

Durchstoßsicherheit von Schutzwerkstoffen für Batterieschutzgehäuse

Experimentell basierter Ansatz für die iterative Materialbeschreibung und Validierung

Frank Huberth, Markus Jung, Stefan Hiermaier, Klaus Thoma

Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut, EMI, Freiburg, Deutschland



Abstract:

Dieser Beitrag stellt eine Werkstoff- und Simulationsstudie vor, die verschiedene Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbünde umfasst. Deren Anwendungsziel ist eine Leichtbaulösung für den Batterieschutz in Elektrofahrzeugen. Auf der Basis des Grundwerkstoffs PP-LGF werden verschiedene Varianten mit integrierten Metallgittern oder verstärkenden Gewebelagen (Organoblech) mithilfe von Durchstoßversuchen untersucht und bewertet. Das beste Schutzpotenzial zeigt dabei der Verbund aus PP-LGF und Organoblech. Für diese Variante und die Referenzvariante aus PP-LGF wird ein Modell des Durchstoßversuchs für die Simulation mit LS-DYNA umgesetzt. Die Parameter der verwendeten Werkstoffmodelle werden, ausgehend von Startwerten aus Zugversuchen und Datenblättern, anhand von Messdaten optimiert. Dabei dienen die optimierten Daten für PP-LGF als Grundlage für die Simulation des Lagenaufbaus aus PP-LGF und Organoblech. Zusätzlich werden verschiedene Einflussgrößen untersucht, um die Robustheit der ermittelten Daten zu bewerten und eine Übertragbarkeit auf andere Anwendungen zu gewährleisten.

Keywords:

Schutzwerkstoffe, Leichtbau, Crash, Elektromobilität, Batteriesicherheit, Impact, Durchstoßversuch, optische Dehnungsmessung; Hybridwerkstoffe, Verbundwerkstoffe.

Kontakt: frank.huberth@emi.fraunhofer.de

1 Einleitung

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität (FSEM), gefördert durch das BMBF, erarbeitet. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden verschiedenste Aspekte der Elektromobilität betrachtet, von der Energieerzeugung, -Verteilung und Speicherung bis hin zu sozialen und gesellschaftlichen Aspekten. Ein zentraler Punkt ist die Umsetzung von Lösungen in Demonstratoren. Als PKW-Demonstrator wird der FRECC0 auf Basis eines bestehenden Fahrzeugs (Bild 1) aufgebaut. Ein wichtiger Teilaspekt ist dabei die Crashesicherheit, insbesondere die crashtsichere Batterie. Diese wird bei dem Fahrzeug im Bereich integriert, den sonst der Verbrennungsmotor und das Getriebe einnehmen (Bild 2).



Bild 1: FRECC0-Basis Artoga GT

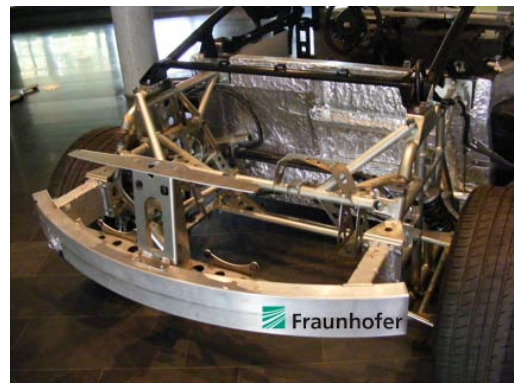


Bild 2: Einbauvolumen für Energiespeicher und Elektronik im Heckbereich

Zur Untersuchung des Crashverhaltens wird anhand von CAD-Daten ein entsprechendes Simulationsmodell der Heckstruktur aufgebaut. In ersten numerischen Studien ist der Batteriepack mit Batterieschutzgehäuse als vereinfachter Block modelliert und wird dann entsprechend dem Entwicklungsstand schrittweise detaillierter aufgebaut (Bild 3).

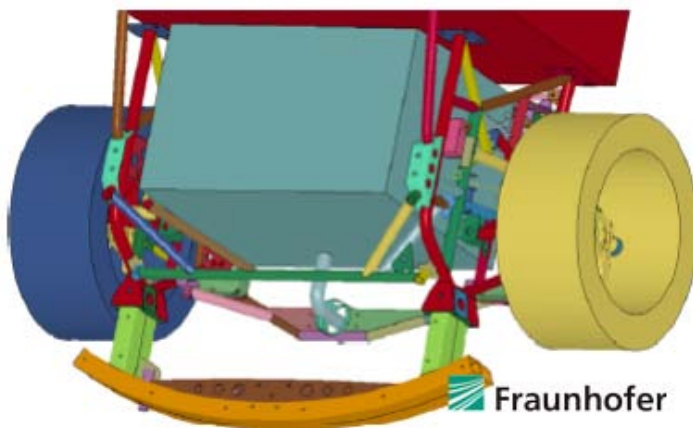


Bild 3: Simulationsmodell für die Crashsimulation mit LS-DYNA des FRECC0-Heckrahmens, Fraunhofer EMI und IWM



Bild 4: Entwurf eines Batteriemoduls mit Knautschzone

Ein erster Modellansatz für die Batteriemodule hat eine Knautschzone für die Module vorgesehen, was aber aufgrund der Bauraumsituation nicht realisierbar ist (Bild 4). Bereits bei diesem Konzept war neben der energieabsorbierenden Knautschzone der Schutz vor lokaler Durchdringung der Modulwände ein wesentliches Kriterium. Dieser Schutz ist von entscheidender Bedeutung für die Sicherheit. Im Falle einer Durchdringung können Zellen so beschädigt werden, dass ein Kurzschluss unvermeidbar ist. Das kann dann zu einer instabilen Reaktion beschädigter Zellen führen, dem sogenannten »Thermal Runaway«. Ein Beispiel dafür ist in den folgenden Bildern (Bild 5 und 6) anhand des Ergebnisses eines Nageleindringversuchs dokumentiert.



Bild 5: Primatische Li-Ionen-Zelle nach dem Nageldurchstoßversuch und exothermer elektrochemischer Reaktion aufgrund des erzwungenen Kurzschlusses

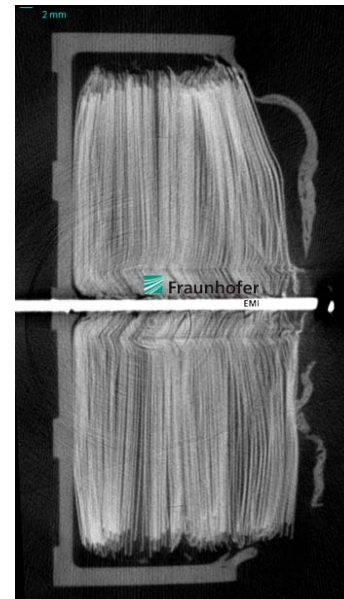


Bild 6: CT-Aufnahme der geschädigten Zelle, Schnitt mit Nagel (weiß)

Entgegen anderer mechanischer Belastungen, wie z.B. Stauchen der Zellen, führt das Durchstoßen von Zellen, insbesondere mit elektrisch leitenden Werkstoffen, zwangsweise zu einem Kurzschluss. Aus diesem Grund ist dieser Schadensfall durch geeignete Schutzmaßnahmen möglichst umfassend auszuschließen.



Bild 7: Grundwerkstoff PP-LGF (V1), Probe vor und nach dem Durchstoßversuch mit DIN-EN-ISO-6603-2-Impaktor



Bild 8: Grundwerkstoff PP-LGF mit eingelegtem Metallgitter (V2), Probe vor und nach dem Durchstoßversuch mit DIN-EN-ISO-6603-2-Impaktor



Bild 9: Grundwerkstoff PP-LGF mit einer Schicht Organoblech (V7), Probe vor und nach dem Durchstoßversuch mit DIN-EN-ISO-6603-2-Impaktor

Da für mobile Anwendungen eine schwere Panzerung dem erforderlichen Leichtbau widerspricht, ist es notwendig, Leichtbauwerkstoffe mit entsprechendem Schutzpotential einzusetzen. Aus diesem Grund wurden am Fraunhofer ICT verschiedene Werkstoffverbünde bzw. Verbundwerkstoffe für vergleichende Untersuchungen gefertigt. Eine Auswahl der dem Fraunhofer EMI zu Untersuchung

bereitgestellten Werkstoffe ist in den Bildern 7 bis 9 dargestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sollen der Simulation der im FRECC0 zu verbauenden Batterieschutzstruktur im Crashlastfall dienen.

Es wurden Proben des Grundwerkstoffs Polypropylen mit Langglasfasern (PP-LGF) gefertigt (Kurzbezeichnung V1), Proben mit verschiedenen Metallgittereinlegern und Proben aus Grundwerkstoff mit einer zusätzlichen Lage Organoblech, einer ca. 0.9 mm dünnen Schicht Glasfasergewebe (Kurzbezeichnung V7). Die Proben weisen für alle Varianten im Mittel eine Dicke von 4 mm auf und haben eine Kantenlänge von 10 mm..

Die eingelegten Metallgitter variiert in Maschenweite und Drahtdurchmesser. In Bild 8 ist eine ausgewählte Variante dargestellt mit einer Maschenweite von 5 mm und einem Drahtdurchmesser von 1 mm (Kurzbezeichnung V2). Die Gittereinleger stellen eine kombinierte Funktion aus mechanischem Schutz und eine elektrischen Abschirmung dar. Die Versuche und Versuchsergebnisse werden im folgenden Kapitel dargestellt.

Die Orientierung der Proben ist so gewählt, dass Gewebe parallel zu den Probenkanten orientiert sind.

2 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Der Versuchsaufbau ist angelehnt an DIN-EN-ISO-6603-2 (Bild 10) und an einer dynamischen servo-hydraulischen Versuchsanlage aufgebaut.

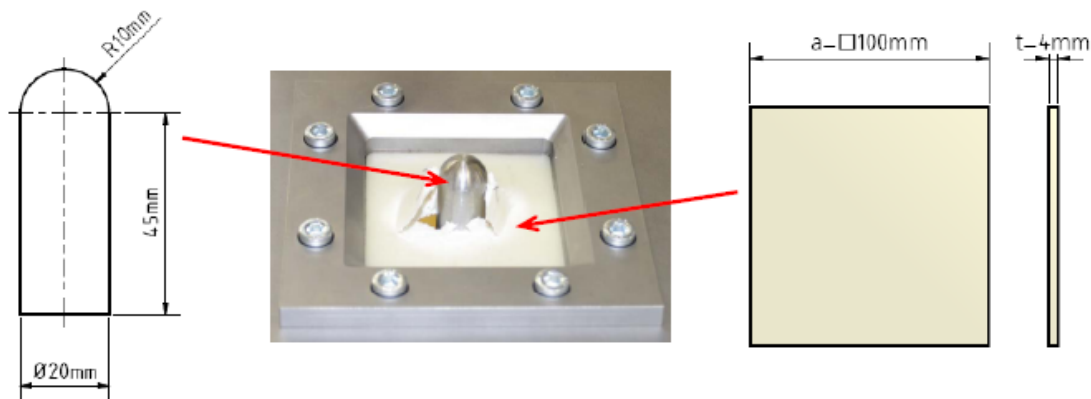


Bild 10: Versuchsaufbau und Probengeometrie Durchstoßversuch nach DIN-EN-ISO-6603-2

Für die Validierung der Simulationsergebnisse wurde zusätzlich zur Kraft- und Weg- Messung am Impaktor ein Stereokamerasystem installiert, was es ermöglicht, mithilfe der Grauwertanalyse dreidimensional Verschiebungsfelder auf Oberflächen zu analysieren. Aus diesen Verschiebungsfeldern können dann lokale Verzerrungen auf der Oberfläche bestimmt werden.

Als Variante des Durchstoßversuchs wurde ein zweiter Impaktor entsprechend den Spezifikationen des »UN-Transportation Tests« für den Nagelversuch eingesetzt.

Die dynamischen Versuche mit einer Impaktorgeschwindigkeit von 4.4 m/s zeigten für die Versuchsserie mit DIN-Impaktor bei zwei Werkstoffvarianten, V2 und V7, eine deutlich höhere Energieaufnahme. Für den Grundwerkstoff V1 kann durch zusätzliche Versuche mit quasistatischer Belastungsgeschwindigkeit ein deutlicher Dehnrateneffekt nachgewiesen werden.

Betrachtet man die bis zum Versagen aufgenommenen Energien der verschiedenen Varianten (Bild 11) und normierte diese noch mithilfe der mittleren Dichte der Werkstoffe, zeigt sich die hohe Leistungsfähigkeit des Verbunds V7 aus PP-LGF und Organoblech. Die Variante V2 mit maximaler Maschenweite und Drahtdicke fällt bei Berücksichtigung der Leichtbaugüte deutlich ab gegenüber V7 und nähert sich Varianten mit engmaschigen Gittern und geringerer Drahtdicke (V4) an. Die weiteren Betrachtungen beschränken sich deshalb auf den Grundwerkstoff V1 (PP-LGF) und auf die Variante V7 PP-LGF mit Organoblech.

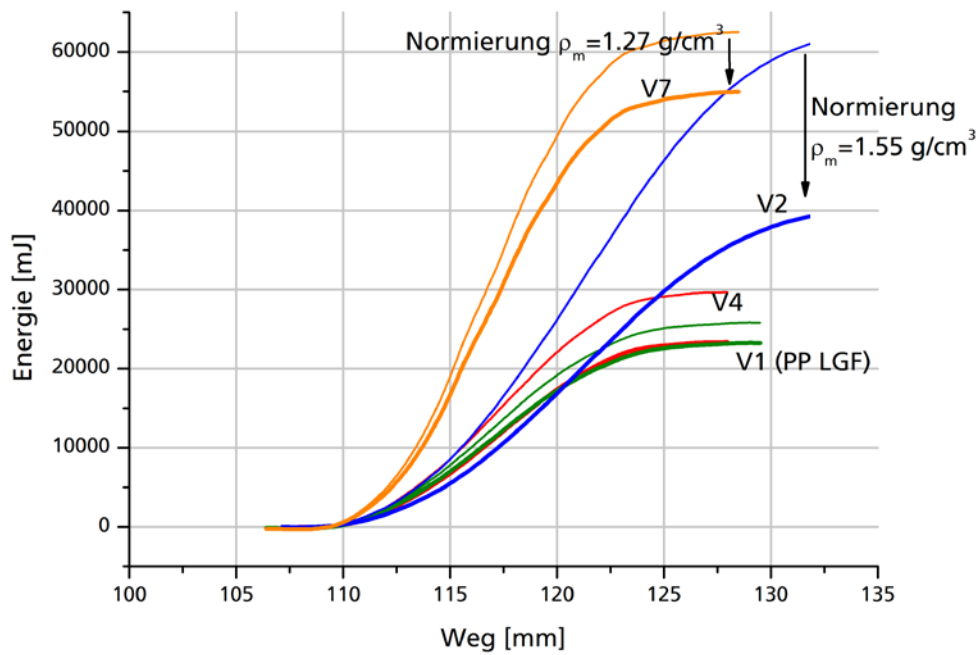


Bild 11: Vergleich der Energieaufnahmen für vier Werkstoffvarianten im Durchstoßversuch mit DIN-Impaktor als Integral der Kraft- Weg-Daten und normiert mit der mittleren Dichte zur zusätzlichen Berücksichtigung der Leichtbaugüte

Am Fraunhofer IWM wurden für die Werkstoffe quasistatische Zugversuche in Geweberichtung durchgeführt, deren Ergebnisse dem Fraunhofer EMI zur Verfügung stehen. Diese Daten liefern die Startwerte für die Simulation.

3 Modell des Durchstoßversuchs

Für die Simulation des Durchstoßversuchs wird der Versuchsaufbau in ein einfaches Modell überführt, das die Klemmung durch einfache Randbedingungen abbildet. Die Probe ist mit Schalenelementen diskretisiert. Dabei werden zwei Netzvarianten verwendet. Eine Netzvariante weist eine gleichartige Vernetzung der Probe aus, die andere eine lokale Netzverfeinerung im Impaktbereich. Die gröbere Elementierung entspricht einer mittleren Kantenlänge von 2 mm, die feine einer mittleren Kantenlänge von 1 mm. Der Impaktor ist als Starrkörper mit einem translatorischen Freiheitsgrad definiert, dem eine konstante Geschwindigkeit von 4.4 m/s zugewiesen ist, was den Versuchsbedingungen entspricht (Bild 12).

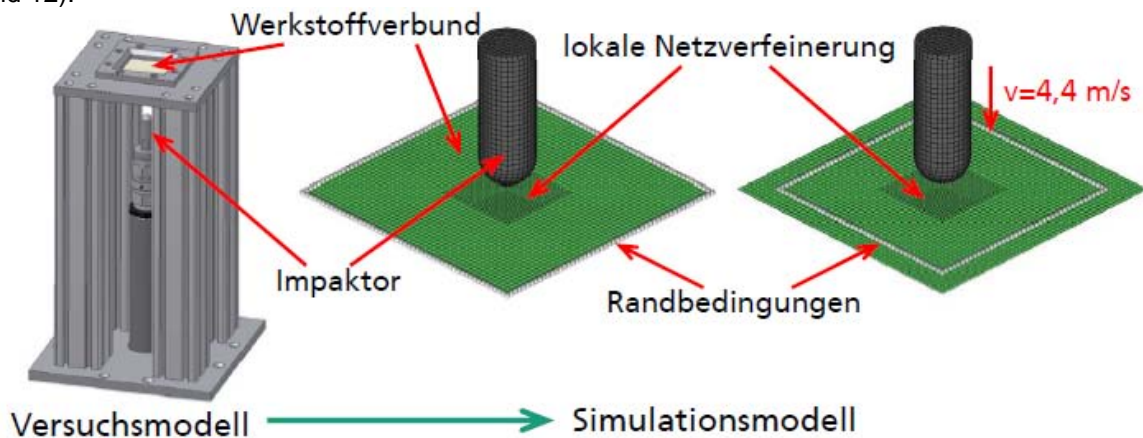


Bild 12: Modell des Durchstoßversuchs (rechts), abgeleitet aus dem Versuchsaufbau (links)

Für den Grundwerkstoff V1 wird ein einfacher Ansatz mit dem LS-DYNA-Materialmodell 24, *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY gewählt, da keine Informationen über die Anisotropie vorliegen. Dieses Materialmodell ermöglicht eine einfache Berücksichtigung des Dehnrateneffekts und ist für eine iterative Anpassung der Materialparameter inklusive der Eingabekurven einfach zu handhaben.

Die verwendeten Elementtypen für diese Variante sind Elementformulierung 1, 2 und 16 in LS-DYNA. Elementformulierung 1 ist das Huges-Liu-Element (ELFORM=1). Dieses 4-knotige Element besitzt als reduziert integriertes Element einen Integrationspunkt in der Ebene. Die Anzahl der Integrationspunkte über die Dicke ist für die Untersuchungen an Variante V1 auf 5 festgelegt. Das Standard-schalenelement in LS-DYNA ist Elementformulierung 2, das Belytschko-Tsay-Element (ELFORM=2), ebenfalls ein reduziert integriertes Schalenelement. Elementformulierung 16 ist ein vollintegriertes »fully integrated shell element« (ELFORM=16) mit vier Integrationspunkten in der Ebene.

Für den Verbund V7 aus einer dicken Schicht PP-LGF und einem dünnen Organoblech mit Glasfasergewebe wird die *PART_COMPOSITE-Definition für einen Lagenaufbau mit verschiedenen Materialmodellen verwendet. Dabei werden Materialmodell 24 für die PP-LGF-Lage und Materialmodell 22, *MAT_COMPOSITE_DAMAGE, für das Organoblech verwendet. Mit diesem anisotropen Materialmodell wird das für Gewebe charakteristische orthotrope Materialverhalten berücksichtigt.

Für den Durchstoßversuch ist ein Kontakt zwischen Probe und Impaktor definiert, *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE.

Für die Modellierung der Einspannung sind zwei Knotengruppen definiert, sogenannte Sets (Bild 12). Das Set an der Probenkante weist keine Freiheitsgrade auf. Das Set an der inneren Kante der Einspannung beinhaltet nur noch eine Sperrung einiger translatorischer Freiheitsgrade.

Alle aufgeführten Materialmodelle, Elementformulierungen und anderen LS-DYNA-spezifischen Definitionen sind in den aktuellen LS-DYNA-Handbüchern weiter erläutert.

4 Simulationen für Grundwerkstoff PP-LGF (V1)

Aus den Zugversuchen wurden Startwerte für die Simulation bestimmt. So wurde ein Elastizitätsmodul von 4560 MPa ermittelt. Unter Annahme kleiner Verzerrungen wurde eine additive Dehnungszersetzung gewählt, um die Eingabekurven für das plastische Materialverhalten zu bestimmen (Bild 13).

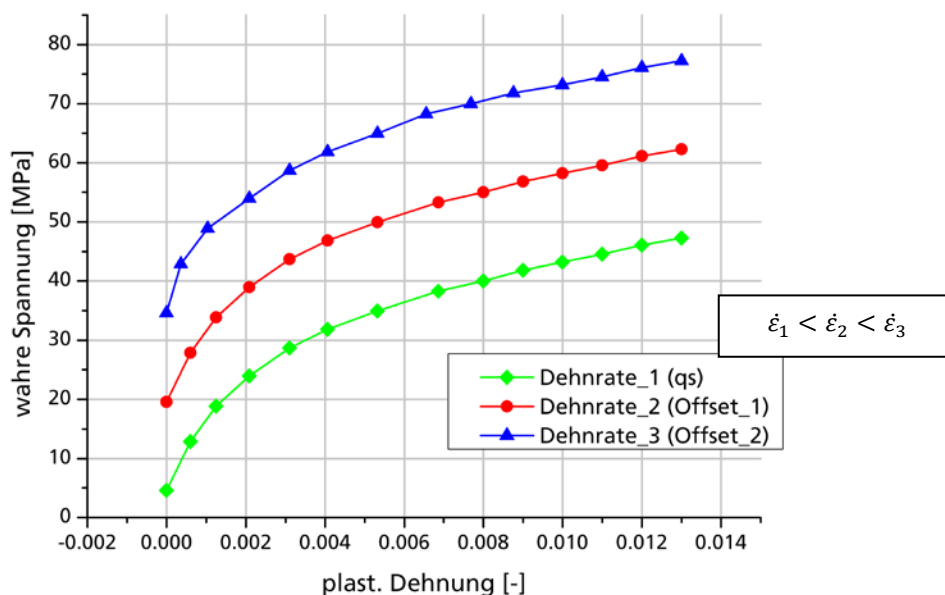


Bild 13: Spannungs-Dehnungs-Kurve eines quasistatischen Zugversuchs im plastischen Verformungsbereich und der skalierten Eingabekurven zur Berücksichtigung des Dehnrateneffekts

Nach einigen Iterationen mit Anpassungen der Werkstoffparameter konnte der Versuch gut in der Simulation reproduziert werden. Vergleichskriterium für die Bewertung sind die Kontaktkraft in der Simulation und die gemessene Impaktorkraft in Impaktrichtung. Die Referenzkurve in Bild 14 zeigt eine gute bis sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Für diese Simulationen wurde immer die Vernetzungsvariante mit Netzverfeinerung verwendet.

Zur Bewertung des Reibungseinflusses im Kontaktbereich und anderer ausgewählter Einflussfaktoren wurde eine einfache Robustheitsuntersuchung durchgeführt.

Für die Reibung werden Literaturwerte vergleichbarer Reibpaarungen als realistische Abschätzung der vorhandenen Reibung angesetzt und um $\pm 50\%$ variiert (Bild 14). Die verschiedenen Varianten weisen eine relativ geringe Abweichung für die geänderten Reibwerte auf. Damit kann bei einer Änderung der Reibpaarung die Anpassung anhand von Literaturdaten hinreichend genau erfolgen. Bei vergleichbaren Reibpaarungen können geringfügige Abweichungen vernachlässigt werden.

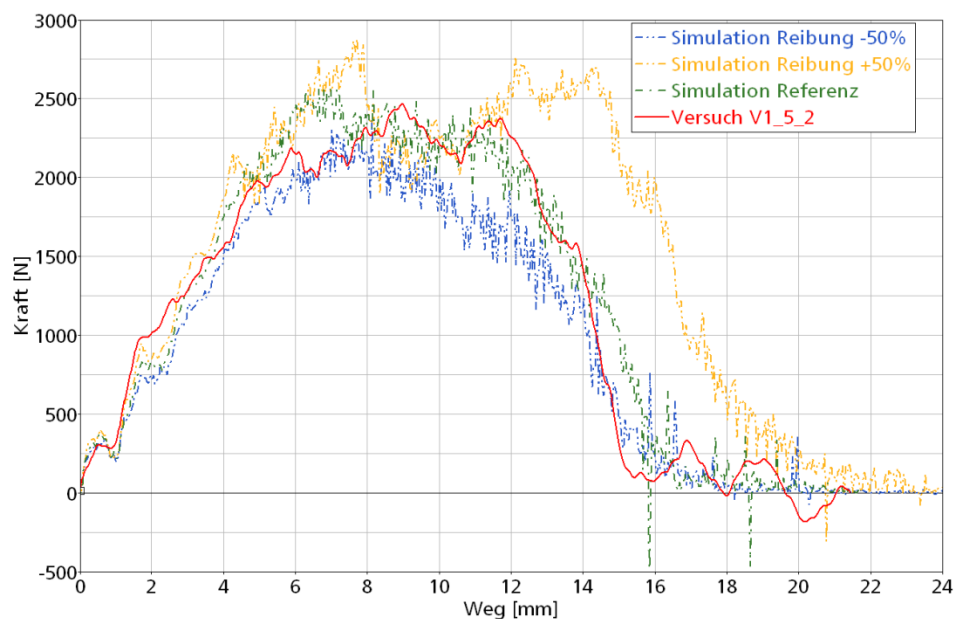


Bild 14: Darstellung der Reaktionskraft für Versuch und Simulation für den Grundwerkstoff V1 bei unterschiedlichen Reibkoeffizienten für den Kontakt in der Simulation

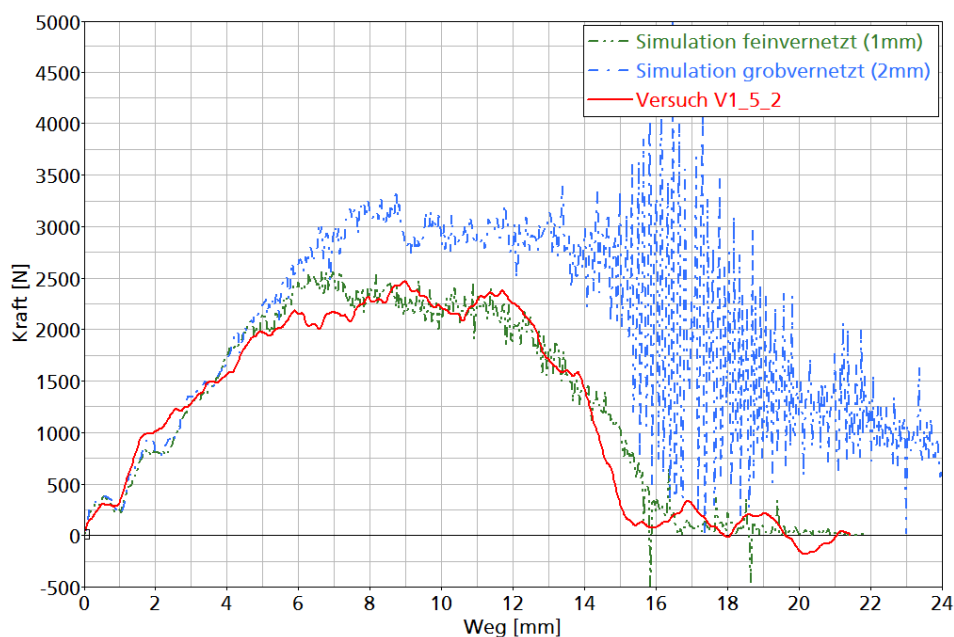


Bild 15: Darstellung der Reaktionskraft für die zwei Netzvarianten mit (1 mm) und ohne (2 mm) lokale Netzverfeinerung im Impaktbereich und Vergleich mit einem Versuchsergebnis

Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, werden zwei Vernetzungsvarianten für die Untersuchung verwendet. Beim Vergleich wird die signifikante Verbesserung der Simulationsergebnisse im Vergleich mit dem Versuch für die Variante mit Netzverfeinerung deutlich (Bild 15). Dieses Ergebnis zeigt die Notwendigkeit in den Kontaktbereichen eine angepasste Netzverfeinerung im Modell zu berücksichtigen. Eine Elementkantenlänge von 1 mm sollte bei Übertragung der Ergebnisse auf andere Simulationen erreicht werden.

Die Iteration der Parameter für das Materialmodell erfolgte mit Elementformulierung 2. Im folgenden Bild ist der Einfluss bei Verwendung anderer Elementformulierungen, wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, dargestellt. Es wird deutlich, dass eine direkte Übertragung der optimierten Materialparameter mit Elementformulierung 2 nur mit Einschränkungen möglich ist, insbesondere für den vollintegrierten Elementtyp Elementformulierung 16. In diesem Fall wäre eine erneute Anpassung für eine hinreichende Prognosefähigkeit der Simulation sinnvoll.

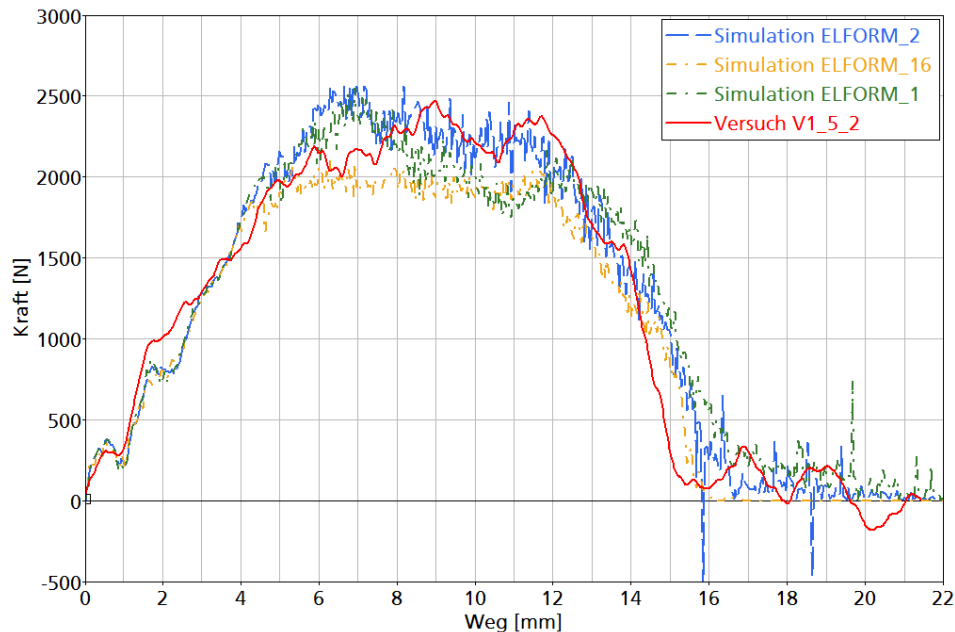


Bild 16: Darstellung der Reaktionskraft für verschiedene Elementformulierungen

Die iterativ ermittelten Materialparameter für PP-LGF werden in die Verbundsimulation übertragen. Die Reibpaarung ändert sich in der Verbundsimulation nicht, da die Kontaktpaarung Stahl auf PP-LGF identisch bleibt.

5 Simulation Verbundmaterial

Wie bereits beschrieben, wird der Werkstoffverbund V7 aus PP-LGF und Organoblech als Lagenaufbau definiert. Dabei werden die optimierten Daten für PP-LGF übernommen. Für das Organoblech werden Startwerte anhand des Herstellerdatenblatts definiert. Die Richtungen des orthotropen Materialmodells sind alle identisch angepasst.

Ein wichtiges Ergebnis der Parameteranpassung ist die relativ hohe Versagensgrenze für das Organoblech, die dabei ermittelt wurde. Die beste Übereinstimmung zum Versuch wird mit einem Versagensparameter von 8% erreicht. Dieser liegt deutlich über dem Wert, der anhand von quasistatischen Zugversuchen am Fraunhofer IWM ermittelt wurde. Der Einfluss dieses Parameters und die beste erreichte Übereinstimmung im Vergleich mit dem Experiment sind in Bild 17 dargestellt. Das erreichte Ergebnis ist für den Verbund V7 auch als gut bis sehr gut einzuschätzen.

Neben der iterativen Anpassung der Parameter für das Organoblech im Lagenaufbau müssen auch die Hourglass-Parameter angepasst werden, was auf die Definition *PART_COMPOSITE zurückgeführt wird. Nach dem Versagen erster Elemente und deren Löschung aus der Simulation zeigen eine Vielzahl von Elementen eine Hourglass-typische numerische Instabilität, die durch die Anpassung beseitigt werden kann.

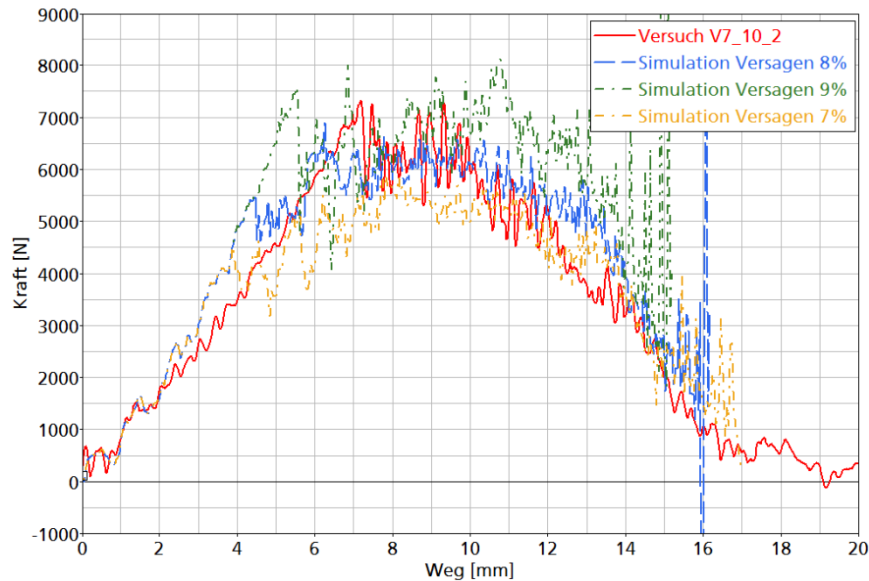


Bild 17: Darstellung der Reaktionskraft der Simulationen und des Experiments für den Durchstoßversuch an dem Werkstoffverbund V7, PP-LGF und Organoblech, für verschiedene Versagensgrenzen des Organoblechs

Nicht nur der Kraft-Weg-Verlauf zeigt die Güte der Simulation im Vergleich mit dem Experiment. Durch den Einsatz der optischen Messtechnik ist auch ein flächiger Vergleich des Deformationsverhaltens möglich. Dieser ist für die Oberflächenverschiebung in Impaktrichtung in Bild 18 vergleichend dargestellt. Auch dieser Vergleich zeigt eine gute bis sehr gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation. Eine Abweichung zeigt sich in der stärkeren Lokalisierung der Wölbung in der Simulation, während das Experiment einen gleichmäßigeren Wölbungsübergang von der Einspannung bis zu einer Wölbung von ca. 2 mm zeigt. Diese geringe Abweichung kann auf die sehr einfache Umsetzung der Einspannung im Modell zurückzuführen sein, die keine Phasen oder Ähnliches an der Einspannung berücksichtigt. Ab einer Wölbung von 2 mm ist die Übereinstimmung von Simulation und Experiment sehr gut.

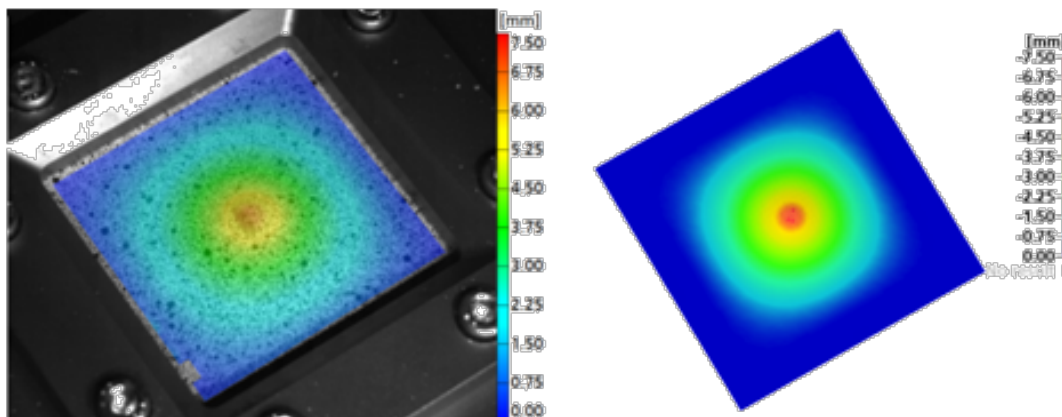


Bild 18: Vergleich des Experiments (links) und der Simulation des Durchstoßversuchs (rechts). Dargestellt ist die Verschiebung der Probenoberfläche aus der Ebene

6 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde dargestellt, dass mit einem relativ begrenzten Versuchsumfang eine gute Prognosefähigkeit der Simulation anhand eines realitätsnahen Werkstofftests möglich ist. Auf der anderen Seite zeigte sich ebenso, dass für eine Startwertabschätzung ein Mindestmaß an ergänzenden experimentellen Untersuchungen, wie z.B. Zugversuchen, notwendig ist. Eine Simulation der Durchstoßversuche nur auf Basis quasistatischer Zugversuchsdaten scheint aufgrund der Ergebnisse bezüglich des Dehnrateneffekts und der deutlich verschobenen Versagensgrenzen nicht möglich.

Um die Übertragbarkeit der so anhand realer Belastungen optimierten Materialparameter auf andere Strukturen sicherzustellen, ist es zu empfehlen, wie dargestellt, verschiedene Einflussfaktoren zu variieren, die so nach Übernahme der Parameter in anderen Anwendungen auftreten können. Damit kann eine Abschätzung der Übertragbarkeit vorgenommen und Empfehlungen für bestimmte Größen formuliert werden, wie es für die Elementgröße dargestellt ist. In [1] erfolgte eine umfassende Darstellung dieser Studie.

7 Ausblick

Wie in dem Beitrag dargestellt, wurden weitere Werkstoffe untersucht und eine weitere Versuchsvariante durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Nagelversuchs (Bild 19) zeigen zum Teil deutliche Abweichungen im Vergleich zum DIN-Impaktor-Versuch. Diese ist besonders deutlich für das grobe Gitter, Variante V2, die nur noch eine dem Grundwerkstoff vergleichbare Schutzwirkung zeigt. Der Impaktor dringt einfach durch den Grundwerkstoff zwischen den Gitterdrähten.

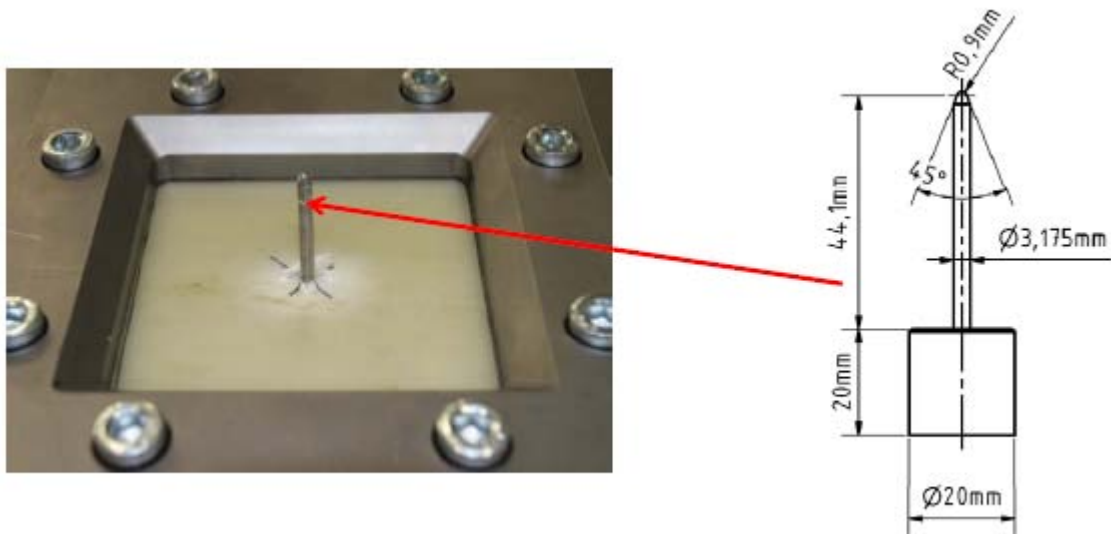


Bild 19: Aufbau und Geometrie des Nageldurchstoßversuchs

Des Weiteren ist bei der Bewertung noch nicht die elektromagnetische Schutzwirkung berücksichtigt, was zu einer Neubewertung führen kann.

Aus diesem Grund ist vorgesehen, auch Varianten der Durchstoßversuche mit Metallgitter zu simulieren. Dieses liefert Simulationsbausteine, die dann eine virtuelle Bewertung neuer Kombinationen ermöglicht, bei denen der Grundwerkstoff durch eine Gittervariante ersetzt wird, so dass maximale Abschirmung mit bester Schutzwirkung kombiniert wird.

8 Literatur

- [1] Jung, M: Modellierung und Simulation des Durchstoßversuchs an Schutzwerkstoffen für Batterieschutzgehäuse, EMI-Bericht A 12/10, 2010