

## Effiziente Ermittlung von Dehnraten- und Versagensparametern für die Fahrzeug-Crashsimulation mit LS-Dyna

Dipl.-Ing. (FH) Johannes Winklhofer\*, Dipl.-Ing. Dr. mont. Gernot Trattnig\*, Dipl.-Ing. Harald Schluder\*,  
Dipl.-Ing. Bernhard Fellner\*\*

\* Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug Forschungsgesellschaft mbH  
Area D Mechanics, Inffeldgasse 21a A-8010 Graz

\*\* MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG  
Liebenauer Hauptstraße 317 A-8041 Graz

### Abstract:

Determination of material data for automotive crash simulation is a costly and time consuming process. Especially the measurement of material behaviour like strain rate sensitivity and stress state dependent fracture is a difficult task for experimental testing. Therefore a novel and efficient material data determination process is introduced including standard quasistatic tension and compression tests and dynamic 3-point-bending and compression tests.

The 3-point-bending and compression tests are carried out with the innovative material testing device Impetus<sup>®</sup> developed by 4a engineering GmbH. Using this device and the coupling of experimental, simulation and optimization methods (also called system identification or reverse engineering methods) strain rate dependent hardening parameters can be determined for sheet metals, plastics and foam materials.

The fracture behaviour of ductile metals is characterized with the fracture model of Johnson&Cook based on the results of quasistatic tension and shear tests.

The benefit of the developed process is validated material data for crash simulation models, the inexpensive determination of strain rate sensitivity and fracture behaviour and a standardized material data determination method.

### Keywords:

Materialdatenermittlung, Crashsimulation, System identification, Dehnratenabhängigkeit, Cowper&Symonds, Versagensmodellierung, Johnson&Cook

## 1 Einleitung

Um eine hohe Prognosequalität von Computer Aided Engineering Methoden in der Konzeptphase einer Automobilentwicklung zu erreichen, ist es notwendig das Materialverhalten von Strukturelementen im Fahrzeug-Crash korrekt abzubilden. Wesentliche Einflussgrößen auf das Materialverhalten sind die Dehnratenabhängigkeit der Fließspannung und das Versagensverhalten.

Bei hoher Verformungsgeschwindigkeit kommt es zu einem Festigkeitsanstieg der im Fahrzeugbau verwendeten Karosseriestähle. Wird dieser in der Konzeptphase nicht berücksichtigt, kann es durch die dehnratenbedingt erhöhte Steifigkeit der Karosse, etwa bei der Auslegung der Rückhaltesysteme, zu Fehlern kommen. Das wiederum kann im realen Crashfall schwerwiegende Folgen für die Insassen haben. Daher ist es notwendig das dehnratenabhängige Materialverhalten zu berücksichtigen [1].

Im modernen Fahrzeugbau steigt aus Gründen des Leichtbaus die Zahl der aus höchstfesten Stählen gefertigten Bauteile. Diese weisen eine hohe Festigkeit auf, sind jedoch nur in geringem Maße plastisch verformbar und neigen dadurch zum Versagen bei geringen Verformungen. Die Berücksichtigung des Versagensverhaltens dieser Werkstoffe bei der Auslegung der entsprechenden Bauteile ist daher erforderlich.

Das Materialverhalten wird in der numerischen Crashesimulation mit Materialdaten aus standardisierten Prüfmethode quantifiziert. Diese Materialdaten sind in vielen Fällen zum gewünschten Zeitpunkt in der Konzeptphase jedoch nicht verfügbar bzw. nur in unzureichender Qualität vorhanden. Der Grund dafür sind zum Teil kosten- und zeitaufwändige Experimente und Methoden um das Materialverhalten zu charakterisieren.

Aus den genannten Gründen ist es daher für einen Fahrzeugentwickler wichtig auf einen effizienten Materialdatenermittlungsprozess zurückgreifen zu können. Ein solcher wird hier vorgestellt.

Grundlage einer Materialcharakterisierung ist die Ermittlung des verformungsabhängigen Verfestigungsverhaltens mithilfe von quasistatischen einachsigen Zug- oder Druckversuchen. Der Zugversuch ist z.B. für metallische Werkstoffe nach DIN EN 10002 oder für Kunststoffe nach DIN EN ISO 527-1/2 genormt und einfach durchzuführen und auszuwerten. Das elastische Verfestigungsverhalten kann mithilfe dieses Versuchs in Form des Elastizitätsmoduls  $E$  bestimmt werden, das plastische Verformungsverhalten kann in Form einer Fließkurve aufgenommen werden [2]. Die Ergebnisse des quasistatischen einachsigen Zugversuchs können direkt in die entsprechenden Materialmodelle der FE-Solver implementiert werden. Für LS-Dyna ist dies z.B. das für metallische Werkstoffe und höherfeste Kunststoffe zum Einsatz kommenden Materialmodell 24 [3]. Für hochverformbare Schaumwerkstoffe die als Energieabsorber z.B. im Fahrzeug-Stoßfänger oder Innenraum eingesetzt werden sind in LS-Dyna spezielle Materialmodelle verfügbar (z.B. Materialmodell 57 oder 83) [3]. Um das Verformungsverhalten dieser Werkstoffe zu charakterisieren werden die entsprechenden Modelle mit den Ergebnissen aus quasistatischen Druckversuchen bestückt.

Die Dehnratenabhängigkeit wird für gewöhnlich mit dynamischen Zug- oder Druckversuchen bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten ermittelt. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen, das sind dehnratenabhängige Spannungs-Dehnungs-Kurven, können ebenfalls direkt in die entsprechenden Materialmodelle der FE-Solver implementiert werden. Dynamische Zug- und Druckversuche werden mit speziellen Prüfmaschinen z.B. servohydraulischen Zugprüfmaschinen durchgeführt, sind schwierig auszuwerten und sehr zeit- und kostenintensiv [4] [5].

Das Versagensverhalten metallischer Werkstoffe kann mithilfe des einachsigen Zugversuchs und weiteren quasistatischen Versuchen mit unterschiedlichen Probengeometrien und Belastungszuständen wie z.B. dem Druckversuch, dem Scherversuch, dem Kreuzzugversuch oder dem Zugversuch mit taillierter Probe bestimmt werden [6]. Durch die große Anzahl der unterschiedlichen Experimente ergibt sich ebenfalls ein beträchtlicher Zeit- und Kostenaufwand. Die Ergebnisse dieser Versuche sind die Basis für parametrisierte Versagensmodelle. Kontinuumsmechanische Versagensmodelle z.B. versuchen die Rissinitiation durch Aufintegration der eingebrachten plastischen Energie oder Dehnung unter Berücksichtigung des Spannungszustandes zu beschreiben [7]. Andere Versagensmodelle beruhen auf Porenwachstum und Porenkoaleszenz und sind auf metallografische Untersuchungen angewiesen [8] [9]. Wesentlich ist dabei die Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Spannungsmehrachsigkeit [10] [11].

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, wie die Dehnratenabhängigkeit metallischer Werkstoffe ohne dynamische Zugversuche ermittelt werden kann. Dabei werden die Parameter des Modells von Cowper&Symmonds [12] [3] mithilfe von dynamischen 3-Punkt-Biegeversuchen und Reverse Engineering Methoden (auch System Identification) ermittelt. Die dynamischen 3-Punkt-Biegeversuche werden mit einer neuartigen Versuchseinrichtung durchgeführt, die es ermöglicht die Dehnratenabhängigkeit von dünnwandigen Strukturen sowie von Blockstrukturen (z.B. Schaumstoffe)

zu ermitteln. Der Vorteil dieser Methode ist die einfache und kostengünstige Versuchsdurchführung und Auswertung.

Die Versuche, die herangezogen werden um das Versagensverhalten von metallischen Werkstoffen zu beschreiben, beschränken sich in dieser Arbeit auf den quasistatischen einachsigen Zugversuch und einen Scherversuch. Mithilfe der in diesen Versuchen gemessenen Bruchdehnungen werden die Parameter des Versagensmodells von Johnson&Cook ermittelt [13] [14]. Dieses Modell beschreibt die Bruchdehnung abhängig von der Spannungsmehrachsigkeit, ist vergleichsweise einfach zu bestücken und standardmäßig in den meisten FE-Crashcodes verfügbar. In LS-Dyna besteht außerdem die Möglichkeit die Elementkantenlänge des numerischen Modells bei der Beschreibung der Bruchdehnung zu berücksichtigen.

## 2 Verwendete Materialmodelle und deren Bestückung

### 2.1 Modellierung des Verformungsverhaltens

Für die Beschreibung des Verformungsverhaltens wird das in der Fahrzeugcrashsimulation für metallische Werkstoffe standardmäßig verwendete Materialmodell nach v. Mises herangezogen. Das Modell beruht auf der Fließbedingung nach v.Mises, isotroper Verfestigung und Volumenkonstanz. Die Bestückung des Materialmodells mit Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl, Streckgrenze und Fließkurve erfolgt aus dem quasistatischen einachsigen Zugversuch. Für die Extrapolation der Fließkurve über die Gleichmaßdehnung hinaus werden mithilfe einer Optimierungsprozedur Extrapolationsmodelle angepasst. Für metallische Werkstoffe kommen üblicherweise folgende Extrapolationsmodelle in Frage: Hollomon, Voce, Ghosh, Hockett-Sherby, Ludwik [15]. Das Modell, das die beste Übereinstimmung mit der gemessenen Fließkurve zeigt, wird für die Extrapolation ausgewählt (Bild 1).

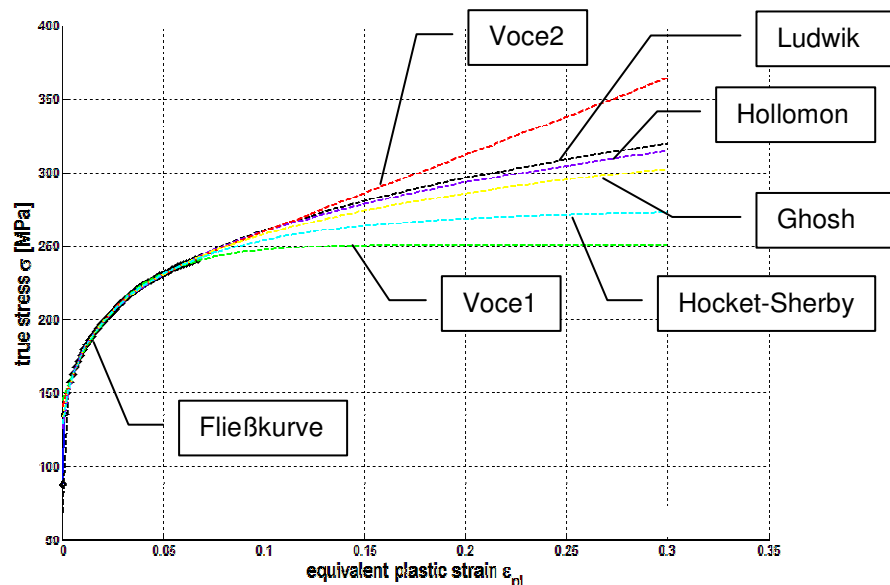


Bild 1: Vergleich der Modelle zur Fließkurvenextrapolation

Für nichtmetallische Werkstoffe die im Fahrzeugbau verwendet werden, wie z.B. Kunst- oder Schaumstoffe, existiert eine Vielzahl an Materialmodellen. Die Grundlage dieser Modelle ist in den meisten Fällen ebenfalls das quasistatische Verformungsverhalten, das mit Zug- oder Druckversuchen gemessen wird.

## 2.2 Modellierung der Dehnratenabhängigkeit

Die Dehnratenabhängigkeit metallischer Werkstoffe wird in der vorliegenden Arbeit mit dem Modell von Cowper&Symonds [12] [3] beschrieben. Dabei wird die Fließspannung  $\sigma_y(\epsilon_{eff}^p, \dot{\epsilon}_{eff}^p)$  abhängig von der plastischen Vergleichsdehnung  $\epsilon_{eff}^p$  und der plastischen Dehnrates  $\dot{\epsilon}_{eff}^p$  basierend auf der quasistatischen Fließkurve  $\sigma_y^s(\epsilon_{eff}^p)$  mit den Dehnratenparametern  $C$  und  $p$  wie folgt berechnet:

$$\sigma_y(\epsilon_{eff}^p, \dot{\epsilon}_{eff}^p) = \sigma_y^s(\epsilon_{eff}^p) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}_{eff}^p}{C} \right)^{1/p} \right]. \quad (1)$$

Die Modellparameter  $C$  und  $p$  werden in dieser Arbeit mithilfe eines dynamischen 3-Punkt-Biegeversuchs, einer Finiten-Elemente-Simulation des dynamischen Biegeversuchs und eines Optimierungsalgorithmus invers ermittelt.

Die dynamischen Biegeversuche werden mit der Pendelversuchsanlage der Firma 4a engineering GmbH<sup>1</sup> durchgeführt. Dabei wird ein Pendelarm mit der Masse  $m$  um einen bestimmten Winkel  $\alpha$  ausgelenkt und trifft mit einer definierten Geschwindigkeit  $v$  auf den Probekörper (siehe Bild 2). Dadurch kommt es zu einer Verformung des Probekörpers infolge einer Biegebelastung. Die größte Dehnung und die höchste Dehnrates treten in der Außenfaser des dünnwandigen Probekörpers auf. Üblicherweise werden drei unterschiedliche Prüfkonfigurationen mit unterschiedlichen maximalen Dehnrates durchgeführt. Die Versuchseinstellungen die variiert werden um unterschiedliche maximale Dehnrates zu realisieren, sind die Pendelarmgeschwindigkeit  $v$ , der Widerlagerabstand  $lw$  und (wenn möglich) die Probendicke  $t$ . Während der Versuche wird die Beschleunigung des Pendelarms gemessen und aufgezeichnet.

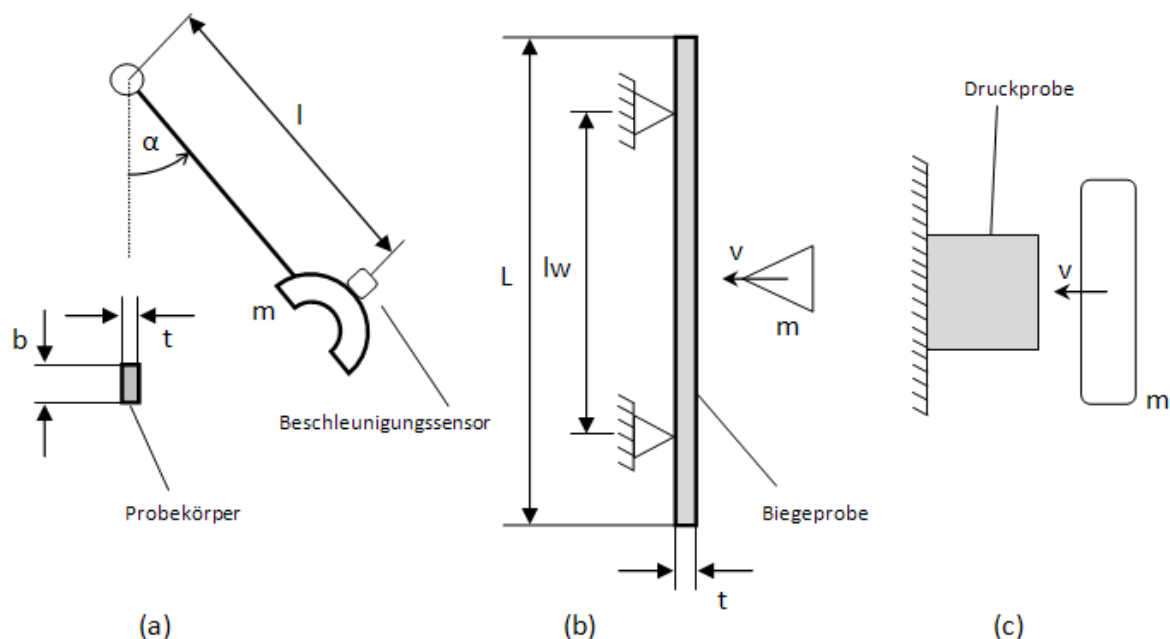


Bild 2: (a) Darstellung des Aufbaus der Pendelversuchsanlage und (b) des damit realisierbaren dynamischen 3-Punkt-Biegeversuchs bzw. (c) des dynamischen Druckversuchs

Der Pendelversuch wird danach als Simulationsmodell abgebildet. Die Biegefinne und die Widerlager werden als starr modelliert. Um die Rechenzeit des Simulationsmodells zu verkürzen wird nur das halbe Modell mit den entsprechenden Symmetriebedingungen berechnet (siehe Bild 3). Die wichtigsten Merkmale des Simulationsmodells sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

<sup>1</sup> www.4a.co.at

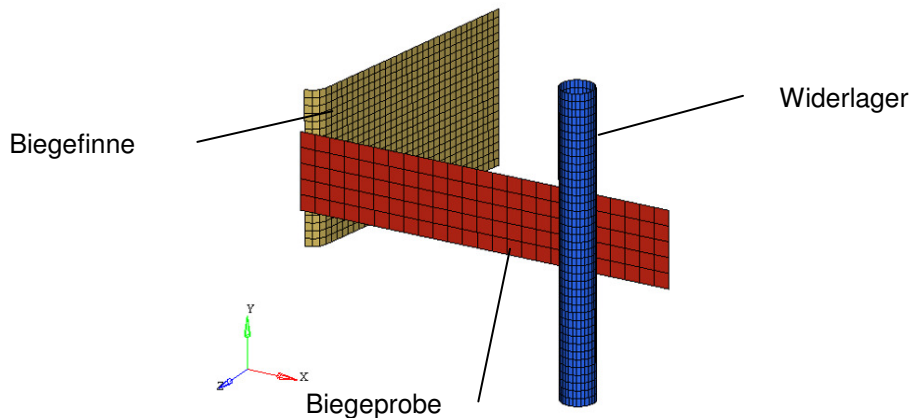


Bild 3: Simulationsmodell des 3-Punkt-Biegeversuchs

Tabelle 1: Einstellungen im Simulationsmodell des dynamischen 3-Punkt-Biegeversuchs

FE-Solver	LS-Dyna ls971_s_7600.1224_win32.exe
Materialmodell	MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
Elementkantenlänge [mm]	2-5
Schalenelementtyp	16
Anzahl der Integrationspunkte über die Schalendicke	7
Integrationsgesetz	Lobatto
Reibungskoeffizient	0.10 (Teflonbeschichtung der Widerlager)

Bei der inversen Ermittlung der Dehnratenparameter wird versucht die Versuchsergebnisse, das sind das Beschleunigungs-Zeit-Signal und der maximale Verformungsweg, mithilfe von Optimierungsmethoden in der Simulation abzubilden. Die Optimierungssoftware die hierfür zum Einsatz kommt ist LS-OPT<sup>2</sup>. Der verwendete Optimierungsalgorithmus ist die Successive Response Surface Methode [16] [17]. Das Maß der Abweichung des Beschleunigungs-Zeit-Simulationssignals vom Versuchssignal wird mit der Mean Square Error Funktion [16] berechnet. Das Ziel der Optimierung ist die Mean Square Error Funktion durch Optimierung der Dehnratenparameter  $C$  und  $p$  zu minimieren (Bild 4).

Nach dem Aufprall des Pendelarms kommt es vorerst zu einer rein elastischen Verformung der Biegeprobe. Das führt zu starken Schwingungen im Beschleunigungssignal. In die Optimierung fließt lediglich der Bereich des Beschleunigungssignals ein in dem diese Schwingungen abgeklungen sind (in Bild 4a zwischen 0.004 und 0.012 s). In diesem Bereich wird die Probe plastisch verformt.

Das Ergebnis der Optimierungsprozedur sind die Dehnratenparameter  $C$  und  $p$ , welche die Dehnratenabhängigkeit des untersuchten Werkstoffes beschreiben (Bild 5).

<sup>2</sup> www.lstc.com

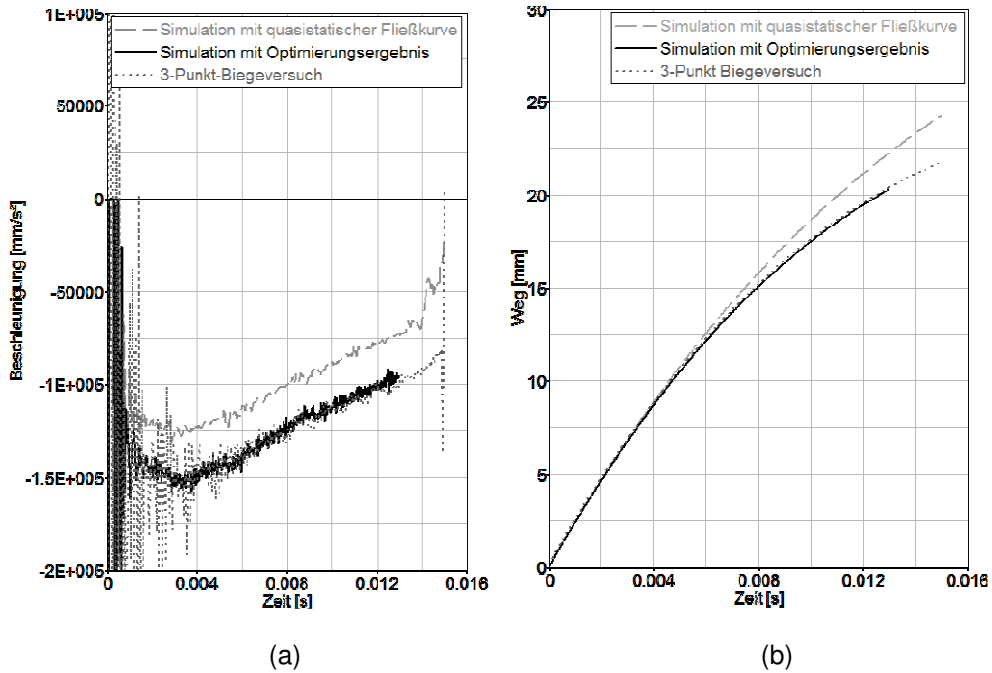


Bild 4: (a) Beschleunigungs-Zeit-Signal und (b) Weg-Zeit-Signal aus dem Pendelversuch und der entsprechenden Simulation mit der quasistatisch gemessenen Fließkurve und der dehnratenabhängigen Fließkurve nach Cowper Symonds mit den optimierten Dehnratenparametern  $C$  und  $p$ .

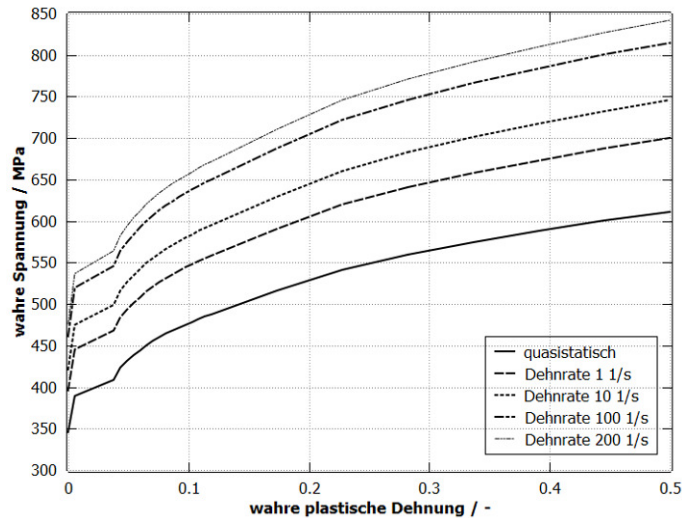


Bild 5: Beispiel für eine dehnratenabhängige Fließkurve nach dem Modell von Cowper Symonds

Mit der beschriebenen Vorgehensweise kann auch die Dehnratenabhängigkeit dünnwandiger Strukturen aus Kunststoff charakterisiert werden.

Um die Dehnratenabhängigkeit von Schaumstoffen zu ermitteln können mit der Pendelversuchsanlage auch dynamische Druckversuche durchgeführt werden (siehe Bild 2c).

### 2.3 Modellierung des Versagensverhaltens

Die Annahme, die der Beschreibung des Versagensverhaltens in dieser Arbeit zu Grunde liegt, ist die für duktile metallische Werkstoffe aus der Literatur bekannte Abhängigkeit der plastischen Vergleichsdehnung bei Versagen  $\varepsilon_f$  von der Spannungsmehrachsigkeit

$$\eta = \frac{\sigma_H}{\sigma_M}, \quad (2)$$

mit der hydrostatischen Spannung  $\sigma_H$  und der Vergleichsspannung nach v.Mises  $\sigma_M$ .

Eines der Modelle das diesen Zusammenhang beschreibt wurde von Johnson&Cook [13] [14] vorgestellt und ist in der folgenden Form im LS-Dyna Materialmodell MAT\_120\_JC implementiert:

$$\varepsilon_f = \left[ D_1 + D_2 \exp\left( D_3 \frac{\sigma_H}{\sigma_M} \right) \right] (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}) \Lambda. \quad (3)$$

$D_1$ ,  $D_2$  und  $D_3$  sind Parameter mit denen das Modell an gemessene Bruchdehnungen bei bekannten Spannungsmehrachsigkeiten angepasst werden kann. Mit  $D_4$  kann die Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Dehnrage berücksichtigt werden. Mithilfe des Parameters  $\Lambda$  geht die verwendete Elementkantenlänge im FE-Simulationsmodell in das Versagensmodell ein. Das ist notwendig, weil die Lokalisierung der Verformung mit großen Elementen nicht simuliert werden kann. Beispielsweise kann eine Verformungsllokalisierung in der Größenordnung von 1 mm mit Elementen mit 5 mm Elementkantenlänge nicht abgebildet werden.

Gibt man im Versagensmodell die gemessene lokale Bruchdehnung als Versagenskriterium an, kann das bei großen Elementkantenlängen zu unzulässig großen Verformungen in der Simulation führen. Daher sollte die Bruchdehnung in der Simulation abhängig von der Elementkantenlänge angegeben werden.

Das Modell von Johnson&Cook wurde für metallische Werkstoffe ausgewählt weil es vergleichsweise einfach zu bestücken ist, in FE-Crashcodes zum Teil standardmäßig implementiert ist und in der Lage ist die relevanten Versagensfälle für dünnwandige metallische Bauteile zu beschreiben.

Um die Modellparameter zu ermitteln, ist es notwendig Versuche durchzuführen mit denen Bruchdehnungen bei bekannten Spannungsmehrachsigkeiten ermittelt werden können. In dieser Arbeit wurden für die Ermittlung der Modellparameter der einachsige Zugversuch, der auch zur Aufnahme der Fließkurve herangezogen wird, und der doppelt gekerbte Scherversuch (Bild 6) ausgewählt.

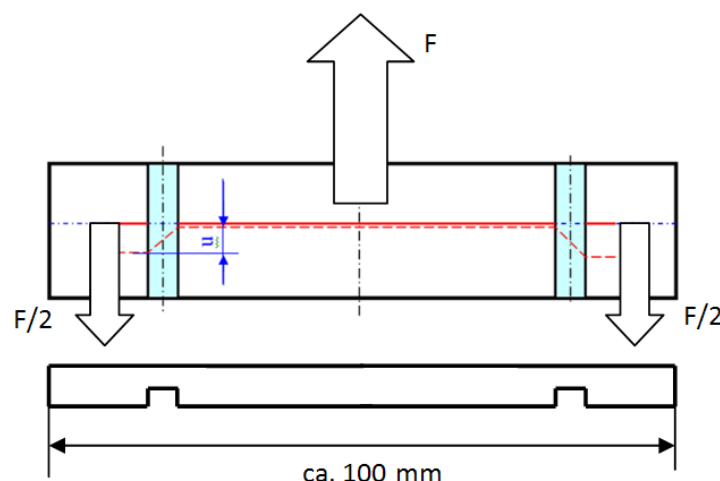


Bild 6: Doppelgekembter Scherversuch (schematisch)

Im Scherversuch ist die Spannungsmehrachsigkeit ca. null. Im einachsigen Zugversuch ist Spannungsmehrachsigkeit während der Gleichmaßdehnung 1/3 und steigt im Zuge der Einschnürung an. Dünnwandige metallische Strukturbauteile, wie sie im Fahrzeugbau eingesetzt werden, versagen im Crashfall bei Spannungsmehrachsigkeiten wie sie auch im Zug- bzw. im Scherversuch auftreten.

Das sind in der Regel Zug- bzw. kombinierte Zug-Biegebelastungen. Das parametrisierte Versagensmodell ist daher in der Lage die für die numerische Crashsimulation relevanten Versagensformen zu beschreiben. Die Bruchdehnung kann in beiden Versuchen direkt gemessen werden. Im einachsigen Zugversuch kann der Wert  $\ln(A_0/A_f)$  mit dem Ausgangsquerschnitt  $A_0$  und der Bruchfläche  $A_f$  als konservativer Wert für die Vergleichsdehnung beim Bruch verwendet werden [18]. Im Scherversuch wird die Bruchdehnung mithilfe des Scherwinkels und der Verschiebung  $u$  bestimmt (Bild 6). Mithilfe der gemessenen Bruchdehnungen wird durch Optimierung der Parameter  $D_1$ ,  $D_2$  und  $D_3$  das Versagensmodell von Johnson&Cook angepasst. Durch Simulationen des einachsigen Zugversuchs mit unterschiedlicher Netzfeinheit werden die Bruchdehnungen für unterschiedliche Elementkantenlängen ermittelt (Bild 7).

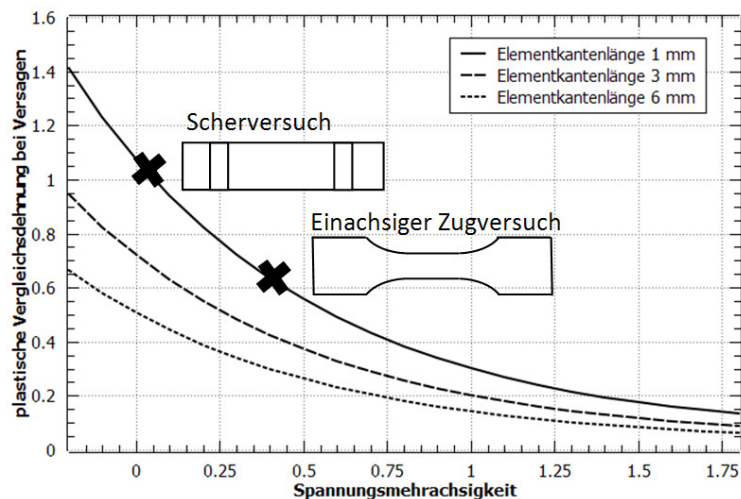


Bild 7: Beispiel für die Abhängigkeit der Vergleichsdehnung bei Versagen von der Spannungsmehrschichtigkeit und der Elementkantenlänge im Simulationsmodell nach dem Versagensmodell von Johnson Cook.

Die vorgestellten Methoden werden im nächsten Abschnitt exemplarisch anhand der Materialdatenermittlung eines borlegierten Stahlblechs und eines hochverformbaren Schaumstoffes, der als Energieabsorber in einem Fahrzeug Stoßfänger verbaut ist, demonstriert.

### 3 Beispiele der Materialdatenermittlung eines borlegierten Stahlblechs und eines energieabsorbierenden Schaumstoffes

#### 3.1 Materialdatenermittlung eines borlegierten Stahlblechs

Bei der Charakterisierung eines borlegierten Stahlblechs wurden die Materialproben für Zugversuche, Scherversuche und dynamische Biegeversuche aus einer warmumgeformten Fahrzeug-B-Säulenverstärkung entnommen. Durch die direkte Entnahme der Proben aus dem Bauteil können eventuelle Veränderungen des Werkstoffes, zu denen es während des Herstellungsprozesses gekommen ist (Kaltverfestigung, Wärmebehandlung, ...), bei der Materialcharakterisierung mitberücksichtigt werden.

Im einachsigen Zugversuch (nach DIN EN 10002-1) wurden E-Modul, Streckgrenze, Zugfestigkeit und die wahre Bruchdehnung gemessen. Die ermittelte Fließkurve wurde mit dem Extrapolationsmodell von Hockett&Sherby extrapoliert. Mithilfe des doppelt gekerbten Scherversuchs wurde die Bruchdehnung unter Scherbelastung gemessen.

Um die Dehnratenabhängigkeit des untersuchten Werkstoffes zu ermitteln, wurden im nächsten Schritt dynamische Biegeversuche mit der Pendelversuchsanlage durchgeführt. Durch die Minimierung der Differenz zwischen den Beschleunigungs-Zeit-Signalen aus den Versuchen und den entsprechenden Simulationen mit der Optimierungssoftware LS-OPT wurden die Dehnratenparameter nach Cowper&Symonds bestimmt.

Für die Ermittlung des Versagensverhaltens wurden die Versagensparameter nach Johnson&Cook mithilfe der gemessenen Bruchdehnungen aus dem einachsigen Zugversuch und dem Scherversuch herangezogen. Mithilfe eines Simulationsmodells des einachsigen Zugversuchs wurden die



Versagensparameter iterativ an die gemessenen Bruchdehnungen angepasst. Dieser Vorgang wurde mit unterschiedlichen Elementkantenlängen wiederholt, um den Einfluss der Elementkantenlänge auf das Versagen in der Simulation zu berücksichtigen.

Die ermittelten Materialdaten wurden anhand eines Prinzipversuchs validiert. Der Versuchsaufbau ist in Bild 8a abgebildet. In diesem 3-Punkt-Biegeversuch wurden die Stempelkraft und der Stempelweg bei quasistatischer Belastung gemessen. Durch die Einbringung einer Schwächung des Bauteils in Form einer Bohrung und eines Einschnitts, kommt es in diesem definierten Bereich mit zunehmender Belastung zum Versagen des Bauteils. Das Versuchssignal und das entsprechende Simulationsergebnis sind in Bild 8b dargestellt. Ohne Berücksichtigung des Versagens in der Simulation kann der Kraftabfall bei Versagen des Bauteils nicht simuliert werden. Erst durch die Berechnung mit dem Versagensmodell kann das Versuchsergebnis in der Simulation abgebildet werden.

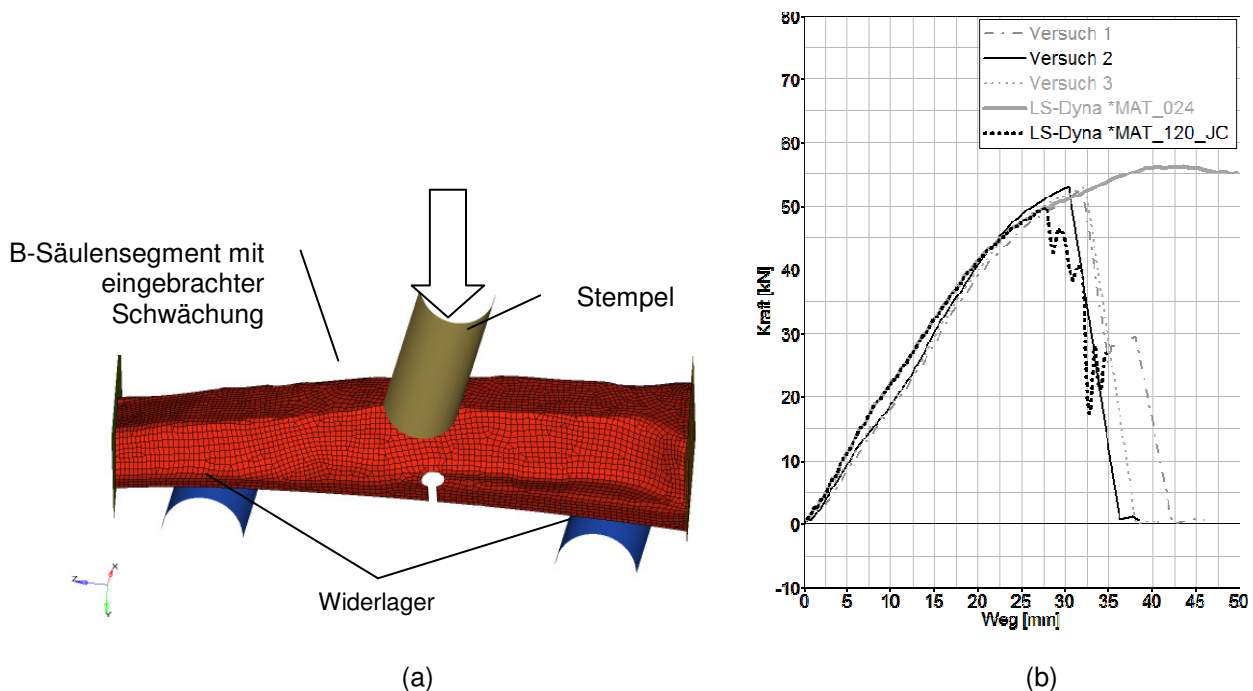


Bild 8: (a) Simulationsmodell des 3-Punkt-Biegeversuchs mit einem Segment aus einer warmumgeformten B-Säulenverstärkung, (b) Kraft-Weg-Signal des Versuchs- und Simulationsergebnis mit und ohne Versagensmodellierung

### 3.2 Materialdatenermittlung eines energieabsorbierenden Schaumstoffes

In einer weiteren Untersuchung wurden die Materialeigenschaften eines Schaumstoffes untersucht. Im Automobilbau wird dieser Werkstoff als Energieabsorber im Stoßfänger eingesetzt. Das quasistatische Verformungsverhalten wurde mit einem quasistatischen Druckversuch ermittelt. Die Dehnratenabhängigkeit wurde mit dynamischen Druckversuchen, die mit der Pendelversuchsanlage durchgeführt wurden, ermittelt. Die Validierung der Materialdaten erfolgte in einem Prinzipversuch in dem ein halbkugelförmiger Körper mit einer Masse von 500 kg mit 4 m/s auf einen quadratischen Schaumblock mit einer Seitenlänge von 140 mm aufprallt. Der Versuchsaufbau ist in Bild 9a dargestellt. Verglichen wurden die Weg-Zeit-Signale aus dem Prinzipversuch und der entsprechenden Simulation mit und ohne Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit (MAT\_057 bzw. MAT\_083 in LS-Dyna). Die Ergebnisse aus Versuch und Simulation sind in Bild 9c gegenübergestellt. Bei der Simulation mit der quasistatisch gemessenen Spannungs-Dehnungskurve kann die erhöhte Steifigkeit des Werkstoffes bei dynamischer Belastung nicht abgebildet werden. Erst durch die Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit konnte das Verformungsverhalten ausreichend genau simuliert werden.

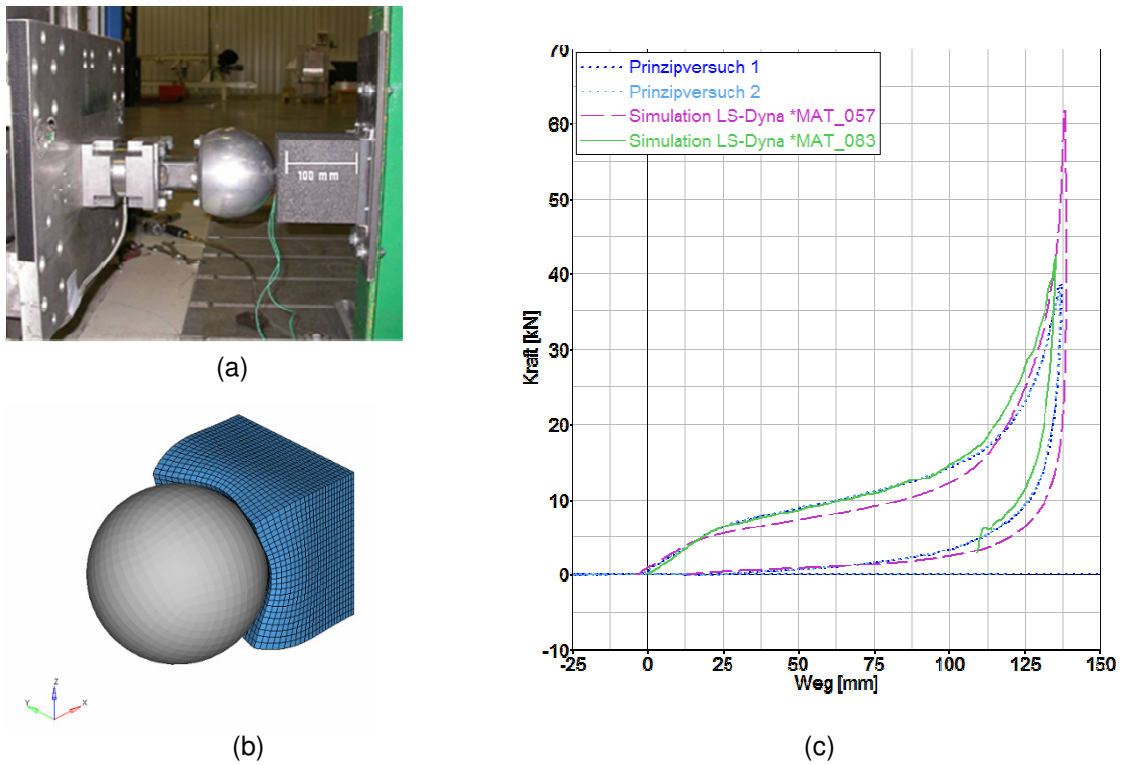


Bild 9: (a) Versuchsanordnung, (b) Simulationsmodell und (c) Kraft-Weg-Signal aus Versuch und Simulation mit und ohne Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit (\*MAT\_083 bzw. \*MAT\_057)

#### 4 Materialdatenermittlungsprozess

Die erarbeitete Vorgehensweise bei der Charakterisierung von Werkstoffen für die Crashsimulation wurde standardisiert. Arbeitspakete wie die Berechnung der Fließkurve aus der gemessenen Kraft-Weg-Kurve des Zugversuchs, die Fließkurvenextrapolation, die Erstellung des 3-Punkt-Biegeversuch-Simulationsmodells oder das Aufsetzen der Optimierungsprozedur zur Ermittlung der Dehnratenparameter wurden automatisiert. Das Ergebnis ist der in Bild 10 skizzierte Materialdatenermittlungsprozess.

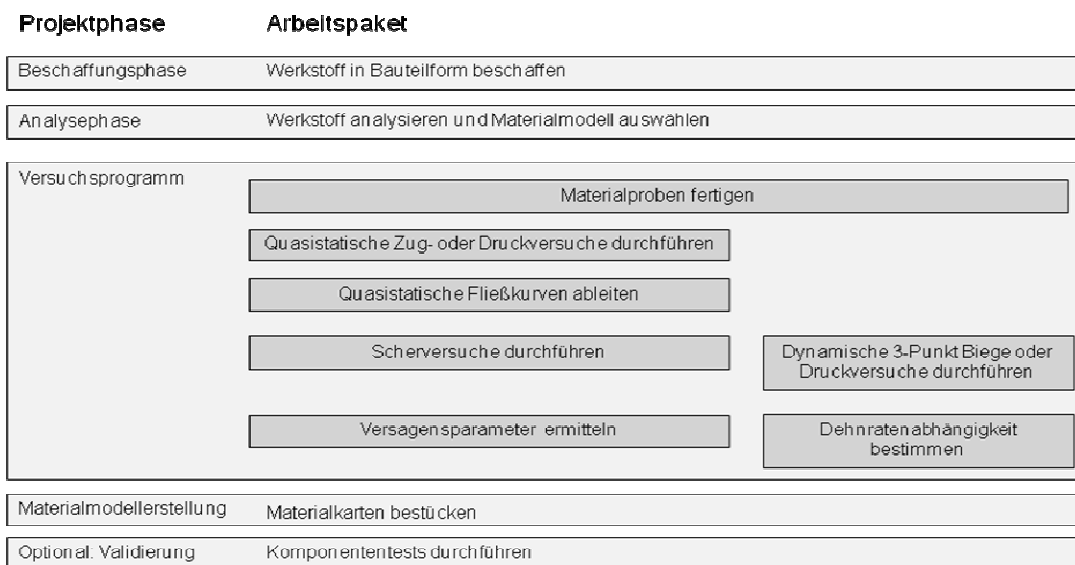


Bild 10: Arbeitspakete des standardisierten Materialdatenermittlungsprozesses

## 5 Zusammenfassung

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit und des Versagensverhaltens einen wesentlichen Einfluss auf die Prognosefähigkeit numerischer Simulationsmodelle in der Crashberechnung haben. Die Ermittlung der Dehnratenabhängigkeit mit der neuartigen Pendelversuchsanlage hat sich als zielführend erwiesen. Das Versagensmodell von Johnson&Cook, das mit den Ergebnissen aus dem quasistatischen einachsigen Zugversuch und dem Scherversuch bestückt wurde, beschreibt das Versagen metallischer Werkstoffe im Crashfall hinreichend genau. Der erarbeitete Materialdatenermittlungsprozess ermöglicht es einem Fahrzeughersteller in der Konzeptphase schnell und effizient Materialdaten für die Crashsimulation zu generieren. Voraussetzung hierfür ist die Existenz des entsprechenden Bauteils aus denen Materialproben für die notwendigen Versuche gefertigt werden können.

## 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern "Kplus Kompetenzzentren-Programm" des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), Land Steiermark und steirische Wirtschaftsförderung (SFG) für deren finanzielle Unterstützung. Ausserdem bedanken sich die Autoren bei den Unternehmen und Projektpartnern MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & CO KG und Technische Universität Graz.

## 7 Literatur

- [1] Gese, H.; Werner, H.: "Zur Bedeutung dehnratenabhängiger Werkstoffkennwerte in der Crashsimulation", in A. Frenz, & A. Wehrstedt: "*Kennwertermittlung für die Praxis*". 2002
- [2] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: "*Werkstoffkunde*", 6.Auflage, 1999, S.91 ff
- [3] Livermore Software Technology Corporation (LSTC): "LS-Dyna<sup>®</sup> Keyword Users Manual Version 971", Volume I, 2007, S. 110 (MAT)
- [4] Thoma, K.; Junginger, M.: "Messung mechanischer Kennwerte im Bereich hoher und höchster Dehnraten", in A. Frenz, & A. Wehrstedt: "*Kennwertermittlung für die Praxis*". 2002
- [5] Bleck, W.; Frehn, A.; Larour, P.; Steinbeck, G.: "Untersuchungen zur Ermittlung der Dehnratenabhängigkeit von modernen Karosseriestählen", *Mat.-wiss u. Werkstofftech.* 35 No.8, 2004
- [6] Wierzbicki, T.; Bao, Y.; Lee, Y.-W.; Bai, Y.: "Calibration and evaluation of seven fracture models", *International Journal of Mechanical Sciences*, 47 , 2005, S. 719-743
- [7] Cockroft, M. G.; Latham, D. J.: "Ductility and the Workability of Metals", *Journal of the Institut of Metals*, 96 , 1968, S. 33-39
- [8] Gurson, A.: "Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I Yield criteria and flow rules for porous ductile media", *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 99 , S. 2-15
- [9] Tvergaard, V.: "Influence of void nucleation on ductile shear fracture at a free surface", *Journal of the Mechanics and and Physics of Solids*, 30(6), 1982, S. 329-425
- [10] Chae, D.; Koss, D.: "Damage accumulation and failure of HSLA-100 steel", *Materials Science and Engineering A366*, 2004, S. 299-309
- [11] Trattinig, G.; Antretter, T.; Pippan, R.: "Fracture of austenitic steel subject to a wide range of stress triaxiality ratios and crack deformation modes", *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 2008, S. 223-235
-

- [12] Cowper, G.; Symonds, P.: "Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams", *Brown Univ. Applied Mathematics Report*, 1958
- [13] Johnson, G. R.; Cook, W. H.: "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures", *Engineering Fracture Mechanics Vol. 21 No.1*, 1985, S. 31-48
- [14] Johnson, G.; Cook, W.: "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures", *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands*, 1983, S. 541-547
- [15] Gese, H.; Keller, S.; Yeliseyev, V.; Dell, H.: "Ermittlung von Fließwiderstandskurven bei großen Formänderungen für die Blechumformsimulation", in A. Frenz, & A. Wehrstedt: "Kennwertermittlung für die Praxis". 2002
- [16] Livermore Software Technology Corporation (LSTC): "LS-OPT User's Manual Version 3.1.", August 2006
- [17] Winklhofer, J.; Lind, C.; Schluder, H.: "Optimization Methodology in Structural Mechanics - Comparison of LS-OPT and Hyperstudy". 4. *LS-Dyna Anwenderforum, Bamberg*, 2005
- [18] Ling, Y.: "Uniaxial True Stress-Strain after Necking", *AMP Journal of Technology*, 5 , 1996, S. 37-47