

Experimentelle und numerische Untersuchung von schlagbelasteten Aramidgewebeverbunden

Manuel Mehrkens¹, Dr. Daniel John¹

¹imk automotive GmbH, Chemnitz, Germany
www.imk-automotive.de

1 Einleitung

Aufgrund weltweit zunehmender Mobilität in allen Bereichen (Automotive, Luftfahrt und Bahn) werden Leichtbaulösungen mit dem Ziel einer ressourceneffizienten Herstellung und eines energieeffizienten Betriebes über die gesamte Produktlebensdauer immer wichtiger. Der Einsatz von funktionsintegrierten Faserverbundstrukturen besitzt dabei eine wichtige Schlüsselrolle. Allerdings sind dünnwandige Leichtbaulösungen sehr oft anfällig gegenüber Schlagbelastungen aller Art.

Daher richtet sich der Fokus dieser Arbeit auf die Modellierung impaktbelasteter Strukturen, welche auf einen breiten Anwendungsbereich stoßen, wie z.B. Schottersteinschlag im Bahnbereich, Steinschlag und Crash im Automobilbau, Tool Drop und Vogelschlag in der Luftfahrt sowie schusssichere Strukturen im zivilen Sonderschutzbereich. Dazu wird ein Aramidgewebeverbund untersucht und ein numerisches Simulationsmodell erstellt, welches über das genannte Anwendungsspektrum (niederdynamisch bis hochdynamisch) Gültigkeit besitzt. Für eine möglichst genaue Abbildung des Einschlages müssen die eindringenden Körper ebenfalls in einer angemessenen Detaillierungsstufe abgebildet werden, da diese teilweise einen erheblichen Einfluss auf die Impaktresistenz haben. Gerade die im Sonderschutzbereich eingesetzten Geschosse besitzen ein ausgeprägtes plastisches Verhalten. Daher wird zunächst auf die Projekttilmodellierung eines 9 mm Vollmantelgeschosses eingegangen und im Anschluss folgt die Beschreibung des Aramidgewebeverbundes.

2 Projekttilmodellierung

2.1 Quasistatische Charakterisierung

Das zu untersuchende Geschoss ist ein 9 mm Vollmantelgeschoss. Es setzt sich zusammen aus einem Bleikern und einem Mantel aus einer Kupferlegierung (Fig. 1). Für die geometrische Implementierung wurde zunächst ein Schlibbild des Querschnitts erstellt. Da für die einzelnen Komponenten keine Materialkennwerte zur Verfügung standen, mussten die Eigenschaften mit Hilfe unterschiedlicher Versuche ermittelt werden. Dazu war zunächst eine Separierung von Mantel und Kern notwendig.



Fig. 1: Druckproben Bleikern (links) und Gesamtgeschoss (rechts)

In einem quasistatischen und weggesteuerten Druckversuch konnten die Materialeigenschaften des Bleikerns ermittelt werden. Durch eine Parameterstudie zeigte das Simulationsmodell eine sehr gute Übereinstimmung mit der gemessenen Kraft-Weg-Kurve aus dem Druckversuch (Fig. 2). Folgend konnte mit den bereits ermittelten Materialparametern, die Eigenschaften des Mantels in einem weiteren Druckversuch ermittelt werden. Eine weitere Parameterstudie durch Anpassung der Kraft-Weg-Kurve (Fig. 3) lieferte einen Materialdatensatz für das Mantelmaterial. Mit den durchgeführten Versuchen konnte das Geschoss auf quasistatischer Ebene validiert werden.

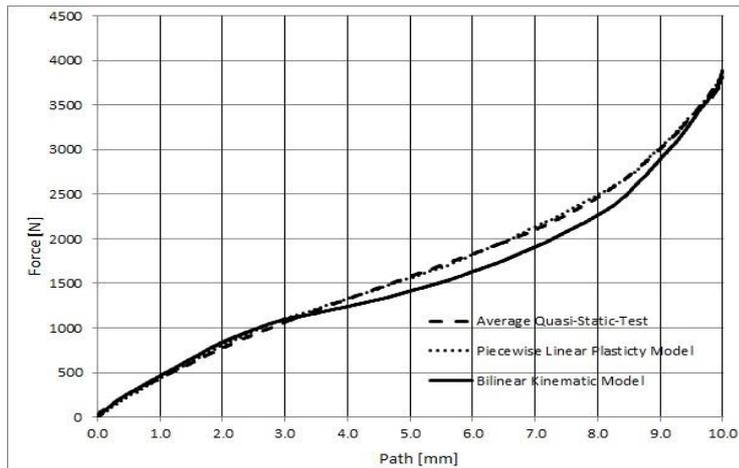


Fig.2: Kraft-Weg-Verlauf Bleikern

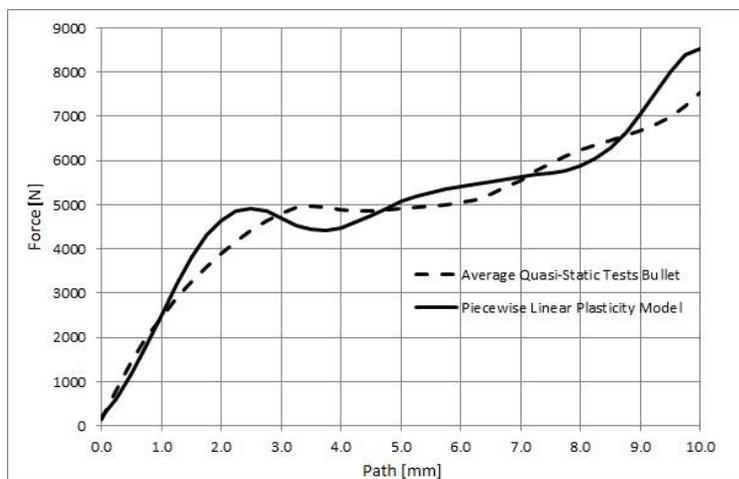


Fig.3: Kraft-Weg-Verlauf Gesamtgeschoss

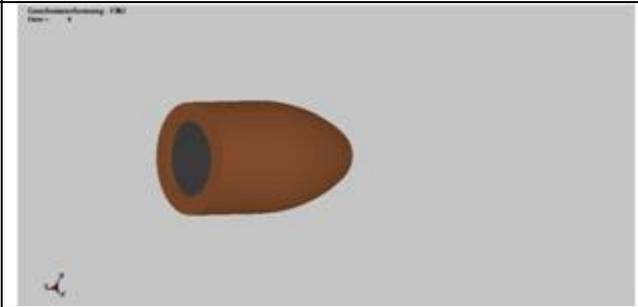
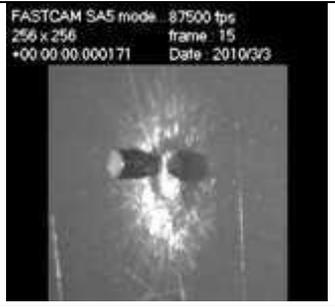
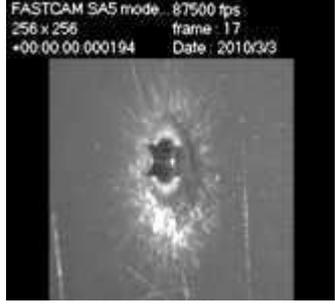
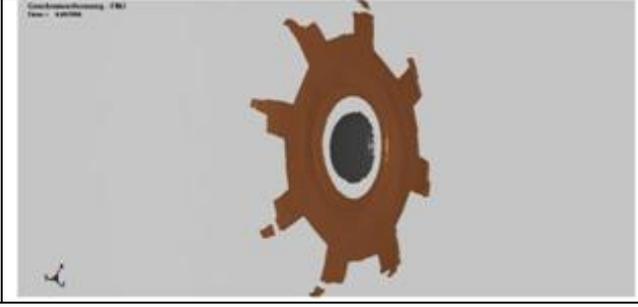
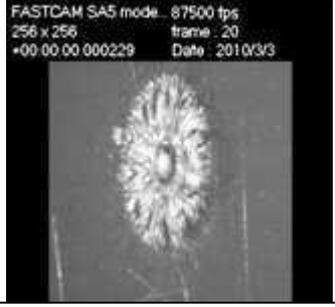
2.2 Hochdynamische Charakterisierung

Für eine weitere Validierung des Geschossmodells unter hochdynamischen Bedingungen wurden Beschussversuche mit Impactgeschwindigkeiten zwischen 200 m/s und 400 m/s auf eine Panzerstahlplatte durchgeführt (Hardox 400). Die Platte reagiert in diesem Belastungsbereich rein elastisch, sodass eine Analyse des Geschossverhaltens mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführt werden konnte. In Tab. 1 ist das Auftreffverhalten dargestellt. Zum Zeitpunkt von 0,000 ms ist das Projektil noch intakt und steht kurz vor dem ersten Kontakt mit der Panzerstahlplatte. Nach 0,023 ms findet eine sehr große plastische Verformung statt. Durch die hohen Druckkräfte verliert das Projektil an Länge und beginnt seitlich abzufließen. Die letzte Darstellung bei 0,058 ms zeigt die radiale Ausbreitung der Projektilfragmente.

Durch die Analyse der unterschiedlichen Geschossgeschwindigkeiten konnten weitere wichtige Materialparameter ermittelt werden. Dazu gehören die Versagensbedingungen unter denen die Elementerosion einsetzt und die dehnratenabhängigen Kenngrößen für den Bleikern sowie für den Kupfermantel. Diese Werte wurden mittels der Cowper-Symonds Materialbeschreibung implementiert.

Das Ergebnis ist ein vollständig validiertes Projektilmodell mit Gültigkeit bis zu einer Impactgeschwindigkeit von ca. 400 m/s, mit dem im weiteren Verlauf das Verformungs- und Schädigungsverhalten des Aramidgewebeverbundes untersucht werden kann [1]. Darüber hinaus kann dieses Simulationsmodell genutzt werden, um eine Vielzahl weiterer Zielmaterialien hinsichtlich ihrer Impactresistenz zu analysieren.

Table 1: Gegenüberstellung von Simulation und Versuch des Impakts mit einer Geschwindigkeit von 400 m/s

| Zeit | Simulation des Impakts | Beschussversuch |
|----------|--|--|
| 0,000 ms |  |  |
| 0,023 ms |  |  |
| 0,058 ms |  |  |

3 Material und FEM

3.1 Aramidlaminat

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Faserverbundwerkstoff handelt es sich um ein Aramidfasergewebe mit dem Handelsnamen Twaron® T750 [2] und einer thermoplastischen Polyurethanfolie. Das Aramidlaminat besteht aus schichtweise angeordneten Gewebe- und Folienlagen und wurde mittels einer Heißpresse hergestellt. Die Verstärkungsfasern werden dabei nicht vollständig mit dem Matrixwerkstoff getränkt, sondern nur auf der Oberfläche benetzt. Die Folie ist insbesondere durch ihre hohe Elastizität gekennzeichnet. Tab. 2 zeigt die verwendeten Materialkennwerte des Aramidfaserverbundes.

Table 2: Verwendete Materialkennwerte des Aramidlaminats

| Kenngröße | Einheit | Wert |
|--|---------|--------|
| E-Modul (x und y) | [MPa] | 26.000 |
| Schubmodul (in plane) | [MPa] | 130 |
| Schubfestigkeit (in plane) | [MPa] | 190 |
| Zugfestigkeit quasistatisch (x und y) | [MPa] | 655 |
| Zugfestigkeit hochdynamisch (120 s^{-1}) (x und y) | [MPa] | 795 |
| Druckfestigkeit (x und y) | [MPa] | 40 |
| Interlaminare Scherfestigkeit ILSS | [MPa] | 20 |

3.2 FE-Modell und Validierung

Die numerische Berechnung erfolgte mit ANSYS/LS-DYNA unter Verwendung der Materialkarte *MAT_058, welches zur Modellierung von unidirektionalen Verbunden, Gewebewerkstoffen sowie vollständigen Laminaten eingesetzt wird und dehnratenabhängiges Materialverhalten berücksichtigt [3]. Die Modellierung basiert auf einem makromechanischen Ansatz. Dieser geht von einer homogenen Einzelschicht aus, in der das Aramidgewebe und die thermoplastische Folie zusammengefasst werden [4]. Zur Einsparung von Rechenzeit wurden Viertelmodelle erstellt. Das in Fig. 4 (links) dargestellte hochdynamische Beschussmodell ist an seinen äußeren Rändern fest eingespannt. Die initiale Projektilgeschwindigkeit beträgt 443 m/s. Die Lagenanzahl variiert zwischen 8 und 11 Gewebeschichten. Im FE-Modell für die niederdynamische Fallturmsimulation (Fig. 4 rechts) liegt der Faserverbund auf einer Ringplatte. Das Fallgewicht mit einer Gesamtmasse von 1,25 kg erhält die Fallgeschwindigkeiten 6 m/s und 9 m/s. Die Lagenanzahl beträgt beim Fallturmaufbau konstant 10.

Die Ringplatte sowie das Fallgewicht bestehen aus Solid-Elementen und sind als Starrkörper definiert. Mit Hilfe eines AUTOMATIC_ONE_WAY_TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE-Kontaktes werden die Einzelschichten des Aramidlaminats miteinander verbunden. Ein Versagenskriterium für die Delamination ist in Form der maximalen interlaminaren Scherfestigkeit eingebunden. In der Beschusssimulation besteht der Faserverbund aus Membran-Schalenelementen. Für die Fallturmsimulation wurden vollintegrierte Schalenelemente eingesetzt. Die dehnratenabhängige Zugfestigkeit des Verbundmaterials wurde zuvor mittels Hochgeschwindigkeits-Zugversuchen experimentell ermittelt und in der verwendeten Materialkarte implementiert [5].

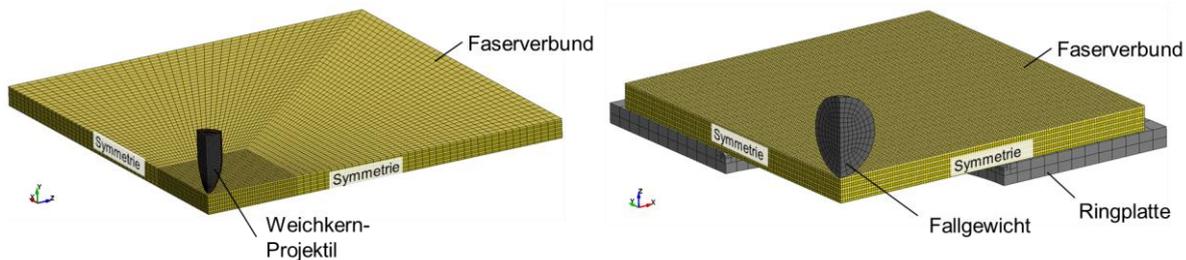


Fig.4: Verwendete FE-Modelle für die Beschuss- und Fallturmsimulation

Die Computer-Berechnungszeit betrug für die Beschusssimulation unter Einsatz von 8 CPU-Kernen ca. 1,5 Stunden. In Fig. 5 (links) ist der Durchschuss des Projektils durch das Faserverbundlaminat in der Zeitspanne von 0 ms bis 0,12 ms exemplarisch für den 10-lagigen Aufbau gezeigt. Es ist erkennbar, dass das Weichkern-Projektile beim Auftreffen auf die einzelnen Faserlagen eine plastische Deformation erfährt. Das Durchdringen der ersten vier Faserlagen wird hauptsächlich durch eine Faserabscherung und eine geringe Energieabsorption begleitet. Die weiteren Gewebeschichten nehmen einen Großteil der kinetischen Projektil-Energie in Form von Delamination und elastischer Faserdehnung auf. In dieser Berechnung erfolgt eine Abbremsung des Geschosses von 443 m/s auf 295 m/s. Dies ergibt mit einer Abweichung von 2 % eine sehr gute Übereinstimmung zum Experiment. Das Delaminationsverhalten wird simulativ ebenfalls gut abgebildet und erstreckt sich, wie im Experiment, über einen Durchmesser von ca. 80 mm.

Weiterhin wurden die maximale Plattenausbeulung (Backface-Trauma) sowie die Projektil-Restgeschwindigkeiten zwischen den numerischen Berechnungen und den experimentellen Daten für 8- bis 11-lagige Laminataufbauten untersucht. Wie in Fig. 5 (rechts) zu sehen, zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung zwischen dem Versuch und der Simulation. Für das Backface-Trauma liegen die Abweichungen zwischen 4 % und 14 %. Bezüglich der Restgeschwindigkeiten ergeben sich Abweichungen zwischen 2 % und 16 %.

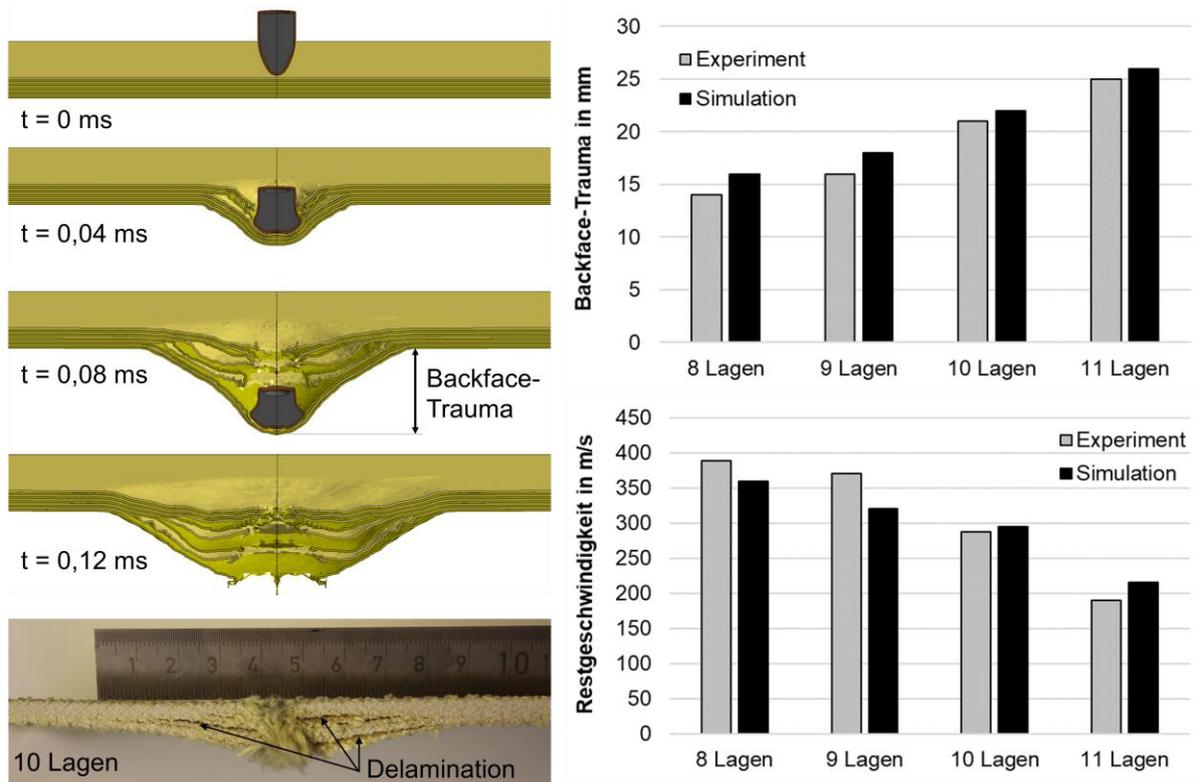


Fig.5: Links: Durchschuss des Aramidlaminats und Vergleich der Delamination zum Experiment. Rechts: Vergleich der Restgeschwindigkeiten und des Backface-Traumas (Ausbeulung)

Die Computer-Berechnungszeit der Fallturmsimulation beträgt aufgrund der höheren Elementanzahl ca. 13 Stunden. Fig. 6 (links) zeigt die experimentell ermittelten und numerisch berechneten Verschiebungskurven des Fallgewichtes sowie die Reaktionskraftverläufe für die Fallgeschwindigkeiten 6 m/s und 9 m/s. Die Kurvenanstiege für den Verschiebungsverlauf zeigen bis 2 ms eine gute Übereinstimmung. Die Maximalwerte der Verschiebungskurven liegen in der Simulation ca. 14 % unterhalb der experimentellen Höchstwerte und stellen damit eine gute Näherung dar. Die experimentelle Verschiebungskurve weist bei einer Fallgeschwindigkeit von 9 m/s einen konstanten Verlauf ab $t = 6$ ms auf, da die Verbundplatte im realen Versuch in der Ringplatte verblieb. In der Simulation findet hingegen eine elastische Rückfederung des Faserverbundes statt. Die maximalen Reaktionskräfte weichen zwischen dem Versuch und der Simulation ca. 12 % voneinander ab. Der steilere Kurvenanstieg in der Berechnung ist auf die Kontaktdefinition zurückzuführen. Das Fallgewicht überwindet zunächst einen Widerstand gegen die Lagenablösung infolge der Plattendurchbiegung.

Dazu steigt die Kraft für eine kurze Zeitspanne an, bis die interlaminare Scherfestigkeit in der Kontaktschicht erreicht und überschritten wird. Der Kontakt wird nun gelöst und die Lagen gleiten aufeinander ab, wodurch sich der Anstieg der Reaktionskraft verringert. Die in Fig. 6 (rechts) abgebildete Verformung des Aramidlaminats zeigt die charakteristische Faltenbildung, die ebenso im Experiment festgestellt wurde. Hinsichtlich der Fallgewichtsverschiebung, des Reaktionskraftverlaufes sowie der Plattendeformation kann der Fallturmversuch mit dem vorgestellten Simulationsmodell in guter Übereinstimmung zum Versuch dargestellt werden.

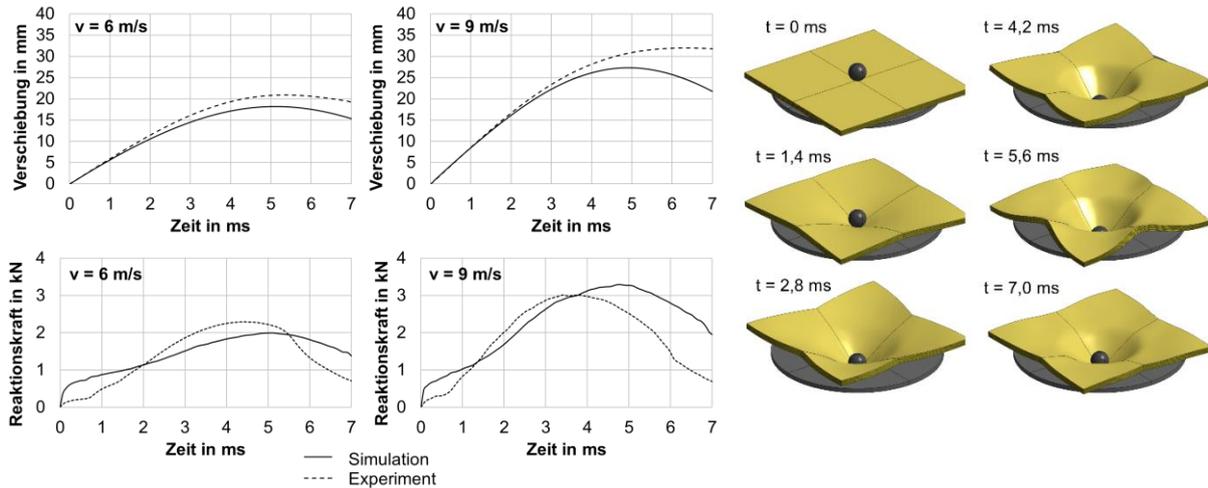


Fig.6: Links: Verschiebungskurven des Fallgewichtes und Reaktionskraftverläufe.
Rechts: Plattenverformung beim Impact

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit den derzeit technischen Möglichkeiten eine relativ gute Beschreibung von Impaktvorgängen realisierbar ist. Mit einem Datensatz zur Modellierung der Aramid-Einzellage ist es möglich, einen sehr breiten Anwendungsbereich von Impaktszenarien abzubilden. Dadurch können in Zukunft die unterschiedlichsten Strukturen im nieder- und hochdynamischen Bereich hinsichtlich des Einschlagschutzes in Verbindung mit effizientem Leichtbau ausgelegt werden.

5 Referenzen

- [1] John, D.: Methodical Approach to Simulate a High Velocity Impact on a Lightweight Bullet-proof Structure for an Aviation Application, University of the West of Scotland, Dissertation, September 2014
- [2] Teijin Aramid: Ballistics material handbook. <http://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2016/05/Teijin-Aramid-Ballistics-Material-Handbook.pdf>. Version: 2012
- [3] LS-Dyna: Keyword Users Manual. Volume II - Material Models.: Livermore Software Technology Corporation, 2015
- [4] Bresciani, L. M. et al.: Experimental tests and numerical modelling of ballistic impacts against Kevlar 29 plain-woven fabrics with an epoxy matrix: Macro-homogeneous and Meso-heterogeneous approaches. In: Composites Part B: Engineering 88 (2016), S. 114–130. – ISSN 1359–8368
- [5] Mehrkens, M.: Numerische Untersuchungen von biegeweichen Aramidgewebestrukturen zur hochdynamischen Anwendung im Sonderschutzbereich, Technische Universität Chemnitz, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, Masterarbeit, 2017