

Einfluss der Materialbeschreibung bei kurzzeitdynamischen Simulationsvorgängen

Dr. Stefan Dominico, Dr. Armin Huß

Ingenieurbüro Huß & Feickert, Liederbach, Deutschland

Reinhard Müller

Adam Opel AG, Rüsselsheim, Deutschland

Summary

Working with LS-DYNA during the development of a new car, many different simulation tasks have to be performed. The overall aim is to improve the capability of a car to withstand certain impact levels, i.e. the displacements or the accelerations at specified points shall stay below certain limits. The protection of occupants and pedestrians is of main importance. During the structural optimisation process, many model parameters have to be varied to achieve the defined goals.

Today it is possible to model the CAD of a structure with a fine and detailed FE-mesh, taking into account the geometrical dimensions as well as the boundary conditions. But it is often difficult to get proper material data. In this paper the influence of the quality of material data on the results of LS-DYNA simulations will be discussed. Two small examples will be used to demonstrate the influence of material data compared to the variation of other model parameters. A simplified crash-box model is simulated for which a 'quasi-danner' loadcase is modelled. In a second example, the head impact on a hood structure is investigated ('pedestrian protection'). This shall support the simulation engineer to get a feeling of how large the influence of lack of material data knowledge is, compared to other model inconsistencies.

Keywords

Kurzzeitdynamik, Crashsimulation, Materialidentifikation, Dehnratenabhängigkeit, Crash-Box, Kopfaufschlag

0. Vorbemerkungen

Im Rahmen der täglichen Arbeit mit LS-DYNA [1] sind vielfältige Simulationsaufgaben zu bewältigen. Ein wesentlicher Teil dieser Aufgaben besteht im Automobilbau bei der Entwicklung eines neuen Fahrzeuges in der Optimierung von Bauteilen für unterschiedliche Lastfälle. Die Bauteile sind so zu verbessern, dass gewisse Zielgrößen eingehalten oder erreicht werden. Bei den zu untersuchenden Bauteilen kann es sich z.B. um die Crash-Box eines Bumpersystems handeln, welche bei einem gewissen Eindringweg eine zu definierende Energie absorbiert haben soll (z.B. Lastfall: Danner). Bei der Anpassung der Crash-Box wird dafür zumeist die Form und dabei im Wesentlichen das Sickenbild so verändert, dass die Zielwerte erreicht werden. Eine weitere Problemstellung ergibt sich z.B. im Bereich Fußgängerschutz („Pedestrian Protection“). Im Rahmen der NCAP-Bewertung wird dabei der Kopfaufschlag auf verschiedene Bereiche der Motorhaube untersucht. Der HIC-Wert, also die Bewertung des Head-Injury-Criteria, gibt Aufschluss über die Verletzungsgefährdung beim Aufschlag des Fußgängerkopfes. Neben der Bewertung der Lastfälle Lower-Leg bzw. Upper-Leg ergibt sich daraus die Sternevergabe bei der NCAP-Bewertung eines neuen Fahrzeuges. Neben den beiden eben dargestellten Lastfällen gibt es natürlich eine Vielzahl weiterer Lastfälle, welche bei der Entwicklung eines neuen Fahrzeuges untersucht und für welche die Fahrzeugstruktur optimiert werden muss, bevor diese Lastfälle anschließend am realen Fahrzeug getestet werden können und - idealerweise - die in der Simulation ermittelten Ergebnisse bestätigen.

Neben der Untersuchung von neu entwickelten Fahrzeugen hinsichtlich Crashverhalten, Fußgängerschutz oder Insassenschutz gibt es noch viele weitere Einsatzbereiche, in welchen kurzzeitdynamische Vorgänge eine entscheidende Rolle spielen. Beispielhaft sei hier der Bereich der Containmentuntersuchungen genannt. Dort wird simuliert, dass beim Versagen von schnell rotierenden Bauteilen (z.B. Turbinen) die Bruchstücke der rotierenden Bauteile innerhalb der Struktur aufgefangen werden und nicht in die Umgebung gelangen, wo sie ein hohes Schadensrisiko für Mensch und Umgebung darstellen würden. Diese Untersuchungen sind insbesondere bei Schiffsmotoren oder Flugzeugtriebwerken von Bedeutung.

Mit den heutzutage vorhandenen Simulationswerkzeugen ist es möglich, hochdynamische und hochgradig nichtlineare Vorgänge, wie sie oben exemplarisch dargestellt wurden, im Modell abzubilden und zuverlässige Vorhersagen über die in der Realität zu erwartenden Verformungen und Belastungen der untersuchten Strukturen bzw. der beteiligten Dummies zu machen. Dies setzt allerdings voraus, dass die Eingangsgrößen der Simulation möglichst genau definiert sind. Bei der Abbildung von CAD-Daten im FE-Modell kann auf Grund der heutigen Rechnerkapazitäten mittlerweile eine ausreichend feine Vernetzung erreicht werden. Bauteildicken lassen sich über Volumenvernetzung oder über Schalenvernetzung mit variierender Dicke ausreichend genau beschreiben. Lagerungsbedingungen und Lasteinleitungen lassen sich ebenfalls zutreffend abbilden. Problematisch dagegen gestaltet sich häufig die genaue Beschreibung der Materialeigenschaften der untersuchten Bauteile im Modell. Oft liegen für die in der Simulation zu verwendenden Materialien nur Standardkennwerte vor. Diese stammen zudem nicht selten aus statischen oder quasi-statischen Materialprüfungen. Eine Angabe über das plastische Verhalten ist z.B. bei Kunststoffen nur schwer zu erhalten. Aber auch bei Stahlwerkstoffen stehen dem Berechnungsingenieur häufig keine geeigneten Materialdaten zur Verfügung. Stähle zeigen bei unterschiedlichen Dehnraten ein unterschiedliches Verfestigungsverhalten. Auf Grund der Kurzzeitdynamik der zu untersuchenden Vorgänge kann dies von wichtiger Bedeutung für die Simulationsergebnisse sein und sollte deshalb – wenn möglich – berücksichtigt werden.

In diesem Vortrag soll anhand von einfachen Beispielen (z.B. Barrierenaufprall auf Bumper-Crashbox und Kopfaufschlag auf Motorhaube) der Einfluss der verwendeten Materialdaten und der daraus abgeleiteten Materialbeschreibungen auf die Simulationsergebnisse aufgezeigt werden. In Relation gesetzt zu anderen möglichen Modellvariationen soll dies dem Berechnungsingenieur ein Gefühl für den Einfluss der Materialbeschreibung auf die Simulationsergebnisse bei kurzzeitdynamischen Vorgängen vermitteln und ihn so in der Bewertung zukünftiger Simulationsergebnisse unterstützen.

1. Materialidentifikation mit DYNAMID

In Zusammenarbeit mit Opel wurde bei IHF ein MATLAB[®]-Tool entwickelt, welches den Anwender bei der dehnratenabhängigen Materialidentifikation auf Basis gemessener Spannungs-Dehnungskurven unterstützt. Im Idealfall liegen dafür gemessene Spannungs-Dehnungs-Verläufe einer Stahlprobe für

unterschiedliche Dehnraten vor, so dass daraus direkt Materialeigenschaften für die Simulation abgeleitet werden können. Auch diese können, je nach Stahlprobenqualität und ausgehend von zu treffenden Annahmen bei der Materialidentifikation, für ein und die selbe Stahlsorte variieren.

In Bild 1 ist exemplarisch eine Materialprüfung für einen CR300-Stahl dargestellt. Es wurden je drei Proben unter quasi-statischer Belastung sowie unter den Dehnraten von etwa 1 1/s, 20 1/s, 200 1/s und 500 1/s getestet. In den übereinanderliegenden Kurven aus Bild 1 ist ersichtlich, dass die Messkurven natürlich deutlich zwischen den einzelnen Dehnraten variieren, dass aber auch innerhalb einer Dehnrate Unterschiede in den Messkurven erkennbar sind.

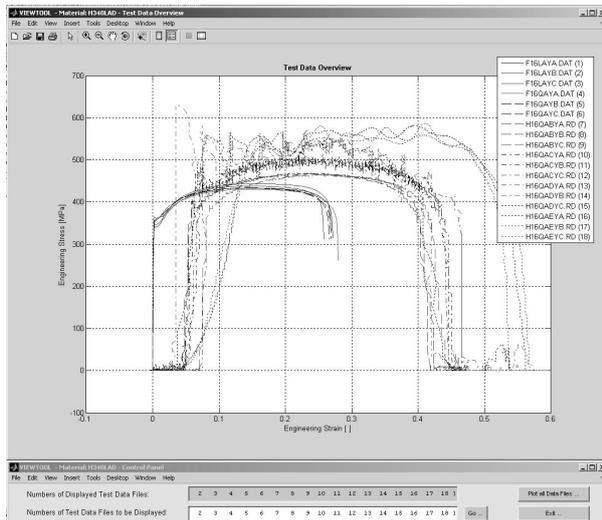


Bild 1: Testdaten eines CR300- Stahls
(3 Datensätze je Dehnrate)

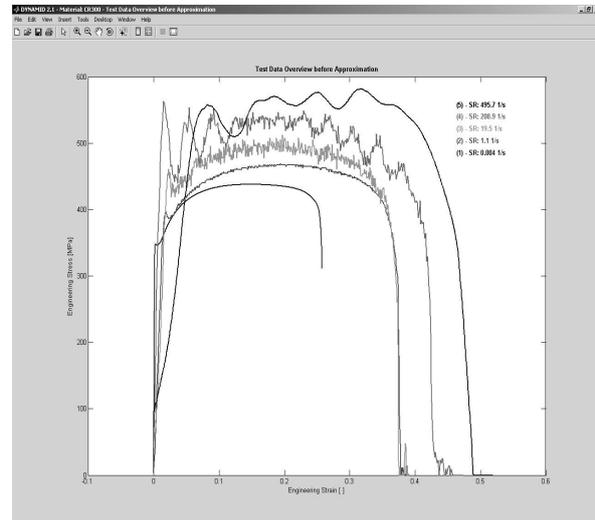


Bild 2: ausgewählte Testdaten eines
CR300- Stahls (1 Datensatz je Dehnrate)

In Bild 2 ist die Messkurvenschar auf jeweils eine Kurve je gemessener Dehnrate reduziert dargestellt. Diese Kurven dienen in DYNAMID als Eingangsgrößen für die Materialidentifikation. Für jeden Datensatz wird dabei eine Offset-Bereinigung der Daten vorgenommen. Für den quasi-statischen Datensatz wird der E-Modul bestimmt. Für jeden Datensatz wird die Fließgrenze ermittelt und der Datensatz von Ingenierdehnung und Ingenieurspannung in wahre Dehnung und wahre Spannung umgerechnet. Anschließend erfolgt eine Approximation der Messdaten innerhalb eines Dehnungsbereiches, welcher am linken Rand durch den Beginn des plastischen Bereiches und am rechten Rand durch die der Zugfestigkeit zugehörige Dehnung vorgegeben wird. Die Approximation kann auf mehrere Arten vorgenommen werden. Dafür eignen sich neben Polynom- und Exponentialfunktionen auch Spline-Funktionen. Der Verlauf der Messkurven über den approximierten Bereich hinaus wird durch die Ausgleichskurven vorgegeben (extrapoliert). Ab einer zu definierenden Grenzdehnung erfolgt die weitere Extrapolation linear.

In Bild 3 ist für den CR300-Stahl bei einer Dehnrate von 19,5 1/s die Vorgehensweise dargestellt. Im oberen Fenster erkennt man den Messdatensatz (Ingenieurspannung über Ingenieurdehnung) sowie den offsetbereinigten Datensatz. Der daraus ermittelte E-Modul ist graphisch dargestellt. Durch ein Dreieck wird die Fließgrenze gekennzeichnet. Im unteren Fenster wurde der Datensatz in wahre Spannung über wahrer Dehnung umgerechnet. Die Grenzen des Approximationsbereiches sind dargestellt. Für verschiedene Approximationsansätze werden die sich aus den vorliegenden Messdaten ermittelten Verläufe dargestellt. Der Anwender kann sich nun für die Materialkartengenerierung für einen der Approximationsansätze entscheiden oder eine Kombination aus verschiedenen Ansätzen wählen.

Zur Zeit unterstützt DYNAMID ausschließlich die Materialkarte 24 (*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY). Für die vorliegenden Messdatensätze, welche für ein Material unter verschiedenen Dehnraten im Test gemessen wurden, wird diese von DYNAMID automatisch generiert und im KEYWORD-Format herausgeschrieben (siehe Bild 4).

Dehnrates – während der Simulation immer die gleiche Spannungs-Dehnungskurve verwendet. In Bild 7 sind die eigentlichen Messdaten (Kurve 1) sowie der mit DYNAMID approximierte Spannungs-Dehnungsverlauf (Kurve 2) dargestellt. Dieser wurde für die Materialbeschreibung des Ein-Element-Modells verwendet. Bei der gegebenen Belastung ergibt sich mit Hilfe von LS-DYNA für das Ein-Element-Modell ein im Element ermittelter Spannungs-Dehnungsverlauf entsprechend Kurve 3. Dieser Verlauf deckt sich mit der Materialbeschreibung aus DYNAMID. Ermittelt wurde dieser Verlauf mit einem Elementtyp #2 (Belytschko-Tsay-Element) und mit dem Einstellparameter ISTUPD = 1 in der Kontrollkarte *CONTROL_SHELL. Bei dieser Einstellung wird die Dickenänderung des Elementes bei zunehmender Länge berücksichtigt. Wird der Parameter ISTUPD auf 0 gesetzt, so weicht der damit ermittelte Spannungs-Dehnungsverlauf im Element deutlich von der vorgegebenen Materialbeschreibung ab (siehe Kurve 4). Keine Unterschiede zur identifizierten Kurve sind hingegen feststellbar, wenn man den Parameter ISTUPD auf 1 belässt, aber den Elementtyp von #2 auf #16 ändert (voll integriertes Schalenelement anstelle Belytschko-Tsay-Element, Kurve 5). Für andere (komplexere) Modelle ist davon auszugehen, dass die Verwendung des Elementtyps #16 einen Einfluss auf die Ergebnisse haben wird (siehe Kapitel 3 und 4).

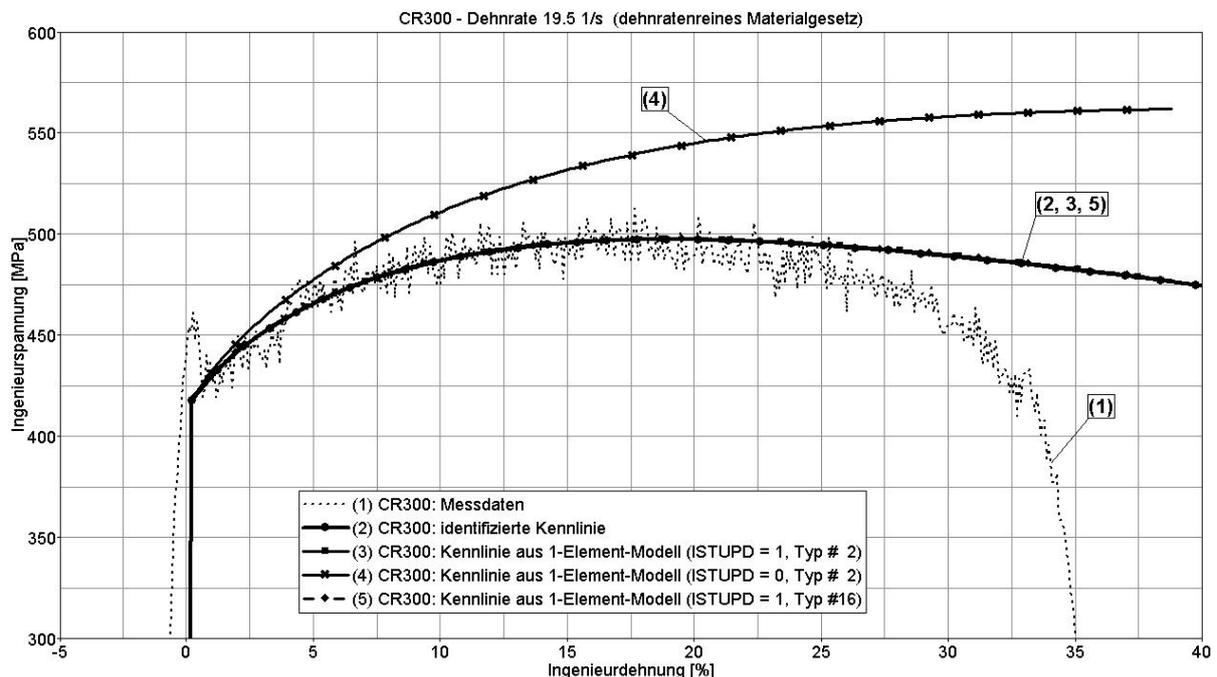


Bild 7: Spannungs-Dehnungsverläufe aus LS-DYNA für einen CR300-Stahl bei variierenden Modellparametern

3. Untersuchung einer Crash-Box

Nach den prinzipiellen Betrachtungen am Ein-Element-Modell soll nun eine Crash-Box untersucht werden. Dabei wird – vereinfacht – ein Lastfall untersucht, welcher mit dem AZT-Test vergleichbar ist. Das System besteht aus einer Crashbox (elastisch-plastisch, Stahl CR300, Wanddicke 2 mm) und einer starren Barriere, siehe Bild 8. Die Barriere besitzt eine Masse von 1000 kg und bewegt sich mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 16 km/h auf die Crash-Box zu. Die Crash-Box ist am barrierenabgewandten Rand unverschieblich gelagert, die einzelnen Bleche sind mit Schweisspunkten untereinander verbunden. Diese Schweisspunkte wurden vereinfacht als kleine Rigid-Spinnen abgebildet.

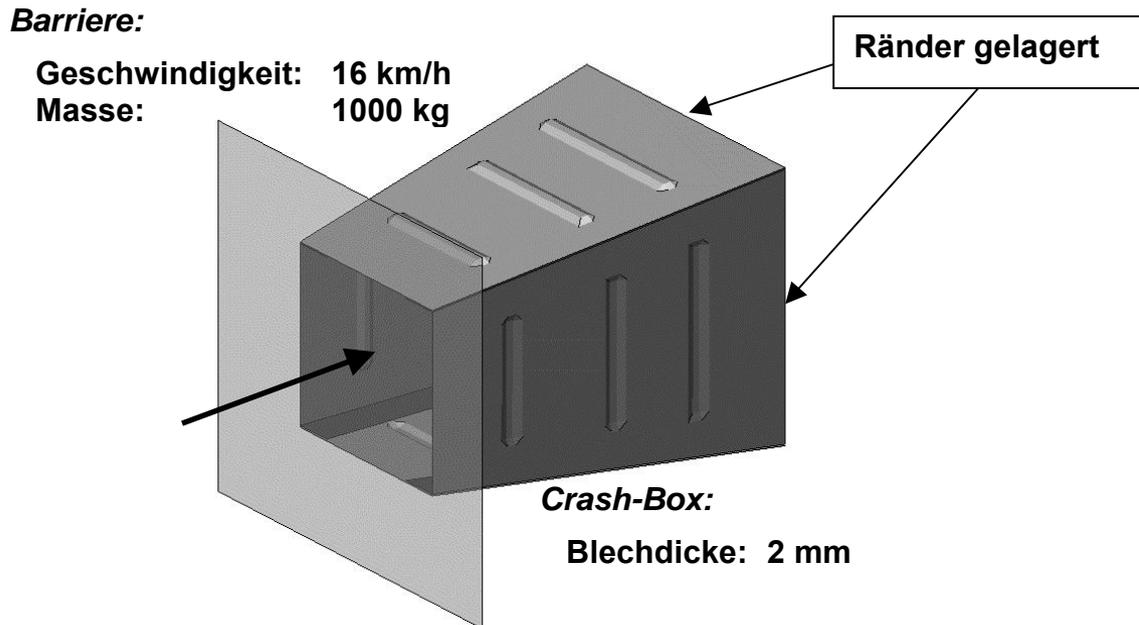


Bild 8: Crash-Box-Modell

In Bild 9 ist der Deformationsverlauf der Crash-Box für einige ausgewählte Zeitpunkte dargestellt.

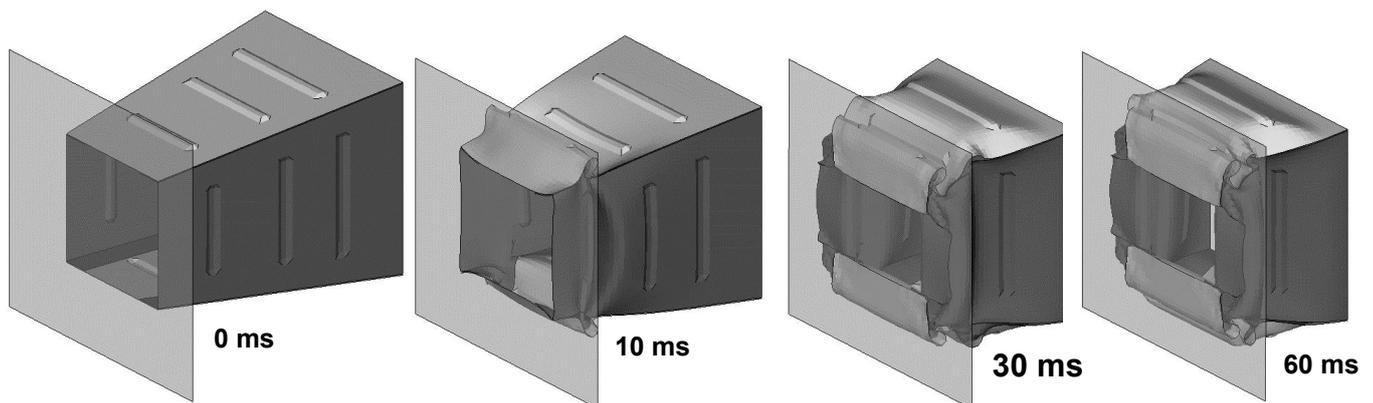


Bild 9: Deformation der Crash-Box

Interessant ist nun, wie stark die max. Deformation der Crash-Box bzw. der Kontaktkraftverlauf zwischen Barriere und Crash-Box variieren, wenn man einige Parameter des Modells verändert. Untersucht werden sollen hier folgende Fälle:

- (1) Basismodell mit dehnratenabhängigem Materialgesetz
- (2) Modell mit statischer Materialkennlinie
- (3) Modell mit um Faktor 1,05 skalierten dehnratenabhängigen Materialgesetz
- (4) Modell mit um Faktor 0,95 skalierten dehnratenabhängigen Materialgesetz
- (5) Modell mit halbierten Elementkantenlänge
- (6) Elementtyp von #2 auf #16 geändert

Die Auswirkungen dieser Modellvariationen sind in den Bildern 10 und 11 dargestellt. Die maximale Deformation der Crash-Box am freien Rand variiert zwischen 100 mm und 121 mm. Dabei liegt die Eindringung des Modells mit dehnratenabhängigem Materialgesetz bei 109 mm (Kurve 1). Die Verwendung eines ausschließlich aus statischen Messdaten identifizierten Materialgesetzes liefert ein deutlich zu weiches Crash-Box-Verhalten (Kurve 2: max. Eindringung 121 mm, d.h. +12 mm gegenüber Kurve 1). Die Variation aller Fließkurven des Materialgesetzes um den Faktor 1,05 bzw. 0,95 verändert die max. Eindringung deutlich geringer als die Verwendung eines ausschließlich

statischen Materialgesetzes (Eindringungsveränderung: -6 mm bzw. +4 mm). Die Halbierung der Elementkantenlängen aller Elemente der Crash-Box hat eine ähnliche Auswirkung wie die Skalierung der Materialeigenschaften mit dem Faktor 1,05. Die max. Eindringung nimmt um 6 mm ab, d.h. das System verhält sich steifer (Kurve 5). Den größten versteifenden Einfluss bewirkt die Umstellung des Elementtyps von Belytschko-Tsay (Typ #2) auf ein voll integriertes Schalenelement (Typ #16). Damit nimmt die max. Eindringung gegenüber der Verwendung des Elementtyps #2 um 9 mm ab (Kurve 6).

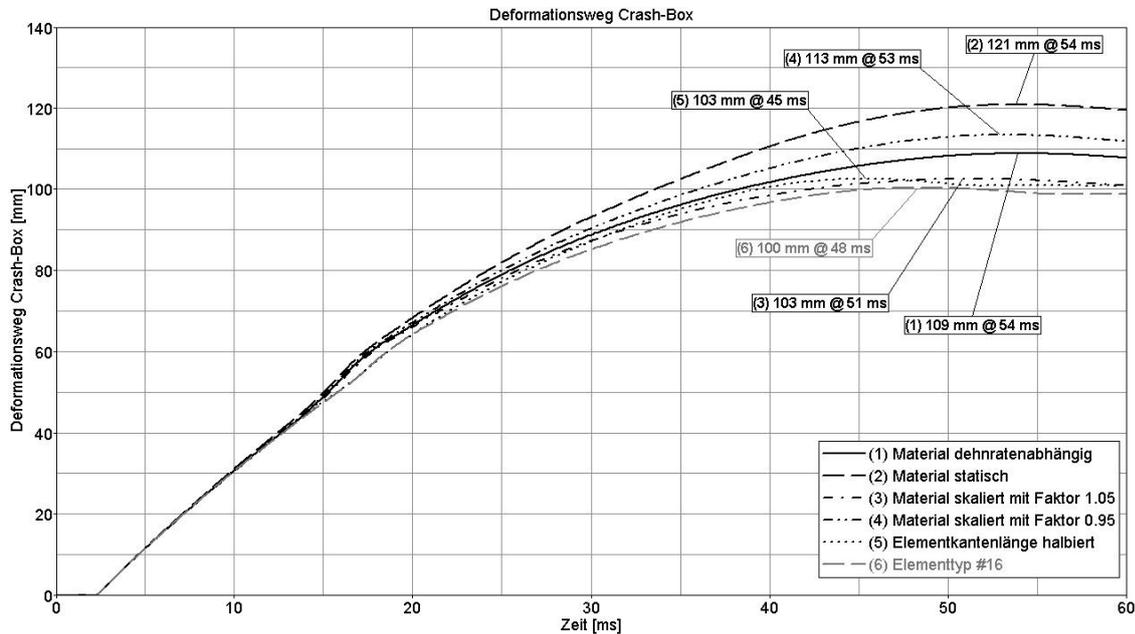


Bild 10: Deformationsweg der Crash-Box nach LS-DYNA für variierende Modellparameter

Die Kontaktkraft-Weg-Verläufe zeigen für alle sechs untersuchten Modellvarianten eine ähnliche Charakteristik, siehe Bild 11. Auch hier ist natürlich die Variation der max. Eindringung ablesbar. Zudem fällt auf, dass sich die Kurvenverläufe für die Varianten (5) und (6) etwas von den restlichen Kurvenverläufen unterscheiden. Eine Aussage über die Variation der max. Energieaufnahme der unterschiedlichen Crash-Box-Varianten ist hier leider nicht möglich, da im Endeffekt alle sechs Varianten die gleiche Energie aufnehmen – bedingt durch die feste Lagerung der Crash-Box ist eine Lastweiterleitung in anschließende Bauteile nicht abgebildet.

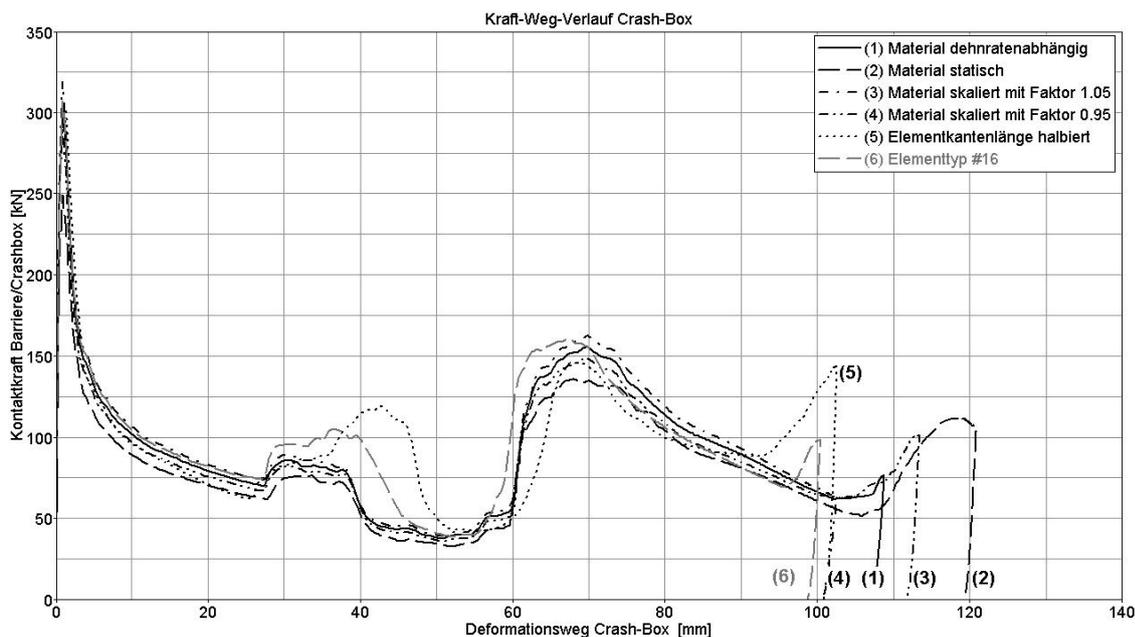


Bild 11: Kraft-Weg-Verlauf der Crash-Box nach LS-DYNA für variierende Modellparameter

4. Untersuchung des Kopfaufschlages auf eine Motorhaube

Für die Sicherstellung des Fußgängerschutzes ist die Untersuchung des Kopfaufschlages auf die Motorhaube von großer Bedeutung. Deshalb soll hier – ähnlich wie oben für die Crash-Box – der Einfluß variierender Parameter auf die Kopfaufschlagbelastung untersucht werden. Als Modell wird das frei verfügbare Dodge Neon Modell verwendet und auf den Frontbereich reduziert. Exemplarisch wird ein Kopf mit einer Masse von 2,5 kg, einem Auftreffwinkel von 50° und einer Auftreffgeschwindigkeit von 40 km/h betrachtet (Kinderkopf).

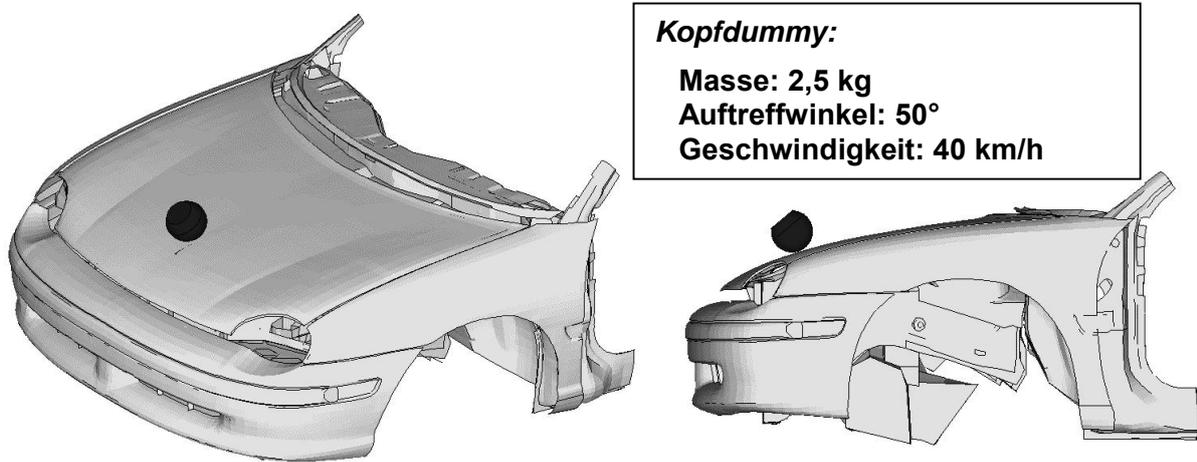


Bild 12: ISO-Ansicht Kopf auf Motorhaube

Bild 13: Seitenansicht Kopf auf Motorhaube

Untersucht werden sollen hier folgende Fälle:

- (1) Basismodell mit dehnratenabhängigem Materialgesetz
- (2) Modell mit statischer Materialkennlinie
- (3) Modell mit halbierten Elementkantenlänge im Bereich des Kopfaufschlages (siehe Bild 14)
- (4) Elementtyp von #2 auf #16 geändert

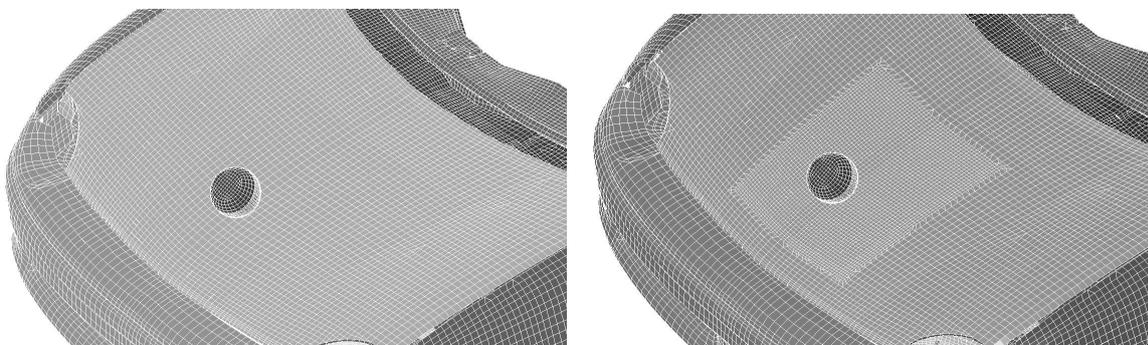


Bild 14: Vernetzung der Motorhaube; links: Fälle (1), (2) und (4), rechts: Fall (3)

Die Auswirkungen dieser Modellvariationen auf den Kopfdummy sind in Bild 15 dargestellt. Der ermittelte HIC-Wert bewegt sich für die vier untersuchten Modellvarianten zwischen 1114 und 1219. Die max. Kopfbeschleunigung variiert zwischen 131 g und 145 g. Es ist festzustellen, dass die Beschleunigungskurve für alle vier Fälle recht ähnlich aussieht. Etwas heraus sticht dabei die Kurve für die Variante (3); bei dieser Variante tritt die maximale Beschleunigung des Kopfes erst in der zweiten Beschleunigungsspitze auf. Generell kann man feststellen, dass für den Kopfaufschlag auf die hier untersuchte Motorhaube die Verwendung eines aus statischen Messungen ermittelten Materialgesetzes (Fall 2, HIC: 1114, max. Beschleunigung: 136 g) nur unwesentlich andere Ergebnisse liefert, als bei der Verwendung eines dehnratenabhängigen Materialgesetzes (Fall 1, HIC: 1135, max. Beschleunigung: 138 g). Für das untersuchte Beispiel haben die Variation der Netzfeinheit (Fall 3) sowie die Änderung des Elementtyps von Belytschko-Tsay (Typ #2) auf ein voll integriertes Schalenelement (Typ #16) (Fall 4) einen deutlich größeren Einfluß.

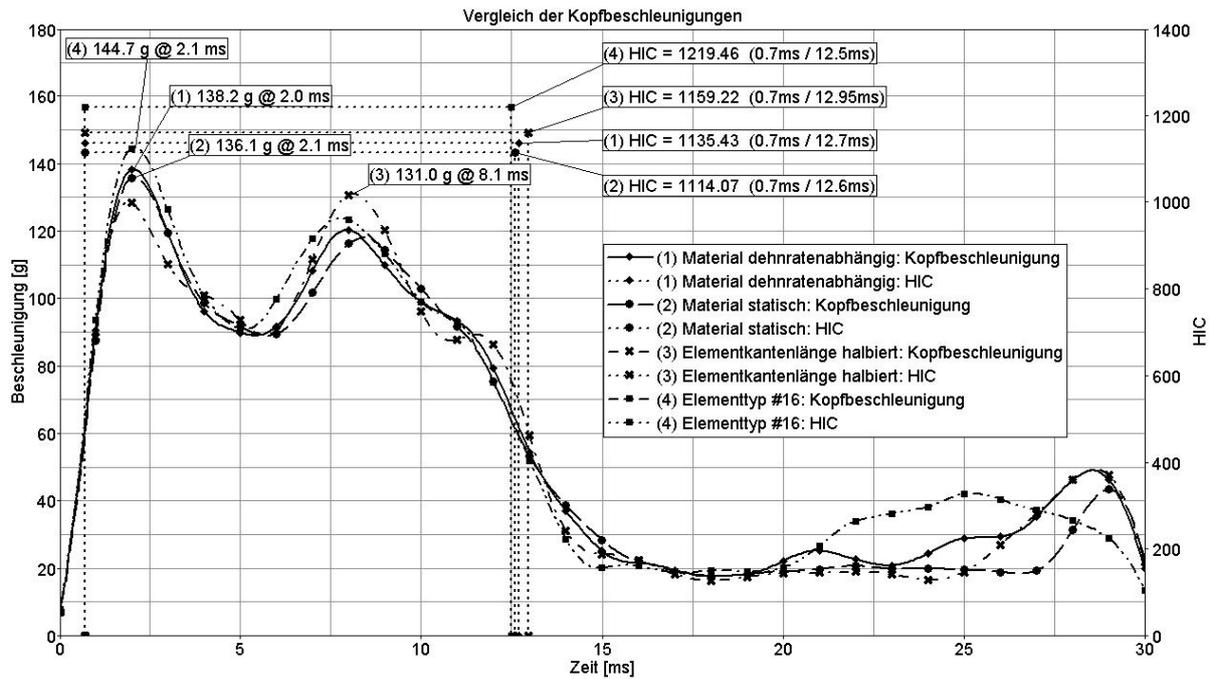


Bild 15: Kopfbeschleunigungen und HIC-Werte der LS-DYNA Kopfaufschlagsimulation auf eine Motorhaube

5. Zusammenfassung

Anhand der untersuchten Beispiele wurde der Einfluss der Materialbeschreibung auf das Ergebnis von kurzzeitdynamischen Simulationsvorgängen aufgezeigt. Dabei fällt auf, dass bei der Untersuchung der Crash-Box die Verwendung eines dehnratenabhängigen Materialgesetzes deutlich andere Ergebnisse liefert als die Verwendung eines aus statischen Messdaten ermittelten Materialgesetzes. Bedingt durch die Struktur der Crash-Box wird diese auf einer relativ kurzen Modelllänge sehr schnell gestaucht, so dass die Dehnratenabhängigkeit deutlich zum Tragen kommt und einen versteifenden Einfluß auf die Strukturdeformation hat. Allerdings haben auch die Netzverfeinerung sowie die Wahl eines voll integrierten Schalenelements einen ähnlich großen Einfluß auf die Simulationsergebnisse. Dies ist zu beachten, wenn Abweichungen zwischen Simulation und Test lediglich über Materialungenauigkeiten erklärt werden sollen. Eine Untersuchung über den Einfluß unterschiedlicher Extrapolationen der dehnratenabhängigen Materialkennlinien auf die Simulationsergebnisse zeigt keine nennenswerten Unterschiede in den Ergebnissen (im Paper nicht dargestellt).

Für den Kopfaufschlag auf eine Motorhaube fällt der Unterschied zwischen der Verwendung eines dehnratenabhängigen Materialgesetzes gegenüber einem aus statischen Messdaten ermittelten Materialgesetz nur sehr wenig ins Gewicht. Die Motorhaube wird großflächiger und somit weniger schnell gedehnt, so dass hier die Qualität der Simulationsergebnisse eher von der Netzfeinheit bzw. dem verwendeten Elementansatz abhängt.

Somit kann man generell zusammenfassen, dass das FE-Netz ausreichend fein und über den verwendeten Elementtyp ausreichend genau abgebildet sein sollte, bevor erhöhter Aufwand in die genaue Abbildung der Materialeigenschaften gesteckt wird. Dann allerdings kann die Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit – wie im obigen Fall der Crash-Box dargestellt – einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Simulationsergebnisse haben. Bei IHF wurde in Zusammenarbeit mit Opel das Materialidentifikationstool DYNAMID entwickelt. Dieses unterstützt den Anwender bei der Ermittlung von dehnratenabhängigen Materialdaten anhand gemessener Spannungs-Dehnungskurven.

6. Literatur

- [1] Livermore Software Technology Corporation: "LS-DYNA Keyword User's Manual", Version 970, 2003

