

Untersuchungen zur Modellierung von Strukturen aus FKV unter Crashbelastung mit Hilfe von Mehrschalenmodellierungen

Martin Holzapfel, Gundolf Kopp

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart

Pawel Adamski, Herbert Elsenhans

Dr.-Ing. h. c. F. Porsche AG, Weissach

Thomas Hambrecht, Jochen Döll

Audi AG, Neckarsulm

Abstract:

The numerical simulation of the crash front in composite structures is up to now still difficult. To improve the numerical results a so called 'stacked shell' model for laminated composites which is typically used for impact modelling was also used to simulate tube 'segment' specimens and generic components under crushing loads. Static and dynamic experimental investigations (tension and compression coupon tests) were performed to measure the elastic and failure properties of the basic ply materials in the laminates.

Material model parameters for stacked shell representations were derived from numerical studies on tube segment crushing tests. These parameters were appropriate to model the energy absorption and average crushing force of different laminate set-ups. In a next step the parameters were used for pre-test simulations of generic composite components under a variety of crash (crushing) and impact (dynamic bending) loading conditions. The pre-test results were later compared to the real dynamic test results.

In this paper the experimental and numerical results of the investigations on the generic components with one specific CFRP laminate are presented. In general, the stacked shell models led to good results but the quality depends on the mesh size and other mesh parameters. The use of a single set of material model parameters for crash and impact load cases led to a good representation of the initial peak load (first failure) but the subsequent damage propagation up to complete failure is significantly delayed.

Keywords:

Composites, material modelling, stacked shell, crushing, crash front, lay-up, laminate, tube segment specimen, generic components, energy absorption

1 Vorbemerkung

Die nachfolgenden Ausführungen beruhen auf experimentellen und numerischen Untersuchungen, welche im Rahmen des Projektes ‚CoSiCra‘¹ durchgeführt wurden. Sie stellen einen weiteren Einblick in die Arbeiten des noch laufenden Projektes dar. Im Projekt CoSiCra wird eine durchgängige Methodik experimenteller und numerischer Untersuchungen verfolgt, bei der, ausgehend von der Kennwertermittlung an Flachproben (Basiswerkstoffe und Mischlaminat) über Stauchversuche an sogenannten ‚Segmentproben‘, Materialkarten für die Einzelschichten erstellt werden. Ergebnisse auf der Ebene von Flach- und Segmentproben wurden auf dem 5. LS-DYNA Anwenderforum präsentiert. Die Überprüfung der so abgeleiteten Modelle erfolgt an generischen Bauteilen (axial und off-axis), welche ausschnittsweise im Folgenden präsentiert werden. Innerhalb der gesamten Prüfkette werden dynamische Versuche bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt, um einen möglichen Dehnrateneinfluss bestimmen zu können. Diese Vorgehensweise bietet die Möglichkeit, dass die numerischen Ansätze in jeder Projektstufe geprüft und bewertet werden können. Mit Ausnahme der abschließenden Verifikation an einer räumlichen Struktur werden auf Proben- und Bauteilebene ebenso statische Prüfungen durchgeführt. Aufgrund der Fülle der Untersuchungen von unterschiedlichen Aspekten im Projekt CoSiCra kann nur ein kleiner Ausschnitt der Arbeiten dargestellt werden.

2 Überblick abgeschlossener Vorarbeiten

Die Abbildung der realen Vorgänge innerhalb der Crashfront von Strukturen aus FKV ist aufgrund der komplexen Vorgänge und der hohen Fragmentierung numerisch nicht umsetzbar [1 - 3]. Zur Erweiterung der numerischen Erfassung von Phänomenen innerhalb der Crashfront wird in diesem Projekt versucht, mit Hilfe der Mehrschalenmodellierung im Vergleich zur Einzelschalenmodellierung zusätzliche Vorgänge wie z.B. Delamination abzubilden und hierdurch eine verbesserte Steuerung des Verhaltens der Crashfront zu erreichen. Ausführlichere Ausführungen zur Motivation und zur Vorgehensweise finden sich in [4]. Nachfolgend wird ein Kurzüberblick zur Vorgehensweise gegeben. Zum Verständnis ist in Bild 1 beispielhaft die Überführung einer mehrschichtigen Einzelschale in ein Mehrschalenmodell mit vier Sublaminaten dargestellt.

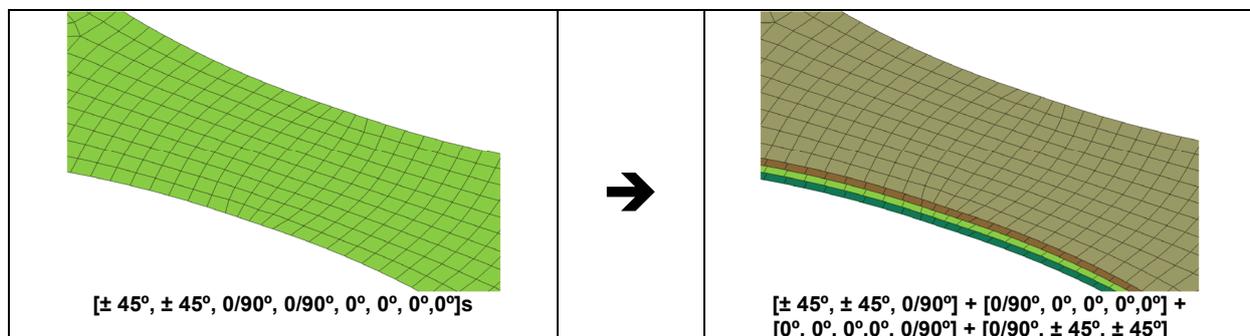


Bild 1: Einzelschalen-Laminat wird zum Mehrschalenmodell mit Sublaminaten

Im Rahmen des Projektes CoSiCra wurden insgesamt vier verschiedene Mischlaminat untersucht, welche aus einer unterschiedlichen Anzahl von Einzelschichten aufgebaut sind. Diese Einzelschichten bestehen aus ausgewählten, sogenannten Basiswerkstoffen, die als Prepreg verarbeitet wurden und in Tabelle 1 aufgeführt sind. Als Matrix kam ein Epoxidharz zum Einsatz.

Tabelle 1: Verwendete Basiswerkstoffe (Prepreg) für Proben und Bauteile

Pos.	Beschreibung	Fasertyp	Verhältnis Kette / Schuss	Dicke [mm]
1	CFK-Gewebe	HT-Faser	50 / 50	0.300
2	CFK-Gelege (unidirektional)	HT-Faser		0.125
3	GFK-Gewebe	E-Glas	50 / 50	0.240

¹ CoSiCra: Entwicklung und Verifikation einer Composite-Simulationsmethodik zur Vorhersage des Crashverhaltens von hoch belasteten Fahrzeugstrukturen

Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Untersuchungen für das reine CFK-Mischlaminat mit der Bezeichnung ‚ML-A‘ mit dem Lagenaufbau:

$$\text{ML-A} \Rightarrow [2 \times \pm 45^\circ / 2 \times 0^\circ / 90^\circ / 4 \times 0^\circ]_s$$

In Bild 2 sind numerische Nachbildungen von Flachprobentests am Beispiel des Materialmodells

MT054: *MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE

dargestellt, welche mit den gemessenen Ergebnissen aus den Flachprobentests gut übereinstimmen.

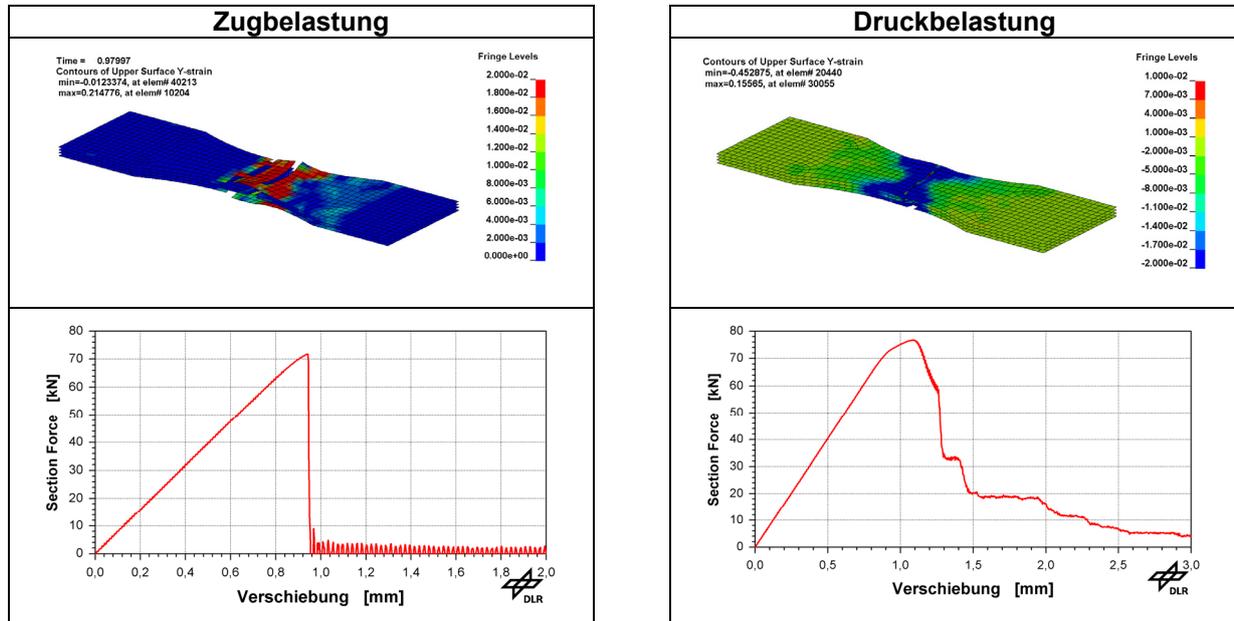


Bild 2: Nachbildung der Zug- und Druckversuche des Mischlaminates ML-A an Flachproben

Zur Bestimmung der Energieabsorptionsfähigkeit der unterschiedlichen Laminats wurden sogenannte Segmentproben eingesetzt, welche vom DLR entwickelt wurden und seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt werden [5]. In Bild 3 sind sowohl eine Probe in der Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine als auch die dynamischen Lastkurven von drei getesteten Proben für das CFK-Mischlaminat ML-A dargestellt. Die Stauchgeschwindigkeit war nahezu konstant und betrug bei diesem Test 10 m/s.

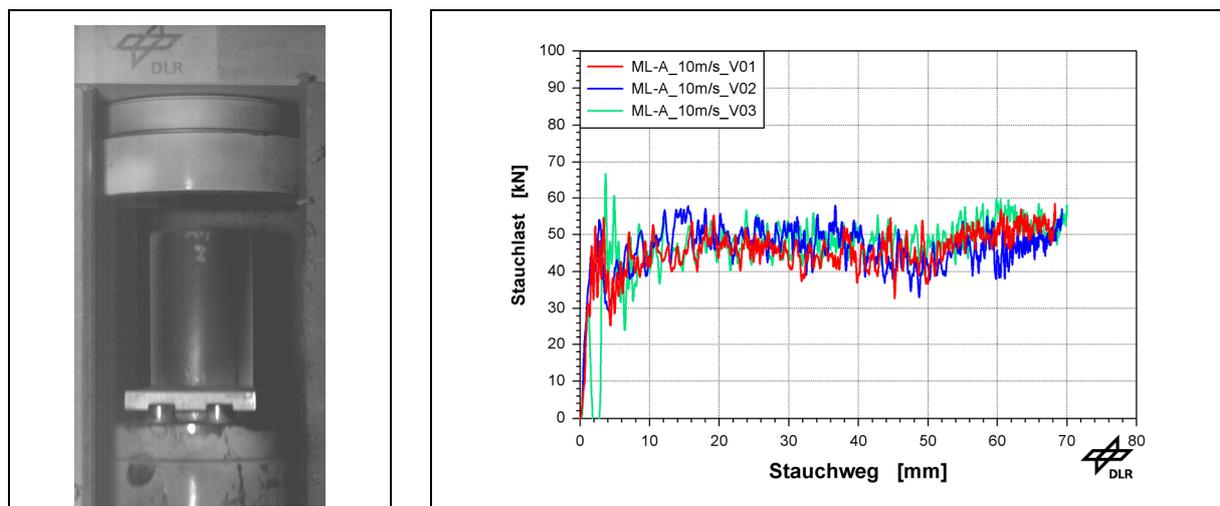


Bild 3: Messergebnisse der dynamische Stauchversuche an Segmentproben des CFK-Mischlaminats ML-A bei 10 m/s Prüfgeschwindigkeit

Für die Untersuchungen in den Mehrschalenmodellen wurde der Kontakttyp:

***CONTACT_AUTOMATIC_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK**

mit der Option 8 verwendet. Dieser Kontakt wurde in [6] im Vorgriff beschrieben und ist seit der Freigabe der Version 971 von LS-DYNA nutzbar. Die Bestimmung der Kontakteigenschaften mittels numerischer Nachbildung entsprechender Tests (z.B. DCB-Test) war nicht wie erhofft möglich, da sich die so abgeleiteten Festigkeiten bei der Mehrschalenmodellierung als zu niedrig erwiesen. Dies führte bei der Simulation der Segmentproben dazu, dass die Delaminationen zu weit der Crashfront vorkamen und damit das Lastniveau deutlich absenkten. Zudem kann es zu einem vorzeitigen Versagen im Bereich der Probenfixierung kommen. Daher wurden die Werte für die Kontaktfestigkeiten empirisch festgelegt. In Bild 4 ist die Segmentprobe als Mehrschalenmodell sowie der Vergleich der dynamischen Stauchlastkurven zwischen Simulationsrechnung und experimentellem Test dargestellt.

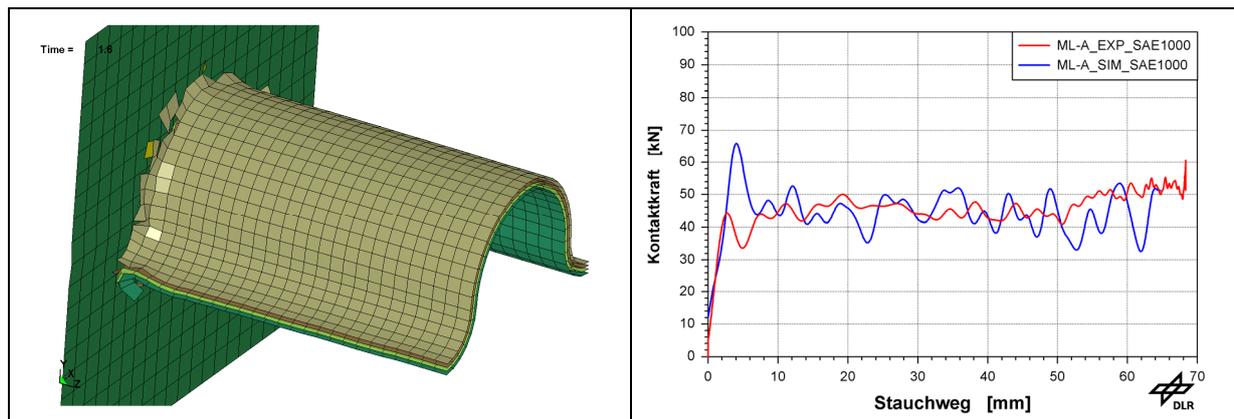


Bild 4: Mehrschaliges Modell der Segmentprobe (links); Vergleich von Test und Simulation der Stauchlastkurven (gefiltert mit 1000 Hz) bei einer Geschwindigkeit von 10 m/s (rechts)

Bei Untersuchungen zur Netzfeinheit erwiesen sich Elementgrößen mit Kantenlängen von 2 mm und 3 mm für die Mehrschalenmodellierung als geeignet. Geringere Werte führen bei unverhältnismäßig längeren Berechnungszeiten zu keinen signifikanten Verbesserungen in den Ergebnissen. Bei einer Elementkantenlänge von 5 mm war sowohl die Ausbildung als auch die Lokalisierung der Crashfront schon nicht mehr zufriedenstellend.

3 Generische Bauteile unter dynamischer Stauchlast

Als weiterer Schritt im Rahmen der vorgeschlagenen Methodik zur Anwendung der Mehrschalenmodellierung auf Strukturebene wurden sogenannte ‚generische Bauteile‘ untersucht. Hierfür waren rohrförmige Prüfkörper mit den in Bild 5 angegebenen Abmessungen vorgesehen.

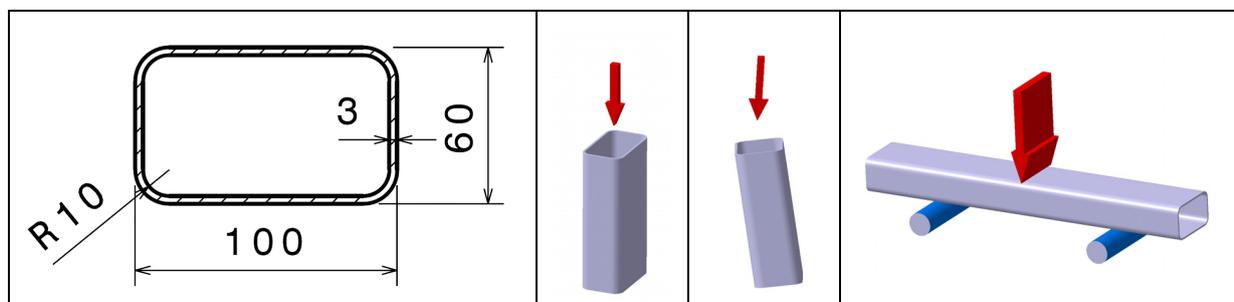


Bild 5: Querschnittsgeometrie der generischen Bauteile mit Abmessungen und vorgesehene Lastfälle: axiale Stauchlast, Stauchlast off-axis, Biegeschlag

Die Wandstärke ist hierbei nur eine ungefähre Angabe, da sie in Abhängigkeit vom untersuchten Laminat gewissen Abweichungen unterliegt. Ebenfalls in Bild 5 sind die prinzipiell untersuchten Lastfälle abgebildet.

Rohre unter axialer Druckbelastung sind in Abhängigkeit von Abmessung und Wandstärke beulgefährdet - insbesondere bei ebenen Seitenflächen. Die maximale Stauchlast sollte daher nicht über der statischen bzw. der dynamischen Beullast liegen. Zur Abschätzung ob eine Beulgefährdung für die ursprünglich vorgesehene Rohrgeometrie vorliegt, wurde zunächst die lineare statische Beullast ermittelt. Es zeigte sich, dass die Beullast zwar für das hier beschriebene Laminat ML-A unkritisch war, jedoch nicht für einen anderen im Projekt untersuchten Laminataufbau, welcher über einen 50 %igen Glasfaseranteil verfügt. Aus diesem Grund wurde die Geometrie durch Einführung von Wölbungen von 6 mm bzw. 2 mm so verändert (siehe Bild 6), dass nun die Beullast für das kritischste Laminat über der zu erwartenden Stauchlast lag.

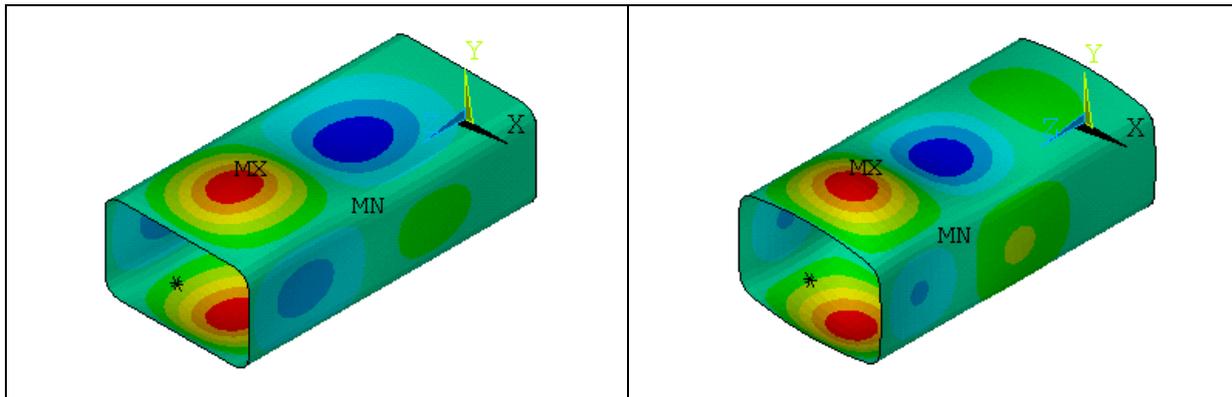


Bild 6: Verformungen der ersten Beulform am generischen Bauteil (ML-A) mit ebenen Seitenflächen (links), mit gewölbten Seitenflächen (rechts)

Für das Laminat ML-A sind diese Untersuchungen jedoch von untergeordneter Bedeutung, da sich die statische Beullast vom 2fachen auf den 3fachen Wert der erwarteten dynamischen Stauchlast verschob. Die numerisch ermittelten dynamischen Beullasten lagen noch deutlich darüber.

Bei üblichen CFK-Laminaten liegt deren Druckfestigkeit um ein vielfaches über der sogenannten ‚Crushing‘-Spannung. Zur Ausbildung einer kontrollierten Crashfront und zur Vermeidung eines Strukturkollaps benötigen Komponenten aus CFK, welche auf axiales Stauchversagen ausgelegt werden, daher eine gezielte Versagensinitiierung, wozu eine Triggerung vorgesehen wird. Wie bei den Segmentproben besteht die Triggerung auch bei den generischen Bauteilen im einfachsten Fall aus einem sogenannten Fasentripper. Hierbei wird einseitig am offenen Rand eine 45°-Fase bis zur halben Wandstärke angebracht, wodurch das lokal ertragbare Lastniveau entsprechend reduziert wird. Offene Ränder neigen bei lokaler Druckbelastung zudem zum ‚Aufpilzen‘, was die maximale Drucklast weiter deutlich absenkt. Wird die Fase über die gesamte Wandstärke angebracht, kann die bei Aufprall auftretende Spitzenlast so weit abgemindert werden, dass sie sich im Bereich des Stauchlastniveaus befindet. Zur Probenstützung und zur Vermeidung von Versagen wird die zweite offene Seite in einen Metallfuß eingeklebt. In Bild 7 (links) ist eine für einen axialen Stauchversuch vorbereitete Probe eines generischen Bauteils mit angebrachtem Fasentripper abgebildet. Rechts ist die beim Test gemessene dynamische Stauchlastkurve dargestellt, welche als repräsentativ angesehen werden kann. Die Versuche wurden im Fallturm durchgeführt, wobei die Fallmasse bei 220 kg und die Anfangsgeschwindigkeit bei ca. 14 m/s lag. Im Gegensatz zu den Untersuchungen an den Segmentproben kann hier die Prüfgeschwindigkeit nicht konstant gehalten werden. Um eine gewisse Vergleichbarkeit zu erreichen, wurde die Aufprallgeschwindigkeit so bemessen, dass 50 % der kinetischen Energie oberhalb einer Geschwindigkeit von 10 m/s und die weiteren 50 % unterhalb von 10 m/s absorbiert werden. In den Abbildungen wird daher der Begriff ‚Nenngeschwindigkeit von 10 m/s‘ verwendet, was einer Anfangsgeschwindigkeit von ca. 14 m/s entspricht.

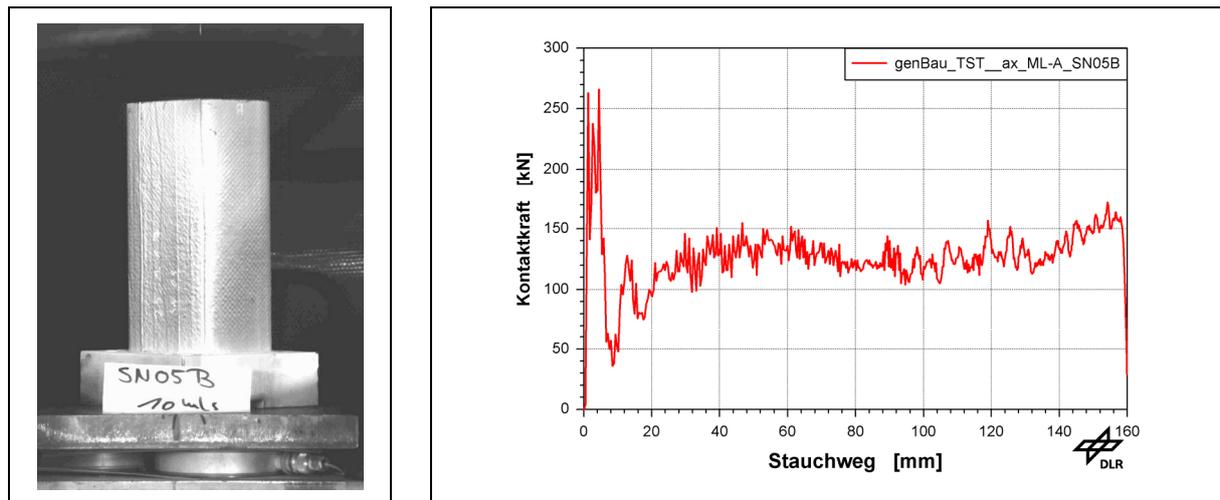


Bild 7: Generisches Bauteil vorbereitet für axialen Stauchtest (links); dynamische Stauchlastkurve aus Testversuch mit einer Fallmasse von 220 kg und einer Nenngeschwindigkeit von 10 m/s (rechts)

Das FE-Modell des generischen Bauteils wurde analog zur Modellierung der Segmentproben aufgebaut. Um bei den Segmentproben ein ausreichendes Stauchlastniveau zu erhalten, mussten die Versagensdehnungen sowohl in Zug- als auch insbesondere in Druckrichtung gegenüber den bei den Flachprobentests ermittelten Kennwerte angehoben werden. Für die Pre-Test-Simulationen wurden sowohl die Kontaktdefinitionen als auch die Materialkarten mit den übertragenen Modellparametern aus den Segmentproben unverändert übernommen. Das Simulationsergebnis für ein FE-Modell des generischen Bauteils mit einer Elementkantenlänge von 2 mm ist in Bild 8 (links) für den Simulationszeitpunkt von 2.4 ms abgebildet. Daneben ist der Vergleich der Stauchlastkurven von Simulation und Test zu sehen.

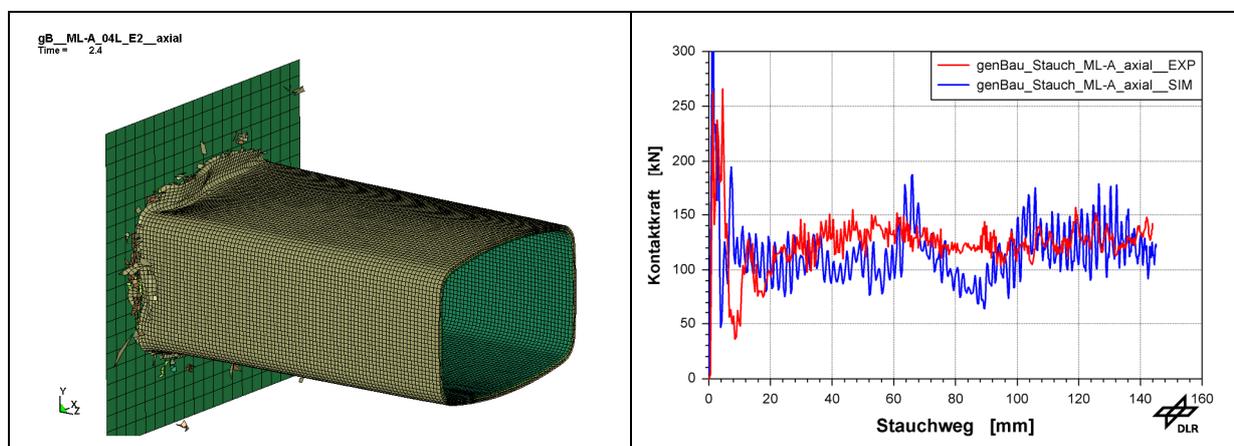


Bild 8: FE-Modell des generischen Bauteils unter axialer, dynamischer Stauchlast (links), Vergleich der Lastkurven von Test- und Simulationsergebnis (rechts)

Zu erkennen ist, dass das Lastniveau der Simulation nicht ganz das Niveau der gemessenen Kurve erreicht. Es wird angenommen, dass das Versagen innerhalb der Crushingfront nicht so lokalisiert abgebildet werden kann und damit trotz der Wölbung in den Seitenflächen eine gegenüber den experimentellen Tests verringerte numerische Fragmentierung stattfindet. Dies zeigt sich an den zum Teil großflächigen Bruchstücken in der Simulation. Berechnungen von FE-Modellen mit Elementkantenlängen von 3 mm zeigen ein leicht reduziertes Lastniveau.

In der Praxis wird ein vollkommen axialer Lastfall eher selten zu finden sein. Daher wurde in Erweiterung ein Lastfall mit um 10° aus der Achse (off-axis) gedrehtem Bauteil untersucht. In Bild 9 sind die Versuchsanordnung sowie eine gemessene repräsentative dynamische Stauchlastkurve abgebildet.

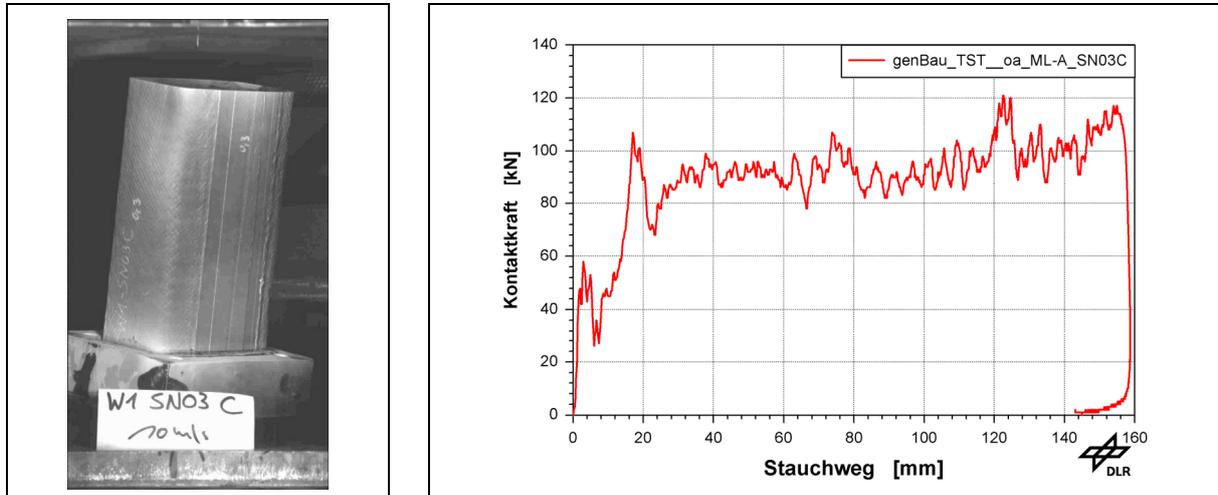


Bild 9: Generisches Bauteil vorbereitet für off-axis Stauchtest (links); dynamisch Stauchlastkurve aus Testversuch mit einer Fallmasse von 150 kg und einer Nenngeschwindigkeit von 10 m/s (rechts)

Bild 10 zeigt das FE-Modell mit einer Elementkantenlänge von 3 mm nach einer Simulationszeit von 3.0 ms. Daneben sind die Stauchlastkurven von Simulation und Test einander gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass von der Simulation die beiden Lastspitzen wiedergegeben werden, die auch im Test beim ersten Aufprall und nachfolgend beim Zustand der vollflächig anliegenden Prallplatte aufgetreten sind. Allerdings liegt das berechnete Niveau der Lastspitzen höher, da die Triggerzone numerisch nur sehr vereinfacht abgebildet werden kann. Das wie auch beim axialen Test leicht ansteigende Lastniveau kann zwei Ursachen haben. Ergebnisse von Versuchen unter quasi-statischer Stauchlast zeigen, dass das Lastniveau bei quasi-statischer Belastung höher liegt als bei dynamischer Belastung. Diese Eigenschaft wird durch das Modell nicht abgebildet, da das eingesetzte Werkstoffmodell keine Dehnratenabhängigkeit berücksichtigt. Andererseits wird das Bauteil im Bereich des Metallfußes gestützt, was ein Ausweichen der Seitenflächen mit zunehmender Stauchlänge behindert. Das FE-Modell mit Elementkantenlänge von 2 mm zeigt ein erhöhtes Lastniveau.

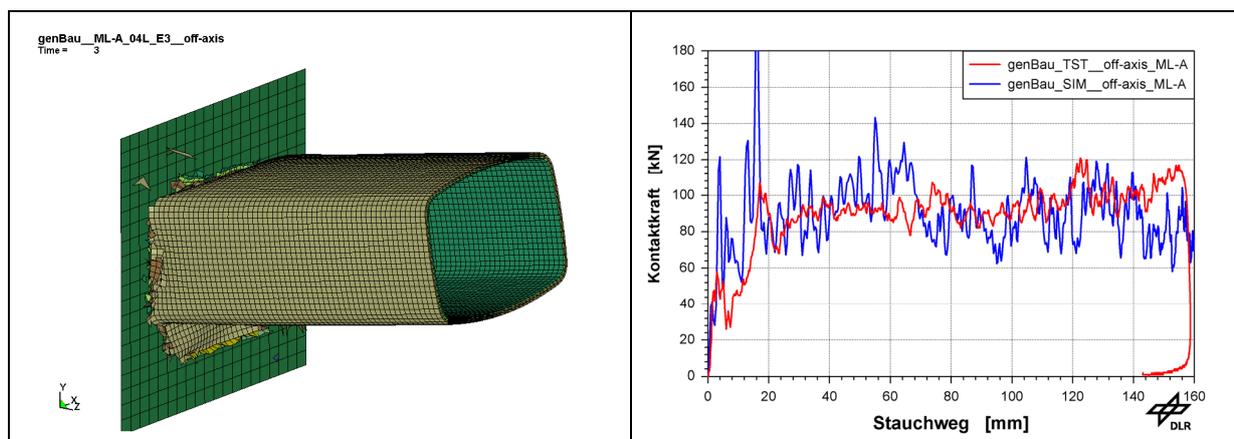


Bild 10: FE-Modell des generischen Bauteils unter dynamischer off-axis Stauchlast (links), Vergleich der Lastkurven von Test- und Simulationsergebnis (rechts)

4 Generische Bauteile unter Biegeschlagbelastung

Neben Crashbelastungen in Bauteilebene sind auch Schlagbelastungen senkrecht dazu bedeutsam. Für das zu untersuchende generische Profil wurde daher in Ergänzung auch eine dynamische Biegeschlagbelastung vorgesehen, für die experimentelle und numerische Untersuchungen bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 10 m/s durchgeführt wurden. In Bild 11 sind hierzu Sequenzen der dynamischen 3-Punkt-Biegung mit zylindrischen Auflagern und flächigem Stempel abgebildet.

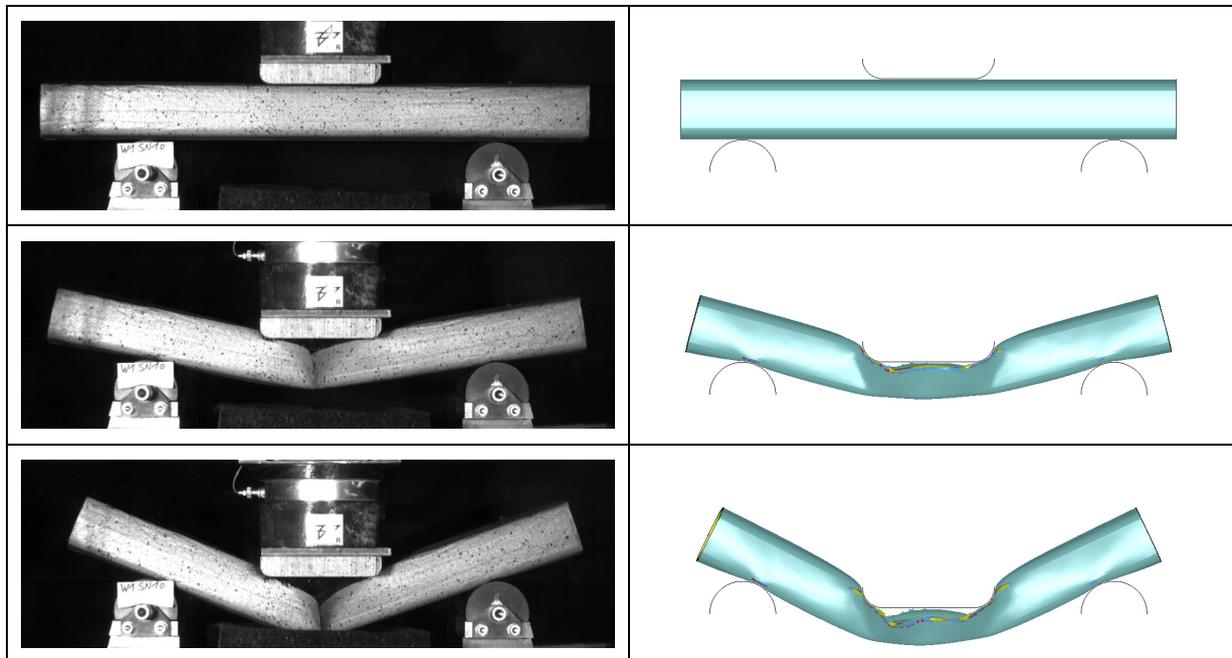


Bild 11: Sequenzen der dynamischen Biegeschlagbelastung am generischen Bauteil, Test (links) Simulation (rechts)

Werden für das Biegeschlagmodell die Werkstoffparameter eingesetzt, wie sie für die dynamischen Stauchbelastungen der Segmentproben abgeleitet wurden, so ergeben sich gewisse Diskrepanzen bei der Nachbildung der experimentellen Tests (siehe Bild 12 rechts). Zwar wird die Spitzenlast bei Versagensbeginn gut abgebildet, jedoch führt das für die Energieabsorption von Stauchbelastungen notwendige ‚duktilere‘ Werkstoffverhalten im Materialmodell mit erhöhten Versagensdehnungen zu einem deutlich späteren Totalversagen. Allerdings kann die Abweichung durch das niedrige Restlastniveau als kalkulierbar betrachtet werden. Durch geringe Parametermodifikationen ist ein Simulationsergebnis erreichbar, welches dem Verhalten aus dem Test sehr nahe kommt (siehe Bild 12 links).

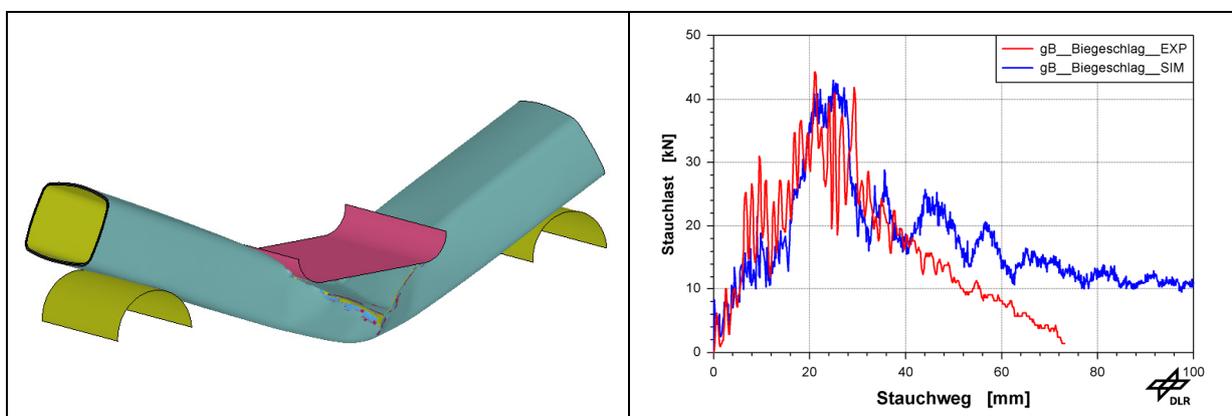


Bild 12: Biegeschlagmodell mit modifizierten Werkstoffparametern (links), Lastkurvenvergleich von Test- und Simulationsergebnissen (rechts)

5 Einfluss der Vernetzung

In [4] wurde aufgezeigt, dass eine Funktionalität des Mehrschalen-Ansatzes leider an die Netzfeinheit des Modells gekoppelt ist. Sinnvolle Elementgrößen liegen zwischen 2 mm und 4 mm Elementkantenlänge. Sowohl die Segmentproben als auch die generischen Bauteile haben durch die absolute Gleichmäßigkeit der Netzgeometrie und der Elementgröße einen gewissen ‚Labor-Charakter‘.

Aus diesem Grund wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt um zu prüfen, ob die Art der Vernetzung, d.h. die Variation der Elementgröße innerhalb eines Modells sowie die Elementorientierung einen Einfluss auf die numerische Nachbildung haben. In Bild 13 ist eine ausgewählte Netzmodifikation für das generische Bauteil dargestellt, welche repräsentativ für die Vernetzung eines realen Bauteils sein könnte. Mit dieser Vernetzungsvariante wurden die Stauchtests unter axialer und off-axis Belastung nachgebildet. Ein Vergleich der Stauchlastkurven zwischen regelmäßigem und unregelmäßigem Netz mit einer Elementkantenlänge von ca. 3 mm unter axialer Belastung ist in Bild 14 zu sehen. Das Lastniveau unterscheidet sich kaum.

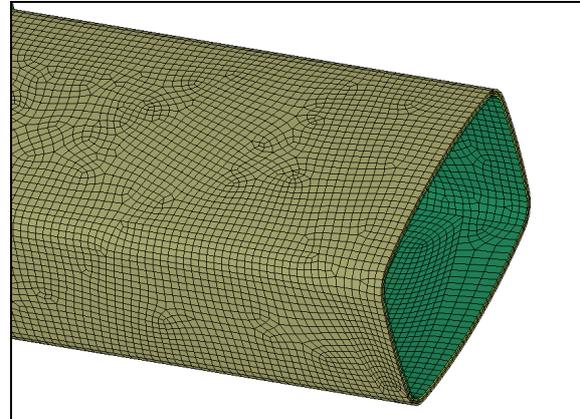


Bild 13: Modifizierte Vernetzung

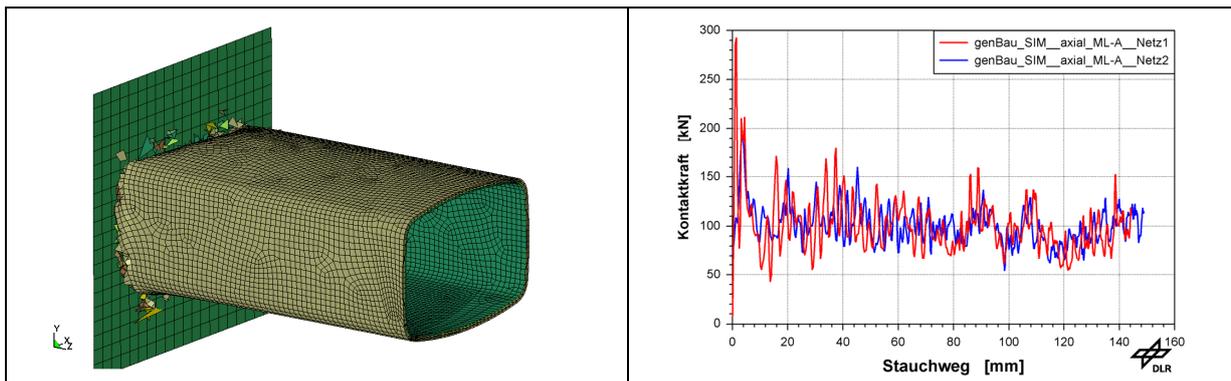


Bild 14: FE-Modell des generischen Bauteils mit unregelmäßigem Netz unter axialer Belastung (links), Vergleich der Lastkurven von gleichmäßigem und unregelmäßigem Netz (rechts)

Für die off-axis Belastung hat die Netzvariation am generischen Bauteil keinen nennenswerten Einfluss (Bild 15). Die Lastspitzen sind beim ‚unregelmäßigen‘ Netz reduziert, das Niveau ist vergleichbar.

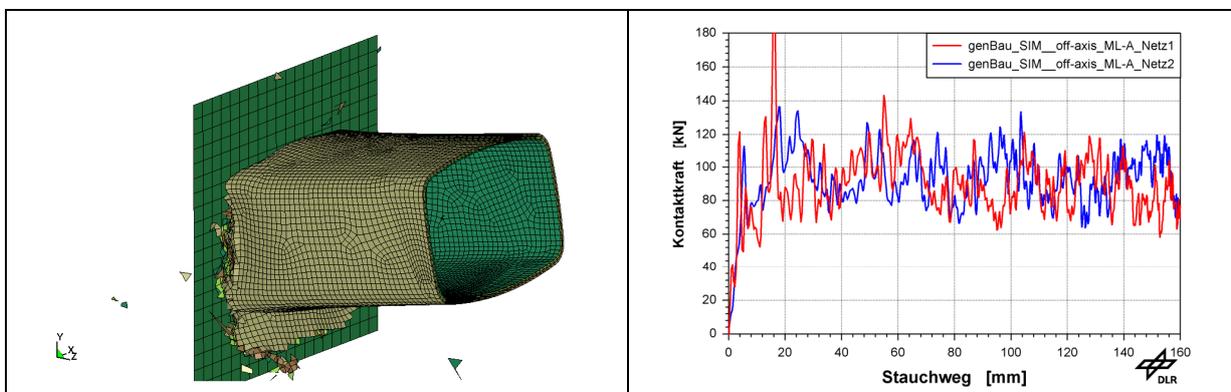


Bild 15: FE-Modell des generischen Bauteils mit unregelmäßigem Netz unter off-axis Belastung (links), Vergleich der Lastkurven von gleichmäßigem und unregelmäßigem Netz (rechts)

6 Zusammenfassung

Die durchgeführten numerischen Untersuchungen zur Anwendung von Mehrschalenmodellen bei der Nachbildung von rohrförmigen Strukturteilen aus CFK unter Crashbelastung zeigten akzeptable bis gute Übereinstimmungen mit dem ermittelten Crash- und Impact-Verhalten der getesteten Prüfkörper. Für die Bewertung des Modellierungsansatzes wurden Pre-Test-Simulationen mittels FE-Modellen an sogenannten ‚generischen Bauteilen‘ unter dynamischer Stauchlast axial und ‚off-axis‘ sowie unter dynamischer 3-Punkt-Biegung durchgeführt. Die Modelle waren mit Werkstoff- und interlaminaren Kontaktparametern versehen, wie sie aus numerischen Untersuchungen an Segmentproben für die eingesetzten Basiswerkstoffe abgeleitet worden waren. Durch anschließende Bauteiltests, welche unter Stauch- und Biegeschlagbelastung durchgeführt wurden, konnten Vergleiche zwischen den Simulationsvorhersagen und den Testergebnissen durchgeführt werden und entsprechende Bewertungen erfolgen. Während bei der axialen Stauchbelastung das experimentell ermittelte Lastniveau nicht ganz erreicht werden konnte, sind die Übereinstimmungen der Lastkurven bei der off-axis Belastung als gut zu bezeichnen. Werden dieselben Modellparameter für die Nachbildung einer dynamischen Biegeschlagbelastung eingesetzt, so werden die Lastkurve und das Lastniveau über einen nennenswerten Versagens- und Verformungsbereich gut wiedergegeben. Allerdings führt die Erhöhung von Versagensdehnungen im Werkstoffmodell, die für die Abbildung Crushing-Verhaltens notwendig sind, zu einem verzögerten Totalversagen der Struktur unter Biegeschlag.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Vernetzung bei den generischen Bauteilen haben gezeigt, dass sowohl für die axiale Stauchbelastung als auch die off-axis Belastung keine signifikanten Unterschiede im Stauchlastniveau zu erkennen sind, was positiv für eine Anwendung der Mehrschalenmodellierung bei realen Strukturen erscheint. Dennoch ist die Anwendung der Mehrschalenmodellierung mit den hier untersuchten Werkstoffmodellen noch keine Universallösung, da der Modellierungs- und Berechnungsaufwand hoch ist, und sich nicht jede Struktur für eine Aufteilung in explizite Sublamine eignet.

7 Literatur

- [1] Hamada, H. et al.: "Crushing mechanism of carbon fibre/PEEK composite tubes", Composites, 1995, pp. 749-755.
- [2] Holzapfel, M., Kindervater, C.M. : "Simulation des Nachbruchverhaltens eines GfK/SfK-Doppelhutprofiles", 17. CADFEM Users Meeting, 1999, III. 3.5.
- [3] Warrior, N.A., et al.: "The effect of interlaminar toughening strategies on the energy absorption of composite tubes", Composites Part A, 2004, pp. 431-437.
- [4] Holzapfel, M. et al.: „Numerische Nachbildung der Crashfront von faserverstärkten Strukturen mit Hilfe von Mehrschalenmodellen“, 6. LS-DYNA FORUM 2007, Frankenthal.
- [5] Kohlgrüber, D.; Kamoulakos, A.: "Validation of Numerical Simulation of Composite Helicopter Sub-floor Structures under Crash Loading". 54th Annual Forum American Helicopter Soc.; Washington D.C. / USA, May 20-22, 1998.
- [6] Middendorf, P.: "Composites – Materialmodellierung und Anwendungen im Flugzeugbau", 3. LS-DYNA Anwenderforum, 2004, A – II, 1 – 13.

8 Schlussbemerkung

Das Projekt ‚CoSiCra‘ ist ein vom Land Baden-Württemberg finanziell gefördertes ‚Leitprojekt‘, welches nur durch die Unterstützung der beteiligten Projektpartner – insbesondere die Firmen Dr.-Ing. h. c. F. Porsche AG und Audi AG zustande gekommen ist. Wichtigen Anteil an der Durchführung und dem Gelingen des Projektes haben auch die Softwarehäuser DYNAmore GmbH und ESI GmbH sowie die Firma ACE GmbH, welche die Proben und Bauteile fertigt.