnissen führen. Als Schwerpunkt im Projekt wurde ein neuartiger Modellierungsansatz zur Verbesserung der Simulationsfähigkeit von FKV unter dynamischer Stauchbelastung verfolgt, wodurch sowohl die Methodik als auch der Ansatz geprüft und bewertet werden konnten. Bei dem Modellierungsansatz wird anstelle der bisher für FKV angewandten mehrlagigen Einzelschale („multilayered shell“) ein über Kontaktformulierungen gekoppeltes Mehrschalenmodell („multilayered stacked shell“) verwendet. Dieser Ansatz ist in der Modellierung und Berechnung zwar deutlich aufwendiger, jedoch versprach er verbesserte Eigenschaften als Ersatzmodell mit erweiterten Möglichkeiten zur Steuerung der Crushing-Eigenschaften.

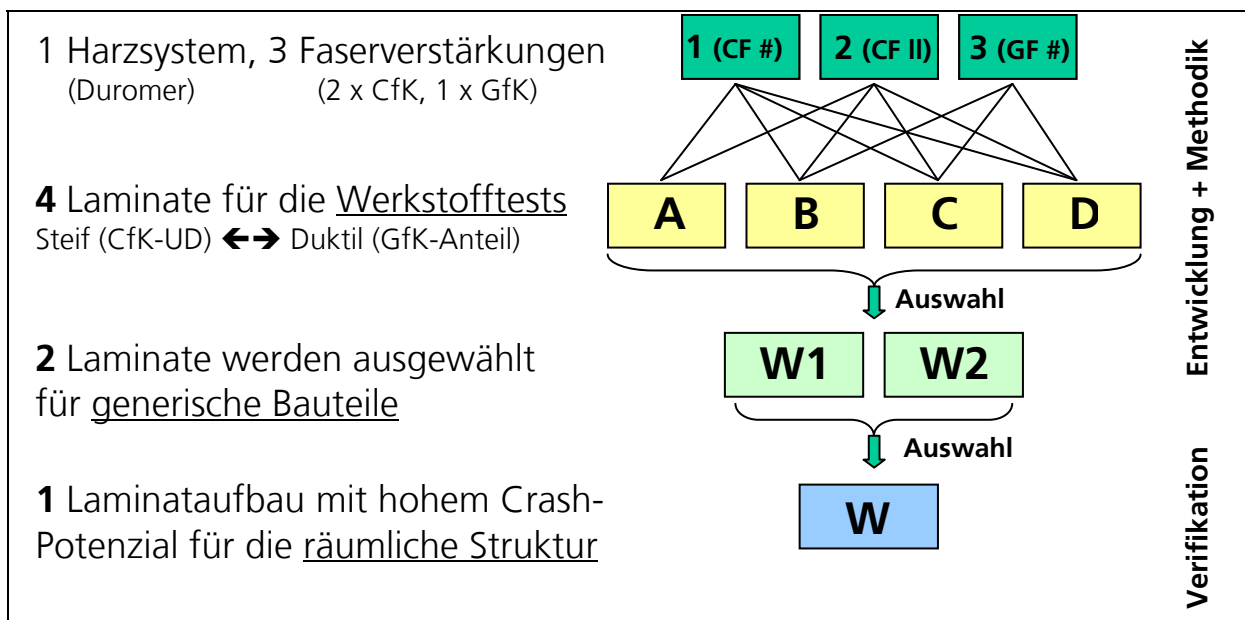
Die vorgeschlagene Methodik mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen beginnt mit der Kennwertermittlung an Flachproben (Basiswerkstoffe und Mischlaminat) und ermöglicht im Verbund mit den Ergebnissen durch Stauchversuche an sogenannten ‚Segmentproben‘ die Erstellung von Materialkarten für die Einzelschichten. Dies geht einher mit der numerischen Validierung der Versuche auf Probenebene. Die Überprüfung erfolgt an generischen Bauteilen (axial und off-axis) mit unterschiedlichen Triggerungen zur kontrollierten Ausbildung der Crashfront. Die abschließende Verifikation erfolgt an einer einfachen räumlichen Struktur. Innerhalb der gesamten Prüfkette werden dynamische Versuche bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt, um einen möglichen Dehnrateneinfluss bestimmen zu können. Mit Ausnahme der räumlichen Struktur werden zum Vergleich ebenso statische Prüfungen durchgeführt. Diese Vorgehensweise bietet die Möglichkeit, dass die numerischen Ansätze in jeder Arbeitsstufe der Methodik geprüft und bewertet werden können und sollen.



Vorgeschlagene und untersuchte Methodik

Seite 4

Der Einsatz verschiedener Harzsysteme, Faserwerkstoffe, Textilstrukturen, Lagenorientierungen und Laminatanordnungen führt zu einer nahezu unbeschränkten Auswahl an Werkstoffen und Werkstoffkombinationen. Aus der Vielzahl der Möglichkeiten beim Aufbau faserverstärkter Strukturen wurde jedoch versucht, mit Hilfe ausgewählter Basiswerkstoffe eine gewisse praxisnahe Bandbreite abzudecken. Als Faserwerkstoffe wurden sowohl Kohlenstofffasern als auch Glasfasern ausgewählt. Im Fall der Kohlefasern wurden sowohl UD-Gelege als auch 50/50-Gewebe für die Einzelschicht verwendet. Bei den Glasfasern wurden für die Einzelschicht ausschließlich 50/50-Gewebe eines Typs benutzt. Als Matrix kam ein Epoxidharz zum Einsatz. Diese drei Gelege- bzw. Gewebetypen bilden die sogenannten Basislaminat (BL-1, BL-2, BL-3; grün unterlegt in der Abbildung). Aus den Basislaminaten wurden insgesamt vier Mischlaminat (ML-A bis ML-D; gelb unterlegt in der Abbildung) mit verschiedenen Lagenaufbauten (Lagenorientierung und insbesondere unterschiedlichen Anteilen von Glasfaser-Gewebe) definiert, durch die eine gewisse Bandbreite an Möglichkeiten repräsentiert werden soll. Aus Gründen begrenzter Ressourcen musste die Anzahl der untersuchten Laminat mit jeder neuen Arbeitsebene in einem sogenannten ‚Down select‘-Verfahren reduziert werden, zumal mit jeder Arbeitsebene der Fertigungs- und Prüfaufwand signifikant ansteigt. So waren auf Flachprobenebene 7 Laminat (171 Prüfungen), bei den Segmentproben 4 Mischlaminat (48 Prüfungen), bei den generischen Bauteilen noch 2 Mischlaminat (42 Prüfungen) und bei der räumlichen Struktur nur noch 1 Mischlaminat (6 Prüfungen) vorgesehen. Die Kriterien für die Selektion wurden zwischen den Projektpartnern nach Abschluss der jeweils vorhergehenden Arbeitsebene abgestimmt.



‚Down-Select‘-Verfahren der Laminatvarianten

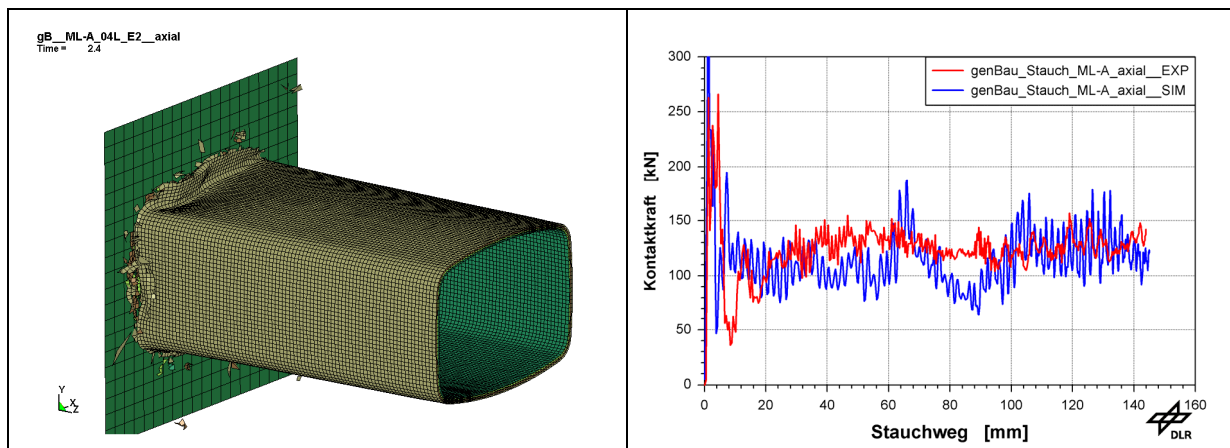
Für die Umsetzung, Prüfung und Bewertung des verfolgten Modellansatzes mittels Mehrschalenmodellierung innerhalb der Methodik wurden zwei am Markt konkurrierende explizite FE-Codes eingesetzt (LS-DYNA und PAM-CRASH).

Ergebnisse und Bewertung

Die entwickelte Methodik hat sich als gutes ‚Werkzeug‘ für die Erarbeitung und die Bewertung von Simulationsmodellen erwiesen, dennoch müssen die Ergebnisse differenziert, d.h. für jede Arbeitsebene separat betrachtet werden. Die dynamischen Messungen an Flachproben waren aufwendiger zu realisieren als zu Projektbeginn erwartet. Dies führte dazu, dass sowohl die ursprünglich vorgesehene Lasteinleitung als auch die Probengeometrie verändert werden musste. Einen signifikanten Dehnrateneinfluss zeigten die Untersuchungen an Basislaminaten bei Faserorientierung mit matrixdominantem Einfluss ($\pm 45^\circ$) sowie generell bei allen Druckversuchen an Flachproben. Während der Dehnrateneinfluss der Faserorientierung unter Zugbelastung bei den Mischlaminaten verschwindet, bleibt der generelle Einfluss der Prüfgeschwindigkeit bei Druckbelastung erhalten. Mit Hilfe der experimentellen Prüfungen an den Flachproben der Basislaminaten konnten die mechanischen Werkstoffkennwerte ermittelt werden, durch die beim Einsatz im numerischen Modell sowohl die Basislaminaten als auch die Mischlaminaten berechnet werden konnten. Die Stauchversuche an den Segmentproben konnten messtechnisch ohne Probleme durchgeführt werden, was die Eignung der Probenform und die Art der Triggerung zur Ausbildung der Crashfront unterstreicht. Die Ergebnisse der Prüfungen bei Raumtemperatur (RT) entsprachen hinsichtlich des Absorptionsvermögens in etwa den Erwartungen, wobei die statischen Versuche mit zunehmender Stauchlänge ein absinkendes Lastniveau, die dynamischen Prüfungen ein konstantes bzw. ansteigendes Lastniveau zeigten. Insgesamt ist zwar eine Abhängigkeit des Absorptionspotenzials von der Prüfgeschwindigkeit feststellbar, jedoch liegt die Absorptionsverminderung mit zunehmender Geschwindigkeit bei unter 10 %. Zusätzlich durchgeführte dynamische Stauchprüfungen bei Hochtemperatur (+75 °C) und bei Tieftemperatur (-30 °C) zeigten einen Einfluss auf das Absorptionsverhalten, welcher sich insbesondere bei hoher Temperatur beim Mischlaminat mit hohem Glasfaseranteil durch ein signifikant abgesenktes Lastniveau zeigte. Hinsichtlich ihres Absorptionspotenzials bewegen sich die untersuchten vier Mischlaminaten über alle Prüfungen hinweg im Bereich von 75 kJ/kg bis ca. 100 kJ/kg, was weit über dem Wert liegt, der von metallischen Werkstoffen bei vergleichbaren Wandstärken erreicht wird. Die Erarbeitung der Werkstoffdatensätze für die Basislaminaten, welche die Grundlage für alle Simulationsrechnungen bilden, erforderte einen erheblichen Aufwand. Zudem waren die Ergebnisse für den Ansatz mit dem untersuchten Mehrschalenmodell erst erfolgreich, nachdem die Kontakteigenschaften semi-empirisch auf das Niveau dynamischer Harzkennwerte bzw. Klebereigenschaften angehoben wurden. Am Ende konnte für beide eingesetzte FE-Codes das Ziel erreicht werden, mit einem einzigen Werkstoffdatensatz für die jeweilige Einzelschicht sowohl die Flachproben als Basislaminaten und Mischlaminaten als auch die Segmentproben nachrechnen zu können. Allerdings zeigte die Modellierung eine deutliche Abhängigkeit von der Netzfeinheit. Ab einer Elementgröße von 4 mm bildet sich bei den Segmentproben mit regelmäßigem Netz keine zufriedenstellende Crashfront mehr aus. Dies muss als Einschränkung hingenommen werden.

Mit Hilfe der erarbeiteten numerischen Modelle wurden Pre-Test-Simulationen für die generischen Bauteile mit Fasentripper unter axialer, dynamischer Stauchlast durchgeführt. Für die Stauchversuche an generischen Bauteilen, welche mit einer Initial-

geschwindigkeit von 14 m/s im Fallturm getestet wurden, ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen Test und Vorhersage. Die gilt in ähnlicher Weise für die außeral axial getesteten und simulierten Versuche, wobei die numerischen Ergebnisse der Bauteile mit hohem Glasanteil nicht an die Übereinstimmung der rein aus CFK gefertigten Bauteile heran reichten. Es ist ergänzend anzumerken, dass die Fertigungsqualität bei den Flach- und Segmentproben von sehr guter Qualität war, während dies für die Rohrproben, welche Grundlage für die generischen Bauteile und die räumliche Struktur war, nicht in gleichem Maße galt. Während die Streuungen in den Stauchlastkurven der mit Fasen trigger versehenen Proben als akzeptabel angesehen werden konnten, ergaben sich zum Teil erheblich Streuungen in den Lastkurven der mit integriertem Trigger versehenen Bauteile. Es ist schwierig, die Ursachen für die Streuungen eindeutig zuzuordnen, da sowohl die Fertigungsqualität als auch abweichendes Verhalten bedingt durch die Art der Triggerung mit variierender Ausbildung bzw. Vorschädigung der Crashfront ausgelöst sein können.



Vergleich von Pre-Test-Simulation und nachgelagertem Stauchlastversuch (14 m/s)

Unerwartete Prüfergebnisse zeigten sich bei den Tests mit einer Initialgeschwindigkeit von 7 m/s. Üblicherweise sinkt das Stauchlastniveau mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit. Bei den hier untersuchten Laminaten sank jedoch das mittlere Lastniveau in Abhängigkeit vom Laminat auf nur noch 60 % bzw. 70 % des bei 14 m/s erreichten Wertes. Trotz zusätzlicher Nachprüfungen konnte bisher keine Erklärung für dieses Verhalten gefunden werden. Mit unterschiedlicher Fertigungsqualität kann dies nicht - zumindest nicht allein - erklärt werden, denn das Verhalten ist systematisch.

Sichtprüfungen und Qualitätsuntersuchungen mit nicht zerstörenden Prüfmethode an den gefertigten Rohrproben unterstrichen den Verdacht, dass hierbei nur von einer deutlich eingeschränkte Reproduzierbarkeit der Fertigungsqualität ausgegangen werden konnte. Aus diesem Grund wurden im Vorfeld der geplanten Untersuchungen an den räumlichen Strukturen zusätzliche statische und dynamische Prüfungen an sogenannten T-Proben (Ausschnittsgeometrie der Pi-Struktur) durchgeführt, durch die einerseits die Reproduzierbarkeit des Crashverhaltens als auch der untergeordnete Einfluss der Fügung sichergestellt werden sollte. Die statischen und dynamischen Untersuchungen an den T-Proben führten zu extremen Abweichungen in den Ergebnissen, welche diesmal maß-

geblich auf die Fertigung der FKV-Komponenten zurückzuführen waren. Nachfolgende Prüfungen an den räumlichen Strukturen kamen zu vergleichbaren Ergebnissen. Hier konnte die Pre-Test-Simulation nur die Verhaltensvorhersage einer optimal gefertigten Struktur liefern, wodurch die ursprünglich vorgesehene Verifikation am Ende der Prozesskette nicht in der gewünschten Form realisiert werden konnte.

Ausblick

Insgesamt hat sich die Methodik bewährt, auch wenn rückblickend die Schwerpunkte für zukünftige Arbeiten anders akzentuiert werden sollten. Die hohe Anzahl an Versuchen auf der Ebene der Flachproben kann aus heutiger Sicht reduziert werden. Zumal numerische Untersuchungen gezeigt haben, dass gewisse Unschärfen für die Einzelschicht bei den Elastizitäten und Festigkeiten zwar einen hohen Einfluss auf die entsprechenden Lamineigenschaften haben, jedoch nur einen geringen Einfluss auf das simulierte Crushing-Verhalten und damit für das berechnete Absorptionslastniveau haben. Eine sehr hohe Gewichtung kommt den Untersuchungen an den Segmentproben zu, die einen wesentlichen Anteil zur Bestimmung der Absorptionsfähigkeit der eingesetzten Werkstoffe bzw. der zu untersuchenden Laminataufbauten haben. Für den Einsatz bestimmter Werkstoffkombinationen in realen Bauteilen bedarf es zudem erweiterter Untersuchungen zum Temperatureinfluss. Ein Vergleich der gewichtsspezifischen Energieabsorption zwischen den Segmentproben und den generischen Bauteilen haben einen deutlichen Einfluss der Bauteilgeometrie auf das Absorptionsverhalten gezeigt. Aus diesem Grund sollten zur Qualifizierung der Methodik zwei von einander abweichende generische Bauteile experimentell und numerisch untersucht werden. Hierdurch muss der Modellansatz nachweisen, dass der Einfluss der Geometrie vom Modell erfasst wird ohne das Werkstoffmodell nachkalibrieren zu müssen. Dies war im Rahmen der durchgeführten Arbeit noch nicht Gegenstand der Untersuchungen, es sollte aber zur Qualifizierung des verwendeten Modellansatzes gezeigt werden.

Einen wesentlichen Stellenwert innerhalb der Methodik nimmt die Fertigungsqualität von Proben, Bauteilen und Strukturen ein. Hier muss sichergestellt sein, dass die Fertigungsqualität in der gesamten Kette ausgehend von den Flachproben bis zur räumlichen Struktur konstant ist. Wenn dies z.B. für die hier im Projekt eingesetzten geschlossenen Rohrproben aus Fertigungsgründen nicht sichergestellt werden kann, muss ggf. über eine geänderte oder gänzlich andere Probenform nachgedacht werden. Gleichzeitig muss sichergestellt sein, dass bei veränderter Bauteilform nicht anderweitig ungewollte Einflüsse eingehandelt werden, z.B. die Fügezone bei geteilten Bauteilen.

Projektpartner

- Advanced Composite Engineering & Manufacturing GmbH, Immenstaad
- Audi AG, Neckarsulm
- DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
- DLR-Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung, Stuttgart
- Dynamore GmbH, Stuttgart
- ESI GmbH, Eschborn
- Dr.-Ing. h. c. F. Porsche AG, Stuttgart