

Verrippte Bauteile – Kugelimpaktversuche und Simulationsergebnisse mit LS-DYNA

Frank Huberth, Stefan Hiermaier

Fraunhofer EMI, Freiburg, Deutschland

Abstract:

Material models for thermoplastic polymers are still subject of research and development. The commonly used material models for crash simulation were developed for metals. This paper shows a way from material data to component testing and simulation for different material models. A state of the art material model "PIECEWISE LINEAR PLASTICITY, MAT24" has been chosen as reference. As improved material model for polymers, material model "SAMP-1" is used. The simulations using the different models are compared with experimental data.

Keywords:

Bauteilsimulation, SAMP-1, Materialmodelle, Thermoplaste. Werkstoffcharakterisierung, Validierung, Crash, Impakt, Dehnratenverfestigung, Volumenkonstanz, pastische Poissonzahl, Dilatation, Messtechnik

1 Einleitung und Motivation

Kunststoffe werden seit Jahren immer umfangreicher in Bereichen eingesetzt, die für die Beurteilung der Sicherheit von Fahrzeugen eine entscheidende Rolle spielen. Im Innenraum sind es Untersuchungen verschiedener Belastungsszenarien wie z.B. der Kopfaufschlag, welche die dort eingesetzten Kunststoffe und Werkstoffkombinationen erfüllen müssen. Aufgrund der Entwicklung, die Bewertung der Fahrzeugsicherheit weiter zu fassen und Interaktionen z.B. mit Fußgängern einzubeziehen, gewinnen die Kunststoffe auch im Exterieurbereich an Bedeutung für die Simulation.

Parallel dazu findet in vielen Bereichen eine Werkstoffsubstitution zu Gunsten polymerer Werkstoffe statt. Strukturbauteile, die bisher nur in metallischer Bauweise gefertigt wurden, werden zunehmend durch Kunststoffbauteile oder durch Mischbauweisen ersetzt. Dadurch werden auch diese Werkstoffe immer wichtiger für die klassischen Crashuntersuchungen. Im Spannungsfeld gegensätzlicher Anforderungen, wie z.B. Steifigkeit und Energieaufnahme einerseits und diesbezüglich einschränkende biomechanische Kennwerte, wie der HIC-Wert andererseits, erfordern gezielte Optimierung, die eine Auslegung mit Sicherheitsfaktoren nicht mehr zulässt.

Solche Auslegungen stellen Aufgaben dar, für die die Simulation ein hervorragendes Werkzeug darstellt, wenn sichergestellt ist, dass Prognosefähigkeit für Werkstoffe und Strukturen gegeben ist.

Eine parallele Entwicklung stellt der Trend dar, immer mehr Entwicklung virtuell zu realisieren und auf kostenintensive und zeitaufwendige Prototypenrealisierung in frühen Stadien zu verzichten. Das erfordert entsprechend realitätsnahe Modelle und Daten [1]. Mit dem SAMP 1 Materialmodell wurde ein neues Materialmodell für die speziellen Anforderungen, die sich aus dem mechanischen Verhalten von Polymeren ableiten, entwickelt [2].

Im Rahmen eines umfangreichen Projekts im Auftrag der FAT wurden Verfahrensweisen für die Bestimmung von Werkstoffparametern untersucht und weiterentwickelt, Vergleiche verschiedener Materialmodelle sowie Validierungsversuche und –simulationen durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden drei Werkstoffe untersucht; zwei davon waren Bayblend T65, ein PC-ABS, und Terblend N NM 19, ein PA-ABS. Auf diese beiden Werkstoffe sind die folgenden Betrachtungen beschränkt.

Unter anderem wurde untersucht, wie Materialmodelle, auch komplexe wie SAMP-1, mit den richtigen Materialparametern versehen werden können. Es werden die experimentellen Ansätze vorgestellt und Ergebnisse dazu aus Versuch und Simulation präsentiert. Eine Bewertung der einfachen und der komplexen Materialmodelle wird gegeben. Entwicklungen verschiedener Prüfungskonzepte werden gezielt für die Ermittlung von Parametern von Crashsimulationen vorgestellt.

Abschließend werden an Bauteilversuchen und Simulationen die Vorteile der komplexen Untersuchungen dargestellt. Dabei werden auch andere Einflussfaktoren dargestellt, z.B. die Modellierung mit Schalenelementen, notwendige Vereinfachungen der Geometrie und andere. Aber auch die noch nicht gelösten Probleme, also die Themen von Morgen werden diskutiert.

Das Projekt wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) gefördert.

2 Werkstoffcharakterisierung

Die Werkstoffcharakterisierung wurde zum Teil schon in [3] dargestellt. Ein ausführlicher Bericht erfolgte in [4]. Hier werden die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst. .

Die Werkstoffe wurden unter verschiedenen Belastungsarten und –geschwindigkeiten geprüft, um das mechanische Materialverhalten bezüglich Zug-, Schub- und Druckbelastung für verschiedene Einflüsse, Temperatur und Dehnraten, zu bestimmen.

2.1 Zugversuche

Die Zugversuche wurden für die in [4] erläuterten Belastungsgeschwindigkeiten, Prüftemperaturen und Probenentnahmerichtungen und –positionen durchgeführt.

Bei der Auswertung wurde für die untersuchten Werkstoffe Volumenkonstanz unter Zugbelastung angenommen. Dies setzt implizit eine Poissonzahl von $\nu=0.5$ für die plastischen Deformationen voraus.

Verwendeter Zusammenhang zwischen technischen und wahren Spannungen bzw. Dehnungen.

Technische Dehnung in Zugrichtung:

$$\varepsilon_{\text{technisch}} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

Technische Spannung in Zugrichtung:

$$\sigma_{\text{technisch}} = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

Wahre Dehnung in Zugrichtung:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\text{wahr}} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \quad (5)$$

Wahre Spannung in Zugrichtung:
(1: Längsrichtung 2: Querrichtung
3: Dickenrichtung)

$$-\nu \cdot \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \quad (4)$$

$$\nu = 0.5 \quad (\text{Volumenkonstanz})$$

$$A(t) = b(t) \cdot d(t) \quad (6a)$$

$$A(t) = (e^{-0.5 \times \varepsilon_1})^2 \cdot b_0 \cdot d_0 \quad (6b)$$

$$\sigma_{\text{wahr}} = \frac{F}{A(t)} \quad (7)$$

Um die Verzerrungen während der Versuche korrekt zu bestimmen, wird eine lokale Messtechnik verwendet[1]. Die Längsdehnungen und Querkontraktionen konnten so innerhalb eines Messbereichs von 2mmx2mm ausgewertet werden.

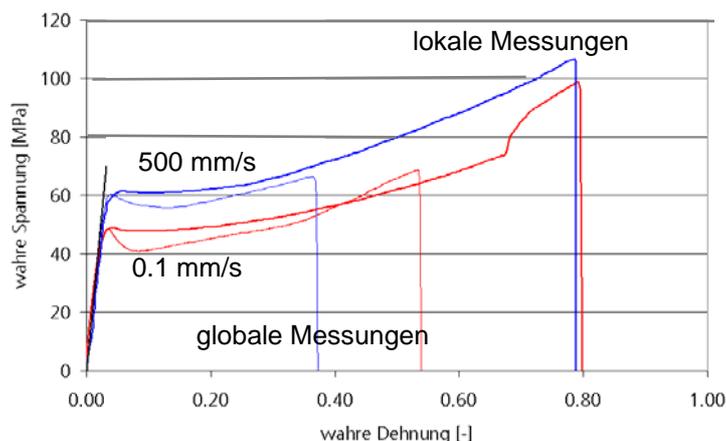


Bild 1: Spannungs- Dehnungsdiagramm Bayblend T65 für verschiedene Belastungsgeschwindigkeiten

In Bild 1 sind verschiedenen Spannungs-Dehnungskurven für 2 Belastungsgeschwindigkeiten dargestellt. Die Kurven zeigen deutlich den Dehnrateneinfluss auf die Fließspannung. Dabei ergeben

sich die höheren Spannungen (7) aus der Querschnittsberechnung in Abhängigkeit von der 1. Hauptdehnung (6b).

Der Dehnrateneinfluss drückt sich in erster Linie in einer Erhöhung der Fließgrenze aus. Aussagen zum Dehnrateneinfluss auf das Versagen erfordern eine hohe Versuchsanzahl, um eine statistische Auswertung durchführen zu können. Tendenziell führen höhere Dehnraten zu geringeren Bruchdehnungen. Das Beispiel aus Bild 1 zeigt aber, wie groß die Streuung und wie ausgeprägt damit die Problematik einer prognosefähigen makroskopisch-kontinuumsmechanischen Modellierung des Versagens ist.

2.2 Schubversuche

Um das Werkstoffverhalten unter Schubbelastung zu untersuchen, wurde eine modifizierte Form des Arcan-Versuchs verwendet [1]. Da bei diesem Versuch eine inhomogene Schubverteilung über die Breite vorliegt, wurde hier ebenfalls eine lokale Messtechnik verwendet, um die Schubverzerrungen in einem Feld von 2mmx2mm wie für die Zugversuche auszuwerten. So wurden die Schubverzerrungen und die Hauptdehnungen bestimmt. So lange die Hauptdehnungen betragsmäßig übereinstimmen konnte ein reiner Schubzustand vorausgesetzt werden. Mit zunehmender Probendeformation wird der Schubzustand durch Zugkomponenten überlagert. Die so initiierte Zugbelastung führt schließlich zum Probenversagen. Ein Versagen unter reiner Schubbelastung und eine damit verbundene Schubversagens-Charakterisierung kann mit diesem Versuch dementsprechend nicht erfolgen. Rechnet man den gemessenen Schubmodul G über die Querkontraktionszahl ν zurück auf den Elastizitätsmodul E , so ergibt sich für die die Werkstoffe ein geringerer Wert als der im einachsigen Zugversuch experimentell ermittelte Elastizitätsmodul.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

2.3 Druckversuche

Das elastische Werkstoffverhalten und der Fließbeginn wurden an streifenförmigen Proben bestimmt. Diese konnten wie die Schub- und Druckversuche an dünnem Plattenmaterial durchgeführt werden. Für höhere Belastungen konnte kein uniaxialer Druckzustand in der Probe gewährleistet werden. Der weitere Kurvenverlauf inklusive Versagen musste deshalb extrapoliert werden. Der Elastizitätsmodul und die Fließgrenze lagen dabei höher als für Zugbelastung.

3 Volumenänderung unter Belastung

Zusätzliche Versuche unter Zug- und Druckbelastung erlaubten es, die Volumenänderung während der Belastung zu bestimmen [3 und 4]. Bei Druckbelastung findet eine geringe Kompression statt, bei Zug nimmt das Volumen zu. Diese Dilatation wird in den meisten Materialmodellen durch die (elastische) Poissonzahl $|\nu| < 0.5$ für die elastischen Verzerrungen berücksichtigt. Die Versuche zeigten aber auch für die plastischen Verzerrungen eine deutliche Dilatation bei Zugbelastung. Unter Druckbelastung konnte diese aufgrund der Beschränkungen hinsichtlich Probengröße und Meßbereich nicht untersucht werden. Für Terblend N NM 19 (PA_ABS) wurde in Breiten- und in Dickenrichtung ein nahezu gleicher und fast konstanter Betrag der plastischen Querkontraktionszahl als Quotient der plastischen Verzerrungen bestimmt. Bild 2 zeigt die Volumenentwicklung, die für 2 Versuche bestimmt wurde. Die experimentell gemessene Volumenänderung wurde aus den elastischen und plastischen Längsdehnungen mittels der elastischen und der plastischen konstanten Poissonzahlen berechnet.

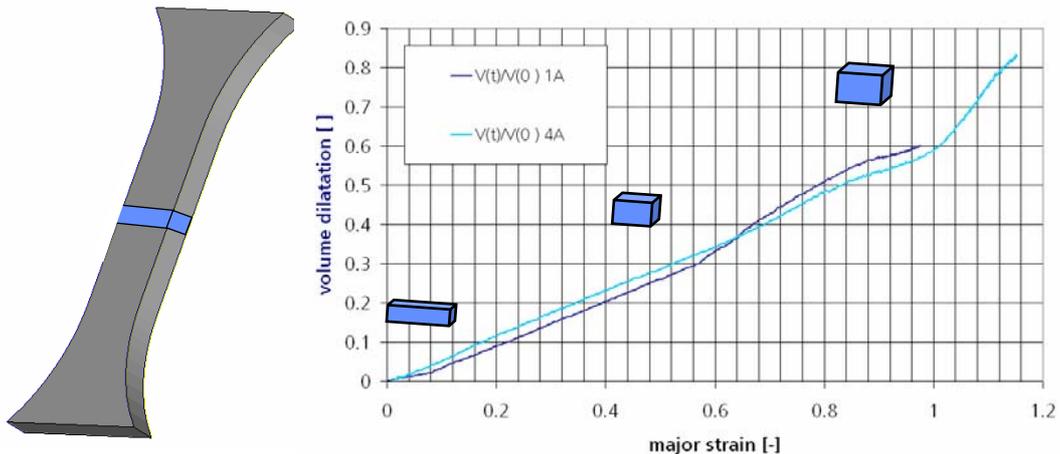


Bild 2: Volumenänderung unter Zugbelastung für Terblend N NM 19, gemessen.

Für Bayblend T 65 konnte kein transversal isotropes Verhalten ermittelt werden. Hier zeigten sich für die Breiten- und die Dickenrichtung unterschiedliche Verläufe der plastischen Poissonzahl. Für eine Abbildung mit Schalenelementen muss dieses Materialverhalten auf zwei Dimensionen reduziert werden. Ein Vorgehen dafür soll ansatzweise dargestellt werden.

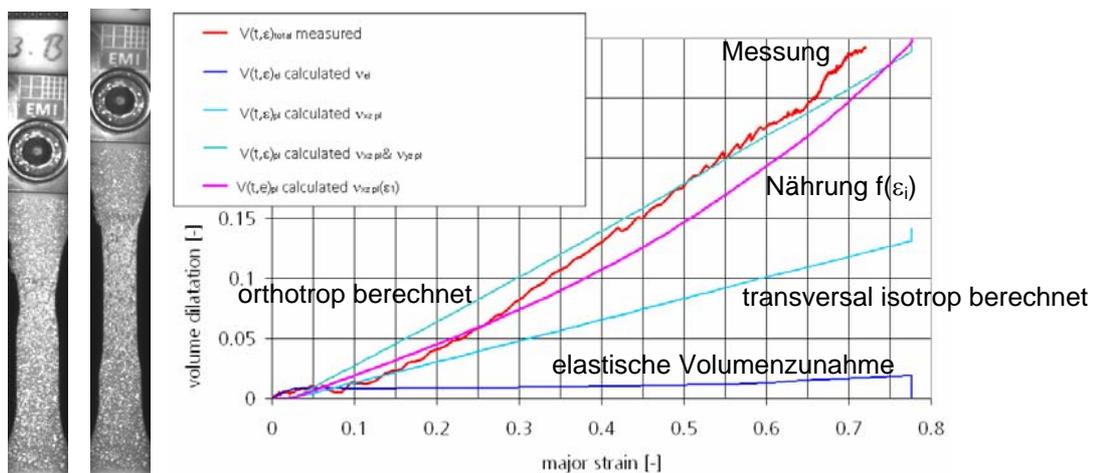


Bild 3: Volumenänderung unter Zugbelastung für Bayblend T65, gemessen und berechnet.

Die Volumendilatation kann in einfachen Modellen nicht berücksichtigt werden. Unter der Annahme transversal isotropen Verhaltens ist für das Materialmodell SAMP-1 eine plastische Poissonzahl definiert, die es ermöglicht auch plastische Volumenzunahme unter Zugbelastung in der Simulation zu berücksichtigen. Die Definition kann als Konstante oder Kurve erfolgen [2].

4 Beispiele für die Bauteilsimulation mit dem einfachen Materialmodell „MAT 24, Picewise Linear Plasticity“

Auf Basis der Zugversuchsergebnisse wurden Parameter für die beiden Werkstoffe bestimmt, die in Modell MAT 24 eingesetzt wurden. Mit diesen Materialmodellen wurden verschiedene Versuche simuliert und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

4.1 Kugelimpakt auf eine Längsrippenplatte

Für die Längsrippenplatte konnte in den Versuchen kein Versagen beobachtet werden. Damit konnte Versagen für diese Simulation unberücksichtigt bleiben.

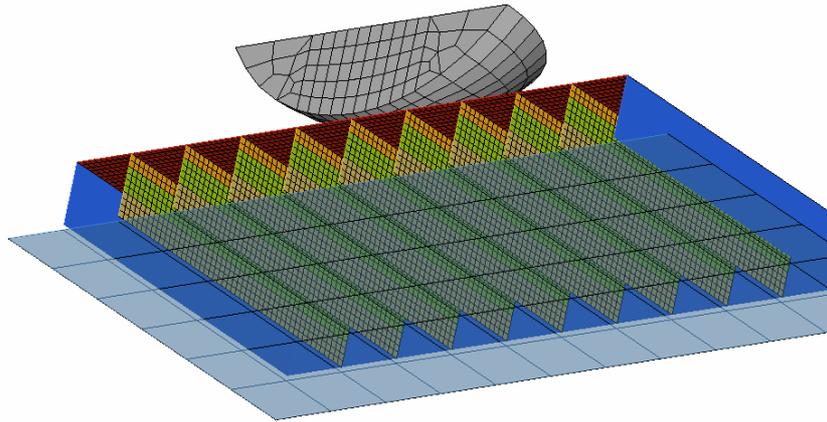


Bild 4: Simulationsmodell für die Impactversuche an Längsrippenplatte, Schnittdarstellung.

Diese Werte lieferten für den Impactversuch auf die Längsrippenplatte eine gute Übereinstimmung mit dem Versuch. Bild 5 zeigt den Kraft-Zeit-Verlauf als Vergleich der gemessenen Impactorkraft und der Kontaktkräfte der Simulation.

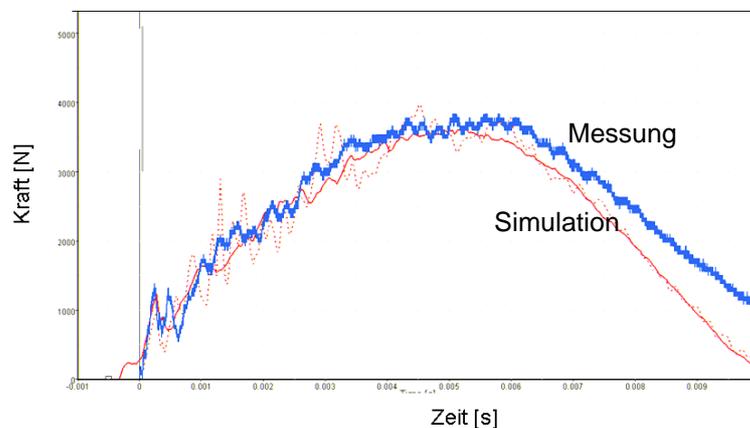


Bild 5: Simulation und Versuch im Vergleich, Kraftverlauf, für die Simulation sind die Kräfte zwischen Impaktor und Probe (1) und Auflage (2) dargestellt.

Auch das Deformationsverhalten lässt sich anhand der während des Versuchs aufgezeichneten Rippendeformation gut vergleichen. Bild 6 zeigt den Versuch im Vergleich mit der Simulation für den zeitlich am nächsten gelegenen Zeitschritt. Die Darstellungen sind dabei gleich skaliert.

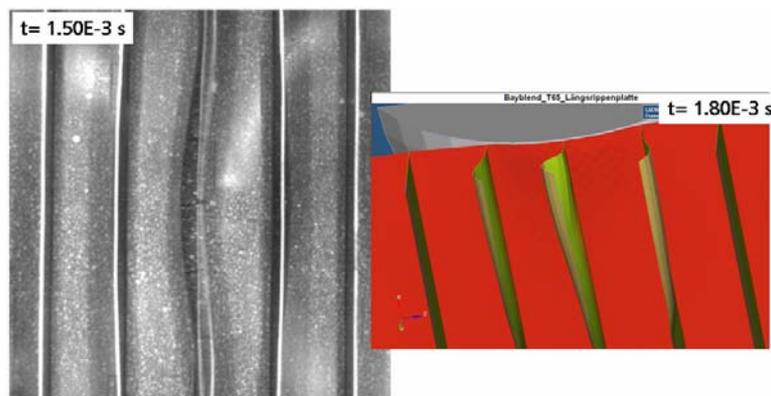


Bild 6: Simulation und Versuch im Vergleich, Deformation der Längsrippen während des Kugelimpakts.

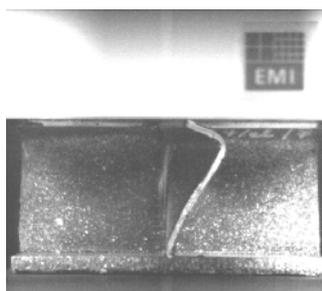
Für Belastungen ohne Versagen und bei geringen Deformationen können, wie für die Längsrippenplatte gezeigt, mit einfachen Modellen schon gute Vorhersagen getroffen werden.

5 Impact auf eine Kreuzrippenstruktur

In einer nächsten Stufe der Untersuchungen wurde das Verhalten von Kreuzrippenstrukturen untersucht. Dafür wurden Versuche für verschiedene Belastungsstufen und mit unterschiedlicher Bauteilkomplexität durchgeführt. Parallel dazu wurden die Versuche simuliert. Dabei wurde auf die gleiche Materialkarte wie für die Simulation des Impakts auf die Längsrippenplatte zurückgegriffen.

5.1 Kreuzrippen

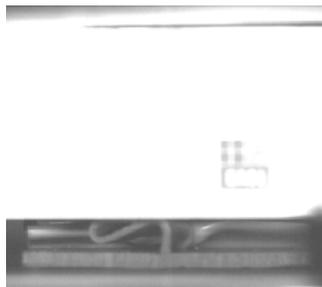
Um die Details der Deformation genauer betrachten zu können, wurden aus großen Platten Segmente entnommen, die nur aus einer Kreuzrippe bestanden. Diese wurden dann mit einer flachen Platte dynamisch belastet. Die Belastung wurde dabei in drei Stufen variiert (Bild 7). Die erste Stufe zeigt nur geringe plastische Deformationen und starkes elastisches Rückfedern. Die zweite Stufe wurde so gewählt, dass der Impaktor die Struktur bis zur halben Höhe staucht. Dabei trat stellenweise schon erstes Versagen in der Struktur auf. Die maximale Belastung wurde dann mit einer anfänglichen Impaktorgeschwindigkeit von ca. 5 m/s bis zu einer maximalen fast vollständigen Stauchung der Struktur durchgeführt. Dabei wurden die Rippen stark plastisch verformt und die Struktur versagte vollständig. Die Kraft- Weg-Kurven für die drei Versuchsvarianten zeigen eine gute Übereinstimmung bis zur jeweils maximalen Belastung. Nur der Aufschlag weist eine zunehmende Spitze der Kraft für höhere Belastungen auf.



maximale Stauchung Belastung 1 (el)



maximale Stauchung Belastung 2 (0.5)



maximale Stauchung Belastung 3 (max)

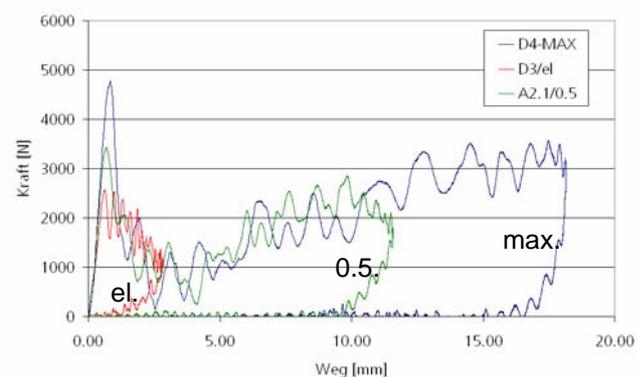


Bild 7: Maximale Stauchung für drei Belastungsvarianten an Kreuzproben und die Impaktorkraft aller drei Versuchsvarianten.

Die Simulationen der einzelnen Stufen zeigte unterschiedliche Qualitäten der Ergebnisse. Die Belastung ohne Versagen und mit geringen plastischen Verformungen konnte gut wiedergegeben werden (Bild 8, links). Mit zunehmender Belastung wurden die Abweichungen zwischen Simulation und Versuch größer. Für die maximale Belastung kam es ab einem bestimmten Punkt zu einem extremen Kraftanstieg in der Simulation. Dieser wurde verursacht durch ein Kollabieren der simulierten Struktur und dem daraus folgenden harten Aufschlag des Impaktors. Dieses konnte auch für Versuche mit höheren Impaktenergien beobachtet werden. Eine Simulation der

Kreuzrippenstruktur mit Volumenelementen erzielte eine deutlich bessere Übereinstimmung von Versuch und Simulation. Hier zeigte sich die Problematik der Modellierung mit Schalenelementen. Ein komplexer Spannungs- bzw. Deformationszustand im Stoßbereich kann nur bedingt durch Schalenelemente abgebildet werden. Der Einfluss des Materialmodells wird hier deutlich durch einen Vernetzungseinfluss überlagert.

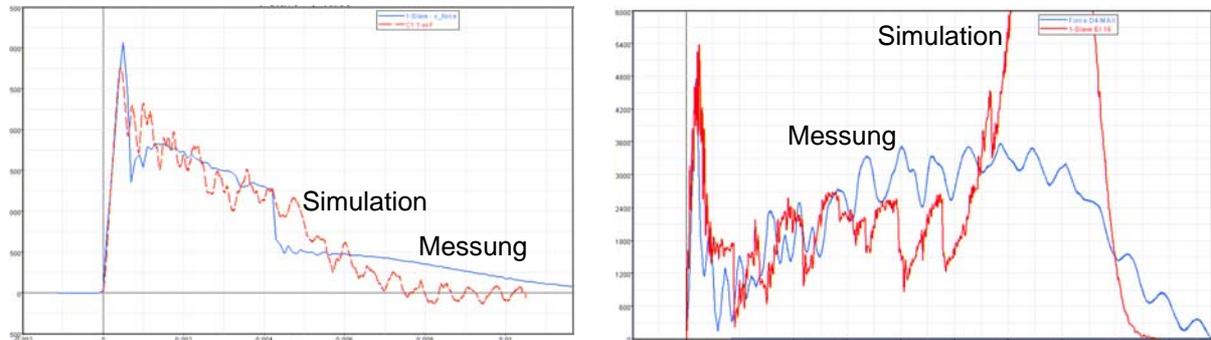


Bild 8: Vergleich des Kraftverlaufs im Experiment und in der Simulation für die geringste Belastung (links) und maximale Belastung (rechts).

5.2 Kreuzrippenplatte

Für größere Kreuzrippenstrukturen reduziert sich dieser Einfluss wieder. Das Totalversagen einer Rippe fällt dabei nicht so stark ins Gewicht. Vergleicht man die Simulationsergebnisse eines Kugelimpakts auf eine größere Kreuzrippenplatte mit den entsprechenden experimentellen Ergebnissen zeigt sich eine vergleichsweise gute Übereinstimmung der Ergebnisse (Bild 9).

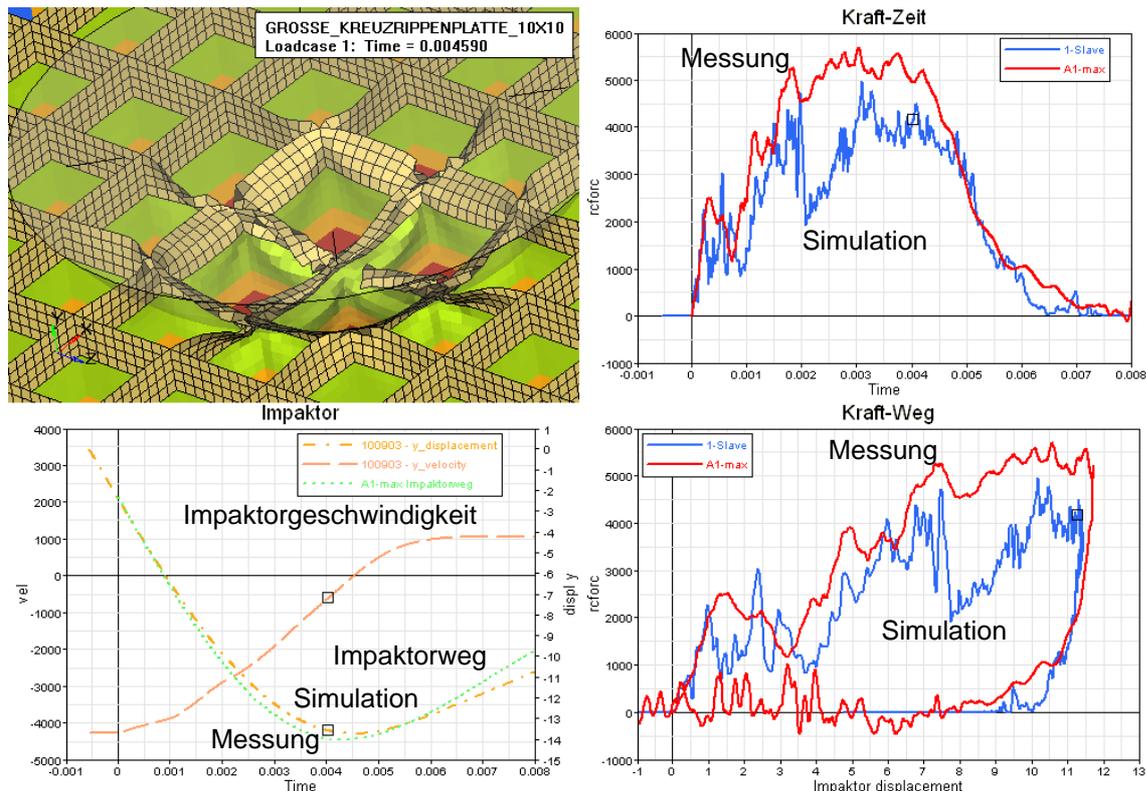


Bild 9: Übersicht Simulationsergebnisse Kreuzrippenplatte mit Kugelimpakt, Deformation und Versagen (oben links), Kraft-Zeit (oben rechts), Weg-Zeit (unten links) und Kraft-Weg (unten rechts) im Vergleich mit Versuchswerten Versuch A1 max.

6 Bauteilsimulationen mit SAMP-1 Materialmodell

Um die Simulation von Bauteilen zu verbessern, wurden die vorgestellten Lastfälle mit einem neuen Materialmodell anstelle von MAT 24 simuliert. Dafür wurden aus den vorgestellten Werkstoffuntersuchungen Parameter für das neue Materialmodell SAMP-1 abgeleitet. Es wurden dehnratenabhängige Zugdaten, Schub- und Druckkurve und auch die Definition einer plastischen Poissonzahl getestet.

Zum Zeitpunkt der Erstellung des Beitrags gab es noch Probleme mit der Stabilität in der Simulation. Für Volumenkonstanz konnten die Ergebnisse, die mit MAT 24 ermittelt wurden, teilweise reproduziert werden. Wird eine plastische Volumenänderung definiert zeigten sich Probleme (Bild 10). Für komplexere Geometrien konnte auch die Variante mit konstantem Volumen noch nicht ausreichend stabil angewandt werden (Bild 11).

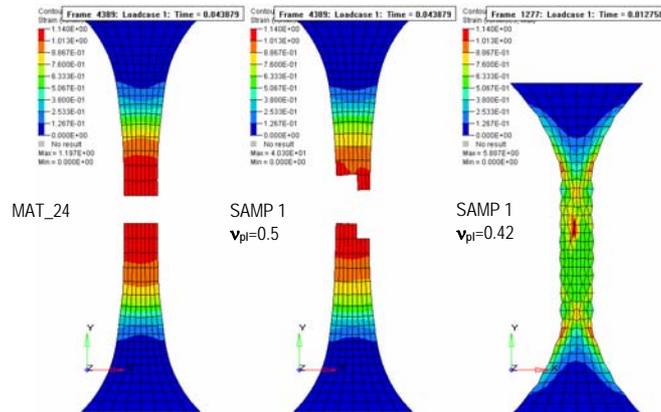


Bild 10: Zugversuche simuliert mit LS_DYNA, MAT 24 (links) SAMP-1 keine plastische Volumenänderung (Mitte), mit plastischer Volumenänderung (Rechts)

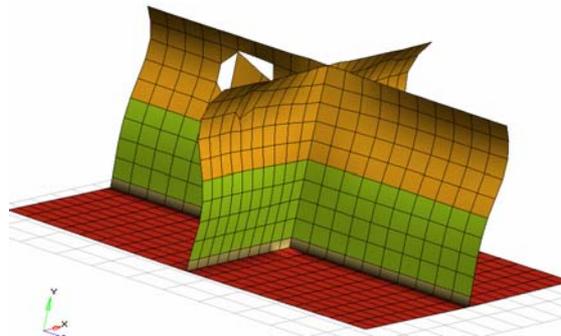


Bild 11: Problem für Strukturen bei der Simulation mit SAMP-1

7 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass einfache Materialmodelle nur in engen Grenzen hinreichende Prognosequalität der Simulation liefern können. Experimentell konnte die auftretende Volumendilatation quantifiziert werden. Die Simulationsrechnungen von Impactversuchen mit vergleichsweise großen Versagenszonen unterstreicht die Bedeutung verbesserter Versagensmodelle. Darüber hinaus erwies sich aber auch, daß eine noch so detaillierte Formulierung des elastisch-plastischen und des Versagensverhaltens in den konstitutiven Gesetzen sehr beschränkte Ergebnisverbesserung bringen kann, wenn auf Seiten der Diskretisierung stark vereinfachende Annahmen getroffen werden. Die aus Gründen der Rechenzeit und der damit verbundenen Effizienz gewählten Diskretisierungen mit Schalenelementen sind dem Problem der kreuzförmig verrippten Bauteile nicht angepaßt und verhindern eine bessere Qualität der Ergebnisse wie sie mit dreidimensionalen Elementformulierungen erzielbar sind.

8 Literatur

- [1] Junginger, M.: "Charakterisierung und Modellierung unverstärkter thermoplastischer Kunststoffe zur numerischen Simulation von Crashvorgängen", Schriftenreihe Forschungsergebnisse aus der Kurzeitdynamik, Heft Nr. 3, Freiburg/Brsg. 2004, ISBN 3-8167-6339-1 Fraunhofer IRB Verlag]
- [2] Kolling, S., Haufe, A., Feucht M., DuBois, P.: "SAMP: A Semi-Analytical Model for Polymers", crashMAT 2006, 4. Freiburger Workshop zum Werkstoff- und Strukturverhalten bei Crashvorgängen, Freiburg 2006
- [3] Huberth, F., Neuman, M., Hiermaier, S.: "Material Models for Polymers under Crash Loads; Existing LS-DYNA Models and Perspective", 4. LS-DYNA Anwenderforum Bamberg, 2004, H-I-01
- [4] Huberth, F.: "Verhalten von thermoplastischen Werkstoffen unter dynamischer Belastung", CCG-Seminar WB 6.02, Freiburg, 2006
- [5] Huberth, F., Gerster, T., Zobel, M.: "Prüfvorschrift: Kunststoffcharakterisierung für Craschanwendungen, Teil 1", EMI-KP-001-1, 2006