Numerische Impaktanalyse von Hochdruckspeichern in Faserverbundbauweise mittels Finite-Elemente-Methode

Louis Ulrich Schreyer Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) @ KIT Rintheimer Querallee 2, Gebäude 70.04 76131 Karlsruhe

1. Einleitung

Die Arbeit umfasst die Entwicklung eines FE-Modells, mithilfe dessen das Impaktverhalten sowie impaktinduzierte Schädigung von Faser-Kunststoff-Verbund-(FKV-)Laminaten mit Dicken bis zu 30 mm unter "low velocity impact" (LVI-)Belastung untersucht werden können. Intralaminare Schädigung in Form von Faserbruch und Zwischenfaserbruch wird durch Verwendung des Hashin-Versagenskriteriums [1] in Verbindung mit einem energiebasierten Degradationsmodell berücksichtigt. Darüber hinaus wird durch Verwendung eines Kohäsivzonenmodells mit "traction-separation"-Beziehung ebenfalls Delamination im Modell abgebildet. Als Validierungsgrundlage dienen die experimentellen LVI-Versuche an Segmentproben aus dem zylindrischen Bereich eines mit kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) umwickelten Typ IV Drucktankbehälters [1].

2. Methodik

Im ersten Schritt werden die Materialkennwerte des zu untersuchenden Drucktankbehälters zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der unidirektional verstärkten (UD-)Einzellage, sowie die Modellparameter zur Beschreibung der intraund interlaminaren Schädigungsevolution anhand numerischer quasi-statischer Simulationsstudien am Einzelelement und auf Coupon-Ebene festgelegt. Zur Identifikation einer geeigneten Modellierung der Sublaminate und der zu berücksichtigenden Grenzschichten wird im nächsten Schritt eine numerische LVI-Studie anhand eines experimentellen Literaturbeispiels [2] auf Plattenbene durchgeführt. Damit einhergehend werden die Schädigungsmodelle hinsichtlich impaktinduzierter Faserzug- und -druckschädigung sowie Delamination validiert. Im letzten Schritt soll das entwickelte FE-Modell auf den herangezogenen Drucktankbehälter erweitert und validiert werden. Die Impaktenergien sind im Vergleich zum Plattenmodell ($E_{kin} = 25 \text{ J}$) mit ungefähr 200 J und 440 J signifikant erhöht.

3. Modellaufbau

Mithilfe der LVI-Studie auf Plattenebene wird der Ansatz mit gestapelten Schalenelementen ("layered shell") in Verbindung mit "zero-thickness"-Kohäsivzonenelementen als geeignete Modellvariante identifiziert. Der betrachtete Drucktankausschnitt wird entsprechend der zu berücksichtigenden Grenzschichten in Sublaminate unterteilt. Diese werden mit Schalenelementen diskretisiert und über kohäsive Elementschichten miteinander verbunden. Um die Rechendauer und den Modellierungsaufwand bei möglichst gleichbleibender Modellgüte zu minimieren, werden auf Basis der Erkenntnisse der vorangegangen Impaktstudie an CFK-Platten Vereinfachungen bei der Modellbildung getroffen. So werden zwischen den (+)- und (-)-Lagen der Kreuzwicklungen mit identischem Wickelwinkel keine Grenzschichten berücksichtigt. Darüber hinaus wird zwischen Einzelschichten mit einem Wechsel der Faserorientierung von weniger als 45° keine Grenzschicht modelliert. Um Schädigung im Modell zu berücksichtigen werden vollständig degradierte Elemente aus dem Modell entfernt, weshalb geeignete Kontaktinteraktionen zwischen den einzelnen Sublaminaten sowie dem kugelförmigen Impaktor definiert werden müssen. Da die experimentellen Ergebnisse durch Setzeffekte in den Einspannungen der Segmentprobe und einer Aufweitung des L-Profils während des LVI stark beeinflusst werden, muss der Prüfaufbau im Modell berücksichtigt werden (vgl. Abb. 1). Die seitliche Einspannung in den Schraubstöcken wird vereinfacht ohne Vorspannung modelliert.



Abb. 1: Aufbau, Randbedingungen und Vernetzung des Drucktankmodells auf Subkomponentenebene

4. Ergebnisse und Diskussion

Mit den getroffenen Annahmen zur Modellierung der Setzeffekte in den Einspannungen und des Lagenaufbaus sowie den Materialkennwerten, die vollständig auf Literaturwerten basieren, weist der simulative Kraft-Verschiebungs-Verlauf eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen für die kleinere Impaktenergie auf (vgl. Abb. 2 oben). Zudem offenbart das Modell den großen Einfluss von Delamination, die verstärkt durch radiale Aufziehspannungen induziert wird, auf den Kraft-Verschiebungs-Verlauf. Mit einsetzender interlaminarer Schädigung bildet sich ein Kraftplateau aus, das abgebaut wird, sobald die Delamination einzelner Grenzschichten den Rand (z-Richtung) erreicht (vgl. Abb. 2 unten). Seitliche Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskameras während des LVI deuten darauf hin, dass die Delaminationsfläche tendenziell überschätzt wird. Mangels experimenteller Daten können die vom FE-Modell prognostizierten Schäden jedoch nicht tiefergehend beurteilt werden. Versuchstechnisch schwer bestimmbare Materialparameter wie beispielsweise die kritischen Energiefreisetzungsraten der Versagensmodi werden im Rahmen einer Signifikanzanalyse hinsichtlich ihres Einflusses auf das Impaktverhalten untersucht. Während auf Plattenebene die Delaminationsfläche durch Variation der Penalty-Festigkeiten beeinflusst werden kann, ist dies auf Subkomponentenebene infolge der stark erhöhten Impaktenergie und der Laminatkrümmung lediglich begrenzt möglich. Des Weiteren kann gezeigt werden, dass eine maximale Elementdegradierung von eins nicht zu numerischen Instabilitäten führt. Aufgrund der vereinfachten Modellierung der Einspannung stößt das FE-Modell für die größere Impaktenergie hinsichtlich dem Detaillierungsgrad der Setzeffekte an seine Grenzen. Die

entsprechenden Simulationsergebnisse weisen Faserdruckschädigungen in den tieferen Lagen auf, deren Ursache lediglich teilweise ausgemacht werden kann.



Abb. 2: Auswertung der Impaktkraft (oben) und Delamination in den modellierten Grenzschichten (unten) für eine Impaktenergie E_{kin} = 200 J

5. Zusammenfassung

Mit dem entwickelten FE-Modell kann das prinzipielle Impaktverhalten dicker FKV-Laminate untersucht werden. Schwachstellen des experimentellen Prüfaufbaus sowie der Versagensmodi mit dem größten Einfluss auf das Impaktverhalten werden identifiziert. Die getroffenen Vereinfachungen bei der Modellierung des Laminats gewährleisten eine gut Ergebnisqualität bei gleichzeitig geringer Rechendauer. Im Hinblick auf eine geschlossene CAE-Kette kann das Modell um eine nachgeschaltete Strukturanalyse erweitert werden. Im Fall des Drucktankbehälters entspricht dies einer Berstdruckanalyse.

6. Literatur

- Hashin, Z. (1980). Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. Journal of Applied Mechanics. doi: 10.1115/1.3153664.
- [2] Mei, J. (2019). Impaktverhalten von dickwandigen CFK-Laminaten. Masterarbeit, Hochschule f
 ür Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- [3] Hongkarnjanakul, N. (2013). Modélisation numérique pour la tolérance aux dommages d'impact sur stratifié composite: de l'impact à la résistance résiduelle en compression. Dissertation, Université de Toulouse.