

# Validierung von dehnratenabhängigem Schaummaterial für verschiedene Temperaturen

**Autoren:**

Jochen Uftring, Dipl.-Ing., Siemens Restraint Systems GmbH  
Gerd Scholpp, Dipl.-Ing., Siemens Restraint Systems GmbH

**Kontakt:**

Jochen Uftring  
Siemens Restraint Systems GmbH  
Carl-Zeiss-Straße 9  
D-63755 Alzenau

Tel.: +49 – (0) 6023 – 942-143  
Fax.: +49 – (0) 6023 – 942-133  
e-mail: jochen.uftring@siemens.com

**Abstract:**

In order to design pedestrian protection systems with the aid of numerical simulation, an exact depiction of materials used in the front end of vehicles is necessary. Materials used are simulated according to law at room temperature for the passive pedestrian protection design only.

Active pedestrian protection systems, e.g. systems with an active bonnet, work partly with contact sensors which are built into the front end and are not visible from the outside. The effectiveness of the contact sensors depends on for example the determining of pressure, intrusion, acceleration, deformation etc.. The sensor signals and their strengths depend above all on the stiffness of the components built into the front end. Material simulation needs to be carried out at varying operating temperatures of the vehicle because the strength of plastic material is in turn strongly affected by its temperature.

The material from type \*MAT\_083 (\*MAT\_FU\_CHANG\_FOAM) in LS-DYNA depicts strain rate dependent foams (e.g. EPS, EPP etc.), and how they are generally used with bumper foam. There are various approaches with varying test methods in order to generate a material card. One approach for the determining of material behaviour involves quasistatic pressure tests and dynamic tests for various strain rates on the drop tower. The force travel curves determined and the acceleration travel curves respectively are entered directly into the card after a processing phase as tension-strain curves for various strain rates.

The following paper discusses an efficient methodology from testing and generation through to material card verification for various temperatures in addition to the approach and problems which occur and their solutions.

**Keywords:**

Fußgängerschutz; Schaummaterial; Schaumvalidierung; Kontaktsensorik; Temperaturverhalten; Dehnratenabhängigkeit; pedestrian protection; foam material; foam validation; contact sensor; temperature behaviour; strain rate dependency; MAT\_083; MAT\_FU\_CHANG\_FOAM

## 1 Einleitung

Für die Entwicklung von Fußgängerschutzsystemen mit Hilfe der numerischen Simulation ist eine genaue Darstellung der im Frontend von Fahrzeugen verbauten Materialien erforderlich. Für die passive Fußgängerschutz-Auslegung von Fahrzeugen werden die verbauten Materialien nach Gesetz nur für Raumtemperatur simuliert.

Aktive Fußgängerschutzsysteme, z.B. Systeme mit einer aktiven Motorhaube, arbeiten zum Teil mit Kontaktsensoren, die im Frontend, von außen nicht sichtbar, verbaut sind. Die Wirkungsweisen der Kontaktsensoren beruhen beispielsweise auf der Ermittlung von Drücken, Eindringungen, Beschleunigungen, Deformationen, etc. Die Sensorsignale und deren Stärke hängen vor allem von den Steifigkeiten der verbauten Komponenten im Frontend ab. Die Steifigkeit von Kunststoffmaterialien ist wiederum stark von deren Temperatur abhängig, was die Simulation der Materialien bei verschiedenen Betriebstemperaturen des Fahrzeugs erforderlich macht.

Das Material vom Typ \*MAT\_083 (\*MAT\_FU\_CHANG\_FOAM) in LS-DYNA dient zur Darstellung von dehnratenabhängigen Schäumen (z.B. EPP, EPS, etc.), wie sie in der Regel bei Pralldämpfern Verwendung finden. Für die Erstellung der Materialkarten gibt es verschiedene Ansätze mit unterschiedlichen Testmethoden. Ein Ansatz für die Ermittlung des Materialverhaltens sieht vor, dass quasistatische Drücktests und dynamische Tests für verschiedene Dehnraten am Fallturm durchgeführt werden. Die ermittelten Kraft-Weg-Verläufe, bzw. Beschleunigungs-Weg-Verläufe werden nach einer Aufbereitungsphase als Spannungs-Dehnungs-Kurven für verschiedene Dehnraten direkt in die Materialkarte eingetragen.

Im vorliegenden Paper wird eine effiziente Vorgehensweise von Materialtests über die Erstellung bis hin zur Verifikation der Materialkarten für verschiedene Stütztemperaturen vorgestellt und das Vorgehen, sowie auftretende Probleme und deren Lösungen erläutert.

## 2 Teilreversible Schaummaterialien und deren Darstellung in LS-DYNA

Teilreversible Schaummaterialien mit mittlerer, bzw. niedriger Dichte (z.B. EPP), wie sie beispielsweise als Pralldämpfer im Fußgängerschutz Verwendung finden, bestehen in der Regel zu maximal 10% aus Kunststoffmaterial, das Gasbläschen und Hohlräume umgibt. Während einer dynamischen Beanspruchung laufen verschiedene mechanische, thermodynamische und u. U. auch lokale chemische Prozesse ab, die dem Berechnungsingenieur im Regelfall nicht bekannt sind. Es ist in jedem Falle anzunehmen, dass bei starken und schnellen Kompressionen ein hohes Maß an Energie in Form von Wärme im Schaum umgesetzt wird.

Für die numerische Simulation der Schaumwerkstoffe ist die genaue Kenntnis dieser Vorgänge von untergeordneter Bedeutung. Im Wesentlichen werden die mechanischen Eigenschaften abgebildet, die in Form eines dehnratenabhängigen Materialmodells in LS-DYNA formuliert werden können. Für das Material vom Typ \*MAT\_083 kann eine Familie von mehreren Spannungs-Dehnungs-Kurven für verschiedene Dehnraten definiert werden [2].

Spannungs-Dehnungs-Kurven für EPP-Schäume sind in ihrer Charakteristik in drei Bereiche aufgeteilt: Elastischer Bereich, Plateaubereich und Kompressionsbereich (Siehe Abbildung 1). Für das Materialmodell \*MAT\_083 sind Druckspannungen als wahre Spannungen mit positivem Vorzeichen definiert [1]. Das Schaummaterial zeigt bei Entlastung aufgrund einer hohen Energieabsorption ein deutliches Hystereseverhalten [3].

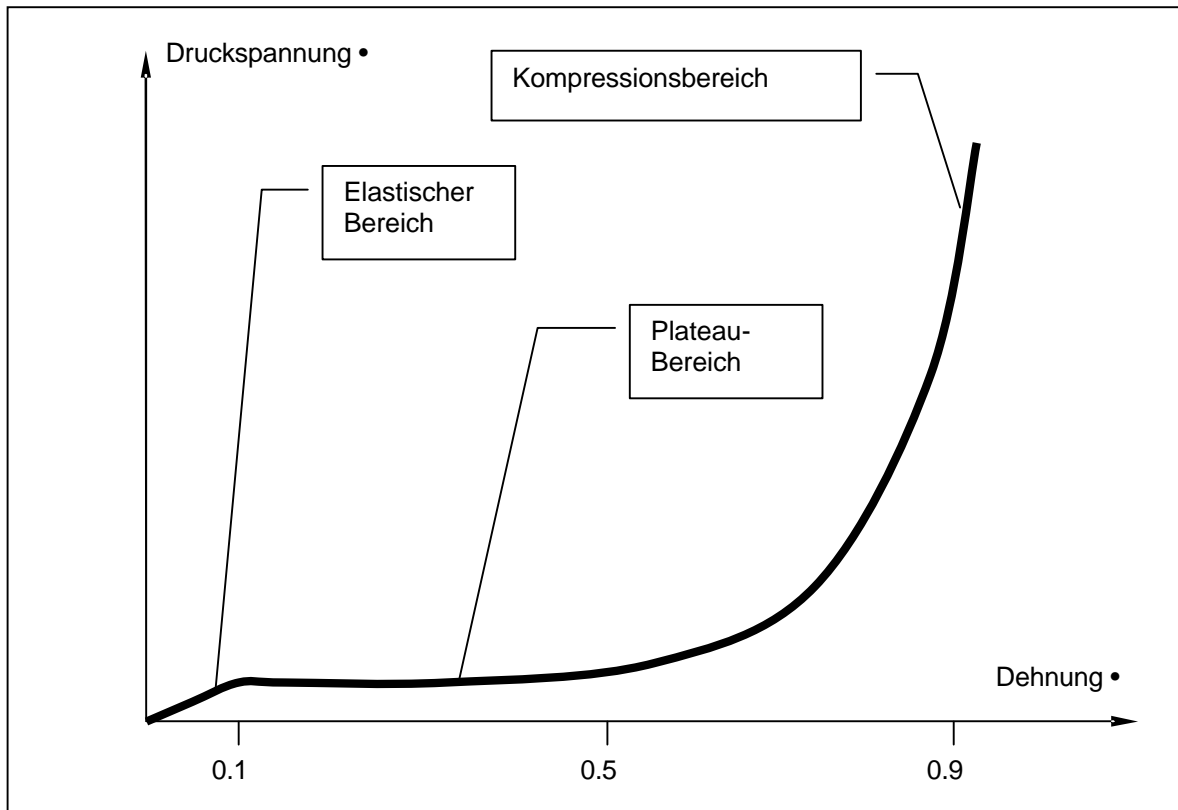


Abbildung 1: Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurve für EPP-Schäume (Belastungskurve)

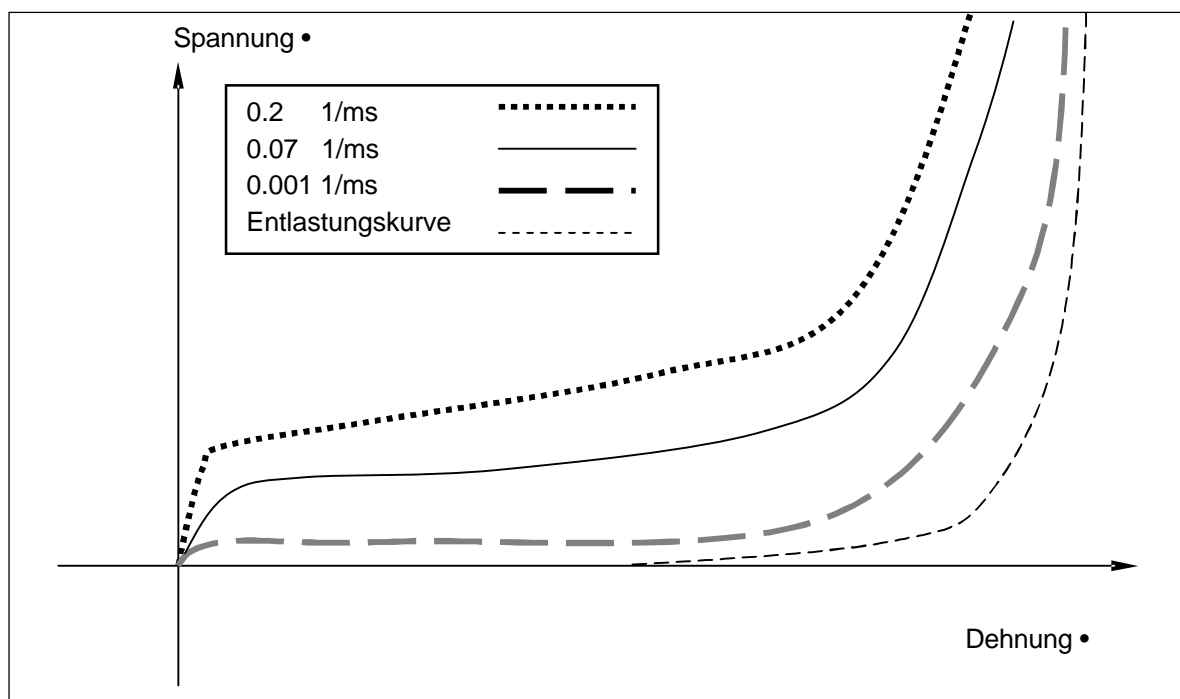


Abbildung 2: Beispiel für eine Familie von Spannungs-Dehnungs-Kurven für das Materialmodell \*MAT\_083 in LS-DYNA

In der Regel besteht eine Kurvenfamilie im Materialmodell \*MAT\_083 aus einer quasistatischen Kurve, 2 bis 4 dynamischen Kurven und einer Entlastungskurve, die als Table (\*DEFINE\_TABLE) in die Materialkarte geschrieben werden (siehe Abbildung 2) [1].

Aus Sicht der Simulation muss die numerische Stabilität des Modells gewährleistet sein. Hierzu ist eine sorgfältig und sauber aufgebaute Materialkarte unerlässlich. Für den Modellaufbau eignen sich Tetraeder und Hexaeder sehr gut für die Vernetzung.

Ferner ist zu beachten, dass aus fertigungstechnischen Gründen globale und lokale Abweichungen in der Dichte und Materialstreuungen auftreten können. Dichtefehler sind in der Regel unvermeidbar und zufällig. Sie entstehen beim Aufschäumen des Materials (das Granulat wird in eine Form geschüttet, expandiert unter Einwirkung von heißem Wasserdampf unter Druck und füllt die Form aus [1]). Die Materialstreuungen sind sowohl bei der Validierung, als auch bei der Beurteilung der Simulationsergebnisse zu beachten. Daher sind insbesondere für dynamische Prüfungen jeweils 5 oder mehr Wiederholungen vorzusehen.

### 3 Materialprüfungen

Für die fußgängerschutzgerechte Auslegung der Fahrzeugfront wurde eine Untersuchung zur Validierung von Materialkarten für EPP-Schaummaterial mit einem Raumgewicht von ca. 28g/l für verschiedene Temperaturen durchgeführt. In der Sensorentwicklung für den Fußgängerschutz soll als Beispiel der Temperaturbereich zwischen -40°C und 80°C abgedeckt werden. Dies geschieht repräsentativ durch 5 Stützstellen (-40°C, -10°C, 20°C, 60°C und 80°C). Zur Ermittlung der Materialdaten werden quasistatische Druckversuche und Fallturmtests durchgeführt. Zur Gewinnung ausreichender Datenmengen aus den Fallturmtests ist eine optimale Auslastung der Testmaschine erforderlich. Die Testkonfigurationen für den Fallturm sind im Vorfeld durch Vorsimulationen mit abgeschätzten Parametern abzustimmen.

#### 3.1 Quasistatische Versuche

Zur Erstellung der Spannungs-Dehnungs-Kurven wurden jeweils 3 quasistatische Druckversuche (Verfahrgeschwindigkeit 5mm/min) zur Ermittlung der quasistatischen Belastungskurven und der Entlastungskurve mit einer Schaumwürfelprobe in einer Klimakammer durchgeführt. Vor Prüfbeginn lagerten die Proben mindestens 24 Stunden im Normklima nach DIN 50 014. Die Ermittlung dieser Kurven anhand von temperierten Proben außerhalb einer Klimakammer ist wegen der Temperaturanpassung des Materials an die Umgebung durch lange Versuchsdauern bei geringer Verfahrgeschwindigkeit nicht zielführend.

In Abbildung 3 sind als Beispiel die ermittelten Kurven bei 80°C zu erkennen. Die maximale Kompression der Probekörper war im vorliegenden Fall, aufgrund des eingeschränkten Arbeitsbereichs der verwendeten Prüfmaschine, auf 80%, bzw. 90% Dehnung beschränkt. Durch Extrapolation mittels eines hyperbolischen Ansatzes und einem entsprechendem Exponenten, ausgehend von den Stützstellen bei 70% und 80% Dehnung, konnten die Kurven auf 98% Dehnung bei einer für die numerische Stabilität des Modells ausreichend hohen Spannung extrapoliert werden.

Die Entlastungskurven wurden ebenfalls mit dem hyperbolischen Ansatz extrapoliert und durch entsprechende Skalierung und Verschiebung, ausgehend von der maximalen Spannung und Dehnung der quasistatischen Belastungskurve, angepasst (siehe Abbildung 4). Es ist anzumerken, dass die Belastungshistorie und die Dehnratenabhängigkeit für Entlastungskurven im Materialmodell \*MAT\_083 nicht berücksichtigt werden.

Die Kraft-Weg – Verläufe wurden in Spannungs-Dehnungs-Kurven umgerechnet und die Materialkarte eingelesen. Die Tests wurden mit den ermittelten Kurven nachsimuliert und auf eine gute Abbildung und Stabilität hin überprüft.

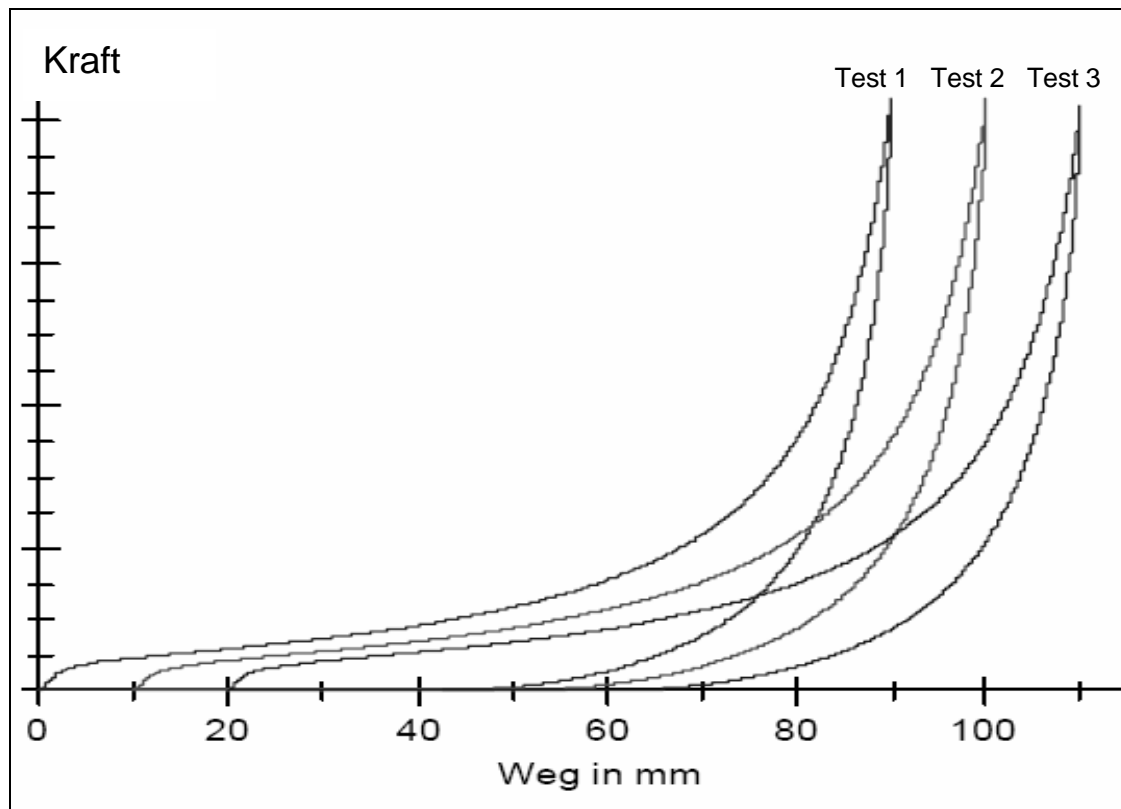


Abbildung 3: Kraft-Weg-Verläufe für quasistatische Be- und Entlastungen bei 80°C

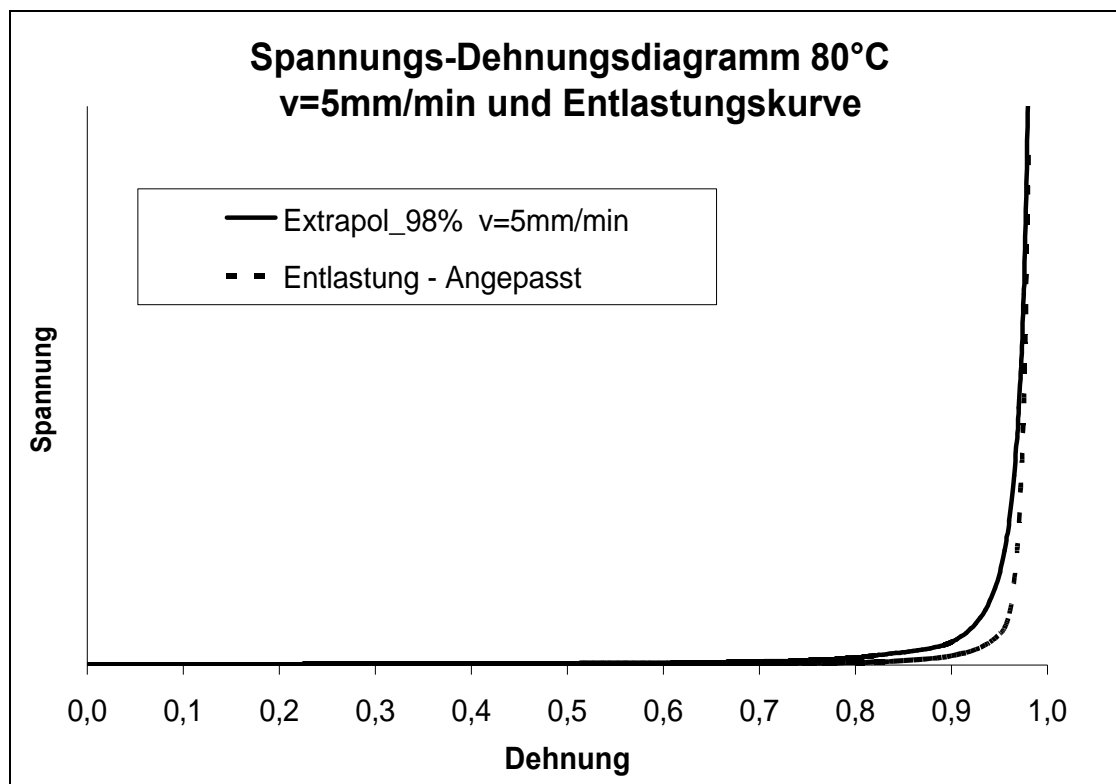


Abbildung 4: Extrapolierte Belastungs- und angepasste Entlastungskurve bei 80°C

### 3.2 Dynamische Fallturmversuche

Die dynamischen Tests wurden auf einem Fallturm mit geführtem Impaktor durchgeführt (siehe Abbildung 5). Als Impaktor diente eine ebene Platte, die mit der geführten Traverse verschraubt ist. Ein Fallturm verfügt als arbeitsgebundene Prüfmaschine nicht über die Möglichkeit, definierte Verformungswege, konstante Geschwindigkeiten und definierte Kräfte zu erzeugen. Der erforderliche Energieeintrag kann einzig über die Fallhöhe und die Masse des Impaktors eingestellt werden. Folgende Ziele wurden demnach im Vorfeld gesetzt:

- Auswahl eines möglichst großen Probekörpers unter Beachtung der Betriebsgrenzen der Prüfmaschine
- die gewünschte (Ingenieurs-) Dehnrate soll während des Impakts möglichst lange konstant bleiben
- der Probekörper soll möglichst stark (90% oder mehr) komprimiert werden
- die Grenzen der Messtechnik (z.B. Messung hoher Impaktorbeschleunigungen) müssen berücksichtigt werden

Für die Ermittlung der Versuchsrandbedingungen Fallhöhe und Fallgewicht sowie der Festlegung optimaler Abmessungen der Probekörper wurden entsprechende Vorsimulation mit einer vereinfachten Materialkarte vom Typ \*MAT\_LOW\_DENSITY\_FOAM (\*MAT\_057) durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein bekannter Spannungs-Dehnungs-Verlauf für dynamische Belastung bei Raumtemperatur auf die Niveaus der übrigen Temperaturen skaliert, um die entsprechenden Prüftemperaturen für die Vorsimulation hinreichend genau abzubilden. Anhaltspunkte für die Abschätzung der Skalierungsfaktoren wurden aus den quasistatischen Versuchen in 3.1 entnommen.

Für temperierte Versuchsproben wurde der Fallturm aufgrund der Abmessungen des Aufbaus nicht mittemperiert. Es wurde eine schnelle Bestückung des Fallturms mit den Proben direkt aus der Klimakammer (ca. 30-40s bis zum Versuchsbeginn) ermöglicht, um die Anpassung der Probekörpertemperatur an die Umgebung in Grenzen zu halten.

Als Messdatenaufnahme diente eine Filmauswertung mittels Targets für die Wegmessung und zusätzlich eine Messung der Impaktorverzögerung mit einem triaxialen Beschleunigungsaufnehmer (siehe Abbildung 6).

Die gewonnenen Kurven für Geschwindigkeit, Verschiebung und Beschleunigung wurden in Spannungs-Dehnungs-Kurven unter Angabe der ermittelten Ingenieursdehnraten umgerechnet. Die Kurven wurden gefiltert, um die hochfrequenten Anteile zu eliminieren. Werte im Kompressionsbereich, die nicht gemessen werden konnten (ca. 90-98% Dehnung) wurden durch eine Extrapolation mit einem hyperbolischen Ansatz auf das gewünschte Spannungs- und Dehnungsniveau erweitert. Die Kurven wurden mit den Parametern aus dem Versuch nachsimuliert und auf Stabilität und gute Abbildung hin überprüft.

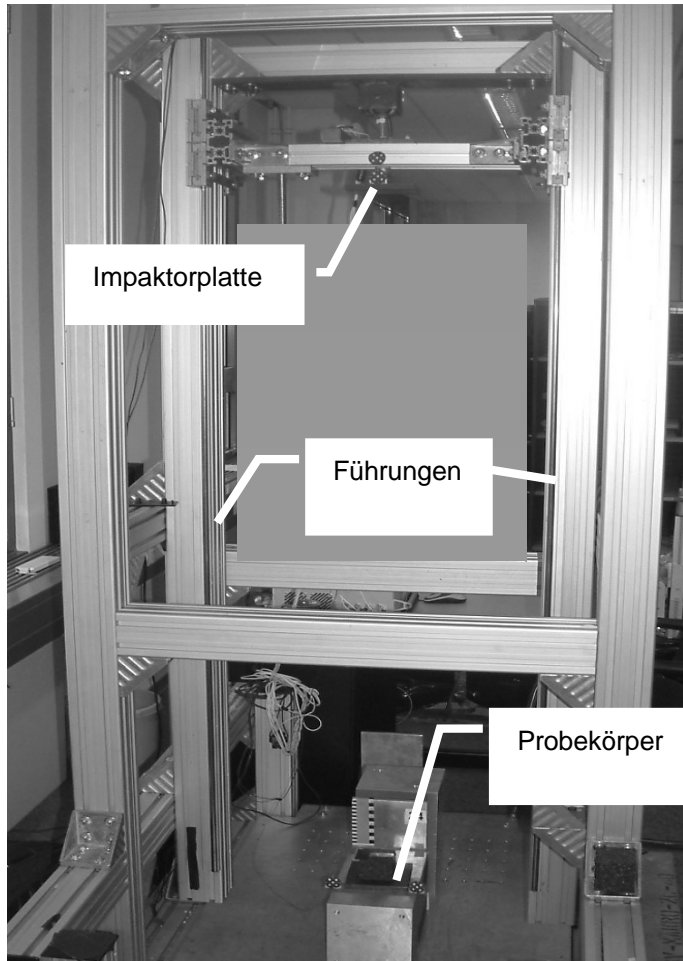


Abbildung 5: Fallturmprüfmaschine mit geführtem Impaktor

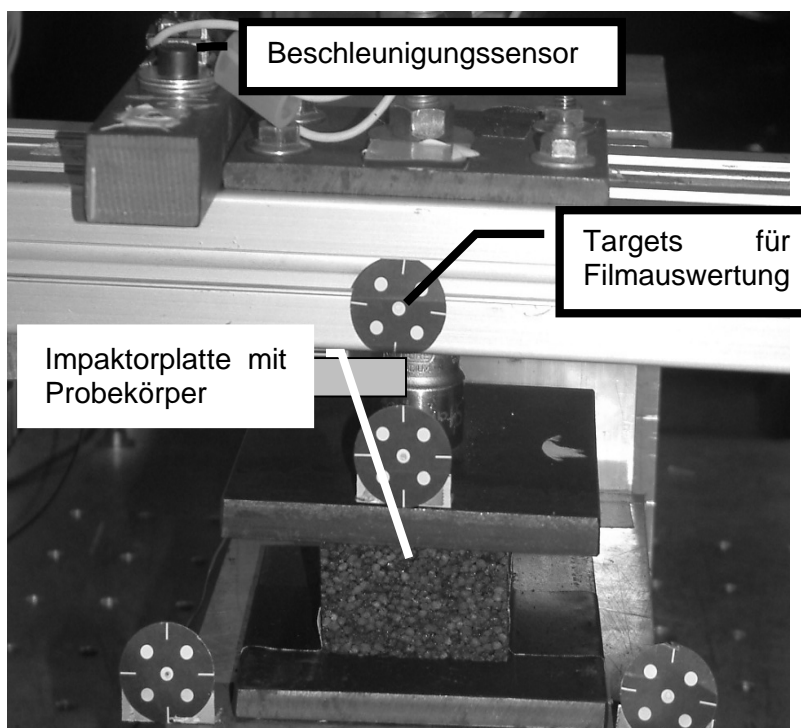


Abbildung 6: Bestückung des Impaktors: Targets für Filmauswertung und Beschleunigungssensor

#### 4 Aufbau der Materialkarten

Aus den Messdaten wurden für jede Temperaturstützstelle eine quasistatische Belastungs- und Entlastungskurve und drei dynamische Spannungs-Dehnungs-Kurven für die verschiedenen Ingenieursdehnraten errechnet und einzeln auf ihre Stabilität und Abbildung hin überprüft.

Bei der Zusammenführung der einzelnen Spannungs-Dehnungs-Kurven zeigten die dynamischen und statischen Kurven für die Temperaturen 20°C; 60°C und 80°C sehr gut harmonisierende Verläufe. In Abbildung 8 ist eine Familie von Spannungs-Dehnungs-Kurven dargestellt. Überschneidungen einzelner Kurven innerhalb einer Karte kann zu numerischen Instabilitäten führen [1]. Daher wurden die Kurven noch entsprechend manuell angepasst.

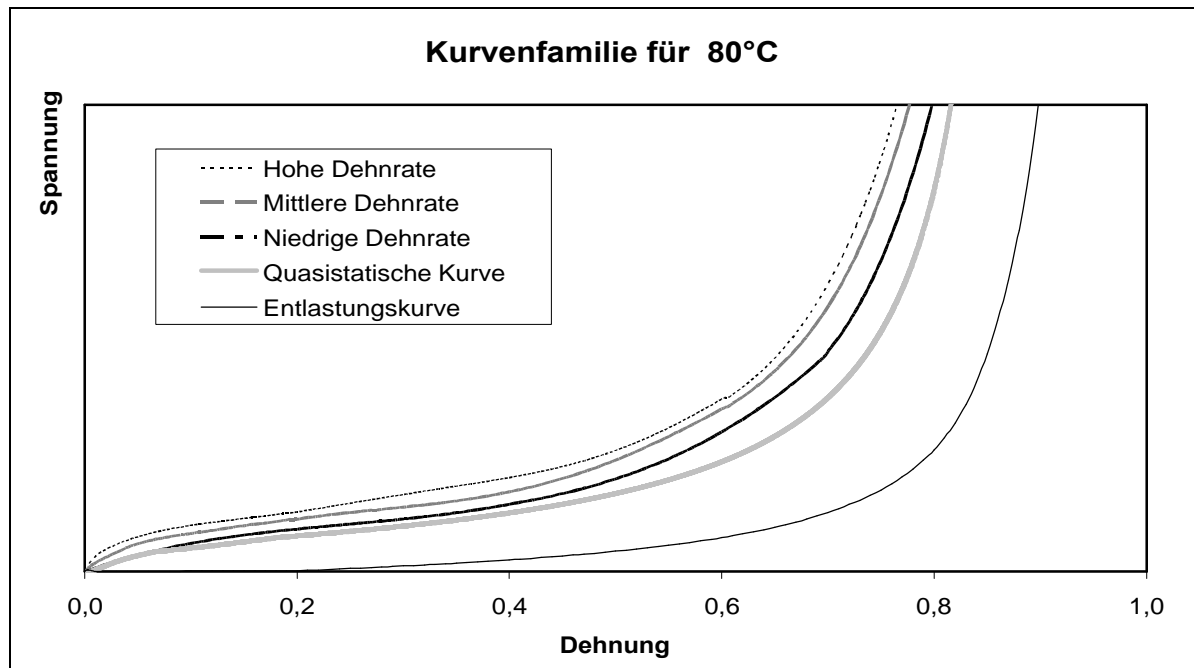


Abbildung 8: Spannungs-Dehnungs-Kurven für die ermittelten Dehnrates bei 80°C

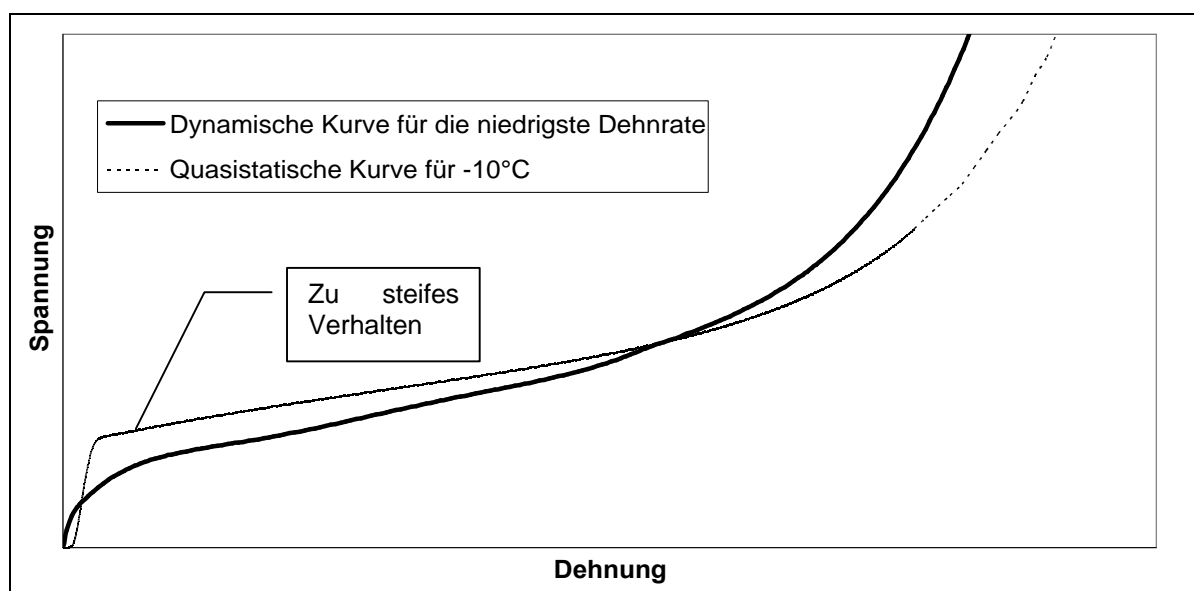


Abbildung 9: Vergleich von quasistatischer Messung zur Spannungs-Dehnungs-Kurve mit der niedrigsten Dehnrates bei -10°C



Bei den tiefen Temperaturen  $-10^{\circ}\text{C}$  und  $-40^{\circ}\text{C}$  zeigten die quasistatischen Kurven im elastischen Bereich und im Plateaubereich wider erwarten ein deutlich zu steifes Verhalten (siehe Abbildung 9). Ursache hierfür sind vermutlich die Bildung von Eiskristallen durch gefrorene Feuchtigkeit im Innern des Schaumes, die durch Kapillarwirkung von außen in den Schaum gelangen kann [3]. Die Proben und die darin enthaltene Feuchtigkeit werden bei quasistatischen Tests in der Klimakammer dauerhaft auf gefrorenem Niveau gehalten. Eine weitere Ursache kann das Rohmaterial selbst sein, das bei Abkühlung zwischen  $+20^{\circ}\text{C}$  und  $-10^{\circ}\text{C}$  eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit für quasistatische Lastfälle erfährt.

Bei dynamischen Versuchen wird Wärme umgesetzt, welche eine Eisbildung vermutlich in kurzer Zeit auflöst. Zu dem Zeitpunkt, bei dem die quasistatische Kurve numerisch zum Tragen kommt, im Bereich zwischen der Spannungs-Dehnungs-Kurve für die niedrigste dynamische Dehnrate und der quasistatischen Dehnrate, ist das Material in der Realität dann bereits so stark erwärmt, dass die quasistatische Kurve für den Fall des gefrorenen Materials keine Gültigkeit mehr besitzt.

Für die ordnungsgemäße Erstellung der Materialkarten für  $-40^{\circ}\text{C}$  und  $-10^{\circ}\text{C}$  mussten die quasistatischen Kurven jeweils auf ein sorgfältig abgeschätztes Niveau skaliert werden. Dabei musste insbesondere der elastische Bereich der quasistatischen Kurve per Hand angepasst werden, um die numerische Stabilität der Materialkarte sicherzustellen. Als hilfreich für die erforderlichen Modifikationen erwiesen sich die Erfahrungen aus der Validierung der Materialkarten für Temperaturen  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$  und  $80^{\circ}\text{C}$  und der Vergleich mit den nachfolgend behandelten Verifikationstests für die entsprechenden Temperaturen. Durch die Anpassung ist die Materialkarte für die gewünschten Anwendungen im Fußgängerschutz geeignet. Hier liegen lastfallbedingt ausreichend hohe Anfangsdehnraten vor.

## 5 Verifikation der Ergebnisse

Für die Verifikation der gewonnenen Materialkarten für verschiedene Temperaturen wurden Fallturmversuche mit einem geführten und starren runden Stahlimpaktor mit dem Durchmesser 76mm auf einen rechteckigen Schaumklotz durchgeführt. Dieser Lastfall gewährleistet durch die zylindrische Impaktorgeometrie das Auftreten des nahezu gesamten Dehnratenbereichs der Materialkarte an verschiedenen Stellen des Schaumbauteils in verschiedenen Kompressionszuständen der Elemente und ist in seiner Form ähnlich dem Beinanprall gegen den Stoßfänger mit einem Lower Leg-Impaktor für den Fußgängerschutz.

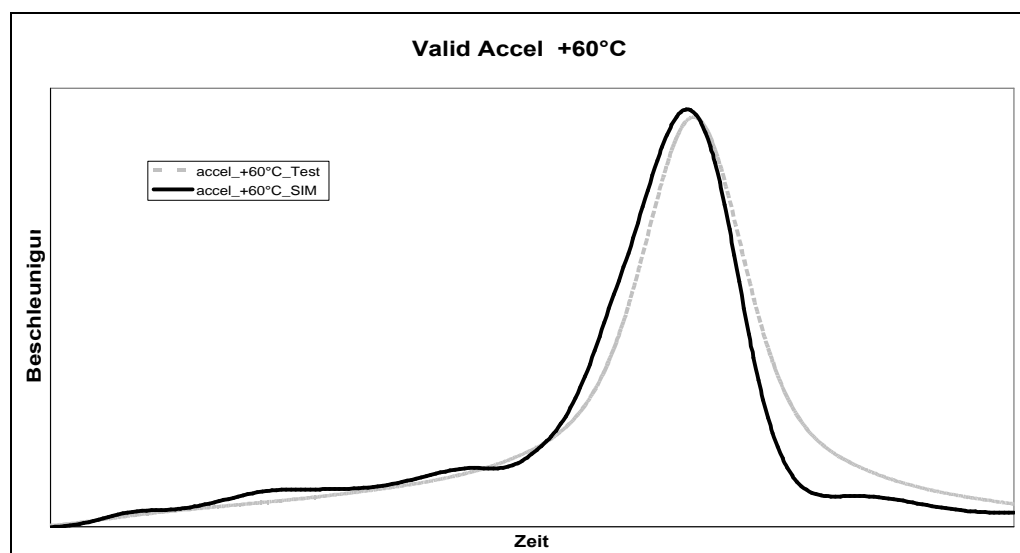


Abbildung 10: Verifikation der Materialkarte durch Poleimpaktor-Versuch und Abgleich mit der Simulation

Für die Verifikationsversuche wurde der undeformierbare Stahlimpaktor gewählt, da der Lower Leg-Impaktor durch den umgebenden Confor-Schaum und die Neoprenhaut deformierbar ist. Für den Versuch soll nur die Schaumeigenschaft für den EPP-Schaum geprüft werden.

Durch die Versuche konnte im Vergleich mit der Simulation die Richtigkeit und Funktionalität der Materialkarten für die Temperaturen 20°C, 60°C und 80°C direkt nachgewiesen werden (siehe Abbildung 10). Für die Temperaturen -10°C und -40°C dienten die Versuche dem Abgleich der quasistatischen Kurvenverläufe.

## 6 Zusammenfassung

Die Validierung von Schaummaterial für verschiedene Temperaturen für \*MAT\_083 bei verschiedenen Temperaturen ist durch Anwendung quasistatischer Drücktests und dynamischer Fallturmtests mit einem geführten Impaktor auf schnelle und effiziente Art und Weise möglich. In der Simulation der erstellten Materialkarten zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen mit Verifikationsversuchen.

Die Materialkarten für verschiedene Temperaturen eignen sich hervorragend für Lastfälle im Bereich Fußgängerschutz und die Simulation von Sensoren am und im Pralldämpfer für aktive Systeme im Fußgängerschutz. Durch die Dehnratenabhängigkeit der Materialkarten können stark unterschiedliche Impaktor- und Objektgeometrien über einen weiten Geschwindigkeitsbereich simuliert werden.

Vor Beginn der Fallturmtests müssen die entsprechenden Fallgewichte und Fallhöhen, sowie die Probekörpergröße definiert werden. Hierzu sind Simulationen auf Basis von Erfahrungswerten oder Abschätzungen nötig, um den Arbeitsbereich der Maschine und der Messtechnik voll ausnutzen zu können.

Alle Tests können aufgrund mechanischer Grenzen der Prüfmittel immer nur einen bestimmten Bereich für die messbaren Spannungen und Dehnungen abdecken, was eine Extrapolation der gemessenen Kurven erforderlich macht. Die Festlegung der Parameter für die Extrapolation ist entscheidend für die Richtigkeit und die numerische Stabilität der erzeugten Materialkarten.

Bei der Darstellung der quasistatischen Kurven für die Temperaturen -10°C und -40°C ergaben sich in der vorliegenden Untersuchung im Vergleich zu den dynamischen Kurvenverläufen deutliche Unstimmigkeiten, die auf Gefriereffekte in den Probekörpern zurückzuführen sind. Die Kurvenverläufe für quasistatische Lastfälle müssen entsprechend angepasst werden, was nur unter Berücksichtigung von Verifikationstests möglich ist. Hierzu ist ein gewisses Maß an Erfahrung erforderlich.

Für zukünftige Untersuchungen muss das Problem der quasistatischen Kurven bei den Temperaturen -10°C und -40°C beseitigt werden, um bereits in der Testphase direkt verwendbare Kurven für alle Materialkarten zu erhalten, wie es auch bei höheren Temperaturen der Fall ist. Im Weiteren könnten die dynamischen Kurven aller Materialkarten auf identische Dehnratenwerte gebracht werden, beispielsweise über ein Curve-Fitting, um Materialkarten für Temperaturen zwischen den geprüften Stützstellen durch Interpolation generieren zu können. Ein weiterer Aspekt ist die Einbringung von Zugkurven in die Materialkarten und auch Kriterien für Versagen.

Die Materialkarte selbst besitzt nur eine Kurve für das Entlastungsverhalten des Schaumwerkstoffs. Hier sollte im Material \*MAT\_083 noch die Belastungshistorie in das Entlastungsverhalten definiert werden können.

## 7 Literatur

- [1] DuBois P. : Simulation von Schaumwerkstoffen, EASi-TechSeminar Oktober 2004
- [2] LS-DYNA: Keyword User's Manual, Version 970 April 2003
- [3] Oberbach K.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 28.Ausgabe 2001, ISBN 3-446-21605-7