

Kunststoff-Materialmodelle für die Crashsimulation mit LS-DYNA

Als der Schweizer Mathematiker Leonhard Euler Mitte des 18. Jahrhunderts sein explizites Näherungsverfahren zur Berechnung der Newtonschen Bewegungsgleichung entwickelt hat, hatte er wohl kaum damit gerechnet, welch mächtiges Tool er Ingenieuren zwei Jahrhunderte später damit in die Hand gegeben hat. Zusammen mit der Finite Elemente Methode bildet die explizite Zeitintegration seit Jahrzehnten die Basis kurzzeitdynamischer Berechnungen. Zunächst im Rahmen militärischer Anwendungen entwickelt, wird das Verfahren seit Anfang der achtziger Jahre zu einer etwas friedvolleren Nutzung verwendet: der Crashsimulation. Eine wichtige Säule dieser Simulationsmethode ist die Verwendung adäquater Materialmodelle, was eine nicht zu unterschätzende Herausforderung an den Berechnungsingenieur darstellt.

Das Thema Materialmodellierung für die Crashsimulation befindet sich nunmehr über 25 Jahren in ständiger Weiterentwicklung. Treibende Kräfte sind hier neben den großen Automobilherstellern vor allem auch die Zulieferindustrie und die Rohstoffhersteller. Und der Bedarf an prognosesicheren Modellen, die das reale Werkstoffverhalten möglichst genau wiedergeben wächst mit dem Wunsch, teure Versuche zu ersetzen, Strukturbauteile hinsichtlich Kosten und Gewicht zu optimieren sowie Entwicklungszeiten bei gleich bleibender Qualität des Endproduktes zu verkürzen.

Während der Fokus der Materialmodellentwicklung sich stark an den metallischen Werkstoffen wie Stahl und Aluminium orientierte und immer noch orientiert, gibt es seit einigen Jahren vermehrt Entwicklungsarbeiten in Richtung Polymerwerkstoffe. Neben dem Leichtbaupotenzial von Kunststoffen spielen hier auch neue Sicherheitsaspekte wie der Fußgängerschutz eine wichtige Rolle. Hier sehen die Testkonfigurationen nach WG17 und Euro NCAP Kopf- und Beinprüfkörper vor, die ihrerseits an der Oberfläche aus Kunststoff bestehen und auf Strukturen treffen, bei denen Kunststoffe eine tragende oder Energie absorbierende Wirkung aufweisen [2]. Bild 1 zeigt exemplarisch einen solchen Beinaufprall, bei dem die Kunststoffkomponenten die entscheidende Rolle spielen. Der Beinprüfkörper besitzt eine Schaumstoffhülle (Confor® blue) und trifft auf einen Kunststoffstoßfänger (Thermoplast), welcher durch Stoßfängerschaum (EPP) gestützt wird. Um das Verhalten dieser Werkstoffe zu charakterisieren, ist es für die Crashsimulation hinreichend, die Kunststoffe in folgende drei Klassen einzuteilen:

1. Elastomere: gummiartige, inkompressible Materialien (Querdehnzahl etwa 0,5), deren Verformungen schwach nichtlinear und weitgehend reversibel sind. Die Dehnratenabhängigkeit ist in der Regel schwach ausgeprägt. Mathematisch über Hyperelastizität beschrieben.

2. Schäume: kompressible Materialien ohne Poisson-Effekt (Querdehnzahl etwa null) unter Druck, deren Verformungen stark nichtlinear und weitgehend reversibel sind. Die Dehnratenabhängigkeit ist in der Regel stark ausgeprägt. Mathematisch über Viskoelastizität oder ratenabhängige Hyperelastizität beschrieben.



Bild 1: Beinaufprall

tenabhängigkeit ist in der Regel stark ausgeprägt. Mathematisch über Viskoelastizität oder ratenabhängige Hyperelastizität beschrieben.

3. Kunststoffe: Materialien mit bleibender Verformung (ähnlich Metalle). Unterschiedliches Verhalten unter Zug und Druck. Mathematisch über Elasto-Plastizität mit geeigneter Fließfläche beschrieben.

Entsprechend dieser Einteilung kann man nun die Klasse an Materialmodellen wählen, die in kommerziellen Codes verfügbar sind. Der Benutzer kann in LS-DYNA aus weit über 200 verschiedenen

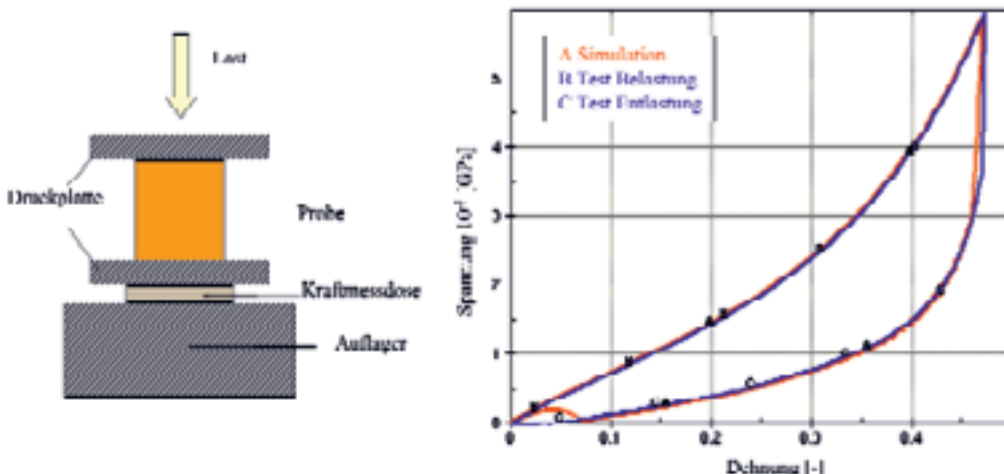


Bild 2: Experimenteller Aufbau und Simulation mit Mat_183

Modellen auswählen [1]. Der Großteil dieser Modelle steht auch in anderen Codes zur Verfügung und ist dem Berechnungsingenieur meist noch aus dem Studium bekannt. Oftmals jedoch in Erinnerung schweißtreibender Parameteridentifizierung, für die er in der täglichen Praxis jedoch keine Zeit hat. Es werden daher im Folgenden drei typische Crash-Materialmodelle nebst einer exemplarischen Anwendungen vorgestellt. Diese haben eine crash-typische, gemeinsame Basis: die kurvenbasierte Eingabe, welche die Parameteridentifizierung weitgehend vermeidet. Hierbei werden die Spannungs-Dehnungs-Kurven für verschiedene Dehnraten aus der experimentellen Messung aufbereitet und direkt über die Materialkarte dem Programm übergeben. Eine weitere Gemeinsamkeit der nun vorgestellten Modelle ist die Verwendung einer Schädigungsformulierung, die es erlaubt, das Entlastungsverhalten des Werkstoffs in guter Näherung zu beschreiben.

1. Elastomere

Gummiartige Materialien können in LS-DYNA mit dem Modell MAT_SIMPLIFIED_RUBBER (Mat_181) bzw. als Variante mit Schädigungsformulierung MAT_SIMPLIFIED_RUBBER_WITH_DAMAGE (Mat_183) berechnet werden. Das Modell basiert auf einem Ansatz nach Ogden (Mat_181) bzw. Hill (Mat_183), siehe [3] für eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Algorithmen. Im letzteren kann auch ein kompressibles Verhalten (Querdehnzahl <0,5) abgebildet werden. In Bild 2 ist eine typische Testkonfiguration dargestellt. Ein würfelförmiger Probekörper wird unter Druck belastet und entlastet. Der daraus gewonnene Kraft-Weg-Verlauf wird in einen (technischen) Spannungs-Dehnungs-Verlauf umgerechnet, welcher dann Basis für die Simulation mit Mat_183 darstellt. Man erkennt, dass das Simulationsergebnis exakt das Experiment wiedergibt, und zwar ohne aufwändige Parameteridentifizierung.

Bild 3 zeigt ein Anwendungsbeispiel, bei dem die Hardscheibe einer Gelenkwelle während eines Frontal-Offset-Crashes belastet wird. Man erkennt die überwiegende Druckbelastung und die starken Verzerrungen der Elemente. Die Hardscheibe wurde daher auch im Versuch auf Druck belastet und die entsprechende Druckkurve nach Aufbereitung, d.h. Glättung und Einteilung in 100

äquidistante Stützstellen, in die Materialkarte übernommen. Es darf aber nicht verschwiegen werden, dass unter anderen Belastungszuständen, z.B. Biegung, das Modell Schwächen aufweist [4], was aber für diesen Lastfall nicht relevant ist.

2. Elastische Schäume

Ein geeignetes und sehr praktisches Materialgesetz für reversible Schäume in LS-DYNA ist MAT_FU_CHANG_FOAM (Mat_83) inklusiver einer Variante mit Schädigungsformulierung, welche ab Version 9.71 zur Verfügung, siehe [5]. Auch hier können dehnratenabhängige Spannungs-Dehnungs-Kurven direkt als Eingabe dienen und über eine Be- und eine Entlastungskurve (bei Dehnraten 0) wird intern die Schädigung berechnet und akkumuliert. Des Weiteren wird so über die elastische Verzerrungsenergie ein Kriterium gewonnen, womit die Be- und Entlastung detektiert werden kann: nimmt die Energie zu, wird belastet ansonsten entlastet. In der ursprünglichen Version dieses Modells wurde die Entlastung noch über die Dehnraten bestimmt: War das Produkt aus Dehnraten und Dehnung positiv, so lag Belastung vor, ansonsten Entlastung. Durch die starke Oszillation der Dehnraten war dieses Verfahren aber fehleranfällig. Bild 4 zeigt einen typischen Validierungsversuch, bei dem eine Metallkugel auf einen Schaumblock fällt. Mit der neuen Schädigungsformulierung wird der experimentelle Verlauf sehr schön wiedergegeben, wobei die ältere Methode ihre Schwächen offenbart. Das Entlastungsverhalten ist aber



Bild 3: Gelenkscheibe während eines Frontal-Offset-Crashes.

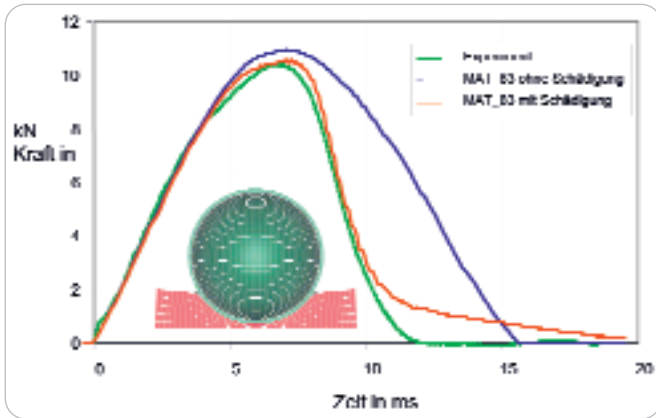


Bild 4: Kugelaufprallversuch zur Validierung eines Schaums

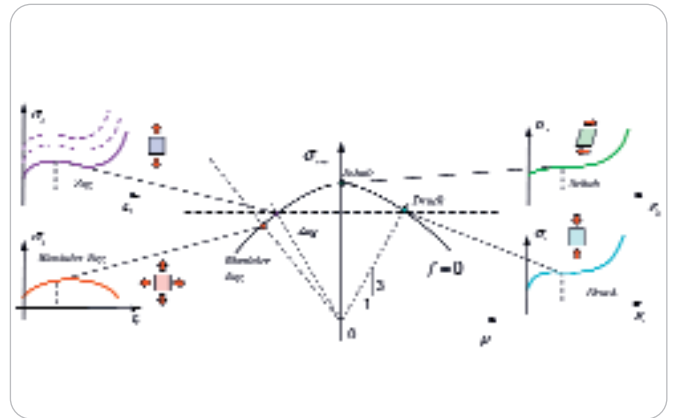


Bild 5: SAMP-Fließfläche

gerade beim Beinaufprall ein wichtiger Punkt, da es den Biege-
winkel maßgeblich mitbestimmt. Leider gibt es aber auch bei die-
sem Modell eine Einschränkung: Ist die Dehnratenabhängigkeit
zu groß (wie es beispielsweise beim Confor® blue der Fall ist), wird
das verwendete Verfahren instabil. Dann ist ein echtes viskoelasti-
sches Modell (z.B. MAT_LOW_DENSITY_VISCOUS_FOAM) zu
verwenden und die Parameter zu bestimmen.

3. Kunststoffe

Kunststoffe zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass sie ein kom-
plexes Materialverhalten aufweisen. Eine erste Näherung hierfür
stellt ein elasto-plastischer Ansatz dar, wie man ihn auch für Metalle
verwendet. Im Gegensatz hierzu muss man allerdings noch
weitere Phänomene berücksichtigen, die man bei Metallen nicht
kennt: Das Fließverhalten ist Abhängig vom Druck, d.h. unter Zug-
Druck- und Schubbeanspruchung erhält man jeweils eine unter-
schiedliche Fließgrenze. Außerdem folgt die Entlastungskurve auf-

grund der Grundviskosität nicht mehr der Hooke'schen Geraden.
Da viele Kunststoffe unter großen Verformungen Mikrorisse bil-
den (crazing/Weißbruch), findet darüber hinaus ein Fließen unter
Volumenzunahme statt.

Im Bereich der Modellierung von Kunststoffen gab es in letzter
Zeit viele gute Ansätze, diese Phänomene zu berücksichtigen. Seit
LS-DYNA 9.71 steht dem Anwender das Modell MAT_SAMP-1
(Semi-Analytical Model for Polymers, Mat_187) zur Verfügung [6].
Hier kann der Benutzer Fließkurven aus Zug- Druck- Schub-
und/oder Biaxialversuch verwenden (Bild 5). Intern wird aus die-
sen Informationen eine quadratische Fließfläche generiert. In Bild
5 ist dies schematisch für einen typischen Thermoplast in der In-
variantenebene (Von-Mises-Spannung über Druck) dargestellt. Die
gestrichelte Linie zeigt die für Metalle verwendete druckunab-
hängige Von-Mises-Fließfläche, die ganz offensichtlich nicht für
Kunststoffe geeignet ist.

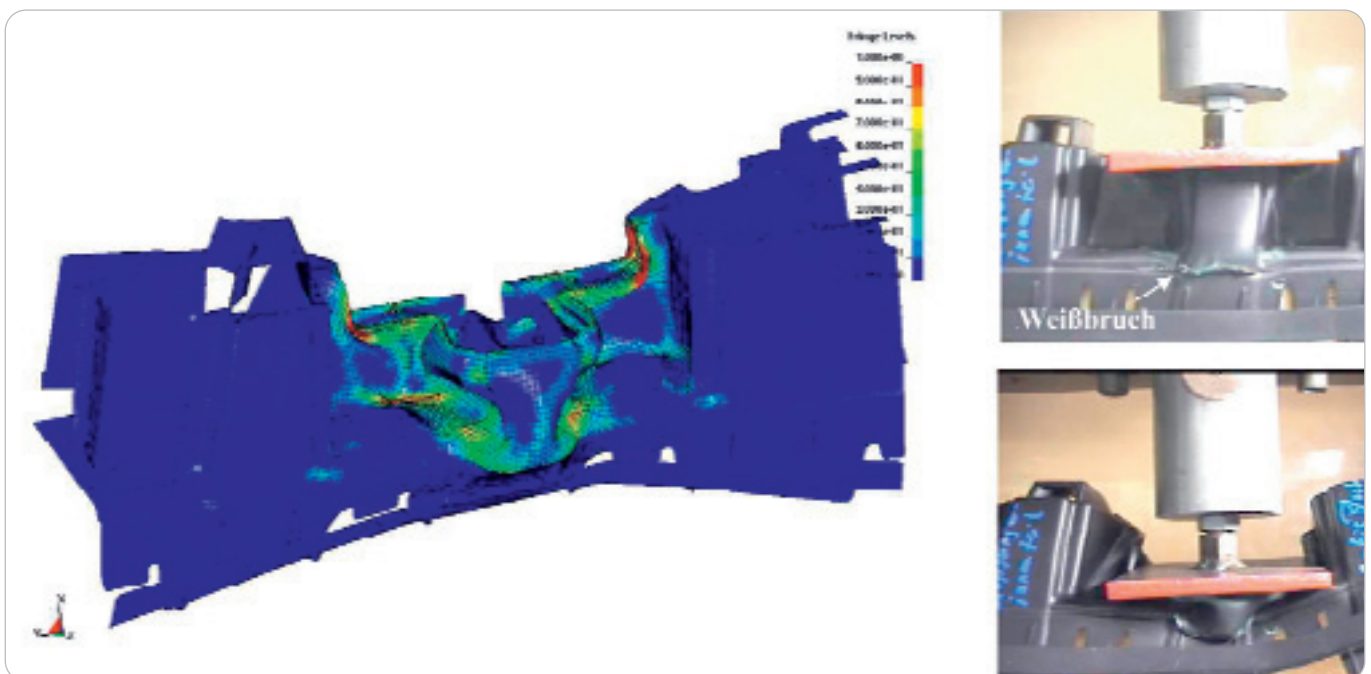


Bild 6: Bauteilversuch und Simulation von Weißbruch

Über die Fließfläche hinaus ist das Modell in der Lage das Entlastungsverhalten über einen Schädigungsansatz zu approximieren erlaubt auch eine Volumenzunahme unter plastischer Dehnung (crazing). SAMP ist weniger ein Materialmodell im mathematischen Sinne als ein Gesamtkonzept zur Berücksichtigung der phänomenologischen Eigenschaften von Kunststoffen.

Bild 6 zeigt exemplarisch einen Bauteilversuch an einem Stoßfängerinnenteil [7]. Der Konturplot zeigt dabei die volumetrische plastische Dehnung, also ein Maß für die Volumenzunahme infolge Mikrorissbildung. Auch das Deformationsverhalten wurde hier gut wiedergegeben.

 Literatur

[1]LS-DYNA User Manual and Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation.
 [2]Du Bois, P.; Kolling, S.; Kösters, M.; Frank (2006), T: Material behaviour of polymers under impact loading. International Journal of Impact Engineering 32: 725-740.
 [3]Kolling, S.; Du Bois, P.; Benson, D.; Feng, W. (2007): A tabulated formulation of hyperelasticity with rate effects and damage. Computational Mechanics 40(5): 885-899.
 [4]Timmel, M.; Kaliske, M.; Kolling, S. (2004): Modellierung gummiartiger Materialien bei dynamischer Belastung. 3. LS-DYNA Forum, Bamberg. C-I: 37-48.
 [5]Kolling, S.; Werner, A.; Erhart, T.; Du Bois, P. (2007): An elastic damage model for the simulation of recoverable polymeric foams. 6. LS-DYNA Forum, Frankenthal. B-II: 31-42.
 [6]Kolling, S.; Haufe, A.; Feucht, M.; Du Bois, P. (2006): A constitutive formulation for polymers subjected to high strain rates. 9th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn. 15: 55-74.
 [7]Du Bois, P.; Kolling, S; Feucht, M; Haufe, A. (2008): The influence of permanent volumetric deformation on the reduction of the load bearing capacity of plastic components. 10th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn. 19: 35-42.

 Autor

Prof. Dr. Stefan Kolling
 Labor für Mechanik, FH Giessen
 stefan.kolling@mmew.fh-giessen.de

 Hinweis

Auf dem CADFEM Users' Meeting vom 22. – 24. Oktober 2008 in Darmstadt wird Prof. Kolling im Bereich der Expliziten Strukturmechanik den Vortrag „**Simulation elastischer Schäume unter stoßartiger Last**“ (Donnerstag, 09:40 – 10:20 Uhr) halten und das Kompaktseminar „**Materialmodellierung von Polymerwerkstoffen für die Impaktsimulation**“ (Freitag, 11:00 – 12:40 Uhr) leiten.
www.usersmeeting.com

Ausblick

Die hier vorgestellten Materialmodelle für die Crashesimulation zeichnen sich vor allem dadurch aus, dass die Eingabeparameter nicht erst aus den experimentellen Daten ermittelt werden müssen, sondern dass die Daten direkt in der Materialkarte verwendet werden können.

Obwohl die gezeigten Modelle einen guten Reifegrad erreicht haben und sich langsam in der Praxis etablieren ist der Entwicklungsbedarf jedoch längst nicht gedeckt. Die Modellierung bis hin zum Versagen und die Einbindung des Herstellungsprozesses in die Simulation sowie der damit verbundenen Berücksichtigung der Anisotropie sind Fragestellungen, denen der Berechnungsingenieur in naher Zukunft begegnen wird. <<

 Seminarhinweis

Materialmodelle in LS-DYNA

15. September 2008
 In Grafing b. München

Die Teilnehmer erhalten Einblick in die Theorie verschiedener Materialmodelle von LS-DYNA. Häufig verwendete Werkstoffgesetze und Werkstoffklassen werden besprochen und Hinweise zur Anwendung sowie zur Materialparameteridentifikation gegeben.

- Theoretische Grundlagen
- Materialbeschreibung in LS-DYNA
- Plastizität und Viskoplastizität
- Viskoelastizität
- Schäume
- Gummimaterialien
- Faserverbundwerkstoffe
- Materialversagen

Information und Anmeldung
www.cadfem.de/seminare

 Information

Ansprechpartner

Materialmodellierung in LS-DYNA

Dr.-Ing. Matthias Hörmann, CADFEM Grafing
 Tel. +49 (0) 80 92-70 05-41
 E-Mail mhoermann@cadfem.de