

Verfahren zur Ermittlung von Materialkennwerten polymerer Schäume für die Crash-Simulation

Diplomarbeit

von

Martin Reiter

erstellt am

**Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe
an der Montanuniversität Leoben**



Betreuung: Dipl.-Ing. Dr. mont Zoltan Major

Begutachtung: O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont Reinhold W. Lang

Leoben, März 2007

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle der Fa. CW Concept Consulting GmbH (Gratkorn, A), insbesondere dem Betriebsleiter, Herrn Dipl.-Ing. Christoph Knotz, für seinen Einsatz und das Zustandekommen dieser Arbeit meinen Dank aussprechen. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Ferdinand Schwinger und Dipl.-Ing. Dr. Gernot Pauer, die durch wertvolle Anregungen und technisch kreative Diskussionen bei der praktischen Umsetzung und dem Gelingen des Projekts maßgebenden Einfluss hatten.

Mein besonderer Dank gilt Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont Reinhold W. Lang, dem Vorstand des Institutes für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe der Montanuniversität Leoben und gleichzeitig Geschäftsführer der Polymer Competence Center Leoben GmbH, der es mir als Student der Werkstoffwissenschaften durch seinen Einsatz sowie durch seine Betreuung und Begutachtung erst ermöglicht hat dieses interessante Projekt durchzuführen. Außerdem möchte ich mich ganz besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont Zoltan Major, der meine Arbeit betreut hat und der durch seine kritische Betrachtung wie auch viele wertvolle Anregungen hinsichtlich des wissenschaftlichen und technischen Aspekts der Arbeit eine unverzichtbare Unterstützung bot, bedanken.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der praktischen Versuche möchte ich mich bei der Fa. CW Concept Consulting GmbH bedanken. Und hier ganz besonders bei den engagierten Mitarbeitern aus den Bereichen Simulation, Versuch, Konstruktion und Messtechnik, ohne die die Werkstoffprüfungen und Simulationen nicht möglich gewesen wären.

ABSTRACT

Due to their energy absorbing and dissipating capabilities, polymeric foams are frequently used in the automotive industry. They are intended to be used at relatively low stress levels, what makes them predestined for occupant and pedestrian protection. For an effective engineering and development of a new vehicle one has to be able to predict the material behaviour in crash situations. Thus unnecessary crash-test and raising the development costs can be avoided. These complex crash situations are mainly simulated with FE-programs, which are based on material models and parameter that describe the crash behaviour of the materials. The objective of this work was the development of a new methodology for characterising the impact behaviour of polymeric foams. At the beginning the foams were tested with a commonly used method to be able to compare with the new achieved impact data. For this purpose the foams were tested under a monotonic uniaxial compression load, where the dependency of force and displacement was measured and transposed to stress-strain data.

The new method is based on an impact test with a free motion steel plate that hits the specimen, which is mounted on the floor. To comply with the assumption of a uniaxial load case, the specimen has to have a cubical or cylindrical shape. These tests differ from the monotonic compression tests on one hand in the loading rate and on the other in the kind of measurement. The measurement only consists of an acceleration sensor on the impacting body. With the assumption of an uniaxial impact load and a zero Poisson's ratio one can calculate the function of stress, strain and strainrate as well as the hysteretic behaviour of the foam. The quality of this data can be instantly checked by simulating these tests with the same calculated material parameters und comparing the simulation results with the real tests. To show that these material parameters achieved from uniaxial impact tests are also applicable to more complex load situations, tests with a spherical impact body were made and compared to the simulation results. Here we have a method to characterise the behaviour of polymeric foams under an impact load. The advantage is that this is a cost and time efficient method to achieve foam data that correspond to the load situation of their intended use. Furthermore it is possible to check the quality of the material data without additional tests.

KURZFASSUNG

In der Automobilindustrie werden vermehrt Polymerschäume aufgrund ihrer guten energiedissipierenden Eigenschaften eingesetzt. Um dem Drang nach immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten nachzukommen und somit konkurrenzfähig bleiben zu können, ist es notwendig, dass das Crashverhalten dieser Schäume am Computer mittels finiter Elemente Simulation vorhergesagt werden kann. Dazu benötigt man Materialmodelle, die das Werkstoffverhalten beschreiben, und angepasste Prüfmethode, mit denen sich die entsprechenden Materialparameter möglichst zeit- und kosteneffizient bestimmen lassen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich diese Parameter über uniaxiale Impactversuche bestimmen lassen. Untersucht wurden zwei PUR-Schäume, ein EPP-Schaum und ein Chloropren-Schaum.

Als erstes wurden die Schäume, um Vergleichswerte zu erhalten, mit Hilfe einer klassischen uniaxialen monotonen Druckprüfung untersucht.

Zur dynamischen Charakterisierung wurden Impactversuche mit einem frei fliegenden Aufprallkörper durchgeführt. Aus den gemessenen Beschleunigungsverläufen können unter bestimmten Voraussetzungen direkt, ohne ein iteratives Verfahren zu benötigen, die Zusammenhänge zwischen Spannungen, Stauchungen und Dehnraten sowie das Hystereseverhalten ermittelt werden. Diese Versuche wurden anschließend mittels FE-Simulation nachgerechnet und die Ergebnisse validiert.

Um die Übertragbarkeit dieser Materialparameter auf komplexere Belastungssituationen überprüfen zu können, wurden anschließend Versuche mit einem kugelförmigen Aufprallkörper durchgeführt. Der Vergleich mit der Simulation zeigte hier ebenfalls gute Übereinstimmungen. Daraus lässt sich schließen, dass sich diese aus uniaxialen Impactversuchen gewonnenen Parameter auch gut für die Berechnung komplexerer Crashvorgänge eignen.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	GRUNDLAGEN	4
2.1	Polymerschäume	4
2.1.1	Herstellung polymerer Schäume.....	4
2.1.2	Struktur	5
2.1.3	Eigenschaften und Deformationsverhalten	6
2.1.4	Materialmodelle für polymere Schäume.....	12
2.2	Methode der Finiten Elemente	16
2.2.1	Ablauf einer FEM-Berechnung.....	17
2.2.2	Dynamische Simulation	20
2.2.3	Implizite Zeitintegration	20
2.2.4	Explizite Zeitintegration.....	22
2.2.5	Materialmodelle in LS-DYNA	24
2.2.6	LS-DYNA - Fu Chang Foam (MAT 83)	26
2.2.7	LS-DYNA – Low Density Foam (MAT57).....	27
2.3	Parameterbestimmung für Materialmodelle	29
2.3.1	Klassische Werkstoffprüfung.....	29
2.3.2	Iterative Parameterbestimmung	31
2.3.3	Dynamische nicht iterative Kennwertermittlung	34
3	EXPERIMENTELLES	37
3.1	Untersuchte Schäume.....	37
3.2	Laborversuche	39
3.3	Praxisnahe Versuche mit flachem Impaktor	40
3.3.1	Aufbau	41
3.3.2	Kenngößen	44

3.3.3	Datenreduktion und Berechnungen	45
3.4	Bauteilversuche	50
3.4.1	Versuchsaufbau	51
3.4.2	Messwerte	52
3.5	FE-Simulation	52
3.5.1	Materialkarte erstellen.....	53
3.5.2	Modellaufbau der Versuche mit flachem Impaktor	54
3.5.3	Modellaufbau der Versuche mit Kugelimpaktor.....	55
3.5.4	Berechnung mit LS-DYNA explicit	56
4	ERGEBNISSE.....	57
4.1	Methodik	57
4.1.1	Uniaxiale Druckprüfung:.....	57
4.1.2	Dynamische Prüfung mit flachem Impaktor	58
4.1.3	Vergleich von monotoner und dynamischer Belastung	64
4.1.4	Vergleich von Impactversuch und Simulation	65
4.1.5	Bauteilähnliche Versuche mit Kugelimpaktor	69
4.1.6	Simulation der Kugelversuche und Vergleich mit Realversuch.....	70
4.2	Materialcharakterisierung.....	72
4.2.1	Uniaxiale Druckprüfung.....	72
4.2.2	Dynamische Prüfung mit flachem Impaktor	75
4.2.3	Vergleich von monotoner und dynamischer Belastung	84
4.2.4	Vergleich von Impactversuch und Simulation	86
4.2.5	Bauteilähnliche Versuche mit Kugelimpaktor	89
4.2.6	Simulation der Kugelversuche und Vergleich mit Realversuch.....	89
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	95
6	LITERATUR.....	103

1 EINLEITUNG

1886 entwickelten Gottlieb Daimler und Karl Benz unabhängig voneinander die ersten motorbetriebenen Fahrzeuge und läuteten somit das Zeitalter unserer heutigen mobilen Gesellschaft ein. Mit der steigenden Verbreitung und den schneller werdenden Fahrzeugen war man auf einmal auch mit der Kehrseite dieser Entwicklung konfrontiert – den Autounfällen. In diesen Ursprüngen des Automobilbaus fand man sich mit diesem Umstand mehr oder weniger ab, oder anders ausgedrückt, die Sicherheit eines Fahrzeugs spielte für die Entwicklung praktisch keine Rolle. Dies hat sich allerdings Ende der 1950er geändert, als man begann die ersten Crashtest durchzuführen und mehr Mittel in die Unfallsicherheit zu stecken, da bis dahin die Anzahl der getöteten Personen im Verhältnis zur Unfallzahl eklatant zugenommen hatten. Bis heute hat sich dieser Sicherheitsaspekt von einem unbedeutenden Randbereich zu einem zentralen Entwicklungspunkt gewandelt. Dies liegt zum einen daran, dass jeder Automobilhersteller gesetzliche Auflagen erfüllen muss, wenn er ein neues Fahrzeug für den Straßenverkehr zulassen will. Und zum anderen daran, dass sich das Sicherheitsbewusstsein der Menschen geändert hat. Die Sicherheit hat sich für den Kunden sozusagen von einem „nice-to-have“ zu einem „must-have“ entwickelt und stellt somit eine wichtige Kaufentscheidung dar.

Die Fahrzeugsicherheit differenziert sich in passive Sicherheit, die dazu da ist die Folgen eines Unfalls zu mindern und aktive, die präventiv wirkt und einen Unfall an sich verhindern sollen. Zur aktiven Sicherheit zählen mechanische Elemente wie Bremskraftverstärker, aber auch elektronische wie ABS, ESP oder auch Kurvenlicht. All diese Systeme helfen dabei das Fahrzeug sicherer auf der Straße halten zu können und somit einen eventuellen Unfall zu vermeiden. Kommt es dennoch zu einem Zusammenstoß, kommt die passive Sicherheit eines Fahrzeugs zu tragen. Nun geht es darum die Aufprallenergie möglichst effektiv abzufangen. Diese Sicherheitsmechanismen können nun entweder aktiv agieren, wie Airbags oder Gurtstraffer, oder passiv, wie bestimmte energieabsorbierende Elemente, Knautschzonen, etc.

Wie man in diesem kurzen Überblick sieht, sind für die Sicherheit eines Fahrzeugs eine Reihe unterschiedlicher Systeme ausschlaggebend. Die meisten dieser Entwicklungen sind erst durch die Entwicklung neuer Werkstoffe umsetzbar geworden. Mit der Möglichkeit Polymere und insbesondere polymere Schäume herzustellen hat man Werkstoffe geschaffen, die auch unter einer relativ geringen Kraft große Energien aufnehmen können (Gibson und Ashby, 1997). So werden z.B. energieabsorbierende Schaumstoffelemente in den Stoßfängern zum Schutz der Fußgänger eingebaut (Zhang, 1997). Für den Insassenschutz werden ebenfalls gerne polymere Schaumstoffe eingesetzt, da diese in der Lage sind z.B. einen Aufprall des Kopfes am Armaturenbrett, der im Vergleich zum Gesamtfahrzeugcrash deutlich weniger Energie besitzt, effektiver abzufangen, als andere Werkstoffe, wie Metalle oder Holz.

Um diese Sicherheit nun definieren zu können, werden standardisierte Tests durchgeführt. Hier gibt es einerseits Versuche, die vom Gesetzgeber verpflichtend vorgeschrieben sind, und andererseits Versuche, wie die Euro NCAP¹ Tests, die unabhängig durchgeführt werden, deren Ausgang aber auch entscheidenden Einfluss auf eine etwaige Kaufentscheidung besitzen. Deshalb ist es das Ziel aller Automobilhersteller diese Tests zu erfüllen. Da man mit immer kürzeren Entwicklungszeiten und immer höheren Anforderungen, die es zu erfüllen gilt, konfrontiert ist, ist man als Automobilhersteller heutzutage nur mehr konkurrenzfähig, wenn man in der Lage ist die Versuche, die für so eine Entwicklung notwendig sind, virtuell am Computer simulieren zu können. Diese Simulationen lassen sich mit Hilfe der Methode der finiten Elemente realisieren. Ziel der Hersteller ist es nun ein Auto von der Idee bis zum fertigen Produkt virtuell am Computer entwickeln zu können. Um nun dieses Ziel erreichen zu können, muss man in der Lage sein das reale Crashverhalten exakt vorhersagen zu können. Das ist heutzutage aufgrund, der Tatsache, dass einerseits das Materialverhalten von den verwendeten Materialmodellen nicht ausreichend genau beschrieben wird, und dass andererseits die Materialdaten für diese komplexen

¹ Euro NCAP (European New Car Assessment Program) ist eine herstellerunabhängige Vereinigung europäischer Verkehrsministerien, Automobilclubs und Versicherungsverbänden. (www.euroncap.com, 2006)

Belastungssituationen, wie sie bei einem Crash auftreten, nicht hinreichend bestimmt sind.

Aus diesen Gründen heraus ergibt sich die Notwendigkeit und auch das Ziel dieser Arbeit, ein Verfahren zu entwickeln, um Materialdaten von Polymerschäumen für eine Impactbelastung bestimmen zu können. Da man mit stark simplifizierten Materialmodellen konfrontiert ist, soll es das Ziel sein Materialdaten zu ermitteln, die entsprechend dem Materialmodell eine ausreichende Genauigkeit aufweisen, um damit aussagekräftige Simulationen durchführen zu können (Serifi et al, 2003). Des Weiteren ist es notwendig einen Kompromiss zwischen der Aufwendigkeit des Verfahrens, hinsichtlich Zeit und Kosten, und der Datenqualität zu finden. Die ermittelten Kennwerte müssen außerdem dahingehend optimiert sein, dass sie bei Verwendung in einer finiten Elemente Simulation gute Ergebnisse liefern. Diese Arbeit inkludiert damit sowohl die Auswahl eines geeigneten Versuchsaufbaus, wie auch das gesamte Auswerteverfahren und die Integration der gewonnenen Daten in die FE-Berechnung.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Polymerschäume

2.1.1 Herstellung polymerer Schäume

Schäume besitzen im Gegensatz zu ihren massiven Grundwerkstoffen viele in ihnen eingeschlossene Gasblasen. Ein Schaumbildungsprozess besteht im Wesentlichen aus drei entscheidenden Phasen der Gasblasenbildung (Klempner 1991).

(1) Entstehung von Gasblasen

Als erstes müssen in einem flüssigen System (einer Schmelze, einer Lösung oder einer Suspension) Gasblasen entstehen. Man spricht hierbei von einem Keimbildungsprozess. Dieser Prozess bedingt eine Erhöhung der freien Energie ΔF , die sich bei einer reinen Flüssigkeit aus der Oberflächenspannung γ und der Fläche der neu gebildeten Grenzflächen A ergibt (Gl. 2.1).

$$\Delta F = \gamma \cdot A \quad (2.1)$$

(2) Blasenwachstum

Wenn nun kleine Gasblasen vorhanden sind, beginnen diese zu wachsen. Dies geschieht über Gasdiffusion. Bei einer reinen Flüssigkeit ist das System nun bestrebt, die Grenzflächen, die ja Energie kosten, möglichst zu minimieren. Das bedeutet, dass ein System mit weniger großen Blasen stabiler als eines mit vielen kleinen ist.

(3) Stabilisierung der Gasblasen

Nach Gl. 2.1 ist es mit einer reinen Flüssigkeit nicht möglich einen stabilen Schaum zu erzeugen. Um nun die Gasblasen stabilisieren zu können, benötigt man eine weitere Phase, die sich bevorzugt an den Grenzflächen anlagert. Dieser Stabilisator dient dazu die Grenzflächenenergie zu erniedrigen.

Wenn man diesen Prozess der Schaumbildung kontrollieren kann, ist man in der Lage aus den verschiedensten Grundwerkstoffen (Thermoplaste, Elastomere, Duromere) Schäume herzustellen. Man kann somit die Struktureigenschaften, wie Zellgröße, Zellform oder Zellwanddicke beeinflussen. In der Praxis unterscheidet

man zwischen chemischen, physikalischen und mechanischen Schäumungsverfahren. Bei den chemischen Verfahren werden Treibmittel verwendet, die meist temperaturaktiviert Stickstoff oder CO_2 freisetzen. Die wichtigsten auf diese Weise hergestellten Schäume sind die Polyurethan-Schäume. Die physikalischen Methoden beruhen z.B. darauf, dass man der Polymermasse Flüssigkeiten mit niedrigem Schmelzpunkt beimengt, die dann bei einer Temperaturerhöhung Dampfblasen bilden. Oder man benutzt den Effekt einer Gasblasenvergrößerung bei einer Druckreduktion. Auf diese Weise wird beispielsweise der Schaumstoff EPS (Expandiertes Polystyrol), oder besser bekannt als Styropor, hergestellt. Die dritte Herstellungsmethode beruht darauf, dass rein mechanisch Gas in ein flüssiges System eingebracht wird.

2.1.2 Struktur

Im Allgemeinen bestehen Schäume aus einem Zellenverbund, der aus einem bestimmten Grundmaterial besteht. Diese Zellen können entweder wie viele kleine geschlossene Kammern ein bestimmtes Gasvolumen in sich einschließen. Man spricht hierbei von einem geschlossenzelligen Schaum (Abb. 2.1(A)). Oder die Zellen besitzen Löcher in ihren Zellwänden, wodurch der Gasaustausch von einer zur anderen Zelle ermöglicht wird. Dadurch erhält man einen offenzelligen Schaum (Abb. 2.1(B)). Wenn nun sowohl offene wie auch geschlossene Zellen vorliegen, spricht man von einem gemischtzelligen Schaum (Gibson und Ashby, 1997).

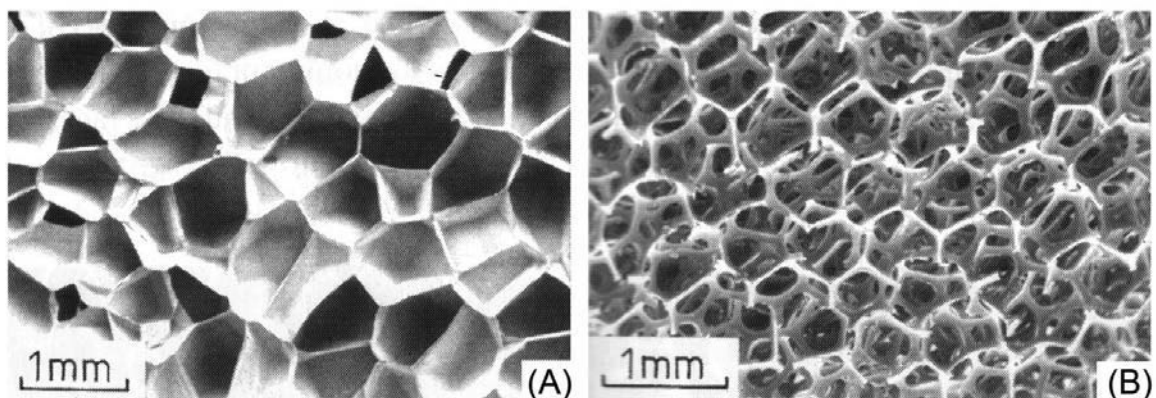


Abb. 2.1: Struktur eines geschlossenzelligen(A) und eines offenzelligen(B) Schaums

2.1.3 Eigenschaften und Deformationsverhalten

Bei Schäumen lassen sich die gleichen Eigenschaften wie bei massiven Werkstoffen bestimmen. Das reicht von mechanischen Eigenschaften, wie Dichte oder Druckverhalten, bis hin zu thermischen und elektrischen Eigenschaften. Das besondere hierbei ist allerdings, dass sich die Eigenschaften des Schaums aus denen des Grundmaterials und der Art des zellulären Aufbaus ergeben. Somit ist es möglich, aus einem Grundmaterial Werkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften herzustellen. Aufgrund dieses neu erschlossenen Eigenschaftsspektrums bieten sich Schäume für bestimmte Anwendungsbereiche besonders an.

Der zelluläre Aufbau bedingt, dass ein Schaum immer eine geringere Dichte als sein Grundmaterial aufweist. Das Verhältnis der Dichte des Schaums zu der des massiven Materials nennt man relative Dichte. Die Werte können von 0.3 bis hinunter zu 0.001 für extrem niederdichte Schäume reichen. Die obere Grenze von 0.3 ist keine herstellungstechnische Grenze, sondern ergibt sich aus der Tatsache, dass hier der Übergang von einem Schaum zu einem porösen massiven Material stattfindet. Wann es sich um isolierte Poren oder um einen Schaum handelt ist in gewisser Weise Ansichtssache. Deshalb ist dieser obere Grenzwert auch nicht als absolute Grenze zu betrachten. Diese niedrigen Dichten prädestinieren Schäume für den Einsatz in Leichtbauanwendungen.

Weitere wichtige Eigenschaften sind eine niedrige thermische Leitfähigkeit, starke Deformierbarkeit und ein gutes Energieabsorptionsvermögen. Die beiden letzteren Eigenschaften in Kombination mit einer geringen Dichte sind es auch, die die Schäume in sicherheitsrelevanten Teilen im Automobilbau immer interessanter machen.

Deformationsverhalten

Da die Schaumstoffbauteile, die in der Fahrzeugsicherheit Anwendung finden, nur zur Aufnahme von Druckbelastungen eingesetzt werden, werden wir hier ihr Kompressionsverformungsverhalten genauer betrachten.

Alle Kennwerte, die die Druckeigenschaften der Schäume beschreiben, werden makroskopisch beobachtet. Sie sind aber trotz allem eine Folge ihrer

Mikrostruktur. Um ein besseres Verständnis dieser Eigenschaften zu erhalten, muss man sich auch die mikrostrukturellen Vorgänge vor Augen führen.

Bei der Beschreibung des Druckverhaltens bedient man sich Spannungs-Stauchungs-Kurven, die den Zusammenhang zwischen aufgebrachtter Spannung σ und Stauchung ε , die wie in Gl. 2.2 definiert ist (Schmiedel, 1992), angeben.

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0} \quad (2.2)$$

L_0 ... ursprüngliche Probendicke

L ... Dicke der verformten Probe

Egal ob es sich beim Grundwerkstoff um Thermoplaste, Elastomere oder Duromere handelt, jeder Schaum, selbst ein metallischer, zeigt aufgrund seiner zellulären Struktur ein charakteristisches Kompressionsverhalten, das sich im Wesentlichen, wie in Abb. 2.2 zu sehen ist, in folgende drei Bereiche einteilen lässt (Gibson und Ashby, 1997).

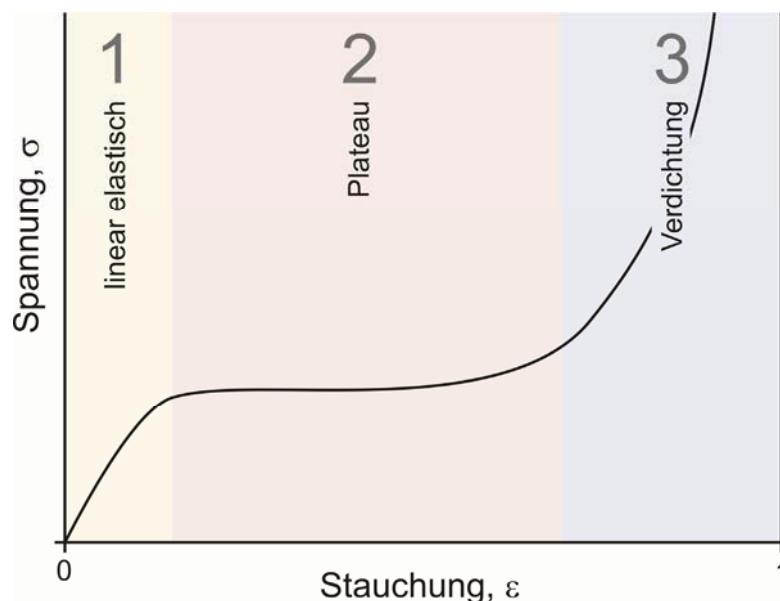


Abb. 2.2: Typischer Spannungsverlauf bei einer Druckverformung

(1) Linear elastischer Bereich

In diesem Bereich der Deformation tritt eine Stauchung und Durchbiegung der Zellwände ein. Obwohl es sich bei Polymerschäumen keineswegs um einen ideal elastischen bzw. ideal viskoelastischen Werkstoff handelt, kann hier der Zusammenhang zwischen Spannung und Stauchung linear angenähert werden.

(2) Plateaubereich

Ab einer gewissen Spannung beginnen die Zellen zu kollabieren. Dies geschieht entweder durch Einknicken, plastische Verformung oder Brechen der Zellwände. Welcher Mechanismus ausschlaggebend ist hängt nun vom Grundmaterial, der Struktur (Zellgröße, Wanddicke) und der Belastung (Belastungsgeschwindigkeit, Temperatur) ab. Bei einem ideal elastischen Werkstoff hängt die Höhe des Plateaus von der Knickspannung, bei einem plastischen von der Fließspannung und bei einem spröden von der Bruchspannung ab (Gibson und Ashby, 1997). In der Realität findet eine Kombination einiger bzw. aller Mechanismen statt. Bei Elastomerschäumen z.B. werden die Zellen vorzugsweise Einknicken, da keine plastische Verformung möglich ist und die Bruchspannungen an den betroffenen Stellen meist nicht erreicht sind. Duromerschäume können der aufgebrachten Last nur mit einem Bruch der Zellwände nachgeben, da bei ihnen ebenfalls keine plastische Verformung möglich ist und ihre Elastizität nicht für ein Einknicken ausreicht. Aber egal welcher Mechanismus vorherrscht, das Ergebnis ist immer, dass sich ein Plateaubereich ausbildet, über den die Spannung annähernd konstant bleibt. Es kann sogar der Fall eintreten, dass die Spannung zu Beginn dieses Bereichs mit steigender Stauchung kleiner wird. Dieser Plateaubereich ist charakteristisch für jeden Schaumstoff. Hierin liegt auch der entscheidende Unterschied zu den massiven Werkstoffen und der Grund für das gute Energieabsorptionsvermögen.

Bei geschlossenzelligen Schäumen ist in dieser Spannungs-Stauchungs-Kurve auch der Luftdruck in den Zellen inkludiert, der mit steigender Kompression exponentiell ansteigt und zusätzlich zu einer Spannungserhöhung beiträgt. Daher weisen geschlossenzellige Schäume meist einen ansteigenden Plateaubereich auf.

(3) Verdichtung

Mit steigender Verformung werden die Hohlräume zwischen den Zellen immer kleiner, bis sie schließlich komplett zusammengedrückt sind. Dadurch müssen immer größere Spannungen aufgebracht werden, um den Werkstoff weiter zu komprimieren.

Energieabsorption

Eine gute Energieabsorption zu besitzen heißt, über einen bestimmten fast konstanten Spannungswert große Verformungen ausführen zu können (Degischer und Kriszt, 2002). Nach dieser Definition besitzen Schäume mit ihrem Plateaubereich im Spannungs-Stauchungs-Diagramm eine hervorragende Energieabsorptionsfähigkeit.

Wenn man ein Spannungs-Stauchungs-Diagramm betrachtet, kann man die Energie, die das Material pro Volumeneinheit aufgenommen hat, als Fläche unter der Kurve darstellen. Man erhält somit die Energiedichte W . Für Anwendungen im Crashbereich ist es wichtig, Materialien zu haben, die unter einer möglichst geringen Peak-Spannung, möglichst viel Energie aufnehmen können. Denn hohe Spannungen führen zu hohen Beschleunigungen, und diese gilt es zu vermeiden. Also ein idealer Energieabsorber ist ein ideal plastisches Material, das unter einer konstanten Spannung die gesamte Impactenergie abbauen kann.

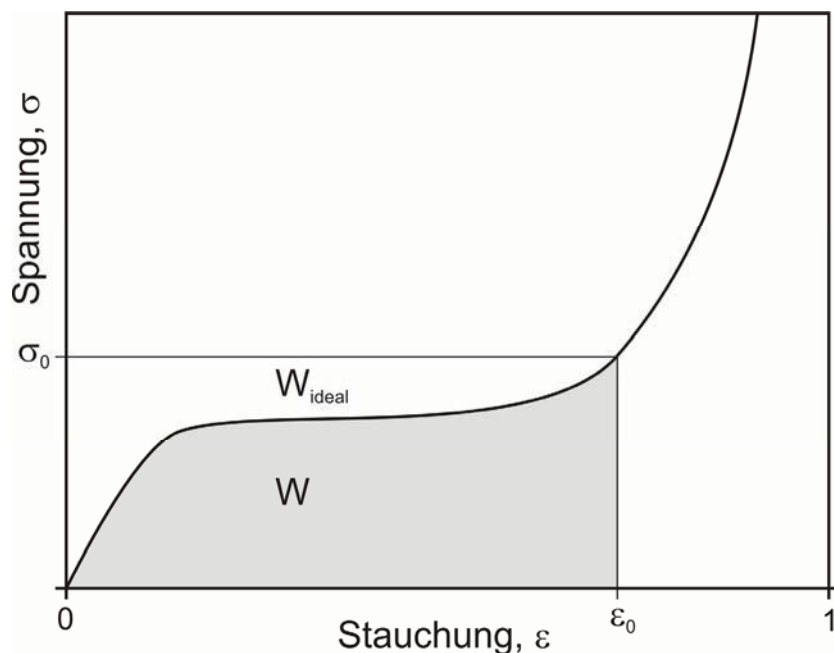


Abb. 2.3: Ermittlung der aufgenommenen Verformungsenergie

In Abb. 2.3 sieht man die Energie pro Volumeneinheit W , die ein Schaum bis zu einer bestimmten Stauchung ϵ_0 aufgenommen hat. Die Energieaufnahme W_{ideal} eines optimalen Materials ergibt sich aus σ_0 mal ϵ_0 . Dies entspricht der maximalen Energie, die unter der Spannung σ_0 bis zu einer Stauchung von ϵ_0 aufgenommen

werden kann. Die Effizienz der Energieabsorption erhält man indem man W durch W_{ideal} dividiert. Wenn man nun diesen Effizienzfaktor über die Stauchung aufträgt (Abb. 2.4), erhält man eine Kurve die für eine bestimmte Stauchung $\varepsilon_{\text{Eff max}}$ ein Maximum aufweist (Degischer und Kriszt, 2002).

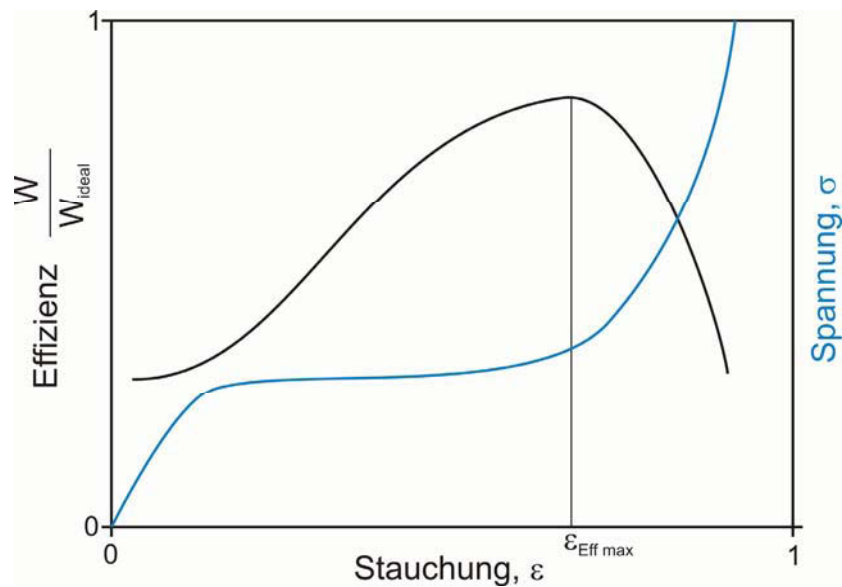


Abb. 2.4: Effizienz der Energieabsorption in Abh. der Stauchung (Degischer und Kriszt, 2002)

Man sieht, dass die effizienteste Energieaufnahme bei Kompressionen am Ende des Plateaubereichs liegt. Überschreitet man diesen Wert treten schnell hohe Spannungen auf und die Effizienz nimmt rasch ab. Deshalb sollten Energieabsorber so ausgelegt werden, dass sie möglichst im Bereich der Plateauspannung genutzt werden. Man kann weiters die Energiedichte $W(\varepsilon_{\text{Eff max}})$ der effizientesten Energieaufnahme berechnen. Hieraus ergeben sich die Crashenergien die ein bestimmter Schaum am besten aufnehmen kann. Bei einer Bauteilauslegung ist es nun sinnvoll darauf zu achten, dass diese Aufprallenergien nicht überschritten werden, da es sonst zu hohen Spannungen und den damit verbundenen hohen Beschleunigungen kommt, die es ja schließlich zu vermeiden gilt.

Hystereseverhalten

Bisher haben wir gesehen, dass ein Schaum sehr viel Energie aufnehmen kann, wenn er unter Druck belastet wird. Was geschieht nun, wenn man ihn wieder entlastet?

Die Materialien A und B (Abb. 2.5) werden bis zu gleicher maximaler Stauchung ε_{\max} und Spannung σ_{\max} belastet. Bei einer Entlastung kann nicht die gesamte zuvor hineingesteckte Energie zurückgewonnen werden, da ein gewisser Anteil dissipiert wurde und somit nicht mehr zur Verfügung steht. Dies geschieht hauptsächlich in der Form von Wärmeabgabe. Material A zeigt einen Schaumstoff mit sehr geringer Hysterese, wie z.B. ein hoch elastischer Elastomerschaum. Dies zeigt sich in der Tatsache, dass der Spannungsverlauf beim Rückweg nur gering unter dem beim Hinweg liegt. Die vom Spannungsverlauf eingeschlossene Fläche entspricht der pro Volumeneinheit dissipierten Energie. Beim Material B ist diese Fläche sehr groß. D.h. dieses Material kann zwar bei gleicher Belastung gleich viel Energie wie Material A aufnehmen, allerdings wird hierbei ein wesentlich höherer Anteil dissipiert. Man kann diesen Hystereseverlust auch prozentuell in dissipierte Energie pro hineingesteckte Energie ausdrücken.

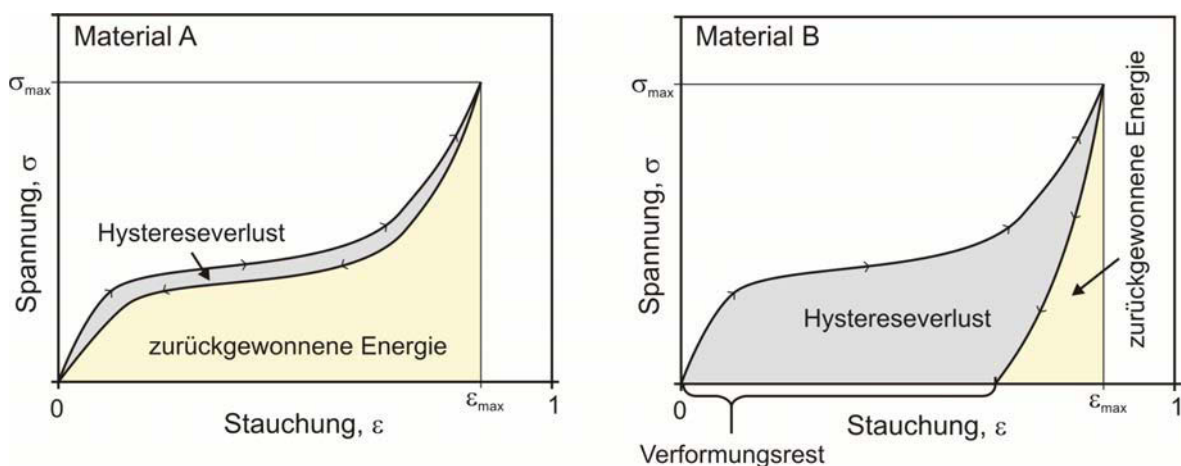


Abb. 2.5: Hystereseverluste und Verformungsrest einer Druckverformung

Material B weist außerdem noch ein irreversibles Verhalten auf. Das bedeutet, es nimmt nach der Entlastung nicht mehr die ursprüngliche Form ein. Es bleibt somit ein gewisser Druckverformungsrest (DVR) erhalten. Es gibt verschiedene genormte DVR-Prüfungen (DIN 53572, ASTM D 1056, DIN EN ISO 1856), bei

denen wie z.B. nach DIN 53572 der Verformungsrest nach einer statischen Verformung von 50% bestimmt wird. Dieser DVR-Wert ist wie folgt definiert:

$$\text{DVR} = \frac{h_0 - h_r}{h_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

h_0 ... Ausgangshöhe der Probe

h_r ... Rückerholungshöhe nach der Belastung

Die Werte Hystereseverlust und Verformungsrest hängen nicht nur von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit ab, sondern auch von der maximal aufgebrauchten Kompression. Deshalb ist es hierbei schwierig allgemein verwendbare Daten anzugeben. Zu Vergleichszwecken gibt es hierfür die genormten Versuche. Diese dienen aber ausschließlich der Vergleichbarkeit der Materialien und nicht der Vorhersage des Materialverhaltens unter anderen Belastungen.

2.1.4 Materialmodelle für polymere Schäume

Um das Verhalten eines Schaums beschreiben und vorhersagen zu können, bedient man sich mathematischer Modelle. Wie bei allen theoretischen Modellen, sind auch diese Materialmodelle nur in der Lage die Wirklichkeit mit einer gewissen Genauigkeit wiederzugeben. Wie gut die Übereinstimmung ist, hängt stark vom verwendeten Modell und dem untersuchten Belastungsfall ab.

Das einfachste ist das linear elastische Werkstoffmodell, dem das Hook'sche Gesetz zu Grunde liegt. Mit ihm lässt sich über den einfachen Zusammenhang, Spannung ist Dehnung mal E-Modul, zu jeder Spannung die entsprechende Dehnung vorhersagen. Für polymere Schäume lassen sich ebenso derartige Zusammenhänge aufstellen. Allerdings sind hierfür, aufgrund des stark nichtlinearen Verhaltens, die Gesetzmäßigkeiten weit komplexer bzw. nur mit Einschränkungen zu verwenden.

Es gibt zwei grundlegende Typen von Materialmodellen. Zum einen phänomenologische und zum anderen mikromechanische Modelle. Die Phänomenologischen zielen nur darauf ab, die experimentellen Daten möglichst gut mit Hilfe mathematischer Methoden zu beschreiben. Die mikromechanischen Modelle hingegen versuchen aufgrund des physikalischen Verhaltens des

Schaums auf mathematische Zusammenhänge zu schließen. Die Parameter dieser Modelle besitzen daher eine physikalische Bedeutung. Sie werden direkt aus dem mechanischen Verhalten der mikrozellulären Struktur abgeleitet. Ein phänomenologisches Modell erfordert hingegen Parameter, die sich nur mathematisch aus den Versuchsdaten berechnen lassen. Sie besitzen keine physikalische Bedeutung.

Die Materialmodelle, egal ob sie auf physikalischen oder rein empirischen Grundlagen beruhen, haben die Aufgabe die Materialantwort auf eine bestimmte Belastung vorherzusagen.

Gibson Modell

Bei dem Gibson Modell (Gibson und Ashby, 1997) handelt es sich um ein sehr beliebtes mikromechanisches Schaumstoffmodell, bei dem die Spannungs-Stauchungs-Kurve in drei Bereiche geteilt wird:

- linearer Bereich

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.4)$$

Die Stauchung hängt linear über den E-Modul E von der Spannung ab.

- Plateaubereich

$$\sigma = \sigma_{\text{yield}} \quad (2.5)$$

Beim Erreichen einer Fließspannung σ_{yield} bleibt die Spannung über den gesamten Bereich konstant.

- Bereich der Verdichtung

$$\sigma = \sigma_{\text{yield}} \frac{1}{D} \left(\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_D - \varepsilon} \right)^m \quad (2.6)$$

Obiger Zusammenhang beschreibt einen asymptotischen Spannungsanstieg zu einer maximalen Kompression ε_D . D und m stellen Parameter dar, die im Ggs. zu E, σ_{yield} und ε_D von der Schaumstoffdichte unabhängig sind. Diese Zusammenhänge wurden aufgrund der Analyse einer einfachen Zellstruktur aufgestellt.

Rusch Modell und modifiziertes Rusch Modell

Das Rusch Modell (Rusch, 1970) ist ein phänomenologisches Schaumstoffmodell, mit dem sich das Druckverhalten eines Schaums beschreiben lässt. Dieses Modell wurde im Ggs. zum Gibson Modell nicht aufgrund von Mikrostrukturanalysen, sondern nur anhand von makroskopischen Beobachtungen erstellt. Es geht von einer isothermen und temperaturunabhängigen Verformung aus, d.h. es berücksichtigt weder die globale Temperatur noch lokale Temperaturveränderungen, die durch die Verformung hervorgerufen werden. Die Stauchung entspricht hier einer rein volumetrischen Kompression, was einer Querkontraktionszahl von Null gleichkommt. Des Weiteren ist es nicht möglich Effekte, die durch eine unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeit hervorgerufen werden, zu berücksichtigen. Die Annahme einer Unabhängigkeit von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit stellt für die Anwendung auf Polymerschäume eine sehr starke Vereinfachung dar, da die meisten Polymere hier eine starke Abhängigkeit zeigen. Bei Impactbelastungen kommt es aufgrund der hohen Belastungsgeschwindigkeiten auch zu lokalen Temperaturgradienten, die wiederum gegen die Annahme einer isothermen Verformung sprechen.

Der Zusammenhang zwischen Spannung σ und Stauchung ε wird wie folgt dargestellt:

$$\sigma = A \times \varepsilon^m + B \times \varepsilon^n \quad (2.7)$$

mit $0 < m < 1$ und $1 < n < \infty$

Der erste Term beschreibt die Stauchung bis hin zum Plateaubereich. Der zweite Term ist dazu da, die Phase der Verdichtung zu beschreiben. Die Parameter A und B hängen von der Dichte des Schaums ab. n und m sollen hingegen unabhängig von der Schaumdichte sein.

Dieses Rusch Modell wurde modifiziert, um die Bereiche höherer Kompression physikalisch korrekter beschreiben zu können (Avalle et al., 2004). Der zweite Term wurde dahingehend geändert, um die Spannung asymptotisch gegen 100% Stauchung ansteigen zu lassen (Gl. 2.8).

$$\sigma = A \times \varepsilon^m + B \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^n \quad (2.8)$$

Die Parameter A, B, m und n werden iterativ an die experimentellen Daten angepasst. Dieses Materialmodell wird später zur Auswertung der experimentellen Daten verwendet.

2.2 Methode der Finiten Elemente

Das physikalische Verhalten von Festkörpern unter einer Belastung kann nur für sehr einfache Geometrien analytisch berechnet werden. Dies beschränkt sich meist auf einfache Stabelemente. Bei komplexeren Geometrien, wie sie in der Praxis üblich sind, treten Differentialgleichungen auf, die nur mehr mit Hilfe von numerischen Näherungsverfahren gelöst werden können. Ein Verfahren, das hier zur Anwendung kommt, ist die Methode der finiten Elemente.

Die Grundlagen dazu wurden schon relativ früh von einigen Mathematikern, wie Walter Ritz, der 1908 das Ritz'sche Verfahren zur Lösung von Variationsproblemen erfand, gelegt. Der Begriff der finiten Elemente tauchte bereits 1960 bei Ray W. Clough („The finite element method in plane stress analysis“) auf. Allerdings konnte sich diese Methode erst in den letzten Jahren, aufgrund der immer schneller werdenden Computer, richtig behaupten. Mittlerweile findet die FEM bei den verschiedenste Problemstellungen ihre Anwendung.

Die FEM dient im Allgemeinen dazu, ein komplexes Problem, welches nicht mehr analytisch lösbar ist, dadurch zu lösen, indem man es in viele kleine Teilgebiete aufteilt, die durch analytisch lösbare Ansatzfunktionen beschrieben werden können. Um ein komplexes System wirklichkeitsgetreu abzubilden, müsste man es in infinitesimale Abschnitte aufteilen. Dies entspricht einer Kontinuumsbetrachtung. Bei der FEM wird aber dieses Kontinuum in eine endliche Anzahl an Elementen geteilt. Jedes dieser Elemente besitzt Ansatzfunktionen mit noch unbekanntem Parametern. Da diese über Knoten miteinander verbunden sind, kann man ein globales Gleichungssystem über alle Ansatzfunktionen aufstellen. Ist man in der Lage dieses Gleichungssystem zu lösen, erhält man gleichzeitig eine Näherungslösung für das Kontinuumsproblem. Wie genau dieses Ergebnis ist, hängt nun von mehreren Faktoren ab (Wriggers, 2001).

Bei der FEM handelt es sich also um ein Approximationsverfahren, um komplexe Systeme zu berechnen. Sie ist daher ein Hilfsmittel um Ingenieursprobleme zu lösen und nicht ein Werkzeug, mit dem die Realität in hundertprozentiger Genauigkeit nachgebildet werden kann. Diese Genauigkeit hängt allerdings von

einigen Faktoren ab, die man sich bewusst machen muss, will man ein optimales Ergebnis erzielen.

2.2.1 Ablauf einer FEM-Berechnung

Um eine FE-Berechnung durchführen zu können, sind einige Schritte notwendig. Jeder dieser Schritte hat Einfluss auf das Ergebnis.

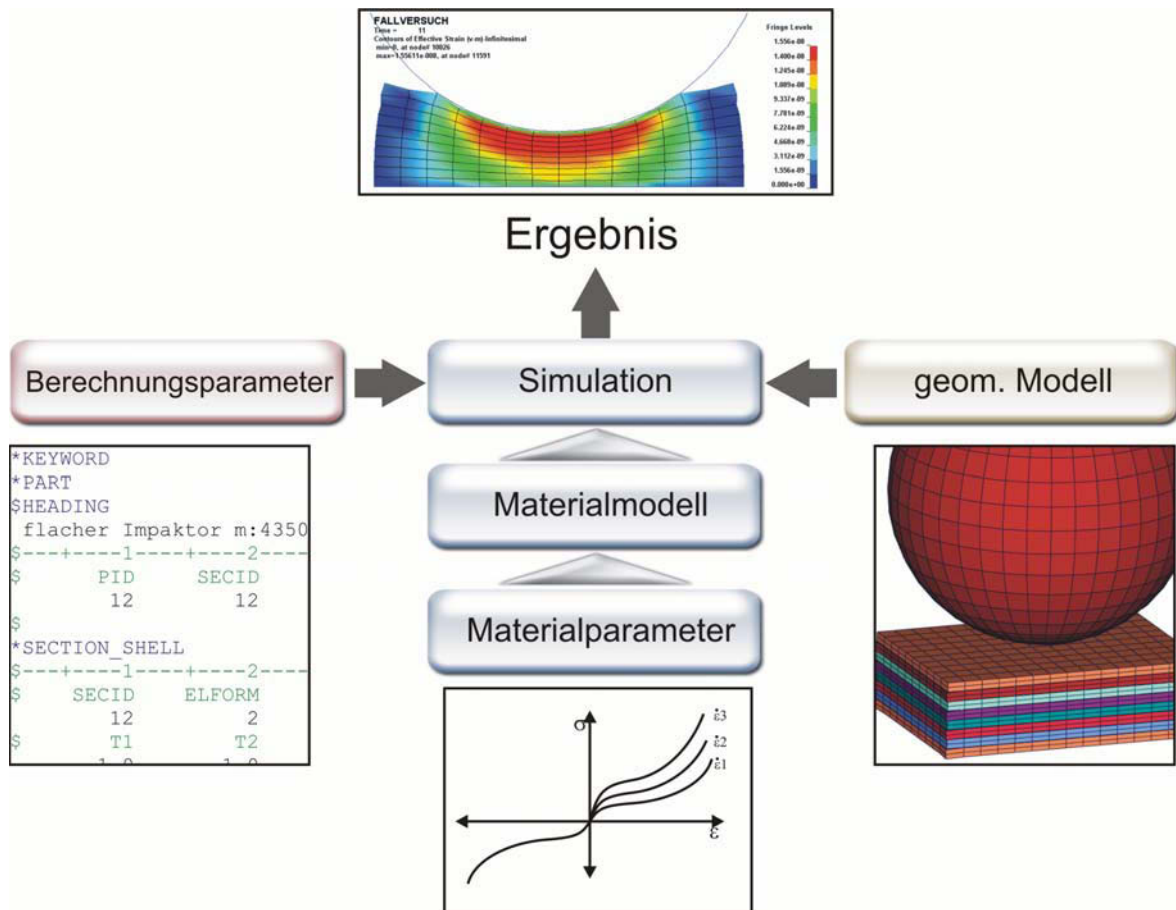


Abb. 2.6: Ablauf einer FEM-Berechnung

Geometrisches Modell

Das reale Kontinuumsmodell muss für die Berechnung in kleinere diskrete Elemente aufgeteilt werden. Diese Elemente hängen über sog. Knotenpunkte zusammen und bilden das FE-Netz oder Mesh. Es gibt drei grundlegende Elementtypen: ein-, zwei-, und dreidimensionale Elemente. Sie werden als Beams, Shells und Solids bezeichnet. Wozu benötigt man nun ein- und zweidimensionale Elemente? In der Realität ist schließlich auch alles dreidimensional. Wenn man sich ein langes dünnes Rohr vorstellt, so ist der Querschnitt im Verhältnis zu der

Länge sehr klein. Der Querschnitt und alle Eigenschaften können zur Vereinfachung über die ganze Länge als konstant angenommen werden. Aus dieser Vereinfachung heraus ergibt sich ein Beam-Element, dem die Eigenschaften wie Flächenträgheitsmomente, Querschnitt, etc. zugewiesen werden (Steinke, 2004). Im FE-Modell stellt es sich als eine Linie zwischen zwei Knotenpunkten dar, also ein eindimensionales Objekt. Will man nun ein Blech nachbilden, dessen Ausdehnung hauptsächlich in zwei Dimensionen liegt, kann man sog. Schalen- oder Shell-Elemente verwenden. Die Dicke wird hierbei über das ganze Blech als konstant angenommen. Für Objekte, bei denen die Ausdehnungen in alle drei Raumrichtungen berücksichtigt werden müssen, benötigt man Solid-Elemente.

Diese Aufteilung in Elemente bedingt allerdings eine gewisse Abweichung vom Realmodell. So wird beispielsweise, wie man in Abb. 2.7 sehen kann, eine Kurve durch einen Polygonzug ersetzt. Erhöht man die Elementzahl wie hier von 3 auf 6, verbessert sich die Abbildungsgüte. Mit sechs Elementen ist der Kurvenverlauf schon deutlich zu erkennen.

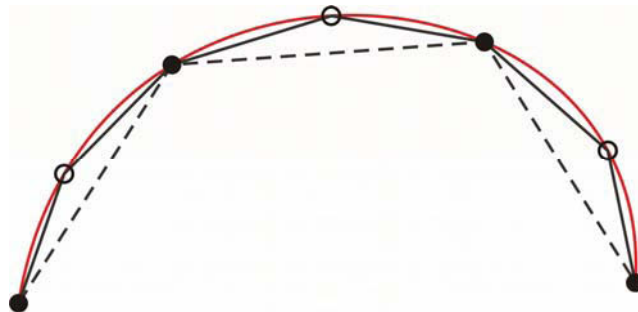


Abb. 2.7: Diskretisierung einer Kurve in Form eines Polygonzugs

Mit einer höheren Elementzahl erhöht sich allerdings auch der entsprechende Rechenaufwand. Daher muss man einen Kompromiss zwischen der Feinheit des Netzes und der Abstrahierung des Modells und dem damit verbundenen Diskretisierungsfehler finden. Es ist also sinnvoll, an Stellen, die eine genauere Betrachtung erfordern, eine feinere Vernetzung zu wählen. Alles in allem kann man diesen Fehlereinfluss aber gut unter Kontrolle halten, indem man ein entsprechend feines Netz wählt und dadurch ggf. auch mehr Rechenzeit in Kauf nimmt.

Berechnungsparameter

Hierunter fallen bei dieser Definition alle Parameter, die weder die Geometrie noch das Materialverhalten betreffen. Zum einen sind dies Einstellungen die sich direkt auf die Berechnung auswirken, wie die Auswahl bestimmter Lösungsalgorithmen oder die Festlegung der Größe eines Berechnungszeitschrittes. Zum anderen ist hier auch die Definition der Rand- und Anfangsbedingungen, wie z.B. die Definition von Einspannungen und Anfangsgeschwindigkeit, enthalten. Des Weiteren muss das Kontaktverhalten definiert werden, wenn in der Simulation einzelne Bauteile miteinander in Kontakt treten. Unter diesen Punkt fallen eine Vielzahl von Einstellungen. Ich möchte hier aber nicht näher darauf eingehen, da sich in dieser Arbeit die Simulation auf den Einfluss verschiedener Materialparameter konzentriert und diese Parameter für unsere Simulationen weitestgehend konstant gehalten werden können.

Materialmodell

Um das Verhalten eines Körpers beschreiben zu können, muss das FE - Programm genau über die Eigenschaft des abgebildeten Materials Bescheid wissen. Diese Information erhält das Programm aus einem Materialmodell. Es hat die Aufgabe zu einem entsprechenden Spannungszustand sowie den dazugehörigen Dehnraten, Temperaturen, etc. die entsprechenden Verzerrungen zu liefern. In den üblichen FEM - Softwarepaketen sind, wie auch im in dieser Arbeit verwendeten LS-DYNA, mehrere Materialmodelle für die unterschiedlichsten Werkstoffe integriert. Dies reicht von einem ideal elastischen Modell, das zu einer gegebenen Spannung mit Hilfe des E-Moduls die entsprechende Verformung liefert, bis hin zu komplexen Modellen, welche zusätzliche Aspekte wie Temperatur, Anisotropie, Belastungsgeschwindigkeit, etc. berücksichtigen. Diese Modelle abstrahieren das reale Materialverhalten oft stark und können somit das komplexe Eigenschaftsspektrum nur zu einem Teil nachbilden. Deshalb entscheidet oftmals die Wahl des richtigen Materialmodells über die Genauigkeit einer Simulationsrechnung.

Materialparameter

Das Materialmodell beschreibt das prinzipielle Verhalten des Werkstoffs. Erst die Materialparameter spezifizieren die genauen Eigenschaften. Materialparameter

sind Kennwerte, die beispielsweise den Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen beschreiben. Im einfachsten Fall, bei einem Hook'schen Materialmodell, wird dieser Zusammenhang durch das E-Modul definiert. Um komplexere Zusammenhänge beschreiben zu können, sind für gewöhnlich eine Vielzahl von Parametern nötig. Hierbei handelt es sich auch um Parameter, die im Gegensatz zu Dichte und E-Modul nicht aus Experimenten direkt ermittelt werden können, sondern nur empirisch bestimmt werden können.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die FE-Simulation auf Modellen basiert, die das Materialverhalten beschreiben. Diese Modelle können allerdings nur dann genaue Daten liefern, wenn für den verwendeten Werkstoff auch genaue Kennwerte vorhanden sind. Die Materialparameter bilden somit die Basis dieser Betrachtung. Von ihnen gehen die Berechnungen der Materialmodelle aus, die eine Grundlage der eigentlichen FE-Rechnung bilden. Zur Verbesserung eines Simulationsergebnisses ist es also zweckmäßig an dieser Basis anzusetzen und in erster Linie zu versuchen möglichst gute Materialkennwerte zu ermitteln. In dieser Arbeit geht es deshalb darum ein System zu finden, um die Materialkennwerte für Schäume für eine Impactbelastung möglichst gut und zeiteffizient ermitteln zu können.

2.2.2 Dynamische Simulation

Um ein Impactverhalten zu simulieren, ist es notwendig das zeitliche Verhalten genau nachzubilden. Hierfür muss neben der räumlichen Diskretisierung auch noch eine zeitliche erfolgen. Mittels Methoden der expliziten oder impliziten Zeitintegration kann der Impactvorgang über diskrete Zeitschritte beschrieben werden.

2.2.3 Implizite Zeitintegration

Implizite Lösungsverfahren werden hauptsächlich für statische und quasistatische Probleme herangezogen. Der Vorteil hierbei ist, dass dieses Verfahren typischerweise mit 100 bis 10000 Mal weniger Zeitschritten auskommt als das Explizite (Hallquist, 2001).

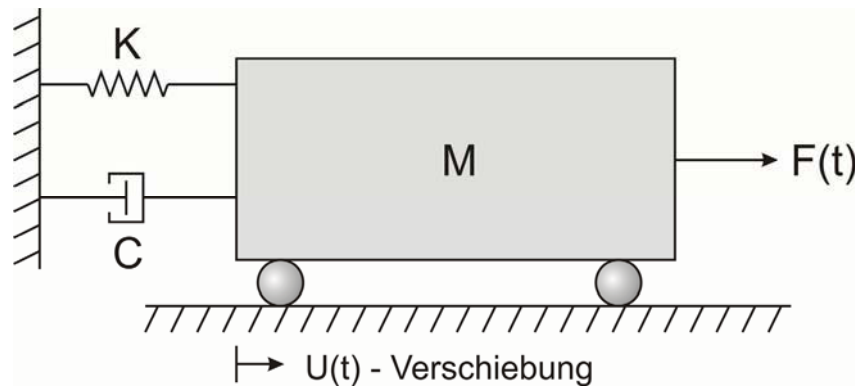


Abb. 2.8: System mit einem translatorischen Freiheitsgrad

Wenn man Abb. 2.8 betrachtet, sieht man ein System mit einem translatorischen Freiheitsgrad. Wenn eine Kraft F auf die Masse M wirkt, entstehen entsprechende Trägheits-, Dämpfungs- und elastische Kräfte die F entgegenwirken. Aus dieser Überlegung heraus ergibt sich folgendes allgemeines Gleichungssystem, das es zu lösen gilt (Bathe, 1996; Hallquist, 1996):

Trägheitskräfte + Dämpfung + elastische Kräfte = äußere Kräfte

$$\underline{\underline{M}} \times \underline{\underline{\ddot{U}}} + \underline{\underline{D}} \times \underline{\underline{\dot{U}}} + \underline{\underline{K}} \times \underline{\underline{U}} = \underline{\underline{F}} \quad (2.9)$$

M... Massenmatrix

D... Dämpfungsmatrix

K... Steifigkeitsmatrix

F... Vektor der äußeren Kräfte

U... Verschiebungsvektor

Bei der impliziten Berechnung wird der Zustand zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ betrachtet. Für diesen Zeitpunkt müssen nun äußere und innere Kräfte in den Gleichgewichtszustand gebracht werden, um den Verschiebungszustand zu erhalten (Felippa, 2001).

$$\underline{\underline{F}}^{t+\Delta t} - \underline{\underline{I}}^{t+\Delta t} = 0 \quad (2.10)$$

I... innere Kräfte

Nachdem die Lösung zum Zeitpunkt t bekannt ist, kann man

$$I^{t+\Delta t} = I^t + \Delta I \quad (2.11)$$

schreiben. ΔI entspricht dem Zuwachs der Knotenpunktkräfte. Dies ergibt sich unter Vernachlässigung der Trägheit und Dämpfung wie folgt aus den Knotenverschiebungen ΔU :

$$\Delta I = K^t \times \Delta U \quad (2.12)$$

Durch Einsetzen von Gl. 2.10 und Gl. 2.11 in Gl. 2.12 erhält man:

$$K^t \times \Delta U = F^{t+\Delta t} - I^t \quad (2.13)$$

Hierbei handelt es sich um eine implizite Darstellung, da auch auf der rechten Seite des Gleichungssystems Variablen vom Zeitpunkt $t+\Delta t$ vorkommen. Somit muss für die Lösung ein iteratives Verfahren angewandt werden. Die Knotenpunktverschiebungen werden nun so lange angepasst, bis der Lastvektor $F^{t+\Delta t} - I^t$ ausbalanciert ist bzw. hinreichend kleine geworden ist.

Da für jeden Zeitschritt die globale Elementsteifigkeitsmatrix berechnet werden muss, zeigt sich dieses Verfahren als sehr speicher- und rechenzeitaufwändig. Ein weiterer Nachteil bezüglich der Hardwarenutzung ist, dass diese iterative Gleichungslösung nicht gut parallelisierbar ist (Bathe, 1996).

Bei größeren Nichtlinearitäten hat man außerdem noch mit dem Umstand zu kämpfen, dass aufgrund von Konvergenzproblemen oftmals keine Lösung gefunden werden kann.

Allerdings erhält man solange die Konvergenz gegeben ist auch stabile Lösungen, da in jedem Zeitschritt das Kräftegleichgewicht hergestellt wird.

2.2.4 Explizite Zeitintegration

Beim expliziten Verfahren wird der Zustand zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ aus dem Gleichgewichtszustand zum Zeitpunkt t heraus ermittelt. Für diesen Lösungsweg ist kein aufwendiges iteratives Verfahren notwendig, da die Verschiebungen zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ explizit aus dem Zustand t ausgedrückt und berechnet werden können. D.h. auf der rechten Seite des Gleichungssystems stehen nur bekannte Größen. Es kann somit sofort gelöst werden.

Unter der Annahme, dass sich das System innerhalb eines Zeitschrittes linear verhält, wird mittels Integration des Beschleunigungsvektors der Zustand der Knotenpunkte im nächsten Zeitschritt berechnet. Die Last breitet sich somit schrittweise von Element zu Element aus (Bathe, 1996; Gupta und Meek, 2000).

Durch diese schrittweise Ausbreitung muss für dieses Verfahren allerdings ein sehr kleiner Zeitschritt verwendet werden, da es ansonsten zu Instabilitäten in der Berechnung kommen kann. Typischerweise liegen diese Zeitschritte für Impactsimulationen im Bereich von 10^{-3} ms (Hallquist, 1996). Um eine stabile Berechnung garantieren zu können, muss der Zeitschritt entsprechend klein gewählt werden. Wie klein ergibt sich aus der Courant-Friedrichs-Levy Bedingung.

$$\Delta t < \frac{x}{c} \quad (2.14)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.15)$$

Δt ... kleinster Zeitschritt

x ... kleinste Elementkantenlänge

c ... Wellengeschwindigkeit in Material

E ... E-Modul

ρ ... Dichte

Diese Bedingung besagt, dass der kleinste Zeitschritt maximal so groß sein darf, damit eine Verschiebung mit maximaler Ausbreitungsgeschwindigkeit – dies entspricht der Schallgeschwindigkeit im Material – kleiner als die kleinste Elementlänge bleibt. Wie hier zu sehen ist, ist beim expliziten Verfahren der Zeitschritt nicht beliebig wählbar, sondern ergibt sich aus dem E-Modul, der Dichte und der kleinsten Elementlänge (Bathe, 1996). Aber auch mit diesem bis zu 10000 Mal kleineren Zeitschritt ist die Rechenzeit bei dynamischen nichtlinearen Problemen wesentlich kürzer als bei einer impliziten Lösung.

Zusammenfassend sind somit explizite Verfahren hervorragend dazu geeignet hochdynamische und stark nicht lineare Probleme zu lösen, da sie bei solchen Problemen wesentlich weniger Rechenzeit benötigen als implizite. Das liegt zum einen daran, dass nicht für jeden Zeitschritt das globale Gleichgewicht berechnet

werden muss und zum anderen an der guten Parallelisierbarkeit der expliziten Berechnung, wodurch auf modernen Multiprozessor-Systemen eine enorme Geschwindigkeitssteigerung erreicht werden kann.

Aufgrund der Tatsache, dass keine iterative Lösung des globalen Gleichgewichts notwendig ist, kann es beim expliziten Verfahren auch zu keinen Konvergenzproblemen kommen.

2.2.5 Materialmodelle in LS-DYNA

Dem Anwender des Finiten Elemente Programms LS-DYNA stehen ca. 150 Materialmodelle zur Verfügung, die fix in das Programm integriert sind (Hallquist, 2001). Aus dieser Vielzahl gilt es nun die Modelle herauszufiltern, die für unseren Einsatzzweck sinnvoll sind. Diese Anzahl ist deshalb so groß, da die meisten Modelle nur sehr speziell auf einen bestimmten Werkstoff bzw. auf einen bestimmten Belastungsfall angewandt werden können. Der Trend ist dahingehend, dass man große allüberfassende Modelle entwickelt, die für die verschiedensten Geometrien und Szenarien gute Ergebnisse liefern. Solche Modelle sind allerdings für Kunststoffe aufgrund des komplexen und stark nichtlinearen Materialverhaltens derzeit noch nicht verfügbar. Daher setzt man im Moment bei den meisten Simulationsprogrammen darauf, eine Vielzahl verschiedener Modelle anzubieten, die dann jeweils für einen konkreten Belastungs- und Anwendungsfall ihre Stärken besitzen. So sind die Schaummodelle differenziert in Modelle für z.B. weiche und harte Schäume, reversible und irreversible Verformbare.

Um nun die richtigen Modelle auswählen zu können, muss man als erstes die Materialien, die man beschreiben will, genau betrachten und anschließend die passenden Modelle auswählen.

Eigenschaften der getesteten Materialien

Die Schäume, die in sicherheitsrelevanten Teilen im Automobilbau eingesetzt werden, besitzen meist folgende wichtige Eigenschaften: Zum Ersten sind sie stark komprimierbar, wodurch ein Stoß über einen möglichst langen Weg abgefangen werden kann. Typisch sind Stauchungen bis 90% bis es zu einem eklatanten Spannungsanstieg kommt. Für Schäume, die im Interieur eingesetzt

werden, ist es auch wichtig, dass sie eine gute Reversibilität zeigen. Denn diese Schäume, wie z.B. im Autositz, werden fast täglich von den Autobesitzern strapaziert. Hier wäre es nicht tragbar, wenn sich der Schaum nach einer Deformation nur mehr zur Hälfte zurückformt.

Außerdem zeigen diese Schäume meist ein rein volumetrisches Kompressionsverhalten. Die Kompression findet hierbei rein über einen Volumenverlust statt, was bedeutet, dass sie eine Querkontraktion von Null besitzen. Dies ist auch der Hauptunterschied zwischen dem Verhalten von stoßdämpfenden Schäumen zu dem von dämpfenden Gummielementen. Da Gummi inkompressibel ist, kann er bei einer Stauchung kein Volumen verlieren. Er zeigt idealerweise eine Querkontraktion von 0,5. Bei einer ausschließlich volumetrischen Kompression hingegen nimmt das Volumen beispielsweise bei 50% Kompression um 50% ab.

Zusammenfassend sind die Hauptmerkmale der betrachteten Schäume: eine starke Komprimierbarkeit, reversibles Verformungsverhalten und eine Querkontraktion von Null.

Korrespondierende Materialmodelle

Unter den vorhergehenden Betrachtungen bieten sich zwei Materialmodelle, die im FE-Simulationsprogramm LS-DYNA zur Verfügung stehen, für die Verwendung besonders an. Zum einen der Materialtyp Low Density Foam (MAT 57) und zum anderen der Materialtyp Fu Chang Foam (MAT83).

Um ein Verfahren zur Ermittlung von Materialparametern entwickeln zu können, ist es zuerst notwendig diese Modelle genau zu betrachten, herauszufinden welches Materialverhalten sie beschreiben können, von welchen Voraussetzungen sie ausgehen und das wichtigste, welche Eingangsparameter sie benötigen.

Annahmen

Die beiden Materialmodelle Low Density Foam (MAT 57) und Fu Chang Foam (MAT83) dienen der Beschreibung von Schäumen mit mittlerer und niedriger Dichte. Sie gehen davon aus, dass der gesamte Schaum ein isotropes Verhalten zeigt. Wird der Schaum komprimiert, kommt es ausschließlich zu einer Verringerung des Volumen. Es gibt keine Querkontraktion. Bei einer Entlastung

nimmt der Schaum wieder die ursprüngliche Form ein. Es bleibt somit kein Verformungsrest. Diese Annahmen decken sich sehr gut mit den Eigenschaften unserer getesteten Schäume. Nun betrachten wir, wie diese Modelle die einzelnen Belastungsfälle beschreiben.

2.2.6 LS-DYNA - Fu Chang Foam (MAT 83)

Aufbringen einer Druckbelastung

Das Aufbringen einer Druckbelastung ist der wichtigste Anwendungsfall, den es zu beschreiben gilt. Das Materialmodell hat die Aufgabe zu einer gegebenen Kraft, die auf das Element wirkt, die korrespondierende Verzerrung zu liefern. Für das Aufbringen einer Druckbelastung ergibt sich dieser Zusammenhang aus einer Spannungsstauchungskurve. Bei diesem Materialtyp ist es möglich für unterschiedliche Dehnraten unterschiedliche Kurven zu definieren. Werte zwischen den definierten Dehnraten werden interpoliert. Für Dehnraten oberhalb der maximal angegeben wird nicht extrapoliert, es gilt die Kurve mit höchster Dehnrate. Die Kurven werden in tabellarischer Form von nomineller Spannung über nominelle Dehnung angegeben. Üblicherweise kommen in FE-Programmen nur wahre Spannungen und wahre Dehnungen zum Einsatz. Um gewonnene Messdaten einfacher anwenden zu können, ist dieses Modell dafür gemacht worden, auch mit nominellen Dehnungen arbeiten zu können.

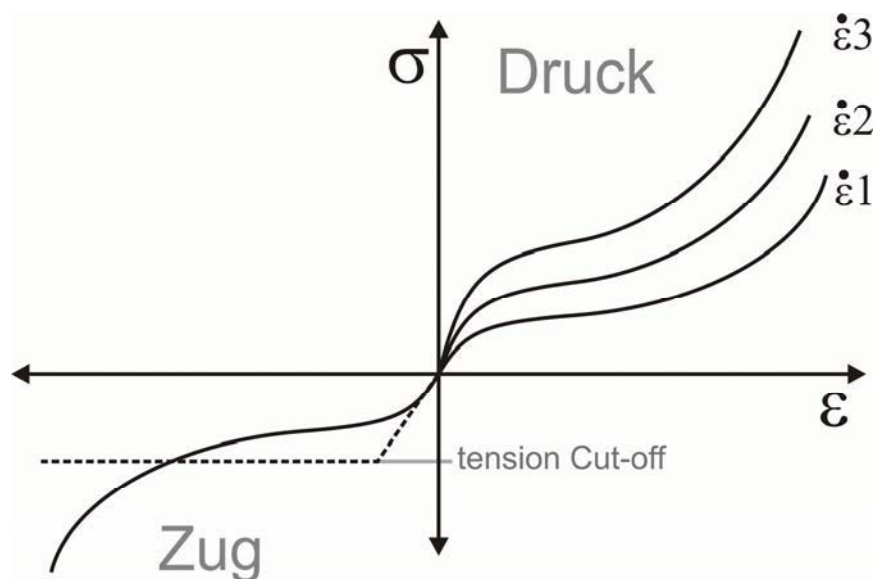


Abb. 2.9: Belastungskurven für das Materialmodell Fu Chang Foam

Druckentlastung

Die Entlastungsphase wird durch die Spannungsstauchungskurve mit der niedrigsten Dehnrate definiert. Zur Beschreibung der Entlastungsphase definiert man eine Entlastungskurve mit Dehnrate null. Der Belastungskurve mit der niedrigsten gemessenen Dehnrate weist man einen Wert knapp über null zu. Somit hat man eine Spannungsstauchungskurve für die Belastung und eine eigene für die Entlastung definiert.

Hier zeigt sich auch schon die erste Einschränkung in diesem Modell. Das Material weist kein viskoses Verhalten auf. Das bedeutet, bei einem Lastwechsel wechselt das Materialmodell sprunghaft auf die niedrigste Spannungsdehnungskurve. Hier kommt es zu einem plötzlichen Spannungsabfall, was in diesem Bereich ein unrealistisches Ergebnis liefert. Dennoch kann es oft von Vorteil sein, wenn man eine eigene Entlastungskurve definieren kann.

Zugbelastung

Die Zugeigenschaften können entweder über eine Spannungsdehnungskurve angegeben werden, oder wenn diese nicht zur Verfügung steht, über den E-Modul. Hierbei wird bis zu einer bestimmten cut-off Spannung ein linearelastisches Verhalten simuliert. Ab diesem Wert wird die Spannung wahlweise konstant gehalten oder sie nimmt den Wert null an.

2.2.7 LS-DYNA – Low Density Foam (MAT57)

Aufbringen einer Druckbelastung

Für die Beschreibung der Druckbelastung kann hier wiederum eine Spannungsstauchungskurve angegeben werden. Diese kann ebenfalls entweder als wahre oder nominelle Dehnung definiert werden. Zum Unterschied vom Fu Chang Foam Modell kann hier aber nur eine einzige Kurve angegeben werden. Dies führt zu der Einschränkung, dass sich hiermit nur Materialien ausreichend gut berechnen lassen, die entweder eine sehr geringe Dehnratenabhängigkeit aufweisen oder man eine Kurve zur Verfügung hat, die dem berechneten Belastungsfall möglichst gut entspricht.

Druckentlastung

Die Entlastung erfolgt prinzipiell entlang der angegebenen Belastungskurve. Der Verlauf lässt sich aber über zwei Parameter (HU und SHAPE) steuern.

Die Entlastungskurve $\sigma(\varepsilon)$ weicht nach folgender Formel von der Belastungskurve $\sigma_0(\varepsilon)$ ab:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_0(\varepsilon) \times \left[1 - (1 - HU) \times \left(1 - \left(\frac{W_{\text{cur}}}{W_{\text{max}}} \right)^{\text{SHAPE}} \right) \right] \quad (2.16)$$

$\sigma_0(\varepsilon)$..Belastungskurve

$$W_{\text{max}} \dots \int_0^{\varepsilon_{\text{max}}} \sigma_0(\varepsilon) \times d\varepsilon \quad (\text{const.}) \quad (2.17)$$

$$W_{\text{cur}} \dots W_{\text{max}} + \int_{\varepsilon_{\text{max}}}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) \times d\varepsilon \quad (=f(\varepsilon)) \quad (2.18)$$

W_{max} entspricht der Energie, die zum Erreichen der maximalen Stauchung benötigt wurde. Dieser Wert bleibt für die gesamte Entlastungsphase konstant. W_{cur} bezeichnet die Energie, die zu einem bestimmten Zeitpunkt im Material gespeichert ist bzw. auch dissipiert wurde. Die Parameter HU und SHAPE lassen sich nur iterativ bestimmen, wenn ein Be- und Entlastungszyklus bekannt ist.

Zugbelastung

Die Zugeigenschaften werden wie beim Fu Chang Foam Modell entweder über eine Spannungsdehnungskurve oder über den E-Modul und eine cut-off Spannung definiert.

2.3 Parameterbestimmung für Materialmodelle

2.3.1 Klassische Werkstoffprüfung

Die am weitest verbreitete Methode, um Schaumstoffe bezüglich ihres mechanischen Verhaltens charakterisieren zu können, ist die Durchführung einer uniaxialen Druckprüfung. Natürlich kann man ebenfalls Zug-, Biege-, Torsionsprüfungen, usw. durchführen. Nachdem aber mechanisch beanspruchte Schäume für gewöhnlich unter Druck eingesetzt werden, ist die Druckprüfung die wichtigste, für die es auch eine Reihe von genormter Verfahren gibt.

Bei diesen Verfahren werden genormten Prüfkörper unter einer vorgegebenen Belastung getestet. Es wird hierbei eine langsame monotone Belastung aufgebracht. Gemessen werden immer Kraft-Verschiebungs-Kurven. Daraus lassen sich dann Kennwerte, wie die Stauchhärte bei 25% Kompression oder der Druckverformungsrest ermitteln. Diese Versuche haben in erster Linie die Aufgabe Kennwerte zu liefern, die eine gute Klassifizierung und Vergleichbarkeit der Werkstoffe ermöglichen.

Will man aus diesen Messdaten nun Spannungsdehnungskurven erhalten, muss man von Kraft und Weg auf Spannungen und Dehnungen umrechnen (Abb. 2.10)

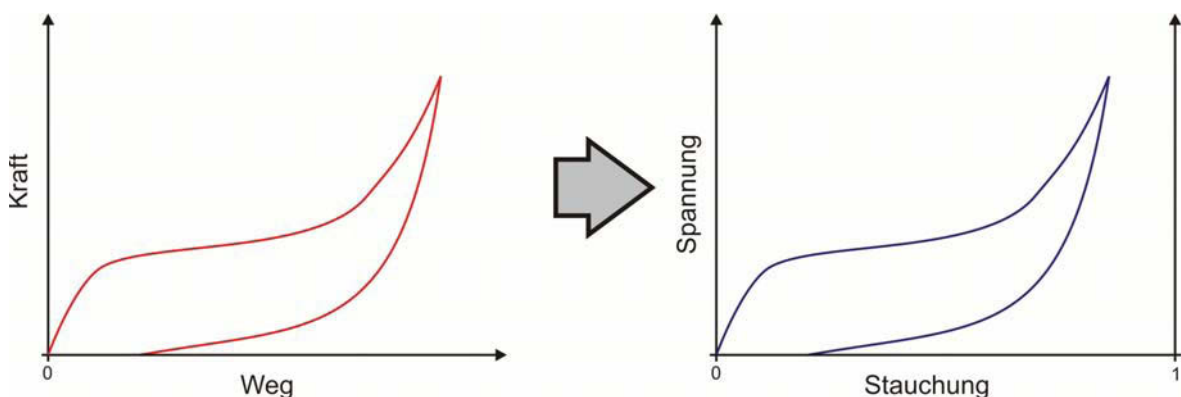


Abb. 2.10: Grundsätzlicher Berechnungsweg der Materialdaten bei einer uniaxialen Druckprüfung mit monotoner Belastung.

Man erhält somit Materialkennwerte, die das Verhalten bei einer monotonen Belastung (Abb. 2.11) beschreiben. Man hält hierbei die Belastungsgeschwindigkeit über den gesamten Messbereich konstant. Die hierbei

aufgebrachten Belastungsgeschwindigkeiten sind in der Regel viel geringer als bei einer Impactbelastung. Um in den Bereich einer Impactbelastung zu gelangen, ist bei dieser Prüfmethode meist ein hoher technischer und somit auch finanzieller Aufwand notwendig.

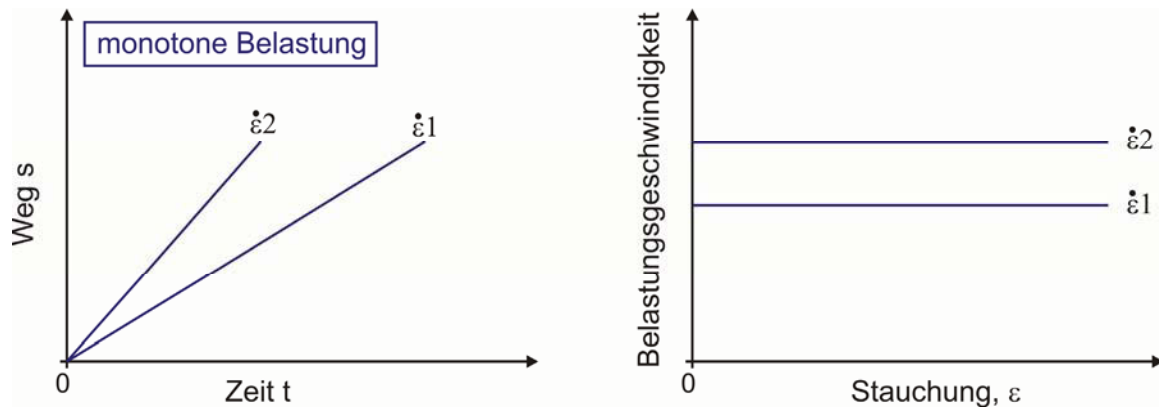


Abb. 2.11: Verlauf einer monotonen Belastung

Polymere Schäume zeigen bei einer Impactbelastung aufgrund ihrer meist starken Dehnratenabhängigkeit ein völlig anderes Verhalten. Daher sind diese Kennwerte, die auch von den Schaumstoffherstellern in Form von Datenblättern angeboten werden, für eine Simulation eines dynamischen Prozesses nur bedingt geeignet.

In Abb. 2.12 ist der schematische Ablauf einer Simulation mit Materialparameter, die über uniaxiale Druckversuche bestimmt wurden, zu sehen. Es werden die ermittelten Materialkennwerte direkt für die Simulation eines beliebigen dynamischen Vorgangs herangezogen. Es sticht dabei sofort heraus, dass es keine Möglichkeit gibt, die Gültigkeit der gemessenen Parameter zu überprüfen. Man geht hier davon aus, dass die Kennwerte bei einer monotonen Belastung auf eine Impactbelastung übertragbar sind. Diese Methode wird sehr häufig eingesetzt, da diese Druckdaten zum einen relativ leicht verfügbar sind und man zum anderen oft kein exaktes Ergebnis benötigt, sondern nur eine gewisse Tendenz vorhersagen will. Um ein besseres Ergebnis zu erzielen, kann man diese Daten aber auch, wie im nächsten Kapitel genauer beschrieben, als Basis für eine iterative Parameterbestimmung in Kombination mit einem Bauteilversuch heranziehen.

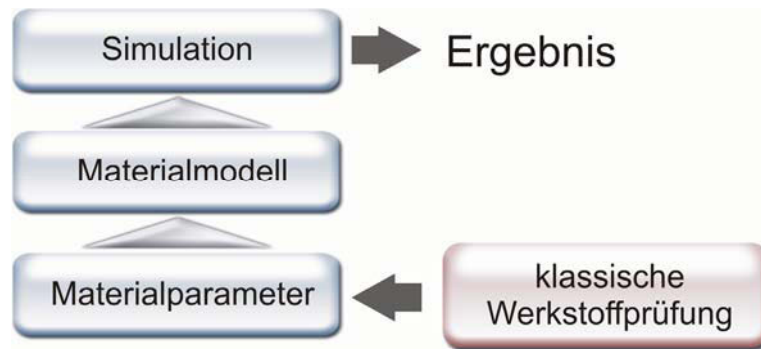


Abb. 2.12: Ablauf einer Simulation mit Materialparameter aus einer herkömmlichen Werkstoffprüfung

2.3.2 Iterative Parameterbestimmung

Um Materialdaten für eine Impactbelastung zu erhalten, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Einer dieser Wege führt über eine Bauteilprüfung. Dabei wird das Bauteil in dem sich das unbestimmte bzw. teilweise unbestimmte Material befindet, als ganzes einer Impactbelastung ausgesetzt. Das Material wird hierbei möglichst so geprüft, wie es dem späteren Einsatzfall entspricht. D.h. man wählt den Versuch möglichst so, dass ähnliche Belastungsgeschwindigkeiten und Spannungszustände (Druck, Zug, Biegung), wie die, die man später simulieren will, auftreten (Stander et al., 2003; Bahlmann, 2004).

Da die meisten Materialmodelle nur sehr stark vereinfacht das reale Verhalten nachbilden, kann es vorkommen, dass ein und dieselben Materialdaten bei einem Versuchsaufbau eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung liefern und bei einem anderen wieder große Abweichungen zeigen. Aus diesem Grund ist diese Art der Parameterbestimmung sehr beliebt. Denn die Daten, die daraus gewonnen werden, sind für den bestimmten Einsatzzweck, für den sie geprüft wurden, auch zuverlässig.

Die erste Einschränkung dieses Verfahrens zeigt sich schon in folgender Voraussetzung: Um Parameter bestimmen zu können, muss man bereits Materialdaten besitzen, die den gesuchten möglichst nahe kommen. Das sind nun die Startwerte, die im Prinzip bei jedem iterativen Verfahren benötigt werden. Hierfür kann man z.B. Kennwerte aus quasistatischen Tests oder etwaigen Datenblättern heranziehen. Der Berechnungsverlauf stellt sich hierbei wie in Abb. 2.13 und Abb. 2.14 dar. Aus bestimmten Ausgangsmaterialdaten (hier

Spannungsstauchungskurven) werden neue Materialdaten, die aber nur eine Abwandlung der Ausgangsdaten darstellen, bestimmt.

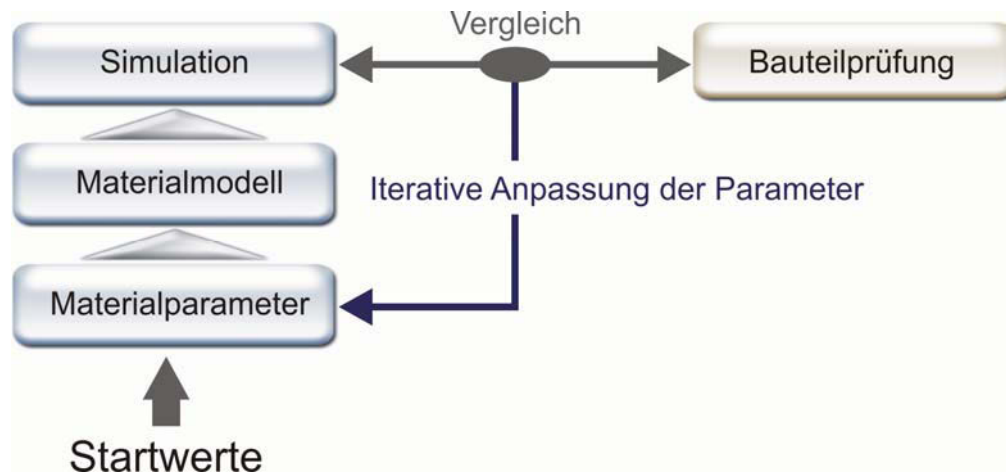


Abb. 2.13: Ablauf einer iterativen Parameterbestimmung

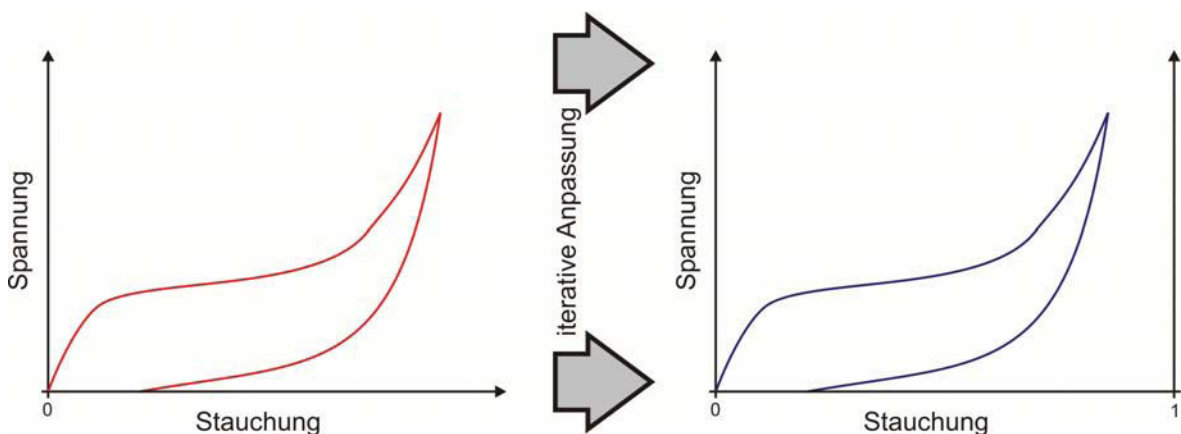


Abb. 2.14: Grundsätzlicher Berechnungsweg der Materialdaten bei einer iterativen Parameterbestimmung

Wenn man nun Ausgangsdaten hat, muss man sich als nächstes für einen Versuch entscheiden und entsprechend ein Simulationsmodell aufbauen. Die Wahl des geeigneten Versuchs ist hier auch entscheidend für die Qualität des Ergebnisses. Bei der Versuchsauswahl muss entschieden werden, wie stark man den Bauteilversuch vereinfachen kann. Man muss probieren den Versuch auf die wesentlichsten Elemente zu reduzieren, um alle störenden Einflüsse möglichst auszuschließen. Ziel ist es einen Versuch zu haben, bei dem die einzige Unbekannte das Material ist, das man testen will.

Als Versuch kann man beispielsweise mit einer Pendelanlage eine Schlagbelastung auf das Bauteil aufbringen. Oder man kann, wie es bei Fußgänger und Insassenschutztest häufig angewandt wird, einen Aufprallkörper, der mit Sensoren bestückt ist, frei fliegend auf das Bauteil schießen. Für diese Tests gibt es verschiedene genormte Impaktoren, die z.B. einen menschlichen Kopf oder ein Bein nachbilden.

- Der erste große Unterschied zu einer herkömmlichen Materialprüfung, wie Zug-, Druckprüfung, etc. ist, dass bei dieser Art von Impactprüfung üblicherweise nur Beschleunigungen gemessen werden. So befinden sich z.B. im Kopf des Pendels Beschleunigungssensoren.
- Der zweite entscheidende Unterschied liegt in der komplexen Geometrie. So ist es z.B. bei einer herkömmlichen Zugprüfung einfach möglich die auftretenden Spannungen und Dehnungen zu berechnen. Bei diesen Geometrien ist dies nicht mehr möglich. Man kann also bei einem Bauteilversuch aus den Daten keine eindeutige Aussage über die Spannungs- und Dehnungszustände im Material treffen und auch auf keine analytische Art und Weise darauf schließen.

Wenn man nun den Versuch und ein entsprechendes Simulationsmodell hat, ist der nächste Schritt die Versuchsdaten mit den Daten aus der Rechnung zu vergleichen.

Wenn Messung und Rechnung übereinstimmt, geht man davon aus, dass die Materialparameter für diesen Werkstoff gültig sind. Der iterative Prozess ist somit abgeschlossen.

Wenn dies aber nicht der Fall ist, so wie es in der Praxis üblich ist, setzt der eigentliche iterative Prozess ein. Hierfür sind sehr erfahrene Leute gefragt, die möglichst wissen, wie man die Materialparameter anpassen muss, damit sich eine Übereinstimmung ergibt. Die Crux an dieser Methodik ist, dass es keinen im Vorhinein bekannten Zusammenhang zwischen den Abweichungen im Beschleunigungsverlauf und den Änderungen an den Parameter gibt. Aus diesem Grund sind meist viele Iterationen notwendig, wobei jeder Iterationsschritt bedeutet, eine Simulation durchzuführen, die mehrere Stunden Rechenzeit in Anspruch nehmen kann. Es gibt zwar Programme die eine Parameteranpassung

mit Hilfe von Response Surface Methoden oder neuronalen Netzen durchführen können. Aber trotzdem zeigt sich dieses Verfahren als sehr arbeitsintensiv.

Ein großer Nachteil ist, dass es nicht möglich ist Materialkennwerte zu ermitteln, ohne dass Basisdaten vorhanden sind bzw. die Basisdaten schon sehr nahe an den gesuchten Kennwerten liegen müssen.

Eingesetzt wird diese Methode hauptsächlich um vorhandene Materialdaten zu verbessern und sie auf ihre Gültigkeit hin zu überprüfen. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich darin, dass man mit diesen Versuchen nicht nur die Materialdaten überprüfen kann, sondern auch gleich die Genauigkeit der Simulationsrechnung bezüglich des gesamten Bauteils.

2.3.3 Dynamische nicht iterative Kennwertermittlung

Wenn man nun die beiden vorangegangenen Methoden betrachtet, liegt es nahe die Vorteile aus Beiden in einem neuen Verfahren zu vereinen. Einerseits ist es zweckmäßig bei den Versuchen eine ähnliche Belastung aufzubringen, wie es dem späteren Einsatzzweck des Materials entspricht. D.h. es müssen Versuche mit einer Impactbelastung durchgeführt werden. Diese Belastung ist dadurch gekennzeichnet, dass bei niedrigen Verformungen, die höchsten Belastungsgeschwindigkeiten auftreten, die bis zu einer gewissen Maximalverformung auf null absinken.

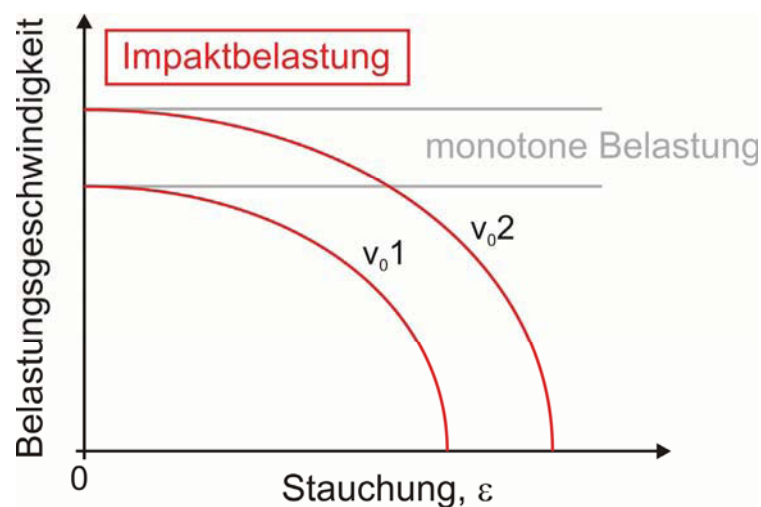


Abb. 2.15: Typischer Verlauf der Belastungsgeschwindigkeit bei einer Impactbelastung im Vgl. zu einer monotonen Belastung

Andererseits ist es auch dringend erforderlich, dass man aus dem Versuch direkt auf Spannungen und Dehnungen schließen kann, um nicht auf einen iterativen Prozess angewiesen zu sein. Die Impactgeschwindigkeiten sollen beim Versuch zwischen 5 und 15 m/s liegen, um möglichst anwendungsnah zu bleiben. Da eine direkte Kraft und Wegmessung bei diesen Geschwindigkeiten aufwendig und teuer ist, sollen stattdessen lediglich Beschleunigungen wie bei den Impact-Bauteilversuchen gemessen werden. Die Geometrie soll nun so einfach gewählt werden, dass man ebenfalls auf Kraft und Weg schließen kann. Dies entspricht einem Berechnungsweg, wie er in Abb. 3.2 dargestellt ist.

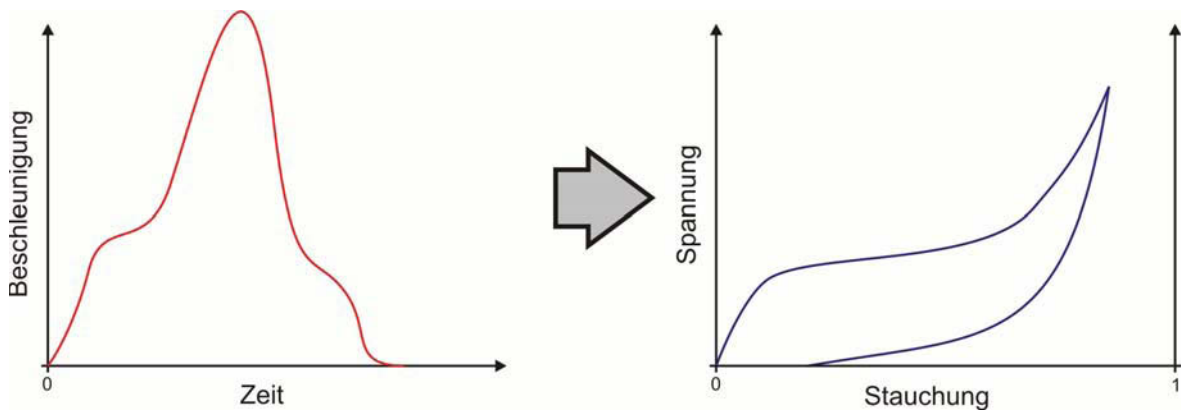


Abb. 2.16: Grundsätzlicher Berechnungsweg der Materialdaten bei einer dynamischen Werkstoffprüfung

Um diesen Voraussetzungen gerecht zu werden, ist es sinnvoll den Versuchsaufbau wie folgt zu treffen:

Beim Versuch soll ein Aufprallkörper mit einer flachen Stirnfläche auf eine zylinder- oder quaderförmige Probe treffen, die auf einer starren Unterlage befestigt ist. Um mögliche Außeneinflüsse auszuschließen, trifft der Aufprallkörper frei fliegend auf die Probe.

Unter diesen Voraussetzungen kann man einen uniaxialen Belastungsfall annehmen und somit die auftretenden Spannungen und Dehnungen aus den gemessenen Beschleunigungswerten berechnen.

Für das ganze Verfahren ergibt sich ein Ablauf wie er in Abb. 2.17 zu sehen ist. An erster Stelle stehen die dynamischen bauteilähnlichen Materialversuche. Hierbei werden in erster Linie die im Aufprallkörper auftretenden Beschleunigungen gemessen. Dabei sollte, um die Messfehler zu minimieren, eine Versuchsserie mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und unterschiedlichen Impaktormassen durchgeführt werden. Aus diesen Daten werden im zweiten und entscheidenden Schritt die Materialparameter berechnet. Hierin liegt der ausschlaggebende Unterschied zu der iterativen Parameterbestimmung. Man ist mit diesen Versuchen in der Lage die Materialparameter direkt aus den Versuchsdaten zu berechnen. Somit entfallen die zeitaufwändigen iterativen Methoden. Anschließend kann man mit diesen Werten gleich in einer Simulationsrechnung die Genauigkeit der Parameter bezüglich der bereits gemachten Versuche untersuchen. Zur Verbesserung der Parameter ist es hier auch optional möglich eine weitere iterative Anpassung vorzunehmen.

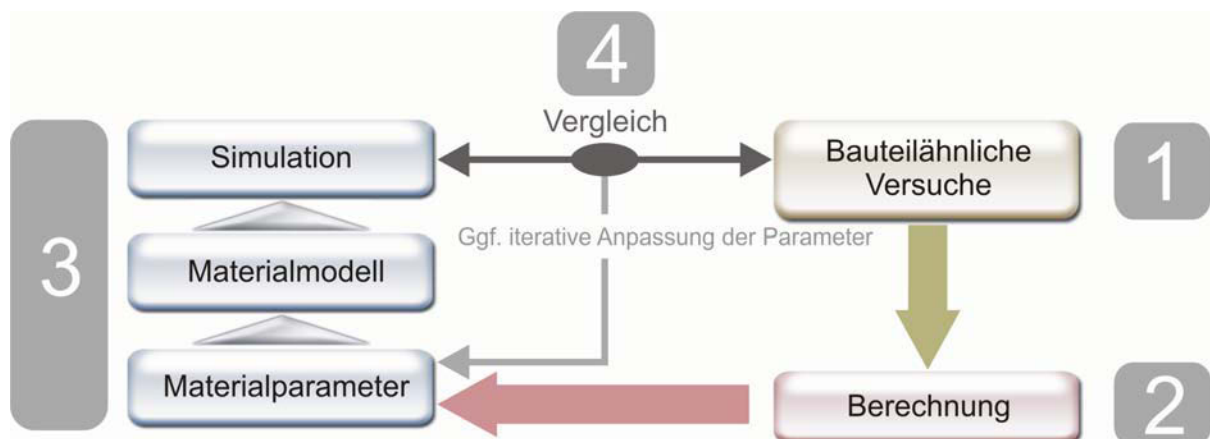


Abb. 2.17: Schematischer Ablauf einer nicht iterativen dynamischen Parameterbestimmung

3 EXPERIMENTELLES

3.1 Untersuchte Schäume

In dieser Arbeit wurden vier Schäume untersucht, die typischerweise in crashabsorbierenden Elementen Anwendung finden.

PP-Schaum

Als erster zu untersuchender Schaum wurde Neoplen® P 40 der Firma BASF (Ludwigshafen, Deutschland), kurz als EPP40 bezeichnet, gewählt. Hierbei handelt es sich um so genanntes expandiertes Polypropylen (EPP). Die Herstellung dieses Schaums umfasst zwei grundlegende Arbeitsschritte. Als erstes werden Schaumpartikel mit einem Durchmesser von 1-8mm hergestellt. In einem Formteilprozess werden diese anschließend weiterverarbeitet. Dazu werden die Schaumpartikel unter Druck in eine Form gefüllt und anschließend mit Wasserdampf beaufschlagt, wodurch sich die Partikel ausdehnen und sich die Zellwände verbinden. Dieses Herstellverfahren gestattet es, sehr homogene thermoplastische Schäume in einem Dichtebereich von 10kg/m^3 bis 300kg/m^3 herzustellen.

Das Impactverhalten dieses Schaums zu untersuchen ist insofern bedeutend, da er eine häufige Anwendung im Automobilbereich findet. Dort wird er aufgrund seines guten Energieabsorptionsvermögens bei Crashabsorber-Elementen eingesetzt. Beispielsweise werden EPP-Leisten zum Fußgängerschutz in den Stoßfängern verbaut.

Im Bereich der FE-Crash-Simulation sind für diesen Schaumtyp schon etliche Materialkennwerte vorhanden. Dies war ein weiterer Punkt, um mit diesem Material die Versuchsserie zu beginnen, da sich somit Vergleichsmöglichkeiten zwischen den neu gewonnen Materialparametern und den derzeit verwendeten ergeben.

Mit einer sehr geringen Querkontraktion und relativ guter Reversibilität erfüllt er auch die Voraussetzungen der verwendeten Materialmodelle.

Der verwendete EPP40-Schaum besitzt folgende Spezifikationen:

Tabelle 3.1: Herstellerdaten des Schaumstoffs EPP40

Formteildichte	40	kg/m ³	
Zugfestigkeit	600	kPa	DIN EN ISO 1798
Reißdehnung	17	%	DIN EN ISO 1798
Druckspannung bei			
25% Kompression	220	kPa	DIN 53421
50% Kompression	390	kPa	
75% Kompression	700	kPa	
Druckverformungsrest	11	%	DIN EN ISO 1856
Stauchhärte	200	kPa	DIN EN ISO 3386

Die Proben wurden mit einer Bandsäge aus einem großen Schaumstoffblock herausgeschnitten und haben eine Fläche von 100x100mm mit einer Höhe von 30 und 60mm.

PUR-Schäume

Weiters wurden die Schäume HRSR und HRSM der Firma Hildebrand und Richter & Co. GmbH (Kirchgellersen, Deutschland) gewählt. Bei diesen Schäumen handelt es sich um Polyätherurethan-Elastomerschäume mit einem gemischt-zelligen Aufbau. Charakteristisch für diese Schäume, sowie für alle Elastomerschäume, ist, dass sie einen geringen Verformungsrest besitzen. Die Schaumtypen HRSM und HRSR bestehen aus dem gleichen Grundmaterial, besitzen aber unterschiedliche Dichte. Für die Probenpräparation lagen die Schäume in Mattenform in einer Dicke von 20mm mit den folgenden Spezifikationen vor:

Tabelle 3.2: Herstellerdaten der Schaumstoffe HRSR und HRSM

	HRSR	HRSM		
Dichte	220	400	kg/m ³	
Reißfestigkeit	500	1300	kPa	DIN 53455-6-4
Reißdehnung	300	300	%	DIN 53455-6-4
Druckverformungsrest	3.2	2.3	%	DIN 53572

Chloropren-Elastomerschaum

Von der Firma PANA Schaumstoff GmbH (Geretsried, Deutschland) wurde der Elastomerschaum CR PUR gewählt. Hierbei handelt es sich um einen Chloropren-Schaum mit gemischtzelliger Struktur. Die Proben wurden hierbei aus 5mm Dicken Schaumstoffmatten herauspräpariert. Die Eigenschaften wurden vom Hersteller wie folgt angegeben:

Tabelle 3.3: Herstellerdaten des Schaumstoffs CRPUR

Dichte	120	kg/m ³	
Zugfestigkeit	>450	kPa	DIN 53571
Bruchdehnung	>150	%	DIN 53571
Druckfestigkeit 25%	35-63	kPa	ASTM D 1056
Druckfestigkeit 50%	80-160	kPa	ASTM D 1056
Druckverformungsrest	11	%	ASTM D 1056

3.2 Laborversuche

Zu Beginn sollen die Schäume auf eine altbewährte Methode charakterisiert werden. Hierfür wird eine uniaxiale servohydraulischen Druckprüfmaschine (MTS 831 Polymer Test System, MTS Systems Corp., MN, USA) verwendet. Mit ihr kann das Verhalten der Schäume bei einer monotonen Belastung bis maximal 8m/s untersucht werden.

Es werden Quaderförmige Proben verwendet. Gemessen werden Weg und Kraft. Daraus kann man unter der Annahme, dass es sich um eine rein uniaxiale Belastung handelt und der Schaumstoff näherungsweise eine Querkontraktion von Null besitzt (Fritz, 2003), einfach unter folgendem Zusammenhang auf Spannungen und Stauchungen umrechnen:

$$\text{Nominelle Spannung } \sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

F ... wirkende Kraft

A ... Probenquerschnittsfläche

$$\text{Stauchung } \varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0} \quad (3.2)$$

Δx ... Deformationsweg

x_0 ... Dicke der unverformten Probe

Die Auswertung folgt somit dem Weg, dass aus den gemessenen Größen Kraft und Weg der Zusammenhang zwischen Spannung und Stauchung hergestellt wird (Abb. 3.1).

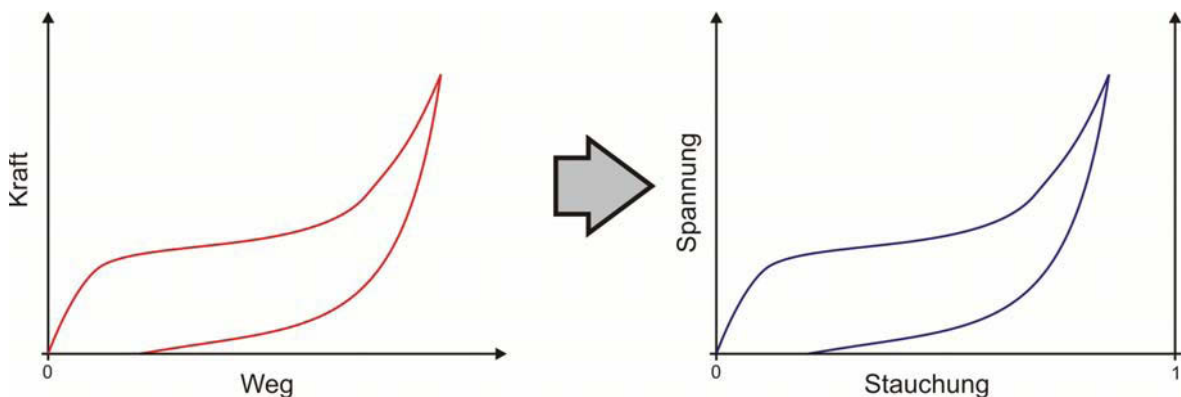


Abb. 3.1: Grundsätzlicher Berechnungsweg der Materialdaten bei einer uniaxialen Druckprüfung mit monotoner Belastung.

3.3 Praxisnahe Versuche mit flachem Impaktor

Ziel dieser Versuche ist es, im Gegensatz zu den Versuchen mit der Druckprüfmaschine, die Materialkennwerte aufgrund der Beschleunigungsdaten eines Impactversuchs zu berechnen (Abb. 3.2).

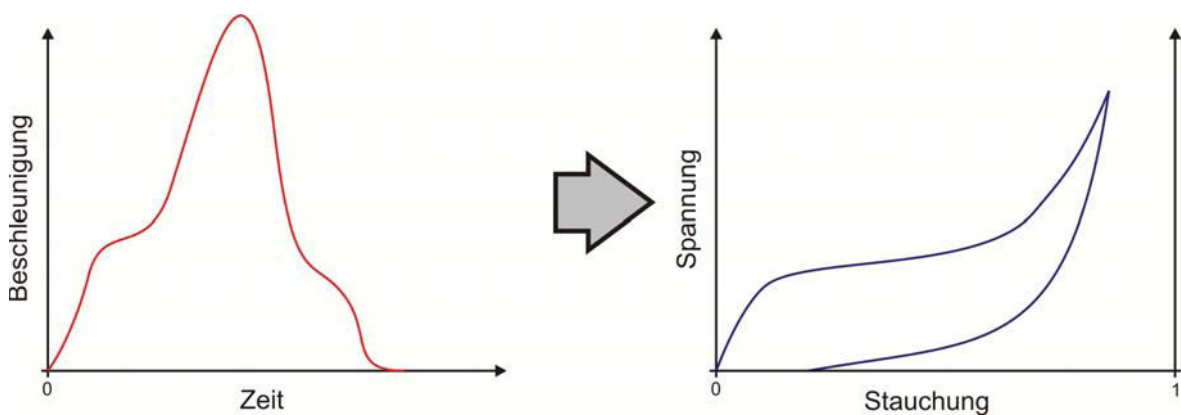


Abb. 3.2: Grundsätzlicher Berechnungsweg der Materialdaten bei einer dynamischen Werkstoffprüfung

3.3.1 Aufbau

Mit den Vorgaben aus der Theorie musste nun ein geeigneter Versuchsaufbau gefunden werden. Der Aufprallkörper soll eine flache Auftrefffläche besitzen, und frei fliegend auf die Probe prallen.

Wenn man mit einer Freifallanlage auf eine Geschwindigkeit von 15m/s kommen will, braucht man bereits eine Fallhöhe von 11,5m. Daher lag die Entscheidung nahe eine pneumatische Abschussvorrichtung zu verwenden, wie sie beim Auftraggeber für verschiedene Fußgängerschutztests verwendet werden. Für die Versuche wurde die FMH-Abschussvorrichtung² benutzt, da diese für den Abschuss von Massen zwischen 3 und 8kg ausgelegt ist und der verwendete Aufprallkörper in diesem Gewichtsbereich liegt. Hierbei handelt es sich um ein Zylinder und Kolben System, mit dem ein Impaktor über eine Länge von ca. einem halben Meter mit Hilfe von Druckluft auf eine bestimmte Geschwindigkeit beschleunigt werden kann. Normalerweise dient dieser Prüfstand zur Untersuchung des Insassenschutzes bzw. auch des Fußgängerschutzes. Dafür wird eine Nachbildung eines Kopfes auf verschiedene Punkte im bzw. auch außerhalb des Fahrzeugs geschossen, um die Beschleunigungen, die bei einem Crash auf den Kopf einer Person einwirken, zu ermitteln. Da der Impaktor für die folgenden Materialprüfversuche ähnliche Masse und Geschwindigkeitsanforderungen wie ein FMH-Kopf besitzt, ist es zweckmäßig diese Anlage für die Versuche heranzuziehen.

Wie in der Abb. 3.3. und Abb. 3.4 zu sehen ist, wird der Impaktor senkrecht nach unten beschleunigt und trifft auf die am Boden liegende Materialprobe. So ist es möglich den 3 bis 8kg schweren Impaktor auf Geschwindigkeiten zwischen 3 und 15 m/s zu beschleunigen.

² FMH - Free Motion Head: genormter Prüfkopf für Kopfaufprallversuche

Pneumatische Abschussvorrichtung



Abb. 3.3: Abschussvorrichtung mit flachem Impaktor

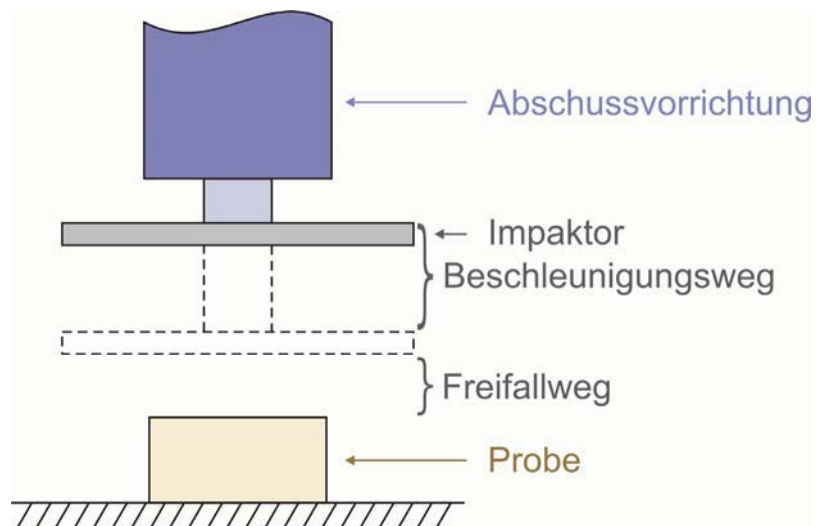


Abb. 3.4: Skizze des Impactversuchs mit flachem Impaktor

Der Aufprallkörper, der eine flache Unterseite besitzen muss, wurde in Form einer rechteckigen Stahlplatte mit den Abmessungen 240x140x14mm realisiert. Wie Abb. 3.7 zeigt wurde auf der Oberseite zusätzlich eine Bohrung für die Führung während der Beschleunigungsphase, sowie weitere Gewindebohrungen zur

Befestigung von Zusatzmassen eingebracht. Als Beschleunigungssensor wurde ein uniaxialer Sensor mit einer Peak-Belastung von 500g ausgewählt. Dieser wird am Rand der Stahlplatte auf der Oberseite befestigt. Ein zentraleres Anbringen ist aufgrund der Haltevorrichtung an der FMH-Kanone nicht möglich. Die erste Versuchsreihe wurde mit Impaktor V1 (Abb. 3.5) durchgeführt, alle weiteren mit Impaktor V2 (Abb. 3.7). Der Impaktor wurde dabei insofern modifiziert, dass er nun auf der Oberseite und an den Rändern durch Gummi und Neopren gepolstert ist, damit die Anlage vom zurückprallenden Impaktor nicht beschädigt wird. Auf der Unterseite wurde eine elektrische Kontaktfolie angebracht, um den exakten Zeitpunkt des Auftreffens bestimmen zu können.



Abb. 3.5: Impaktor V1 mit Zusatzgewichten



Abb. 3.6: Impaktor V2 mit Kontaktfolie, Neopren- und Gummilaschen auf der Abschussvorrichtung befestigt.

3.3.2 Kenngrößen

Der entscheidende Unterschied zu den klassischen Laborversuchen liegt bei diesen dynamischen Versuchen in der Art der gemessenen Kennwerte. Wie bei allen Impact- und Crashversuchen ist die ausschlaggebende Größe die Beschleunigung. Bei diesem Versuch sitzt daher ein uniaxialer Beschleunigungssensor auf der Impaktor-Stahlplatte und liefert uns den zeitlichen Verlauf der Beschleunigung mit der der Impaktor gebremst wird. Der Sensor arbeitet mit einer Abtastrate von 20kHz und kann Maximalbeschleunigungen bis 500g erfassen.

Bei sehr weichen Schäumen kann noch das Problem auftreten, dass der genaue Auftreffzeitpunkt aus dem Beschleunigungsverlauf nicht genau ersichtlich ist. Für die weitere Auswertung ist es aber erforderlich, dass dieser Zeitpunkt genau bekannt ist. Ein Fehler hierbei hat eine direkte Auswirkung auf die Genauigkeit der Berechnung des Deformationsweges. Um diese Genauigkeit zu erhöhen, wurde sowohl auf der Schaumprobe als auch auf der Impaktorunterseite eine elektrische Kontaktfolie in Form einer dünnen selbstklebenden Kupferfolie angebracht. Beim Versuch wird auf einem zusätzlichen Kanal der elektrische Widerstand zwischen beiden Folien gemessen. Sobald sich beide Folien berühren, fällt der Widerstand schlagartig von unendlich auf praktisch null ab. Hieraus lässt sich der Trefferzeitpunkt genauer als aus dem Ansteigen der Beschleunigung bestimmen.

Aus einem Versuch stehen nun folgende Daten für die weitere Berechnung zur Verfügung:

- Beschleunigungsverlauf und
- Auftreffzeitpunkt

Zur optischen Überprüfung wird jeder Versuch mit einer Highspeed Kamera, die auf Höhe der Probe angebracht ist, mit einer Bildrate von 1000fps aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Aufzeichnungen ist es möglich zu überprüfen, ob die Stahlplatte zentral und ohne Verkippung auftrifft. Somit können Versuche, die aufgrund einer Verkippung des Impaktors zu sehr von dem uniaxialen Belastungszustand abweichen, identifiziert werden.

3.3.3 Datenreduktion und Berechnungen

Für die Auswertung der Versuche stehen uns zum einen die vorgegebenen Versuchsrandbedingungen und zum anderen die während des Versuchs gemessenen Werte zur Verfügung.

Jeder Versuch ist im Vorhinein durch die Probengeometrie und die Impaktormasse definiert. Als Messwert erhalten wir den zeitlichen Verlauf der Beschleunigung im Impaktor, bei dem der Nullpunkt der Zeitachse schon auf den richtigen Auftreffzeitpunkt gesetzt worden ist.

Die Aufgabe besteht nun darin, aus diesen Beschleunigungsdaten die Zusammenhänge zwischen Spannung, Dehnung und Dehnrates zu ermitteln. In Abb. 3.7 sind die einzelnen Versuchsphasen mit dem gemessenen Beschleunigungssignal dargestellt.

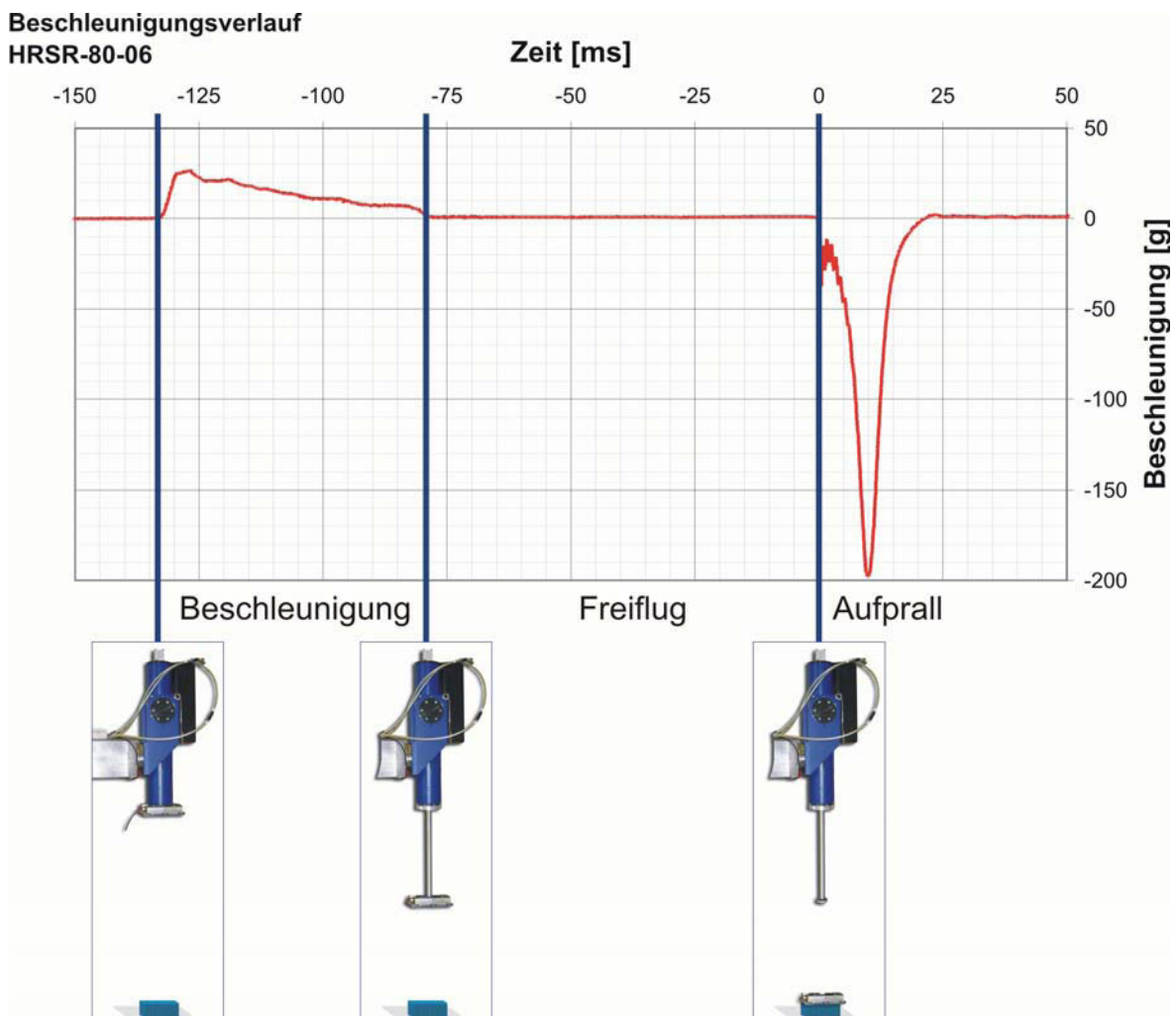


Abb. 3.7: Typischer Beschleunigungsverlauf eines Impactversuchs

Als erstes gilt es die genaue Aufprallgeschwindigkeit v_0 zu berechnen. Der Impaktor wird von der FMH-Kanone über eine Distanz von ca. einem halben Meter auf Geschwindigkeit gebracht. Danach folgt eine kurze Freifallstrecke, über die der Impaktor mit einem g Erdbeschleunigung weiter beschleunigt bis er auf die Probe trifft. Da der Beschleunigungsverlauf über diesen Zeitraum aufgezeichnet wird, ist es möglich über eine Integration des Beschleunigungssignals vom Abschuss bis zum Auftreffen die Auftreffgeschwindigkeit zu berechnen.

$$v_0 = \int_{t_0}^{t_{-1}} a(t) \cdot dt \quad (3.3)$$

t_{-1} ... Beginn der Beschleunigung

t_0 ... Auftreffzeitpunkt

Als nächster Schritt folgt nun die Berechnung des Geschwindigkeitsverlaufs.

$$v(t) = v_0 + \int_t^{t_0} a(t) \cdot dt \quad (3.4)$$

Da die Beschleunigung ein negatives Vorzeichen hat, also eine Bremsbeschleunigung ist, ist das Integral aus Gl. 3.4 kleiner null, wodurch sich eine Verlangsamung ergibt. Aus dem Geschwindigkeitsverlauf kann über eine weitere Integration der zurückgelegte Weg des Impaktors berechnet werden.

$$x(t) = \int_t^{t_0} v(t) \cdot dt \quad (3.5)$$

Die Integrationskonstante ist null, da der zurückgelegte Weg des Impaktors im Auftreffzeitpunkt mit null angenommen wird.

Unter der Annahme, dass die Schaumstoffprobe gleichmäßig komprimiert wird und eine Querkontraktionszahl von null besitzt, also die Kompression rein über eine Volumenreduktion stattfindet, können nun die auftretenden Spannungen und Dehnungen berechnet werden. Über den Zusammenhang Kraft ist Masse mal Beschleunigung, erhält man mit der Impaktormasse und der im Impaktor auftretenden Beschleunigung für jeden Zeitpunkt die Kraft, die von oben auf die Probe wirkt. Diese Kraft erzeugt nach dem Grundsatz *actio est reactio* im Schaum eine Gegenkraft mit gleicher Größe. Mit der Annahme, dass die Spannungen in

der Probe gleich verteilt sind, kann man aus der Kraft über den Probenquerschnitt auf die entsprechende Spannung schließen.

$$F(t) = m_I \times a(t) \quad (3.6)$$

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A} = \frac{m_I}{A} a(t) \quad (3.7)$$

F... Kraft, die auf die Probe wirkt

A... Probenquerschnittsfläche

m_I ... Impaktormasse

σ ... nominelle Spannung in der Probe

Die Dehnungen können wieder unter der Annahme, dass die Dehnungen in der Probe gleichmäßig verteilt sind und dass die Querkontraktion null ist, berechnet werden. Dafür nimmt man den zurückgelegten Weg des Impaktors. Die Probe muss also um die Länge gestaucht worden sein, die der Impaktor seit dem Auftreffzeitpunkt zurückgelegt hat.

$$\varepsilon(t) = \frac{x(t)}{l_0} \quad (3.8)$$

ε ... nominelle Dehnung

l_0 ... Probendicke

Die Dehnrage wird durch die erste zeitliche Ableitung der Dehnung beschrieben.

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{1}{l_0} \times \frac{dx(t)}{dt} = \frac{v(t)}{l_0} \quad (3.9)$$

Aus diesen Daten kann man nun ein Spannungs-Dehnungsdiagramm erstellen bzw. den Zusammenhang Spannung-Dehnung-Dehnrage dreidimensional darstellen.

Der Spannungs-Dehnungsverlauf bildet für den gesamten Impactvorgang eine geschlossene Kurve. Die darin eingeschlossene Fläche entspricht dem Hystereseverlust, der während des Impactvorganges auftritt. Wenn man dieses Integral wie in Gl. 3.10 berechnet, erhält man die pro Volumeneinheit dissipierte Energie E_V .

$$E_V = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma_{\text{HIN}} d\varepsilon + \int_{\varepsilon_{\max}}^0 \sigma_{\text{RÜCK}} d\varepsilon \quad (3.10)$$

Um besser mit anderen Versuchen vergleichen zu können, ist es sinnvoll, diesen Wert auf die gesamte während der Kompressionsphase hineingesteckte Energie zu normieren. Man kann nun die Hystereseverluste H wie in Gl. 3.11 in Prozenten angeben.

$$H = \frac{E_V}{\int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma_{\text{HIN}} d\varepsilon} \quad (3.11)$$

Nachdem nun mehrere Versuche mit einem Schaumstoff durchgeführt wurden, ist es sinnvoll die vielen gewonnenen Spannungsdehnungskurven, die nun ein und dasselbe Material beschreiben auf eine einzige Kurve zusammenzuführen. Es gibt mehrere mathematische Ansätze so ein Problem zu lösen. Ich habe mich für folgende Lösungen entschieden.

Arithmetische Mittelwertkurve

Für eine bestimmte Stauchung gibt es nun aufgrund der Versuchsstreuung unterschiedliche Spannungswerte. Des Weiteren liegen diese Spannungswerte in diskreter Form vor. D.h. es ist notwendig für einen bestimmten Kompressionswert die korrespondierende Spannung zu interpolieren. In unserem Fall werden diese Werte linear zwischen den benachbarten interpoliert. Um nun die Mittelwertkurve zu erhalten, werden in bestimmte Schritten, z.B. alle 1% Stauchung, die Spannungen aus allen Versuchen ermittelt. Von diesen wird anschließend das arithmetische Mittel gebildet.

Sind viele Versuche vorhanden, ergibt sich so eine relativ glatte Kurve die jede beliebige Form annehmen kann.

Aus den einzelnen Versuchen gibt es aber Spannungsdehnungskurven, die alle eine andere maximale Kompression aufweisen. Wenn man sich beim Bilden der Mittelwerte von niedriger zu hoher Kompression vorarbeitet, wird die Zahl der Versuche, aus denen ein Mittelwert bestimmt werden kann, immer geringer. An den Stellen, an denen sich diese Anzahl verringert, kann es zu Stufen in der Mittelwertkurve kommen. Es ist zwar möglich diese Stufen zu einem gewissen Teil

zu glätten, dennoch ergibt sich mit dieser Methode keine Kurve, die für die FE-Berechnung gut geeignet wäre, da bei der Simulation Materialdaten bis zu sehr hohen Kompressionen benötigt werden, um die Stabilität der Rechnung zu garantieren.

Fitfunktion nach dem Rusch-Modell

Eine zweite Möglichkeit die Daten zu vereinheitlichen, besteht darin durch alle Datenpunkte eine entsprechende Ausgleichsfunktion zu legen. Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn man den prinzipiellen Verlauf der Kurve kennt, da dieser Verlauf durch die Fitfunktion vorgegeben wird.

Bei unseren Versuchen handelt es sich um eine Druckverformung von Schaumstoffen. Diese Belastung weist einen charakteristischen Spannungsdehnungsverlauf auf, der in verschiedenen mathematischen Materialmodellen beschrieben wird. Für unsere Schäume hat sich gezeigt, dass hier das modifizierte Rusch-Modell eine gute Übereinstimmung liefert. Diese Funktion kann den Verlauf mit vier Parametern beschreiben. Diese vier Parameter werden mit Hilfe einer Levenberg-Marquadt Iteration mit einem hierfür programmierten VBA-Tool bestimmt.

Trotz der relativ guten Übereinstimmung dieses Modells zeigt es dennoch bei niedrigen Stauchungen bei gewissen Schäumen erhebliche Abweichungen. Um nun bei niedrigen und bei hohen Stauchungen eine saubere glatte Kurve zu erhalten, ist es zweckmäßig diese beiden mathematischen Methoden zu kombinieren. Stauchungen bis ca. 30-40% werden über eine arithmetische Mittelwertkurve beschrieben, da diese in der Lage ist jede beliebige Form anzunehmen. Höhere Stauchungen werden durch die Fitfunktion beschrieben. Mit ihr ist es auch möglich eine Extrapolation der Versuchsdaten bis zu Stauchungen knapp an die 100% durchzuführen. Diese Kombination gewährleistet die gute Nachbildung der Versuchskurven sowie die für die Simulation notwendige Extrapolation der Spannungsstauchungskurve.

Um die Auswertung zu vereinfachen, wurde ein VBA-Tool programmiert, das folgende Schritte automatisiert durchführen kann:

- Messdaten einlesen
- Messdaten glätten
- Berechnen durchführen (Spannungen, Dehnungen, Dehnraten, Hysterese,...)
- Daten zusammenführen (Fit erstellen, Mittelwertkurve erzeugen)
- Diagramme erstellen

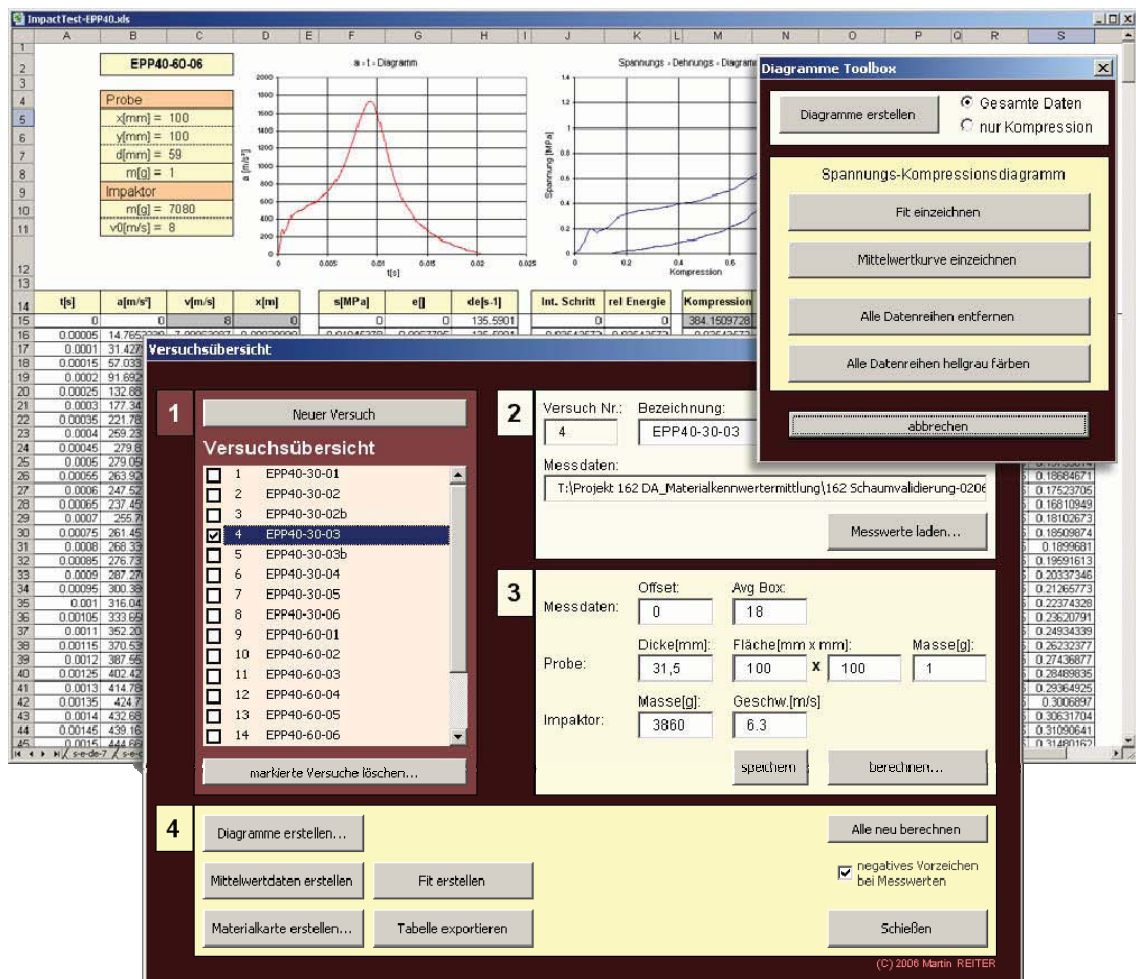


Abb. 3.8: VBA-Tool zur automatisierten Auswertung der Impactversuche

3.4 Bauteilversuche

Um zu überprüfen, ob und wie gut die gewonnenen Materialdaten auf komplexere Belastungsfälle angewandt werden können, werden Versuche mit einem kugelförmigen Impaktor durchgeführt. Bei den Versuchen mit der servohydraulischen Prüfmaschine und den dynamischen Tests mit dem flachen Impaktor konnte man unter den Voraussetzungen, dass die Querkontraktion null ist und dass die Effekte einer wellenförmigen Stoßausbreitung vernachlässigbar

sind, annehmen, dass zu einem jedem Zeitpunkt in der gesamten Probe gleichmäßig verteilte Spannungs- und Dehnungszustände vorliegen. Bei einem Kugelaufprall ist diese Annahme nicht mehr zulässig, da zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Verteilung verschiedener Spannungs- und Dehnungszustände vorliegt. Diese Zustände sind nun analytisch nicht mehr exakt berechenbar.

3.4.1 Versuchsaufbau

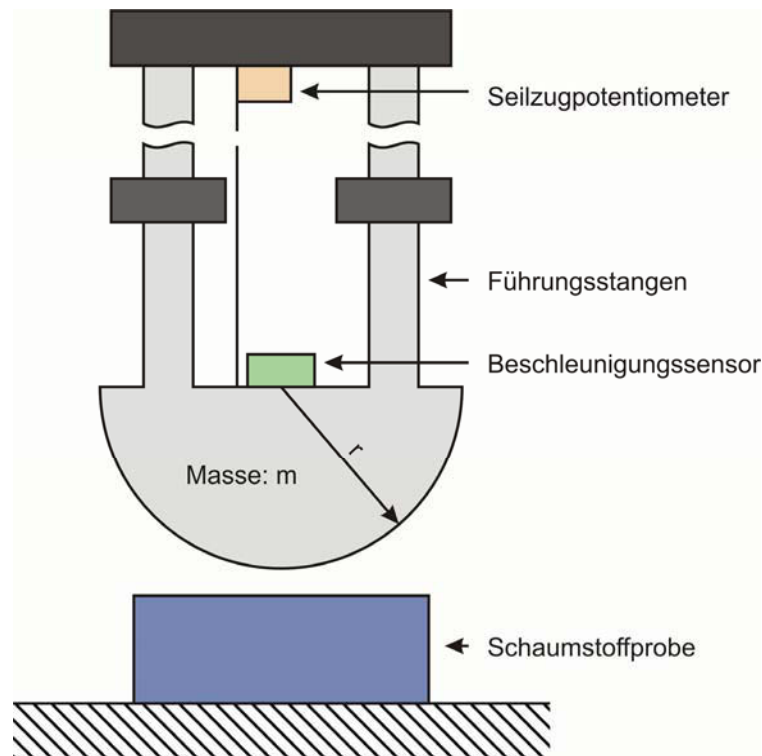


Abb. 3.9: Schematischer Versuchsaufbau der Impactversuche mit Kugelimpaktor

Der Versuchsaufbau wurde, wie in Abb. 3.9 zu sehen ist, als ein geführter Freifallversuch realisiert. Als Basis für diesen Versuch wurde die Fußgängerschutz Legform-Abschussvorrichtung verwendet. Sie wird üblicherweise dazu genutzt, um einen Beinimpaktor zur Untersuchung der Fußgängersicherheit gegen eine Fahrzeugfront zu schießen. Mit Hilfe eines pneumatischen Druckzylinders wird der Impaktor über Führungsstangen beschleunigt. Mit einem dünnen Drahtseil, welches über ein Potentiometer läuft, kann während der geführten Beschleunigungsphase der zurückgelegte Weg gemessen werden. Anstelle der Haltevorrichtung, die normalerweise für den Abschuss des Beinimpaktors an den Führungsschienen befestigt wird, wird hier eine Stahlhalbkugel befestigt. Diese Halbkugel mit einem Durchmesser von 165mm besitzt im Zentrum einen

uniaxialen Beschleunigungssensor. Der gesamte Impactversuch wird senkrecht nach unten durchgeführt. Das Führungsgestänge mit der Halbkugel wird ohne zusätzliche Druckluft, allein mit Hilfe der Schwerkraft nach unten beschleunigt. Die Gesamtaufprallmasse von 6780g ergibt sich aus 1820g für die Halbkugel mit Sensorik plus 4960g für das Führungsgestänge. Diese Masse trifft nach einer Freifallstrecke von ca. 40cm auf die am Boden liegende Schaumstoffprobe.

3.4.2 Messwerte

Bei diesem Aufprall wird wie bei den Versuchen mit flachem Impaktor die Beschleunigung im Aufprallkörper gemessen. Der eingebaute Beschleunigungssensor hat eine Genauigkeit von $\pm 1g$ und eine Peak-Belastung von 500g.

Beim Versuch mit flachem Impaktor wurde die Auftreffgeschwindigkeit über Integration des Beschleunigungssignals während der Beschleunigungsphase berechnet. Bei dieser Versuchsanordnung wird der Impaktor lediglich mit Hilfe der Erdbeschleunigung auf Geschwindigkeit gebracht. Diese Beschleunigung entspricht genau einem g, was wiederum innerhalb der Genauigkeit des Sensors liegt. Daher genügt es hier nicht, die Aufprallgeschwindigkeit aus den Sensordaten zu berechnen. Es muss eine zusätzliche Sensorik verwendet werden.

Deshalb wird bei diesen Versuchen zusätzlich noch der Weg direkt mit Hilfe eines dünnen Drahtseils, das über ein Potentiometer abgerollt wird, gemessen. Aus dieser Messung kann man zum einen die Aufprallgeschwindigkeit und zum anderen den Eindringweg in die Probe genau bestimmen.

Zur optischen Überprüfung wird der ganze Impactvorgang noch mit einer Highspeedkamera mit einer Frequenz von 1000 Bildern pro Sekunde gefilmt.

3.5 FE-Simulation

Um die Richtigkeit der aus den vorherigen Versuchen gewonnenen Materialwerte zu überprüfen, werden diese Versuche mit einer finiten Elemente Rechnung nachgerechnet. Zum Einsatz kommen hier das FE-Softwarepaket LS-DYNA und der Pre-Prozessor Medina, mit dessen Hilfe das FE-Netz generiert wird. Die Rand- und Anfangsbedingungen, sowie alle übrigen Berechnungsparameter werden direkt in das Inputfile eingetragen.

Um die Simulation durchführen zu können, sind folgende Schritte notwendig:

- Materialdaten in eine für das FE-Programm verarbeitbare Form bringen
- Geometrie, Rand- und Anfangsbedingungen der Versuche nachbilden
- Simulation mit LS-DYNA explicit Solver durchführen
- Auswertung der Berechnungsdaten

3.5.1 Materialkarte erstellen

Um die vorherigen Versuche mit Hilfe der FE-Simulation nachrechnen zu können, ist es als erstes erforderlich, dass man die Materialdaten in eine Form bringt, die von der Computersoftware verarbeitet werden können. Man muss hierfür eine sog. Materialkarte erstellen. Das ist eine ASCII Datei, in der die Parameter, die für das verwendete Materialmodell benötigt werden, in einem vorgegebenen Format eingetragen sind.

Die Materialmodelle Low Density Foam (MAT57) und Fu Chang Foam (MAT83) benötigen für die Beschreibung der Druckverformung, die Angabe des Zusammenhangs von nomineller Spannung zu nomineller Dehnung. Hierfür werden die ermittelten Spannungskompressionskurven aus den Versuchen mit flachem Impaktor herangezogen. Um in der Simulation eine stabile Rechnung gewährleisten zu können, sind hierfür Daten bis zu großen Kompressionen notwendig. Für Kompressionen bis ca. 40% werden die Mittelwertdaten aus den Versuchen herangezogen und bis zu 95% Kompression werden die Daten mit dem Rusch-Modell extrapoliert.

Als E-Modul wird die Steigung der Spannungsstauchungskurve im Punkt Null definiert. Dieser wird in erster Linie zur Beschreibung der Zugeigenschaften benötigt. Er hat außerdem noch Einfluss auf die Berechnung des kleinsten Zeitschritts, da er die Schallgeschwindigkeit beeinflusst und diese über die Courant-Bedingung den kleinsten Zeitschritt.

Die Dichte wird den Datenblättern entnommen. Sie hat Einfluss auf die Massenträgheit des Schaums und ebenfalls auf die Berechnung des Zeitschritts.

Für das Material Low Density Foam werden die Parameter HU und SHAPE mit 0.01 und 5 angenommen. Dies ergibt ein Ergebnis, das in erster Näherung gut zu

dem Hystereseverhalten der getesteten Schäume passt. Auf eine genauere iterative Bestimmung wurde hierbei verzichtet.

Bei dem Materialmodell Fu Chang Foam wurde als Entlastungskurve eine Kurve definiert, die der Belastungskurve entspricht, mit dem Unterschied, dass ihr Spannungsniveau um den Faktor der Hystereseverluste nach unten skaliert wurde.

3.5.2 Modellaufbau der Versuche mit flachem Impaktor

Um nun die Qualität der Materialdaten zu überprüfen, wird der Realversuch mit denselben Randbedingungen als FE-Simulation nachgerechnet. Die Geometrie besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen, dem Impaktor und dem Schaumblock. Diese Teile sind wie folgt aufgebaut:

Der Impaktor wird als Schalenelement, als sog. Shell-Element, mit einer Elementgröße von 5mm realisiert. Dies entspricht einer zweidimensionalen Struktur ähnlich einem Blech. Als Materialtyp wird hierfür der Typ Rigid verwendet, wodurch die Platte ein starres unverformbares Verhalten erhält. Um die Masse der Platte gut variieren zu können, wird ein einzelner Massepunkt an den Rigid-Body gehängt. Die Gesamtmasse des Impaktors setzt sich aus der Masse der Rigid-Body-Shell, die die Dichte von Stahl und eine Dicke von 1mm besitzt, sowie des Massenpunktes zusammen.

Der Schaumblock wird aus dreidimensionalen Hexaeder-Solid-Elementen mit einer Elementkantenlänge zwischen 5 und 10 mm modelliert. Auf die genaue Modellierung des Schichtaufbaus der Proben wurde bei den Versuchen mit flachem Impaktor verzichtet, da es aufgrund der uniaxialen Belastung zu keinen Kräften quer zur Belastungsrichtung und somit zu keinem Unterschied zwischen einem Soliden Block und einer Schichtstruktur kommt. Als Elementtyp wird der LS-Dyna Standardtyp Nummer eins mit einem Integrationspunkt gewählt, da dieser bei den Berechnungen von Fahrzeugcrashes aufgrund seiner kürzeren Rechenzeit bevorzugt zum Einsatz kommt. Um den Kontakt zwischen Impaktor und Schaumblock zu gewährleisten, wird über den Schaumblock eine sog. Nullschale gelegt. Hierbei handelt es sich um ein Shell-Element mit dem Materialtyp MAT_NULL, welches die gleichen Knoten wie die Ummantelung des

Schaumblocks besitzt. Es trägt nichts zur Stabilität des Solid-Elements bei, sondern dient nur dazu den Kontakt zum Impaktor definieren zu können. Um die Auflage des Schaumblocks auf dem Boden nachzubilden, werden für alle Knotenpunkte in der untersten Ebene die translatorischen Freiheitsgrade gesperrt.

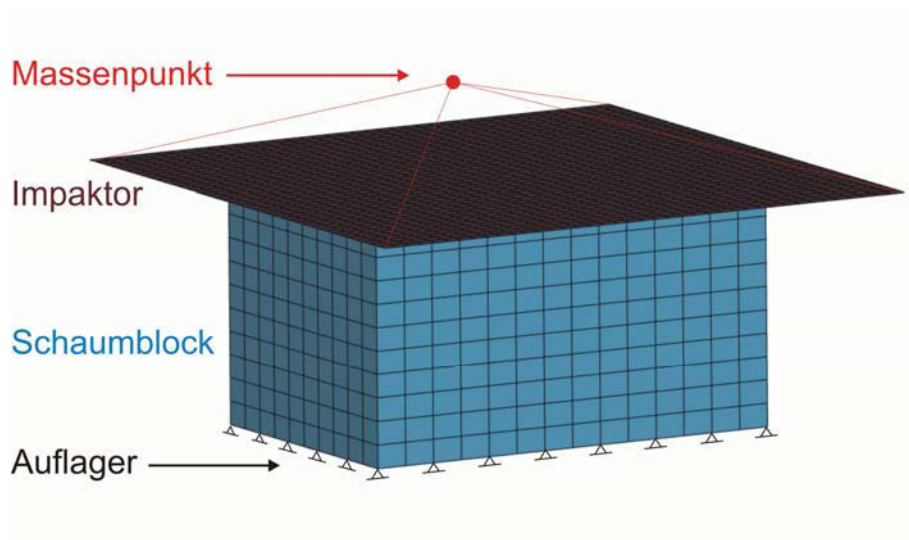


Abb. 3.10: FE-Modellaufbau der Versuche mit flachem Impaktor

3.5.3 Modellaufbau der Versuche mit Kugelimpaktor

Der Modellaufbau der Bauteilversuche besteht im Wesentlichen aus den gleichen Elementen wie das Modell mit flachem Impaktor.

Der Kugelimpaktor ist wie der flache Impaktor als Rigid-Body modelliert. Im Mittelpunkt ist zusätzlich ein Massenpunkt angebracht, um die entsprechende Masse des Impaktors besser einstellen zu können.

Die Schaumstoffprobe besteht ebenfalls aus Hexaeder-Solid-Elementen. Um das Auflager zu simulieren, werden die translatorischen Freiheitsgrade aller Knoten der untersten Ebene gesperrt. Im Ggs. zu den Versuchen mit flachem Impaktor treten hier nun auch Kräfte quer zur Auftreffrichtung auf. Aus diesem Grund wird zusätzlich ein Modell mit dem genauen Schichtaufbau der Probe erstellt. Beim mehrschichtigen Modell wurden die Eckpunkte jeder zweiten Ebene um 1mm nach außen verschoben, damit es nicht bei einem direkten Übereinanderliegen der Knotenpunkte zu Kontaktproblemen und Durchdringungen der Elemente kommt.

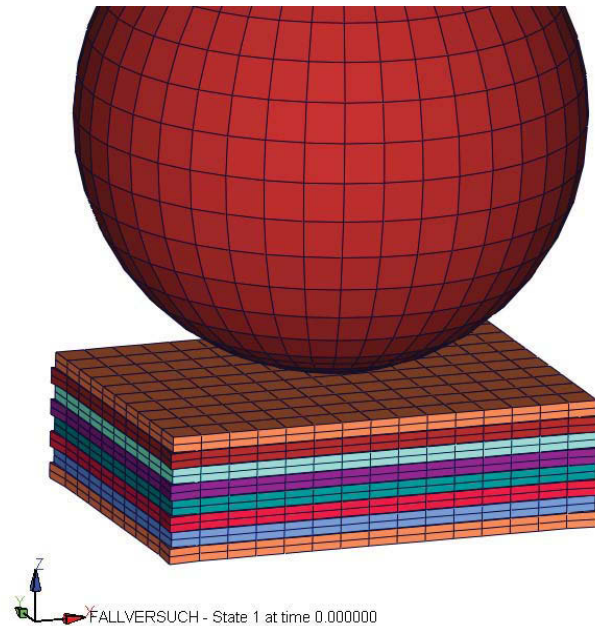


Abb. 3.11: FE-Modellaufbau einer mehrschichtigen Schaumstoffprobe mit Kugelimpaktor

3.5.4 Berechnung mit LS-DYNA explicit

Die FE-Berechnung erfolgt mit LS-DYNA, wie es für dynamische Simulation üblich ist im expliziten Lösungsverfahren. Für jeden Versuch werden nun Geometrie und Materialdaten zusammengeführt und dieser jeweils mit den gleichen Anfangsbedingungen nachgerechnet.

Für die Berechnung wird dem Impaktor mit seinem Massenpunkt eine Initialgeschwindigkeit, die der jeweiligen Auftreffgeschwindigkeit entspricht zugewiesen. Der Kontakt zwischen Impaktor und Schaumblocknullschale ist als automatischer surface to surface Kontakt definiert.

Um nun aus dieser Berechnung auswertbare Ergebnisse zu erhalten, wird zum einen die gesamte Geometrie jede halbe Millisekunde abgespeichert. Dies ermöglicht eine optische Analyse des Vorgangs und einen Vergleich mit dem Video des Realversuchs. Zum anderen werden die Knotenvariablen wie Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg, des Knotens in der Mitte der Impaktorplatte und des untersten Knotens beim Kugelimpaktor alle 0.05ms gespeichert. Dies ermöglicht es einen genauen Beschleunigungs- und Wegverlauf jedes Versuchs zu erstellen. Dieser kann dann mit den realen Versuchsdaten verglichen werden.

4 ERGEBNISSE

4.1 Methodik

Das gesamte Charakterisierungsverfahren wird im Folgenden anhand des Werkstoffs EPP40 ausführlich beschrieben.

4.1.1 Uniaxiale Druckprüfung:

Mit der servohydraulischen Druckprüfmaschine wurden die vier Schäume HRSR, HRSM, CRPUR und EPP40 untersucht.

Für jeden Schaumstoff wurden 6 Belastungszyklen mit einer monotonen Belastung von 1mm/s bzw. 100mm/s gefahren. In Abb. 4.1 und Abb. 4.2 wird die Kraft in Abhängigkeit des Verformungsweges dargestellt. Es wurden hier mehrere Belastungszyklen gewählt, um zu sehen, wie sich das Materialverhalten nach jeder Belastung ändert. Dieses Verhalten kann nämlich von den verwendeten Materialmodellen nicht nachgebildet werden.

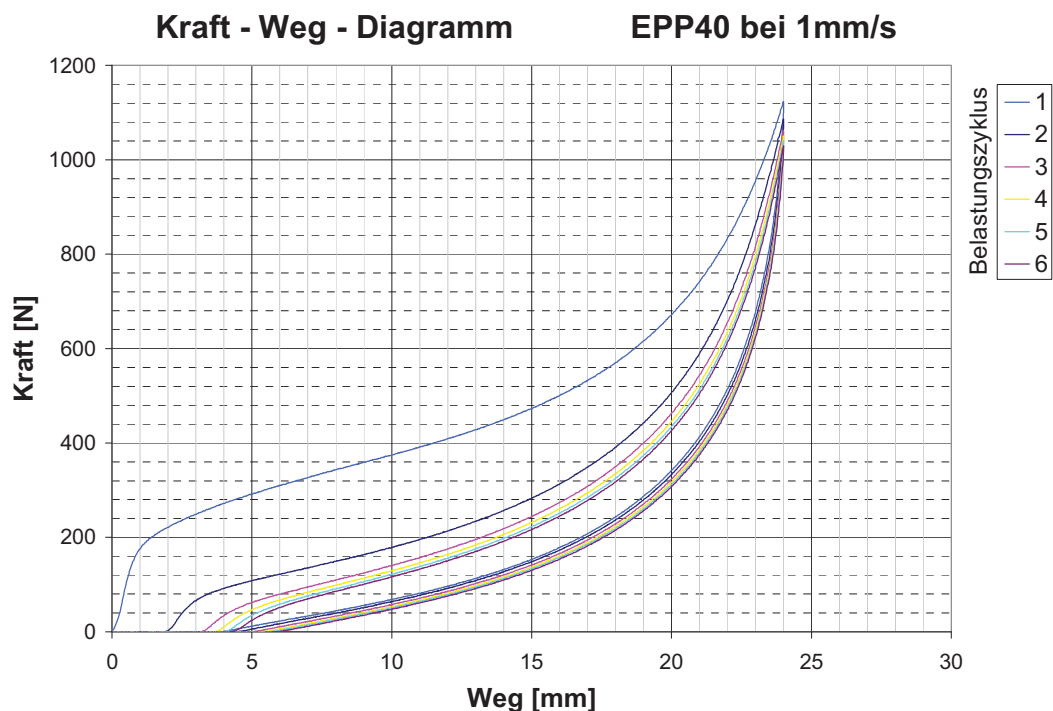


Abb. 4.1: Kraft-Weg-Diagramm einer monotonen uniaxialen Druckbelastung mit 1mm/s und 6 Belastungszyklen; EPP40

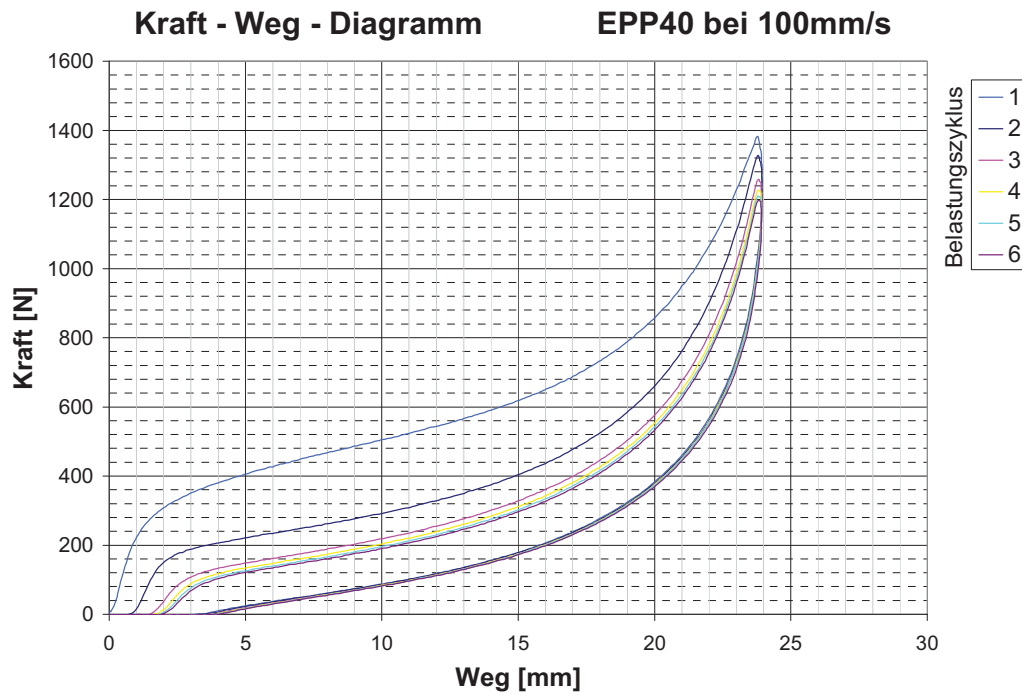


Abb. 4.2: Kraft-Weg-Diagramm einer monotonen uniaxialen Druckbelastung mit 100mm/s und 6 Belastungszyklen; EPP40

Für den Schaumstoff EPP40 zeigt sich mit jedem Belastungszyklus eine deutliche Abnahme des Kraftniveaus. Dies lässt auf eine strukturelle Schädigung des Schaums schließen. Des Weiteren steigt mit jedem Zyklus die Restverformung an. Bei der höheren Belastungsgeschwindigkeit steigt diese Restverformung langsamer zu einem bestimmten Maximalwert als bei der niedrigeren. Diese starken Änderungen im Materialverhalten von einem zum nächsten Belastungszyklus werden bei den verwendeten Materialmodellen nicht berücksichtigt. Daher ist es damit nicht möglich das Verhalten dieses Schaums unter einer zyklischen Belastung, bzw. das Verhalten eines vorbelasteten Schaums zu simulieren.

4.1.2 Dynamische Prüfung mit flachem Impaktor

Für die dynamische Charakterisierung wurden mit jedem Schaumstoff ca. 10 bis 15 Versuche mit flachem Impaktor durchgeführt. Dabei wurden die Impaktormasse, die Probendicke und die Auftreffgeschwindigkeit variiert, um einen repräsentativen Durchschnitt der später zu simulierenden Impaktbelastungen zu erhalten.

Abb. 4.3 zeigt beispielsweise einen Beschleunigungsverlauf, wie er bei den einzelnen Versuchen aufgezeichnet wurde. Der Zeitpunkt null entspricht dem Auftreffen des Impaktors auf der Probe. Er wurde für jeden Versuch händisch bzw. aufgrund des Signals der elektrischen Kontaktfolie automatisch gesetzt.

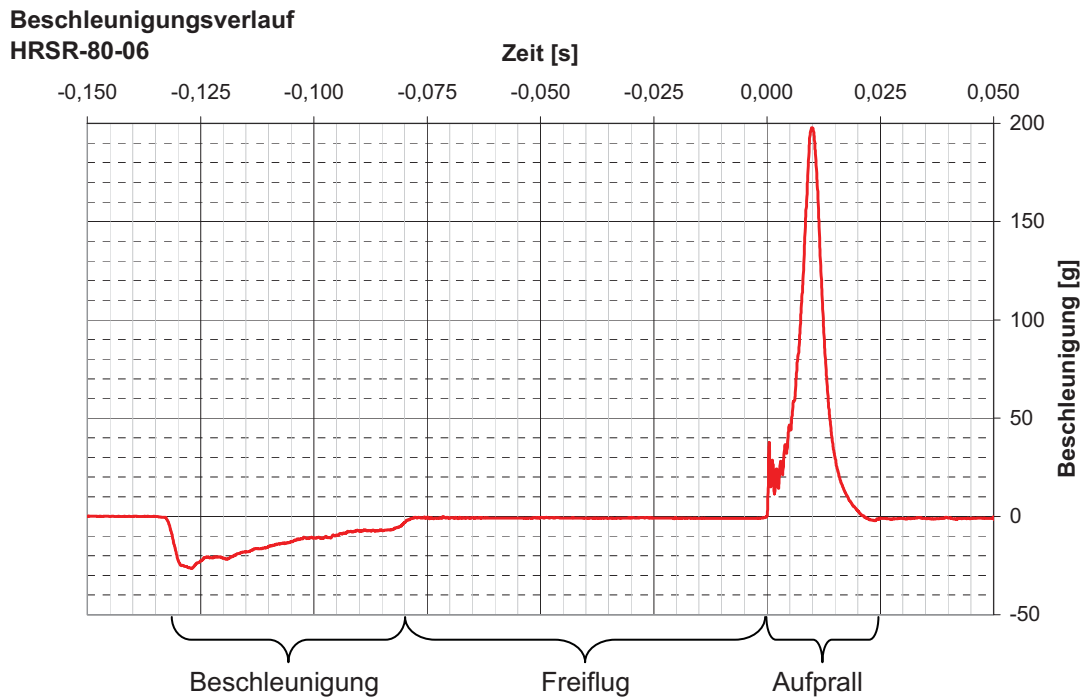


Abb. 4.3: Beschleunigungsverlauf eines Impactversuchs; Bremsbeschleunigungen sind positiv dargestellt.

Es gibt drei charakteristische Phasen während des Versuchs. Zu Beginn gibt es eine Beschleunigungsphase. In diesem Zeitraum wird der Impaktor von der FMH-Kanone auf Geschwindigkeit gebracht. Anschließend kommt es zu einer Freiflugstrecke, in der der Impaktor ohne äußere Einwirkung frei nach unten fällt. Diese Strecke musste teilweise auf bis zu 50cm erhöht werden, da aufgrund des starken Rebounds bei sehr elastischen Schäumen, die Gefahr der Beschädigung der Abschussvorrichtung bestand. Die dritte Versuchsphase besteht im eigentlichen Aufprall auf die Probe. Diese Zeitspanne ist mit ca. 30ms die kürzeste, aber die entscheidende. Hier wird der Impaktor auf null m/s abgebremst und anschließend wieder nach oben beschleunigt. Hierbei treten Beschleunigungen bis ca. 300g auf.

Aus dem Signal aus Beschleunigungsphase und Freiflugphase wird über eine Integration die Auftreffgeschwindigkeit bestimmt.

Mit diesen Daten kann nun jeder Versuch, wie zuvor beschrieben ausgewertet werden.

Aufgrund der langen Freiflugstrecke kann es vorkommen, dass der Impaktor die Probe nicht mehr zentral, trifft bzw. dass er verkippt auf der Probe auftrifft. Deshalb ist es notwendig für jeden Versuch die Videoaufzeichnung auszuwerten und festzustellen, ob der Versuch gültig ist oder nicht. Ein Versuch wird als ungültig gewertet, wenn der Impaktor verkippt oder dezentral auftrifft.

Mit dem Schaumstoff EPP40 wurden die Versuche, wie in Tabelle 4.1 zu sehen ist, durchgeführt:

Tabelle 4.1: Versuchsübersicht der Versuche mit flachem Impaktor an EPP40

Nr	Probe		Impaktor		gültig
	Nr.	Größe	v0	Masse	
		[mm]	[m/s]	[g]	
1	EPP40-30-01	100x100x31,5	6.31	3860	Ja
2	EPP40-30-02	100x100x31,5	5.78	3860	Ja
3	EPP40-30-03	100x100x31,5	6.30	3860	Ja
4	EPP40-60-01	100x100x59	6.52	3860	Ja
5	EPP40-60-02	100x100x59	6.50	3860	Ja
6	EPP40-60-03	100x100x59	6.54	3860	Ja
7	EPP40-30-04	100x100x31,5	8.08	3860	Nein
8	EPP40-30-05	100x100x31,5	8.09	3860	Nein
9	EPP40-30-06	100x100x31,5	8.07	3860	Nein
10	EPP40-60-04	100x100x59	8.00	7038	Ja
11	EPP40-60-05	100x100x59	8.06	7038	Nein
12	EPP40-60-06	100x100x59	8.00	7038	Ja
	Impaktor modifiziert				
13	EPP40-60-07	100x100x59	6.58	3950	Ja
14	EPP40-60-08	100x100x59	6.80	3950	Nein
15	EPP40-60-09	100x100x59	8.29	3950	Nein
16	EPP40-60-10	100x100x59	8.21	3950	Nein

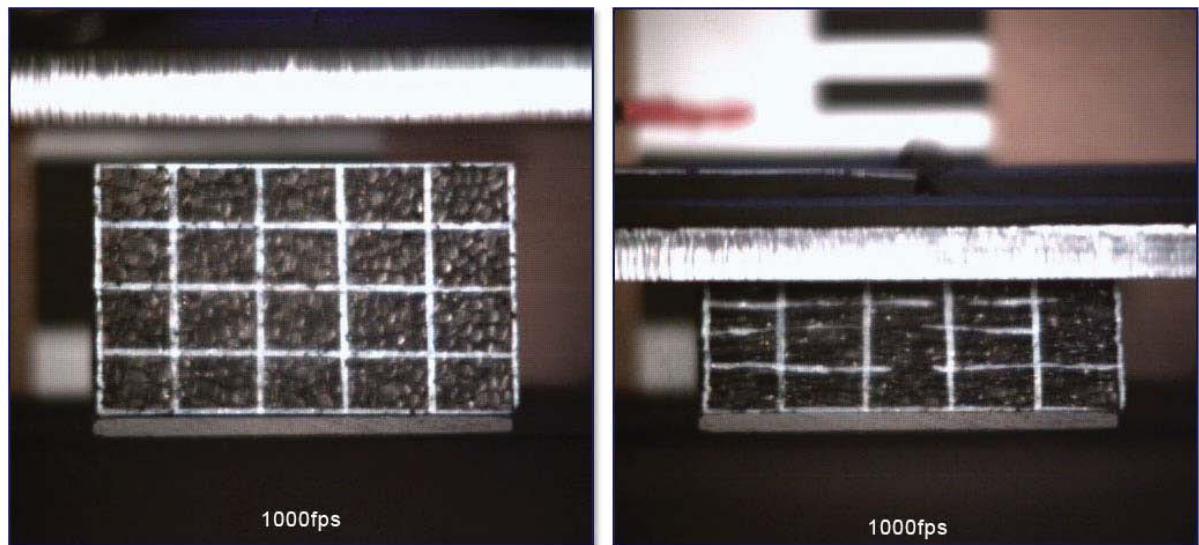


Abb. 4.4: Ausschnitt aus einer Videoaufzeichnung eines Impactversuchs mit EPP40; (1) unverformter Schaumstoff; (2) bei maximaler Kompression

Versuche, die in der Tabelle als gültig geführt sind, zeigten in der Videoauswertung ein ordnungsgemäßes Auftreffen des Impaktors (Abb. 4.4). Bei den ungültigen Versuchen traf der Impaktor sichtlich dezentral oder verkippt auf die Probe auf. In dieser Videoaufzeichnung ist außerdem gut zu erkennen, dass der Schaum praktisch keine Querkontraktion aufweist. Die gesamte Deformation geschieht rein über einen Volumenverlust des Schaums. Dies entspricht der Annahme der verwendeten Materialmodelle.

Aufgezeichnet wurde der Beschleunigungsverlauf des Sensors auf der Impaktorplatte. Bei den ersten Versuchen (bis EPP40-60-06) traten starke Schwingungen mit einer Wellenlänge von ca. 0,9ms auf. Um das Signal für eine Auswertung nutzen zu können, wurde, wie Abb. 4.5 zeigt, ein Box-Average Filter mit einer Größe von 0,9ms angewandt. Für die späteren Versuche wurde die Position des Sensors so verändert, dass er möglichst nahe an einem Schwingungsknoten der Stahlplatte sitzt. Diese Position wurde anhand von FE-Schwingungssimulationen der Platte ermittelt.

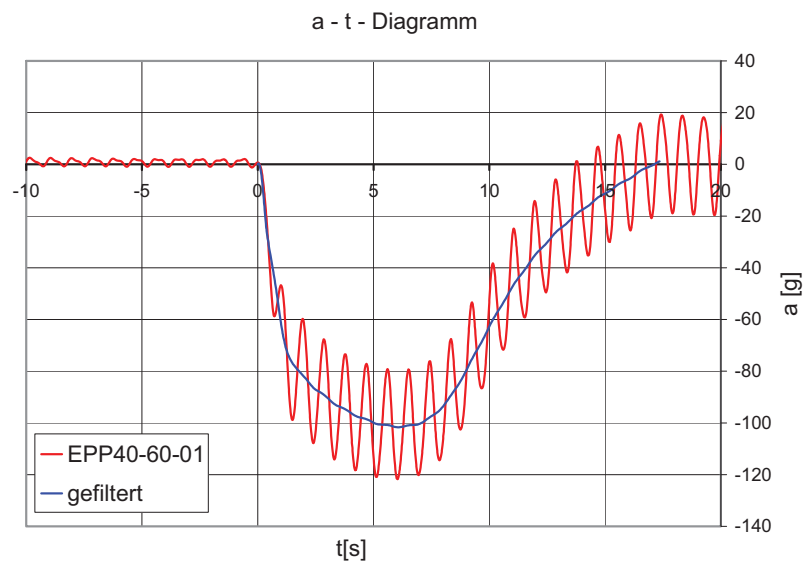


Abb. 4.5: Beschleunigungsverlauf während des Aufpralls; Vergleich zwischen den Rohdaten und den gefilterten Daten.

Für jeden gültigen Versuch wurde nun, wie Abb. 4.6 zeigt, eine Spannungs-Stauchungs-Kurve berechnet. Die Kurven wurden beim Erreichen der maximalen Kompression abgeschnitten, um rein die Phase der Kompression und nicht die anschließend folgende Entspannung des Materials darstellen zu können.

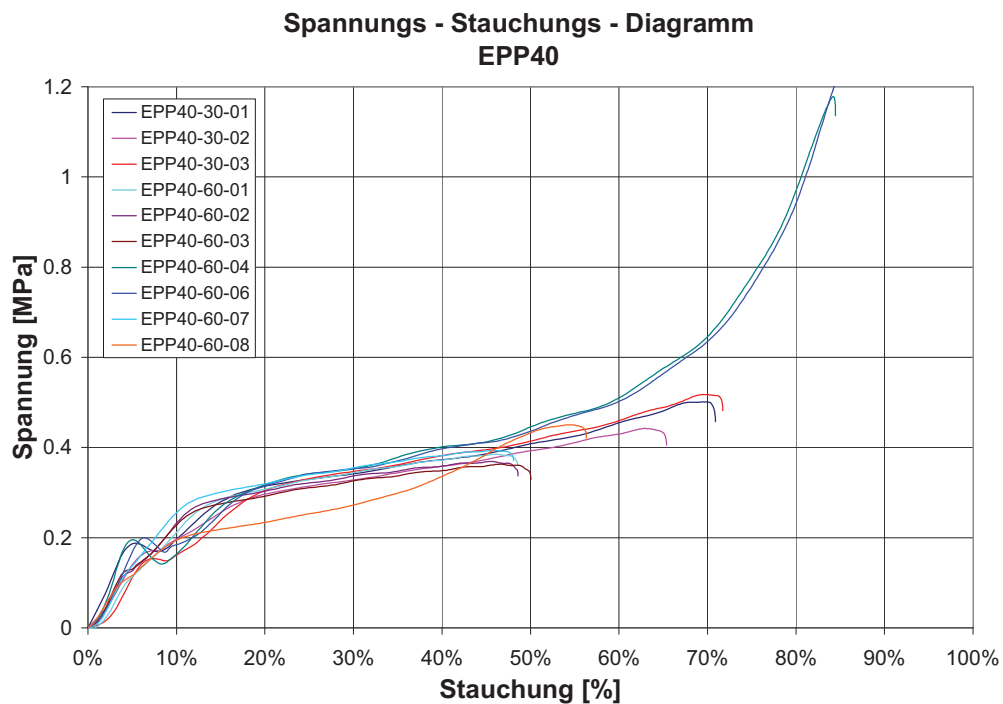


Abb. 4.6: Spannungs-Stauchungs-Diagramm; Impactversuche mit EPP40

Die auftretenden Dehnraten weisen, wie in Abb. 4.7 zu sehen ist, den für einen Impactvorgang typischen Verlauf auf. Hier ist gut zu sehen, dass zu Beginn des Aufpralls die höchste Dehnrates vorliegt, die bis zum Erreichen der maximalen Kompression auf null absinkt.

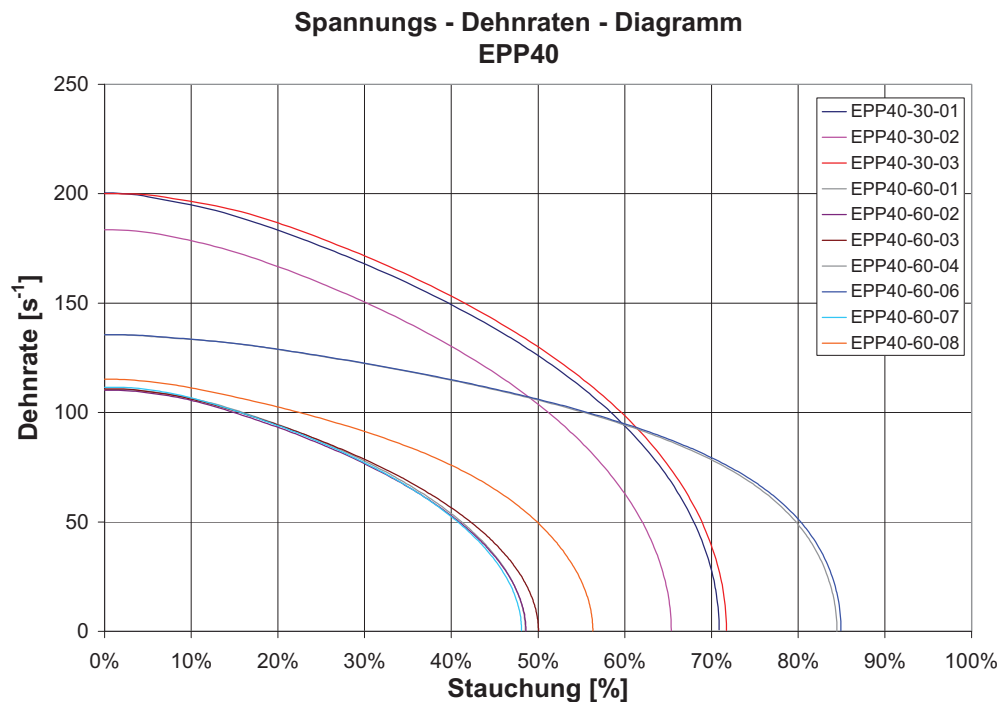


Abb. 4.7: Dehnrates-Stauchungs-Diagramm; Impactversuche mit EPP40

Für jeden Versuch wurde noch die vom Impaktor in Summe abgegebene Energie berechnet. Diese Hystereseverluste sind in Abb. 4.8 in Abhängigkeit von der maximalen Stauchung dargestellt. Für den Schaum EPP40 ergibt sich ein durchschnittlicher Hystereseverlust von 73%. D.h. der Impaktor besitzt nach dem Aufprall nur mehr 27% seiner ursprünglichen kinetischen Energie, die restliche Energie wurde dissipiert bzw. konnte aufgrund der langsamen viskoelastischen Rückverformung des Schaums nicht mehr dem Impaktor zugeführt werden. Die Geschwindigkeit hat allerdings nach dem Aufprall ein entgegen gesetztes Vorzeichen. Die Hystereseverluste weisen keine nennenswerte Abhängigkeit von der maximalen Verformung auf.

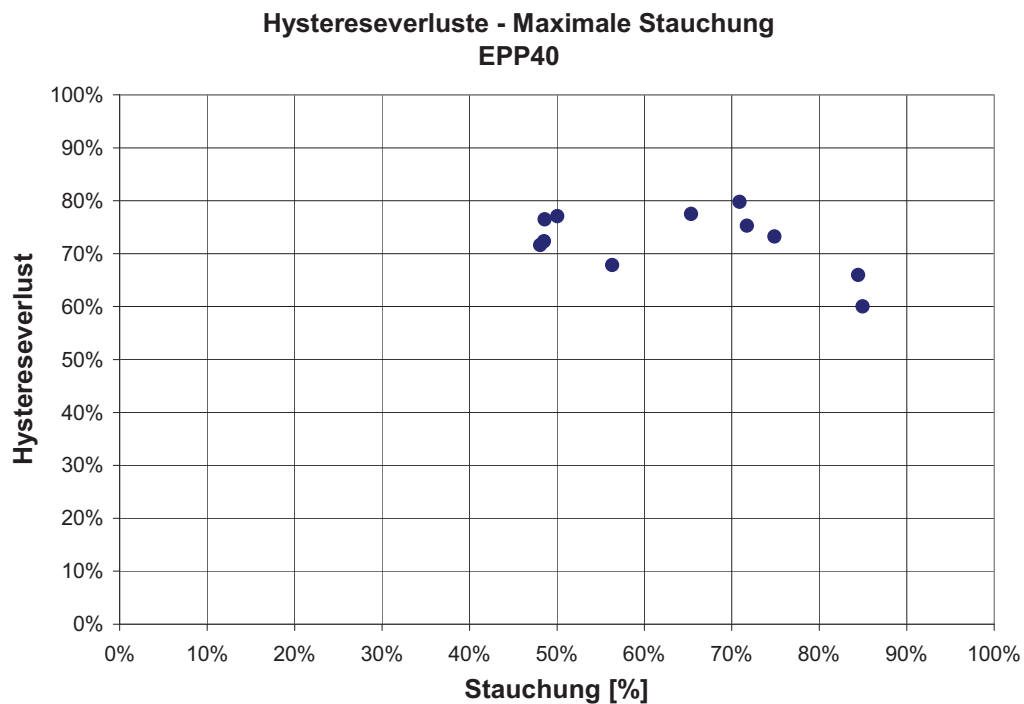


Abb. 4.8: Hystereseverluste in Abh. der maximalen Stauchung; EPP40

4.1.3 Vergleich von monotoner und dynamischer Belastung

Aus den uniaxialen Druckversuchen wird für die Belastungsgeschwindigkeit von 1 und 100m/s aus dem jeweils ersten Belastungszyklus eine Spannungskompressionskurve berechnet.

Aus den Versuchen mit flachem Impaktor wird für jeden Schaumstoff eine arithmetische Mittelwertkurve der gültigen Versuche erstellt. Des Weiteren werden die Versuchsdaten mit dem modifizierten Rusch-Modell genähert. Um nun eine gesamte Spannungs-Stauchungs-Kurve zu erhalten, werden die Mittelwertdaten bis zu einer Stauchung von 40% und darüber hinaus die Daten des Rusch-Modells zu einer Gesamtkurve kombiniert. Der Übergang von der Mittelwertkurve zur gefitteten Kurve erfolgt linear über einen Bereich von 10% Stauchung.

Es ergeben sich Abweichungen im Kompressionsverhalten zwischen einer monotonen Belastung und der Impactbelastung, wie sie in Abb. 4.9 dargestellt sind.

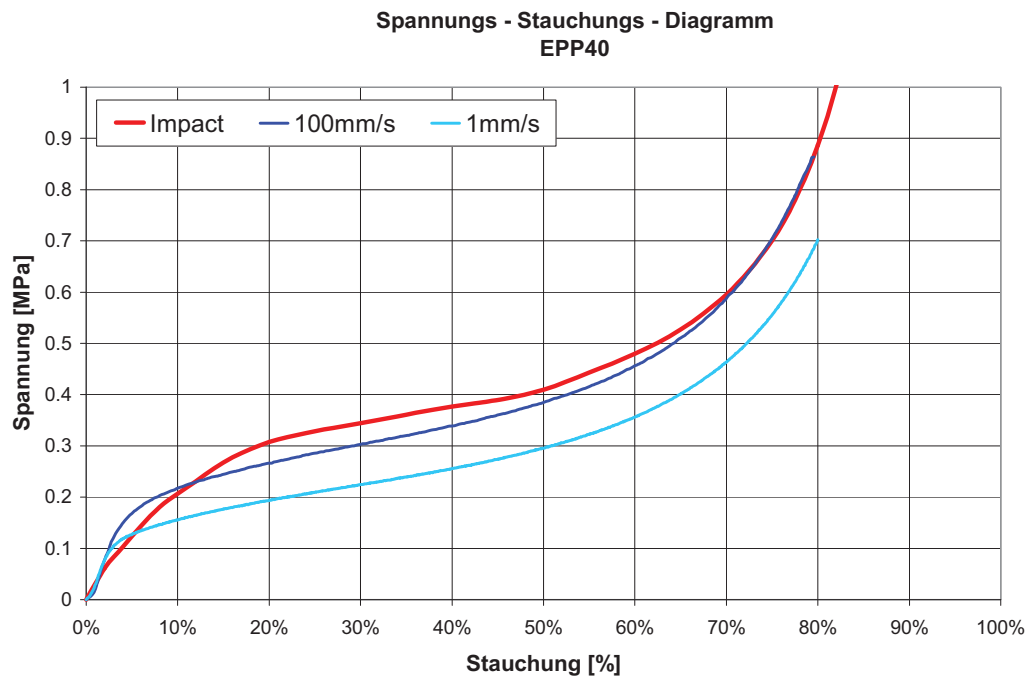


Abb. 4.9: Vergleich der Spannungs-Stauchungs-Kurven bei monotoner Belastung und Impactbelastung; EPP40

In obiger Abbildung kann man gut erkennen, dass das Spannungsniveau von der Belastung mit 1mm/s auf 100mm/s deutlich ansteigt. 1mm/s entspricht bei einer Probendicke von 30mm einer Dehnrates von 0.033 s^{-1} , 100mm/s einer von 3.3 s^{-1} . Die Belastungsgeschwindigkeit liegt beim Impactversuch mit maximal 200 s^{-1} im Moment des Aufpralls noch einmal darüber. Zu erwarten wäre ein entsprechend höheres Spannungsniveau. Die Impactmessungen ergeben hier aber im ersten Anstieg bis ca. 10% Stauchung ein Spannungsniveau, welches unter dem der monotonen Belastung liegt. Der erste Anstieg ist hier also flacher. Erst danach werden höhere Spannungen erreicht. Hierbei könnte sich auch ein Fehler bei der Bestimmung des genauen Auftreffzeitpunktes bemerkbar machen, der wie, im nächsten Kapitel genauer erläutert, in diesem Bereich die größte Auswirkung zeigt.

4.1.4 Vergleich von Impactversuch und Simulation

Für die FE-Simulation wurden aus den Spannungs-Stauchungs-Kurven, die auf Grundlage der vorangegangenen Impactversuche mit flachem Impaktor bestimmt wurden, die Materialkarten für die Simulation erstellt. Alle gültigen Versuche

wurden mit Hilfe von LS-DYNA nachgerechnet. Jede Simulation liefert als Ergebnis den Beschleunigungsverlauf im Impaktor. Diese Kurven werden nun mit den realen Versuchskurven verglichen (Abb. 4.10.)

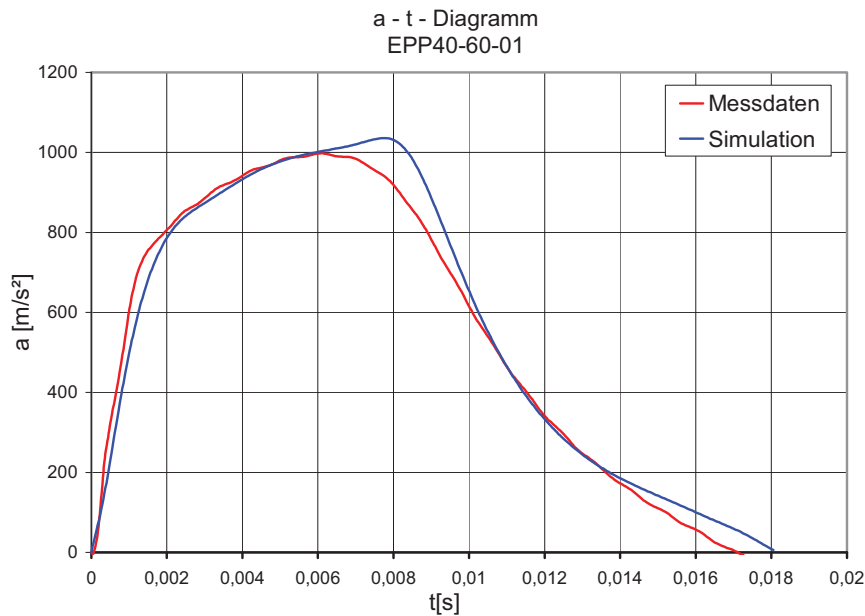


Abb. 4.10: Vergleich der Beschleunigungsverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit flachem Impkator; EPP40

Um den Überblick zu wahren und einen eindeutigen Vergleichswert zu bekommen, werden jeweils die maximal auftretenden Beschleunigungen verglichen (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Vergleich der Maximalbeschleunigung zwischen Realversuch und Simulation der Versuche mit flachem Impkator an EPP40

Versuch	a_{\max} [m/s ²]		Abweichung [%]
	Mess.	Sim.	
EPP40-30-01	1299	1354	4,2%
EPP40-30-02	1146	1194	4,2%
EPP40-30-03	1341	1350	0,7%
EPP40-60-01	998	994	-0,4%
EPP40-60-02	957	993	3,8%
EPP40-60-03	941	995	5,7%
EPP40-60-04	1664	2058	23,7%
EPP40-60-06	1731	2058	18,9%
EPP40-60-07	997	1041	4,4%
EPP40-60-10	1492	1389	-6,9%

Bei Versuchen mit Maximalbeschleunigungen bis ca. 1400 m/s^2 ergeben sich sehr gute Ergebnisse. Die Beschleunigungskurven stimmen sowohl vom prinzipiellen Verlauf her, als auch von der auftretenden Maximalbeschleunigung gut überein. Diese Versuche reichen bis zu maximalen Stauchungen von 70%. Die Versuche, die zu höheren Stauchungen gehen, weisen größere Abweichungen in der Peak-Belastung auf. Ein Grund dafür könnte sein, dass sich die Abweichungen in den Materialdaten hier am stärksten auswirken, da hier auch die Steigung im Spannungsdehnungsdiagramm am größten ist. Man kann im Allgemeinen aber nicht sagen, dass die Materialdaten bei großen Stauchungen fehlerbehafteter sind als bei niedrigen, sie zeigen hier nur eine größere Auswirkung auf die Maximalbeschleunigung. Bei starken Steigungen im Spannungsdehnungsdiagramm zeigen Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des Weges und somit der Stauchung einen großen Einfluss. Der Verlauf der Beschleunigung zeigt bei diesen Versuchen bis auf den Peak-Wert ebenfalls eine gute Übereinstimmung.

In Abb. 4.11 und Abb. 4.12 wurde, zur Veranschaulichung wie sich ein Fehler bei der Bestimmung der Anfangswerte auf den berechneten Spannungsverlauf auswirkt, die Spannungsdehnungskurve einmal mit einem Fehler von 0.5 m/s bei der Auftreffgeschwindigkeit und einmal mit einem um 0.1 ms nach hinten verschobenen Auftreffzeitpunkt berechnet. Es zeigt sich bei beiden Anfangswerten, dass die Abweichungen umso größer werden, je größer die Steigung im Spannungsdehnungsdiagramm ist. Die Genauigkeit der Bestimmung der Auftreffgeschwindigkeit hat hauptsächlich Einfluss auf den Hinterteil der Kurve, die des Auftreffzeitpunktes auf den ersten Anstieg der Kurve. Diese beiden Diagramme zeigen sehr gut, in welchen Bereichen sich dieses Verfahren anfällig und in welchen eher unempfindlich gegenüber Messfehlern verhält.

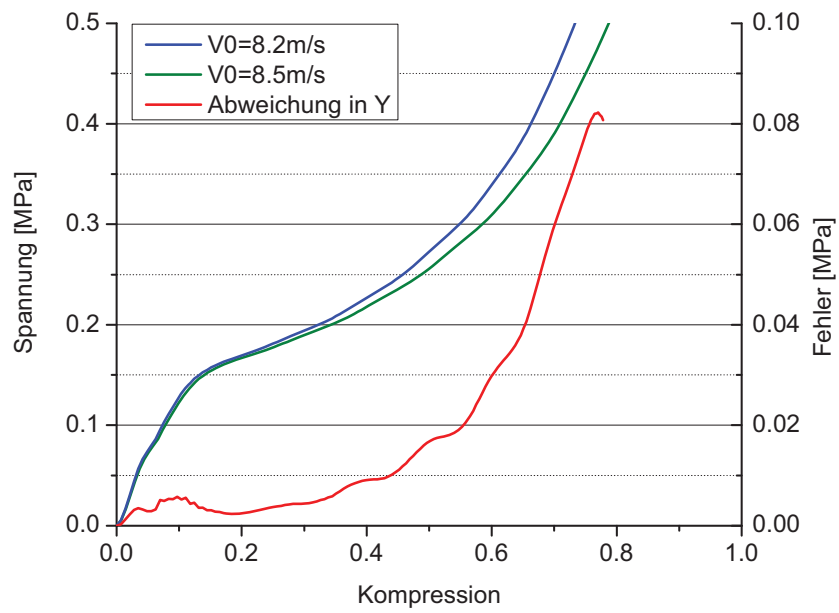


Abb. 4.11: Fehler im Spannungsverlauf aufgrund eines Fehlers in der Aufprallgeschwindigkeit v_0 .

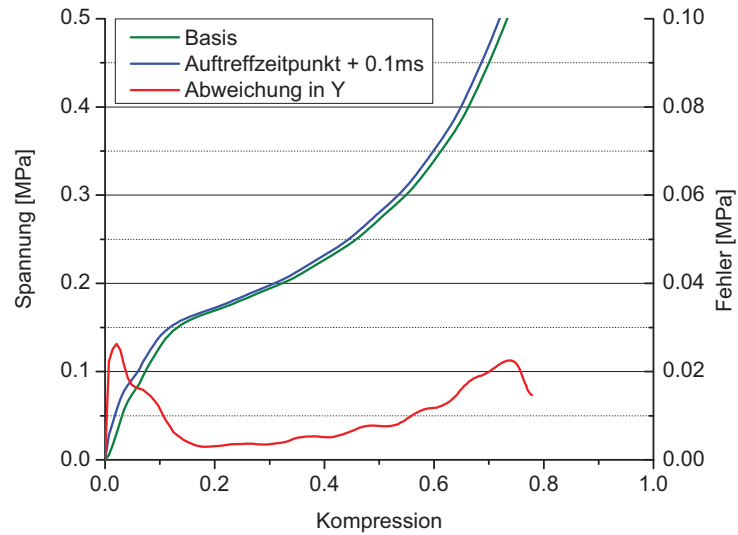


Abb. 4.12: Fehler im Spannungsverlauf aufgrund eines Fehlers bei der Bestimmung des genauen Auftreffzeitpunktes.

4.1.5 Bauteilähnliche Versuche mit Kugelimpaktor

Die Versuche mit Kugelimpaktor wurden mit denselben Probengeometrien wie jene mit flachem Impaktor durchgeführt. Für den Schaum EPP40 wird die Probengröße 100x100x60mm gewählt. Da hier der Impaktor nur im Freifall beschleunigt wird, ergibt sich mit 2.3 m/s eine geringere Aufprallgeschwindigkeit als bei den Versuchen mit flachem Impaktor (Abb. 4.13).



Abb. 4.13: Ausschnitt aus der Videoaufzeichnung des Impactversuch mit Kugelimpaktor (VNr. EPP40-K-01)

Für den Versuch wurde, wie in Abb. 4.14 zu sehen ist, der Beschleunigungs- und Wegverlauf aufgezeichnet.

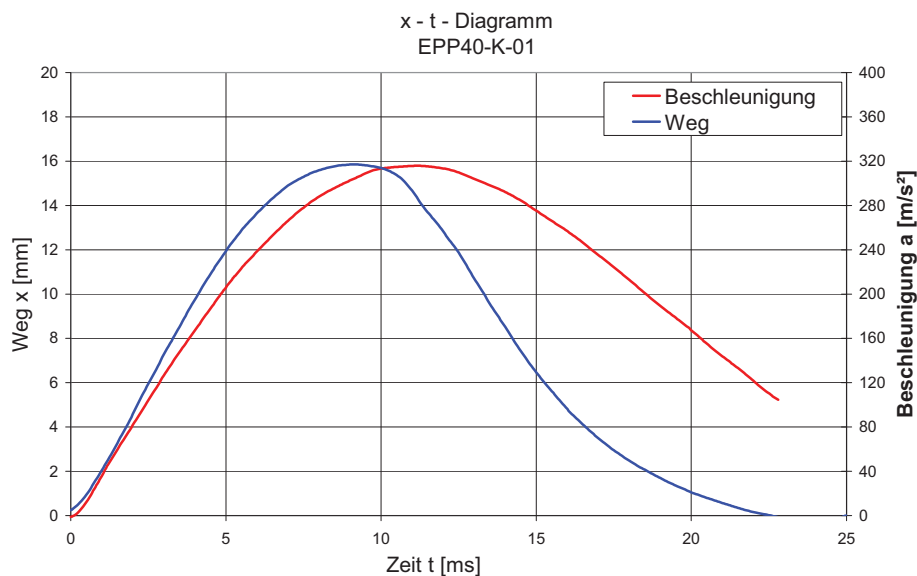


Abb. 4.14: Beschleunigungs- und Wegverlauf; Impactversuch mit Kugelimpaktor (VNr. EPP40-K-01)

Man sieht, dass die maximale Verformung erst nach dem Auftreten der maximalen Beschleunigung erreicht ist. Um das Zeitoffset des im Vergleich zum Beschleunigungssensor langsamer reagierenden Seilzugpotentiometers zu bestimmen, wurde der Seilweg beim Auftreffen auf der Probe zuvor genau bestimmt und als Nullpunkt angenommen. Diese Phasenverschiebung von maximaler Beschleunigung und maximalem Weg kann also nicht auf die unterschiedliche Reaktionszeit der Messaufnehmer zurückgeführt werden. Das gleiche Phänomen trat ebenfalls bei den Messungen mit flachem Impaktor auf. Hier war in der Spannungs-Stauchungs-Kurve zu sehen, dass die Spannung vor Erreichen der maximalen Stauchung ihr Maximum erreicht hatte.

4.1.6 Simulation der Kugelversuche und Vergleich mit Realversuch

Für die Versuche mit dem Kugelimpaktor wurde nun ein Simulationsmodell erstellt und die Versuche mit den gleichen Materialdaten, die schon für die Simulation der Versuche mit flachem Impaktor verwendet wurden, nachgerechnet. Ausgegeben wird hierbei der Beschleunigungs- und Wegverlauf des Impaktors. Diese Daten können nun mit den Versuchsdaten verglichen werden (Abb. 4.15 und Abb. 4.16).

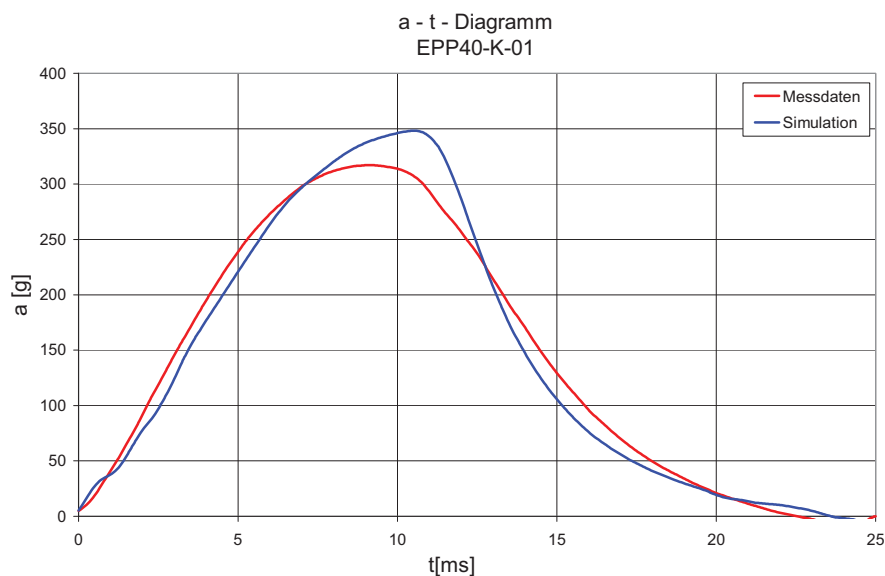


Abb. 4.15: Vergleich der Beschleunigungsverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit Kugelimpaktor; EPP40

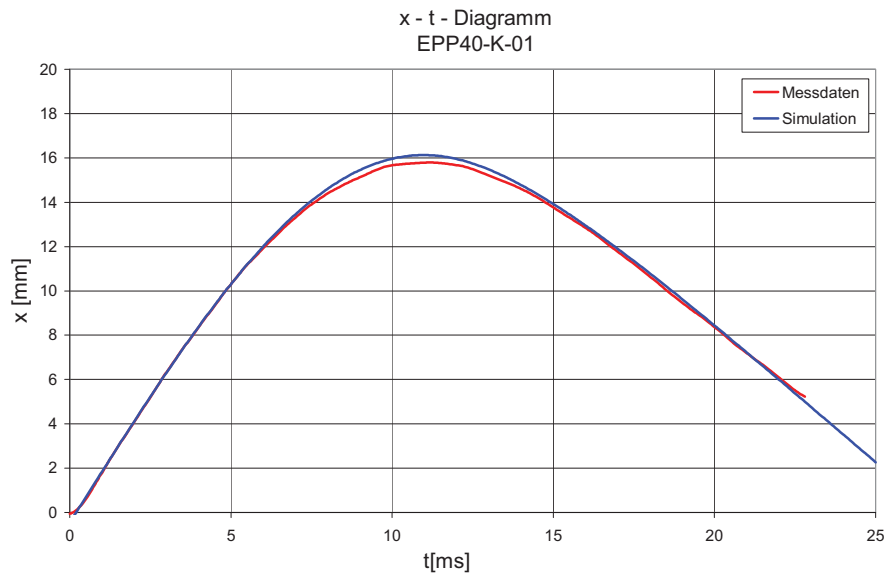


Abb. 4.16: Vergleich der Wegverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit Kugelimpaktor; EPP40

Beim den Vergleichen mit dem Realversuch zeigt sich eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen sind hier aber etwas größer als bei den Vergleichen der Versuche mit flachem Impaktor. Es zeigt sich, dass die Materialdaten aus den uniaxialen Impactversuchen auch gute Übereinstimmung für komplexere Impactbelastungen liefern.

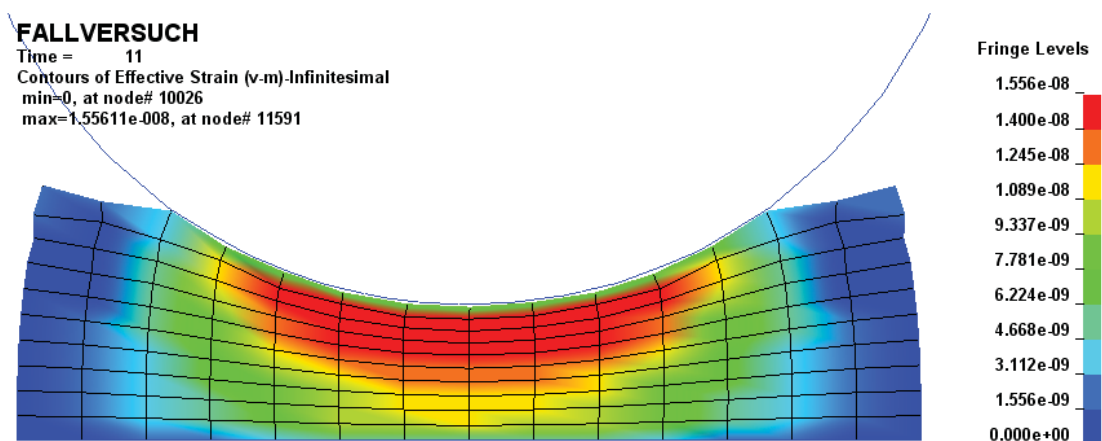


Abb. 4.17: FE-Simulation eines Kugelaufpralls, Schnitt durch den Schaumblock mit färbig dargestellter Dehnungsverteilung

In Abb. 4.17 sind die berechneten Dehnungen im Querschnitt des Schaumblocks färbig dargestellt. Man sieht, dass es sich hierbei um eine viel komplexere Belastungssituation als bei den uniaxialen Versuchen handelt.

4.2 Materialcharakterisierung

Da diese Charakterisierungsmethodik bei dem getesteten EPP-Schaum gute Ergebnisse lieferte, wurden auch noch weitere Schäume auf diese Weise untersucht.

4.2.1 Uniaxiale Druckprüfung

Die uniaxiale Druckprüfung wurde nun auch bei den drei Elastomerschäumen HRSR, HRSM und CRPUR angewandt. Die folgenden Diagramme zeigen die gemessenen Kraft-Weg-Verläufe unter 6 Belastungszyklen.

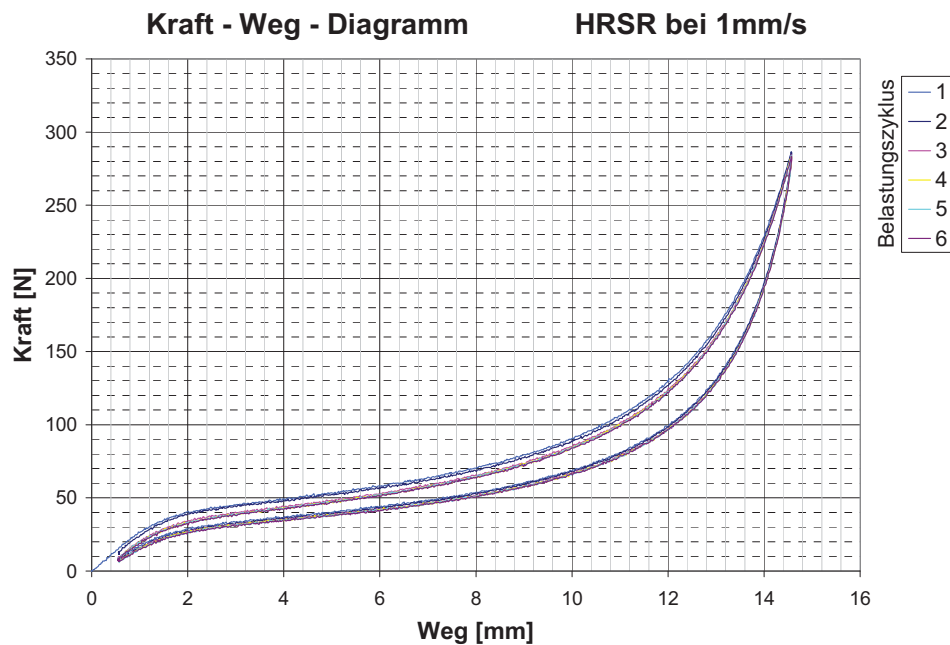


Abb. 4.18: Kraft-Weg-Diagramm einer monotonen uniaxialen Druckbelastung mit 1mm/s und 6 Belastungszyklen von HRSR

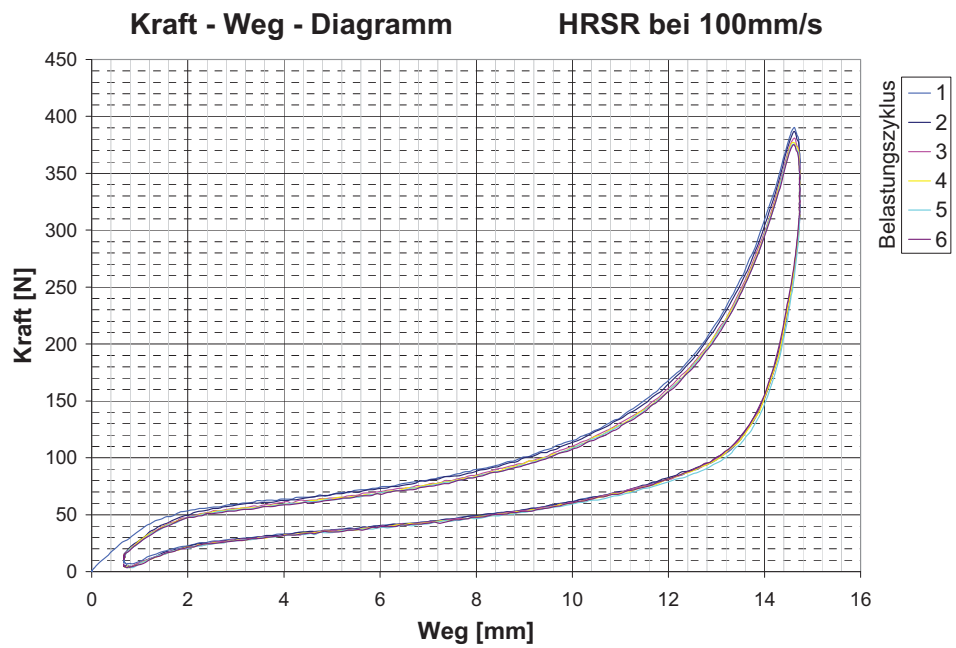


Abb. 4.19: Kraft-Weg-Diagramm einer monotonen uniaxialen Druckbelastung mit 100mm/s und 6 Belastungszyklen von HRSR

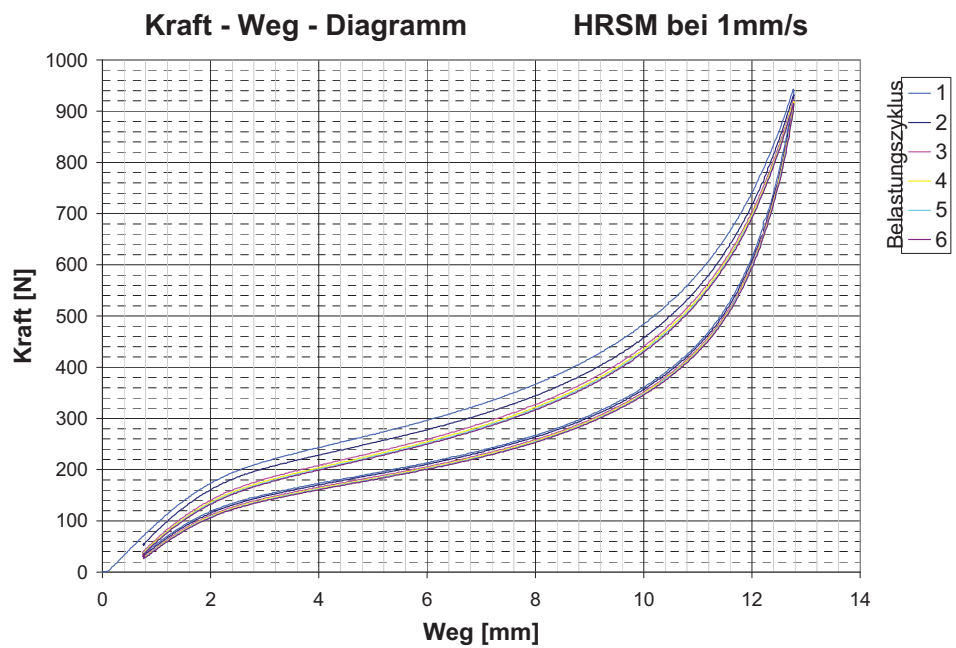


Abb. 4.20: Kraft-Weg-Diagramm einer monotonen uniaxialen Druckbelastung mit 1mm/s und 6 Belastungszyklen von HRSM

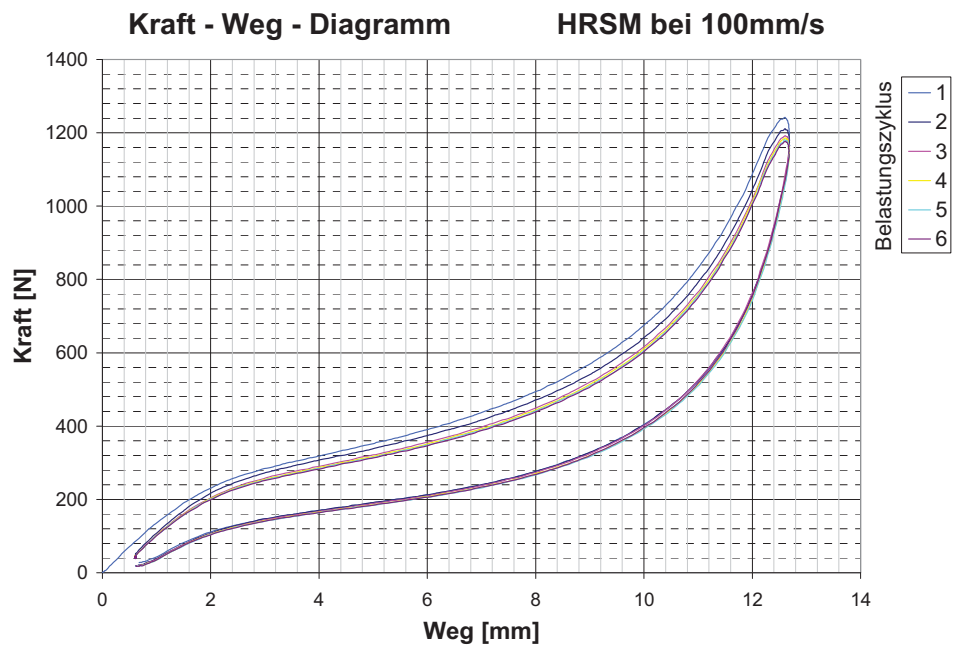


Abb. 4.21: Kraft-Weg-Diagramm einer monotonen uniaxialen Druckbelastung mit 100mm/s und 6 Belastungszyklen von HRSM

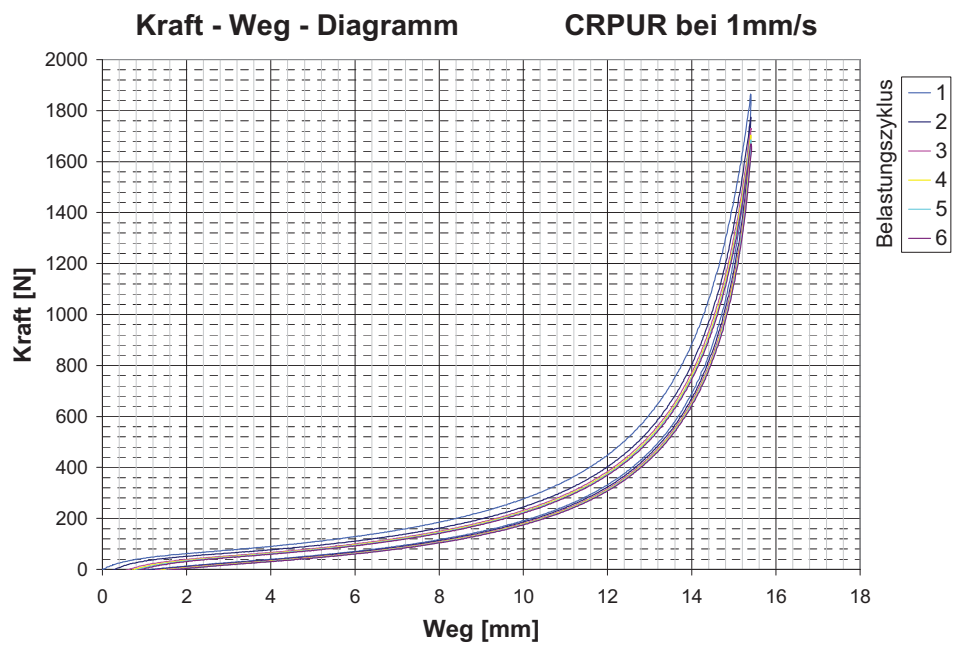


Abb. 4.22: Kraft-Weg-Diagramm einer monotonen uniaxialen Druckbelastung mit 1mm/s und 6 Belastungszyklen von CRPUR

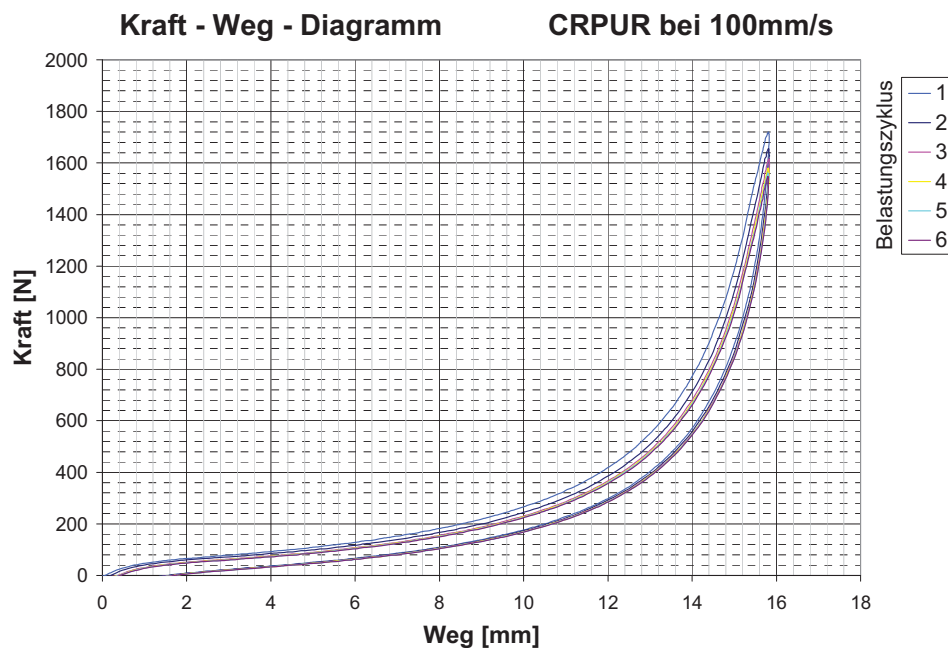


Abb. 4.23: Kraft-Weg-Diagramm einer monotonen uniaxialen Druckbelastung mit 100mm/s und 6 Belastungszyklen von CRPUR

Wenn man Abb. 4.18 bis Abb. 4.23 betrachtet, fällt sofort auf, dass diese Schäume im Ggs. zum EPP-Schaum von einem zum nächsten Zyklus kaum an Spannung verlieren. Dieser Umstand kann auf das viel bessere reversible elastische Verhalten des Grundwerkstoffs zurückgeführt werden. Es bleibt bei diesen Verformungen auch kaum ein Verformungsrest erhalten. Dieser Umstand deckt sich sehr gut mit der Annahme von 100% Reversibilität unserer verwendeten Materialmodelle. Außerdem weisen die drei Schäume im Vergleich zum EPP40 eine deutlich kleinere Hystereseschleife auf.

4.2.2 Dynamische Prüfung mit flachem Impaktor

Um die Materialdaten für die Simulationen zu erhalten wurden wiederum Versuche mit flachem Impaktor durchgeführt.

Versuche mit HRSM

Für die Versuche mit HRSM wurden Proben aus 20mm dicken Schichten zu je 40 bzw. 80mm zusammengesetzt. Die Impaktormasse blieb für alle Versuche konstant. Es wurde lediglich die Probendicke und die Geschwindigkeit variiert. Tabelle 4.3 zeigt die Versuchsübersicht der Impactversuche mit HRSM.

Tabelle 4.3: Versuchsübersicht der Versuche mit flachem Impaktor an HRSM

Nr	Probe		Impaktor		Gültig
	Nr.	Größe	v0	Masse	
		[mm]	[m/s]	[g]	
1	HRSM-80-01	150x100x80	5,65	4466	Ja
2	HRSM-80-02	150x100x80	5,70	4466	Ja
3	HRSM-80-03	150x100x80	5,63	4466	Ja
4	HRSM-80-04	150x100x80	7,84	4466	Ja
5	HRSM-80-05	150x100x80	7,76	4466	Ja
6	HRSM-80-06	150x100x80	7,76	4466	Ja
7	HRSM-40-01	150x100x40	5,67	4466	Ja
8	HRSM-40-02	150x100x40	5,78	4466	Ja
9	HRSM-40-03	150x100x40	5,78	4466	Ja
10	HRSM-40-04	150x100x40	7,84	4466	Ja
11	HRSM-40-05	150x100x40	7,83	4466	Ja
12	HRSM-40-06	150x100x40	7,76	4466	Ja
13	HRSM-40-07	150x100x40	9,79	4466	Nein
14	HRSM-40-08	150x100x40	8,99	4466	Ja
15	HRSM-80-11	150x100x80	7,71	4466	Ja
16	HRSM-80-12	150x100x80	7,69	4466	Ja
17	HRSM-80-13	150x100x80	7,70	4466	Ja

In Abb. 4.24 sieht man zwei Ausschnitte aus der Videoaufzeichnung eines Impactversuchs. Auf dem Impaktor wurden für diese Versuche zusätzlich Neopren und Gummilaschen an der Oberseite und an den Rändern angebracht. Dies dient dem Schutz der Abschussvorrichtung, die bei jedem Versuch vom zurückprallenden Impaktor getroffen wird. Man kann außerdem deutlich erkennen, dass dieser Schaum im Vergleich zum EPP-Schaum eine deutliche Querkontraktion aufweist. Dies liefert eine mögliche Fehlerquelle für die Auswertung, da diese auf der Annahme basiert, dass die Querkontraktion Null ist.

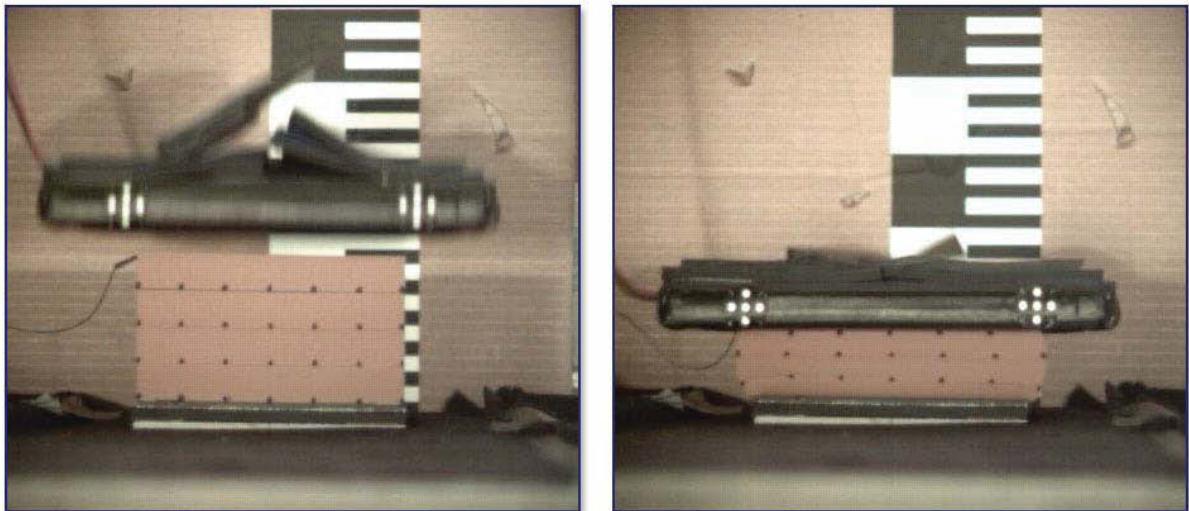


Abb. 4.24: Videoaufzeichnung eines Impactversuchs mit flachem Impaktor an HRSM

Es ergeben sich Spannungs-Stauchungs-Kurven, wie sie in Abb. 4.25 dargestellt sind.

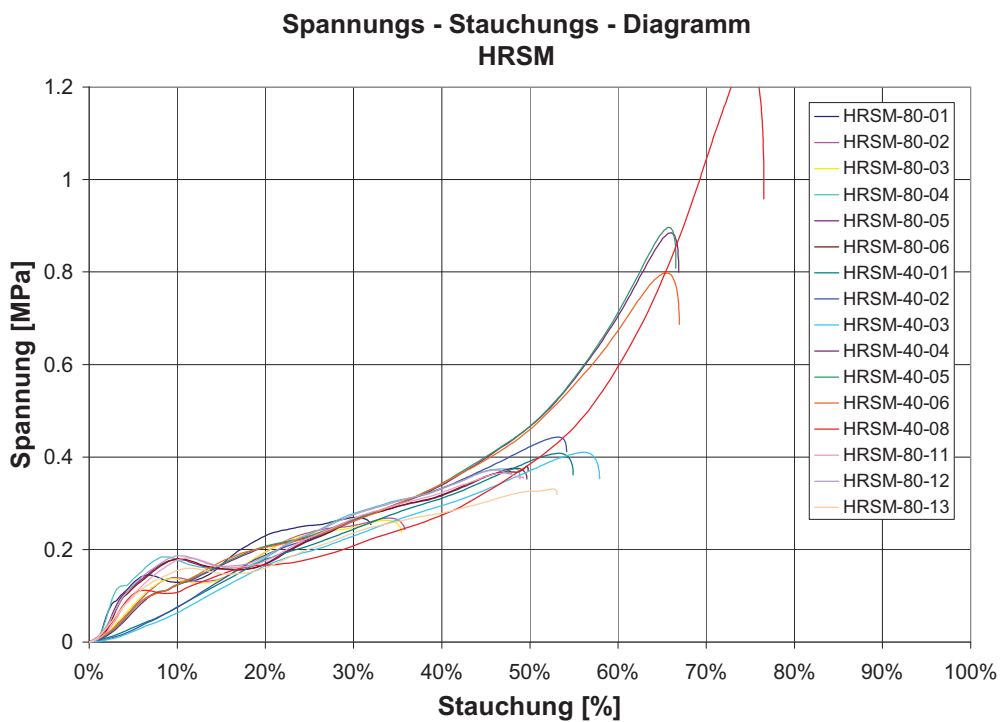


Abb. 4.25: Spannungs-Stauchungs-Diagramm; Impactversuche mit HRSM

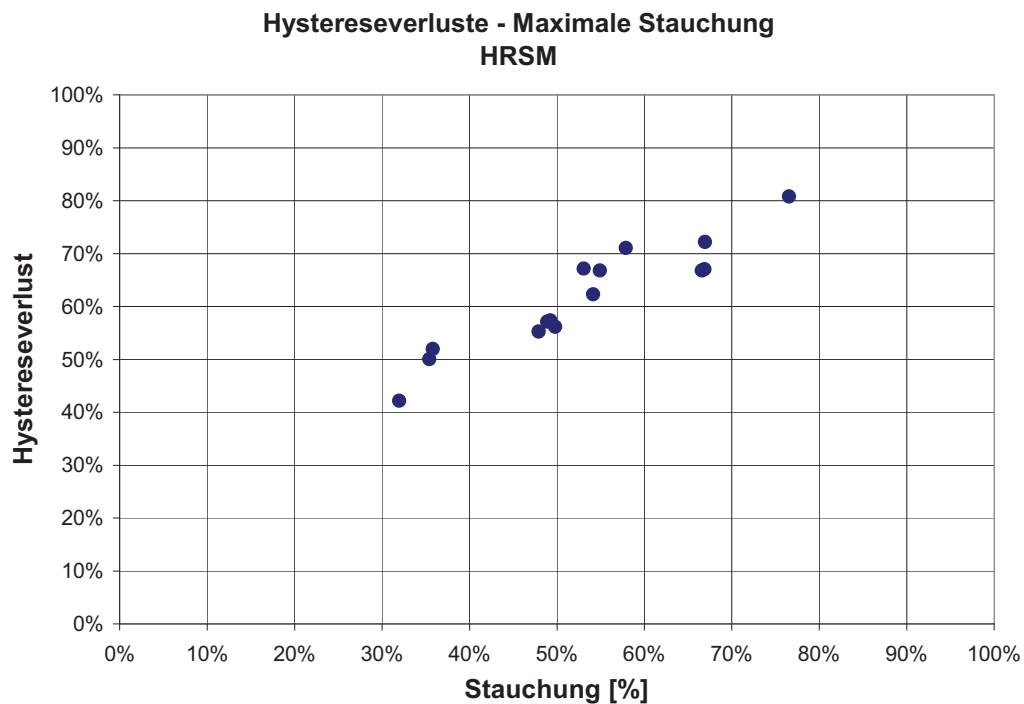


Abb. 4.26: Hystereseverluste in Abh. der maximalen Stauchung; HRSM

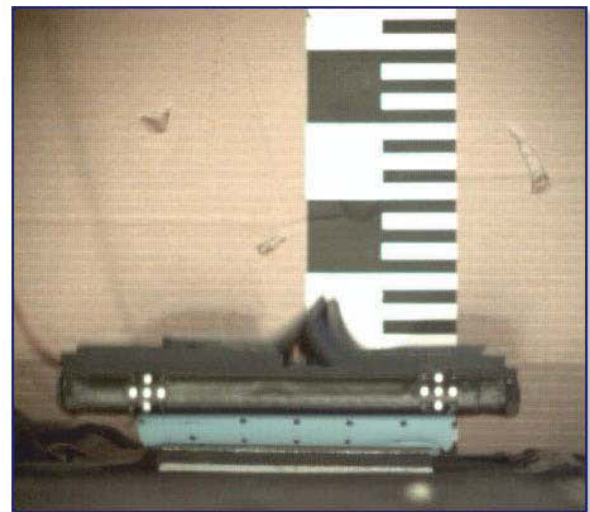
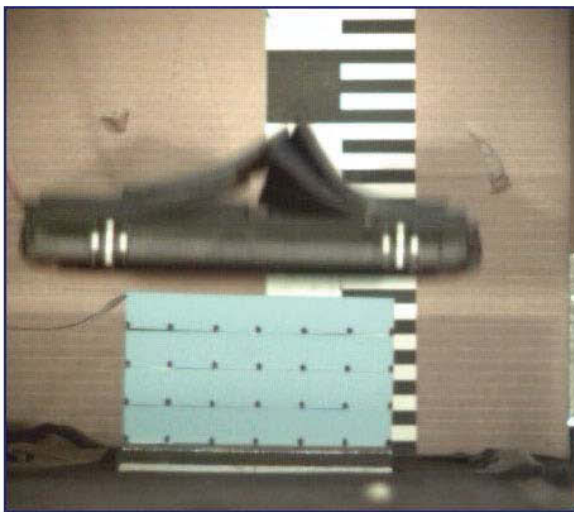
In Abb. 4.26 kann man sehen, dass mit steigender maximaler Verformung die Energieverluste ansteigen. Bei ca. 30% maximaler Stauchung betragen die Hystereseverluste in etwa 40%. Dieser Wert ist viel geringer als beim EPP-Schaum, bei dem die Hystereseverluste zwischen 70 und 80% betragen.

Versuche mit HIRI HRSR

Mit dem Schaumstoff HRSR wurden wie für den Schaumstoff HRSM Versuche mit schichtweise zu 40 und 80mm zusammengesetzten Proben durchgeführt (Abb. 4.27). Auftreffgeschwindigkeit und Impaktormasse konnten für diese Versuche nicht nennenswert variiert werden, da bei diesem relativ weichen Schaum schon mit minimaler Geschwindigkeit und minimaler Masse sehr hohe Kompressionen erreicht wurden (Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4: Versuchsübersicht der Versuche mit flachem Impaktor an HRSR

Nr	Probe		Impaktor		gütig
	Nr.	Größe	v0	Masse	
		[mm]	[m/s]	[g]	
1	HRSR-80-01	150x100x80	5,58	4466	Ja
2	HRSR-80-02	150x100x80	5,49	4466	Ja
3	HRSR-80-03	150x100x80	5,60	4466	Ja
4	HRSR-80-04	150x100x80	7,72	4466	Ja
5	HRSR-80-05	150x100x80	7,80	4466	Ja
6	HRSR-80-06	150x100x80	7,80	4466	Ja
7	HRSR-40-01	150x100x40	2,95	4466	Nein
8	HRSR-40-02	150x100x40	5,71	4466	Ja
9	HRSR-40-03	150x100x40	5,75	4466	Ja
10	HRSR-80-11	150x100x80	7,83	4466	Ja
11	HRSR-80-12	150x100x80	7,79	4466	Ja
12	HRSR-80-13	150x100x80	7,70	4466	Ja

**Abb. 4.27:** Videoaufzeichnung eines Impactversuchs mit flachem Impaktor an HRSR

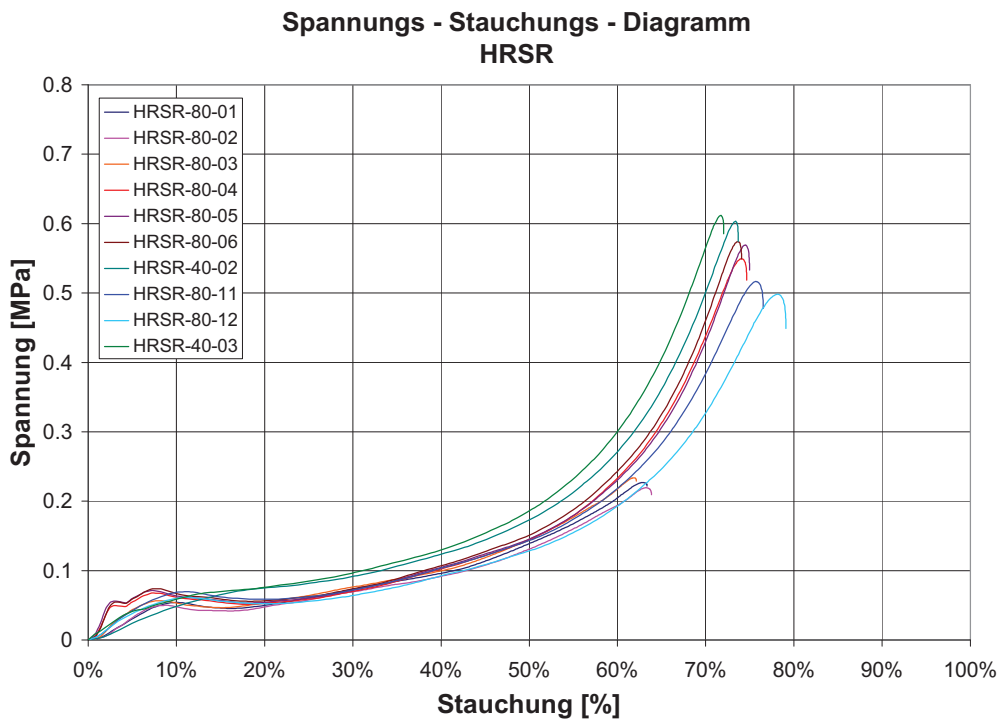


Abb. 4.28: Spannungs-Stauchungs-Diagramm; Impactversuche mit HRSR

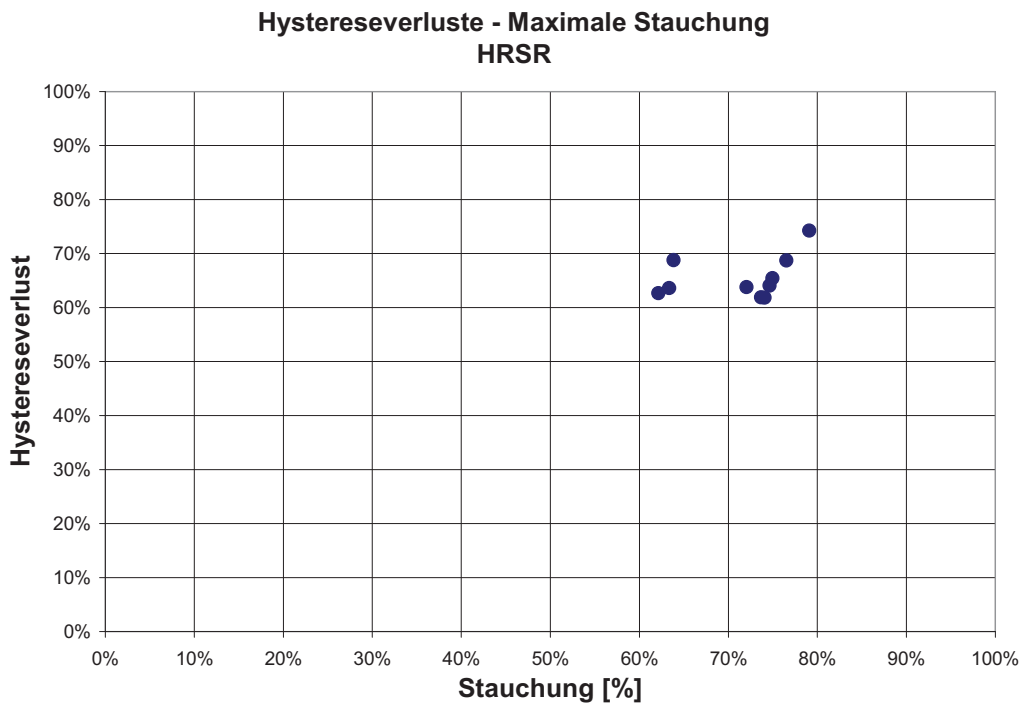


Abb. 4.29: Hystereseverluste in Abh. der maximalen Stauchung; HRSR

Die Streuung der Spannungsdehnungskurven (Abb. 4.28) fällt bei diesem Schaumstoff geringer aus, als bei HRSM, der aus dem gleichen Grundmaterial besteht, aber lediglich eine höhere Dichte besitzt. Die Hystereseverluste liegen im gleichen Bereich wie bei HRSM (Abb. 4.29).

Versuche mit Pana CRPUR

Mit dem Schaumstoff CRPUR wurden die in Tabelle 4.5 aufgelisteten Versuche durchgeführt.

Die Schaumstoffprobe bestand dabei, wie in Abb. 4.30 zu erkennen ist, aus einzelnen 5mm dicken Schichten, die zu den jeweiligen Dicken (30, 70 und 80mm) gestapelt wurden. Die einzelnen Schichten wurden dabei nicht verklebt, sondern nur lose übereinander gelegt.

Tabelle 4.5: Versuchsübersicht der Versuche mit flachem Impaktor an CRPUR

Nr	Probe		Impaktor		gültig
	Nr.	Größe	v0	Masse	
		[mm]	[m/s]	[g]	
1	CRPUR-80-01	144x103x80	6,62	3986	Ja
2	CRPUR-80-02	144x103x80	7,87	3986	Ja
3	CRPUR-80-03	144x103x80	8,21	4170	Ja
4	CRPUR-80-04	144x103x80	6,40	4170	Ja
5	CRPUR-80-05	144x103x80	8,01	4170	Ja
6	CRPUR-70-01	144x103x70	7,91	4170	Ja
7	CRPUR-70-02	144x103x70	8,21	4170	Ja
8	CRPUR-30-01	144x103x30	7,90	4170	Ja
9	CRPUR-30-02	144x103x30	6,97	4350	Ja
10	CRPUR-30-03	144x103x30	7,07	4350	Ja
11	CRPUR-30-04	144x103x30	6,98	4350	Nein

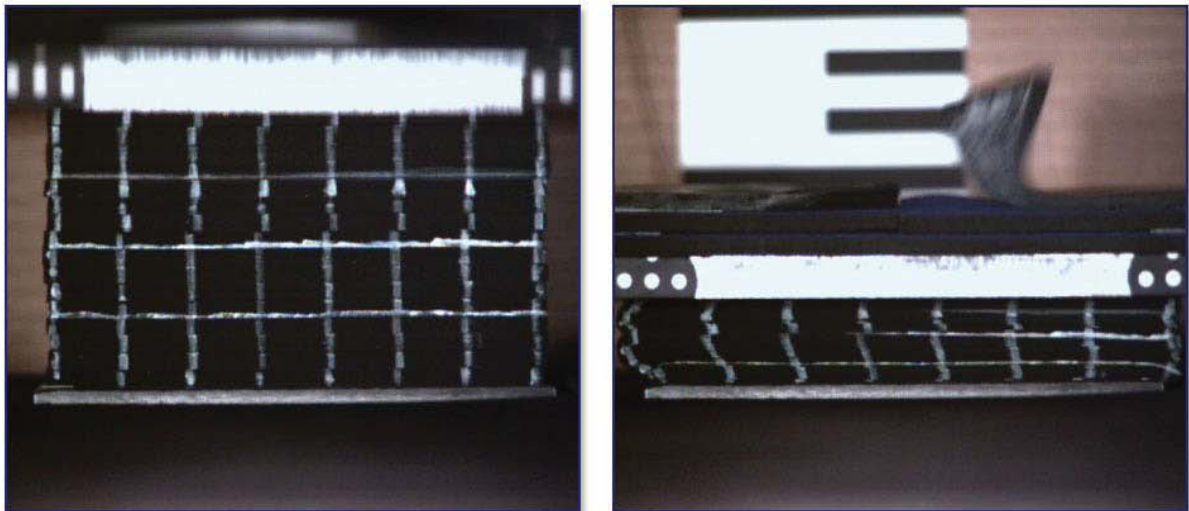


Abb. 4.30: Videoaufzeichnung eines Impactversuchs mit flachem Impaktor an CRPUR

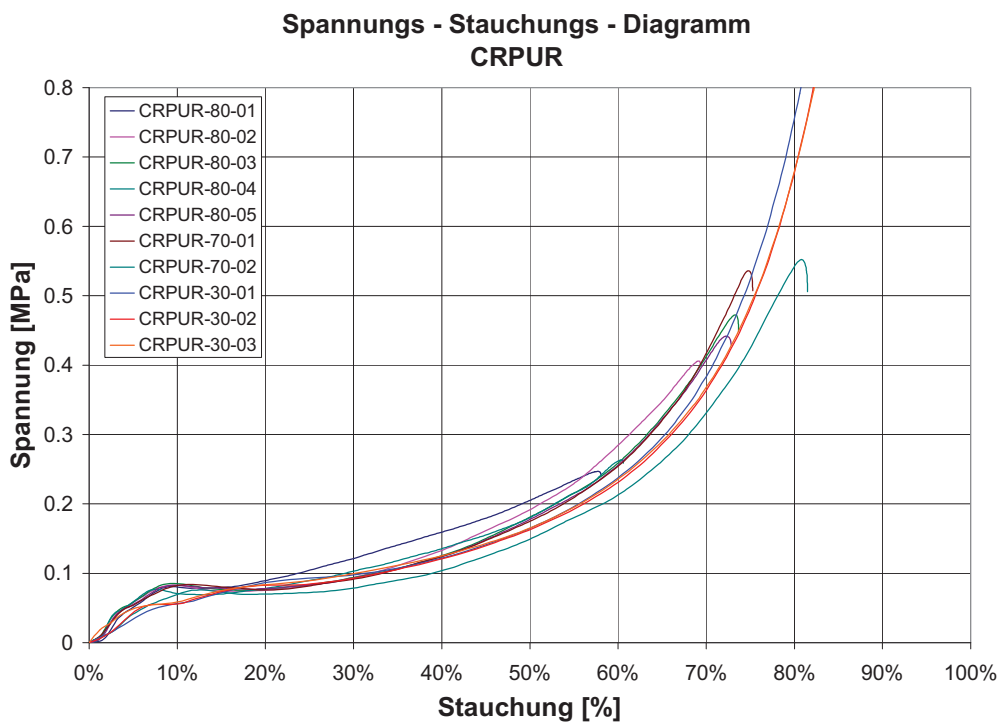


Abb. 4.31: Spannungs-Stauchungs-Diagramm; Impactversuche mit CRPUR

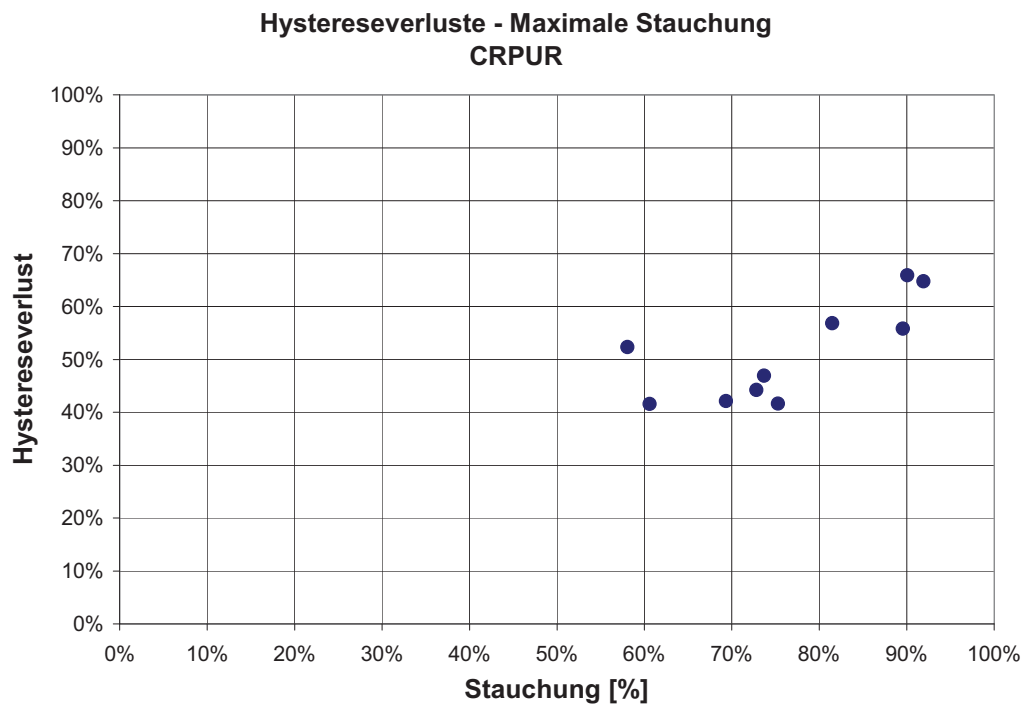


Abb. 4.32: Hystereseverluste in Abh. der maximalen Stauchung; CRPUR

Die Streuung in den berechneten Spannungs-Stauchungs-Kurven ist bei diesem Material von allen getesteten am geringsten (Abb. 4.31). Die Hystereseverluste sind mit durchschnittlich 50% im Vergleich zu den anderen Schäumen relativ gering (Abb. 4.32). D.h. der Impaktor hat beim Rückprall eine Geschwindigkeit die ca. 70% der Auftreffgeschwindigkeit ausmacht.

Im Unterschied zum thermoplastischen EPP-Schaum weisen die 3 getesteten Elastomerschäume eine deutliche Querkontraktion in der Videoaufzeichnung auf. Dies birgt eine mögliche Fehlerquelle für die Auswertung.

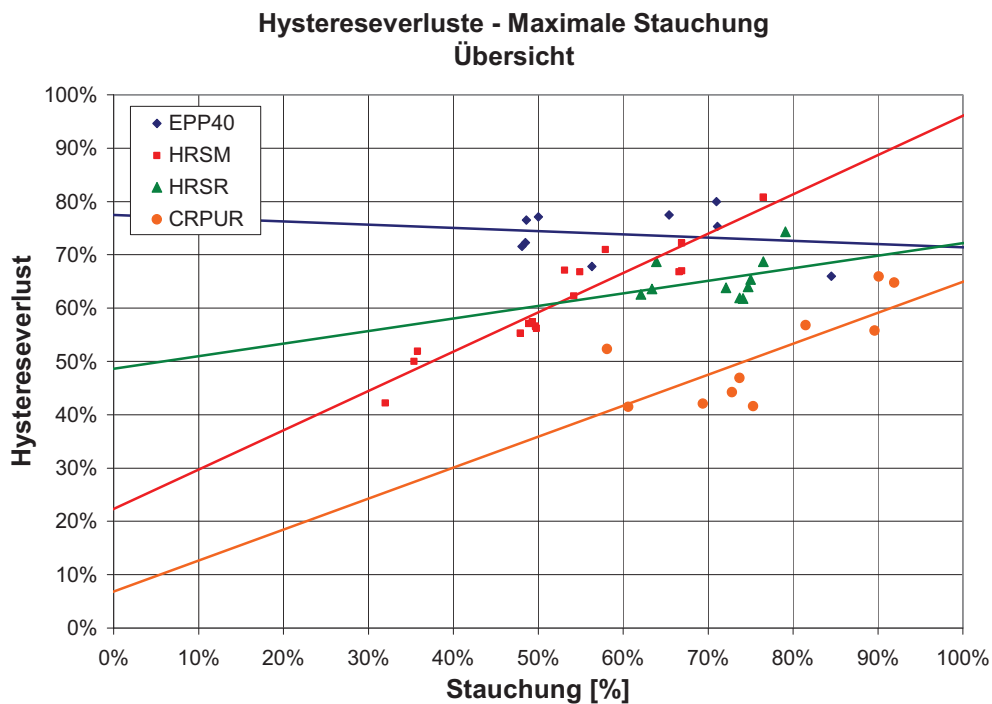


Abb. 4.33: Linearer Zusammenhang zwischen Hystereseverluste und der maximalen Stauchung; Vergleich der verschiedenen Schäume.

Man kann bei HRSM und CRPUR auch eine starke Abhängigkeit der Hystereseverluste von der maximalen Stauchung bemerken (Abb. 4.33). Je größer die maximale Stauchung, umso mehr Energie kann dissipiert werden.

4.2.3 Vergleich von monotoner und dynamischer Belastung

Um die Unterschiede zwischen der geschwindigkeitskontrollierten uniaxialen Druckprüfung und der energiegesteuerten Impactprüfung aufzuzeigen, werden wiederum die Spannungs-Stauchungs-Kurven bei monotoner Belastung von 1 und 100mm/s mit denen der Impactprüfung verglichen.

Bei dem Schaumstoff HRSM zeigt sich ein deutlicher Anstieg des Spannungsniveaus zwischen 1mm/s und 100mm/s. Die Kurve der dynamischen Belastung zeigt hingegen einen ähnlichen Verlauf mit der bei 100mm/s monotoner Belastung (Abb. 4.34).

Der Schaumstoff HRSR, der aus dem gleichen Grundmaterial wie HRSM besteht, zeigt sowohl von 1 auf 100mm/s, wie auch von 100mm/s zur Impactprüfung einen merklichen Anstieg im Spannungsniveau (Abb. 4.35).

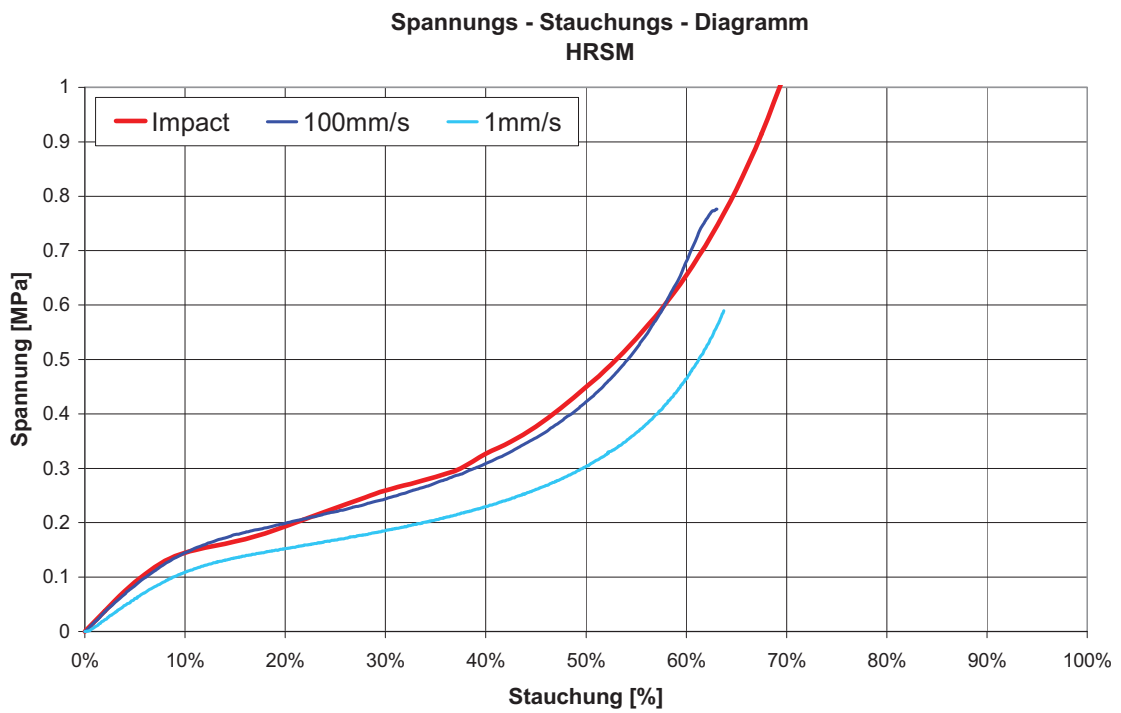


Abb. 4.34: Vergleich der Spannungsdehnungskurven bei monotoner Belastung und Impactbelastung; HRSM

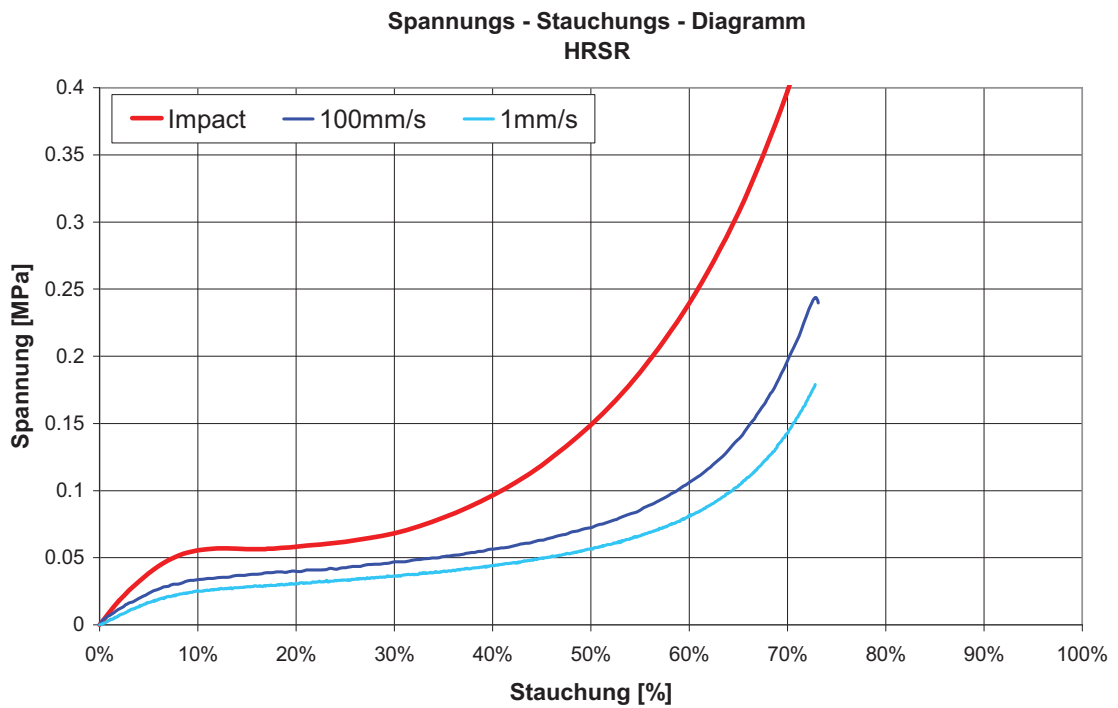


Abb. 4.35: Vergleich der Spannungsdehnungskurven bei monotoner Belastung und Impactbelastung; HRSR

Bei CRPUR ist bei der monotonen Druckbelastung kein Unterschied zwischen 1 und 100mm/s zu erkennen (Abb. 4.36). Die dynamisch ermittelte Kurve liegt hier aber im Anfangsbereich deutlich darüber. Im weiteren Verlauf schneiden sich diese Kurven bei ca. 50% Stauchung. Daraus lässt sich aber nicht auf ein physikalisches Phänomen schließen. Dies könnte ebenso auf Messfehler zurückgeführt werden, da schon kleine Fehler in der Bestimmung des Aufprallzeitpunktes oder der Aufprallgeschwindigkeit zu Fehlern in der Wegberechnung und den damit verbundenen Stauchungen führen. Diese Fehler pflanzen sich zu höheren Stauchungen fort und erhöhen sich. Die ermittelten Spannungen sind hingegen unempfindlich auf Messfehler bei den Anfangswerten. Anfangswertfehler können somit zu Skalierungsfehler in der x-Achse führen.

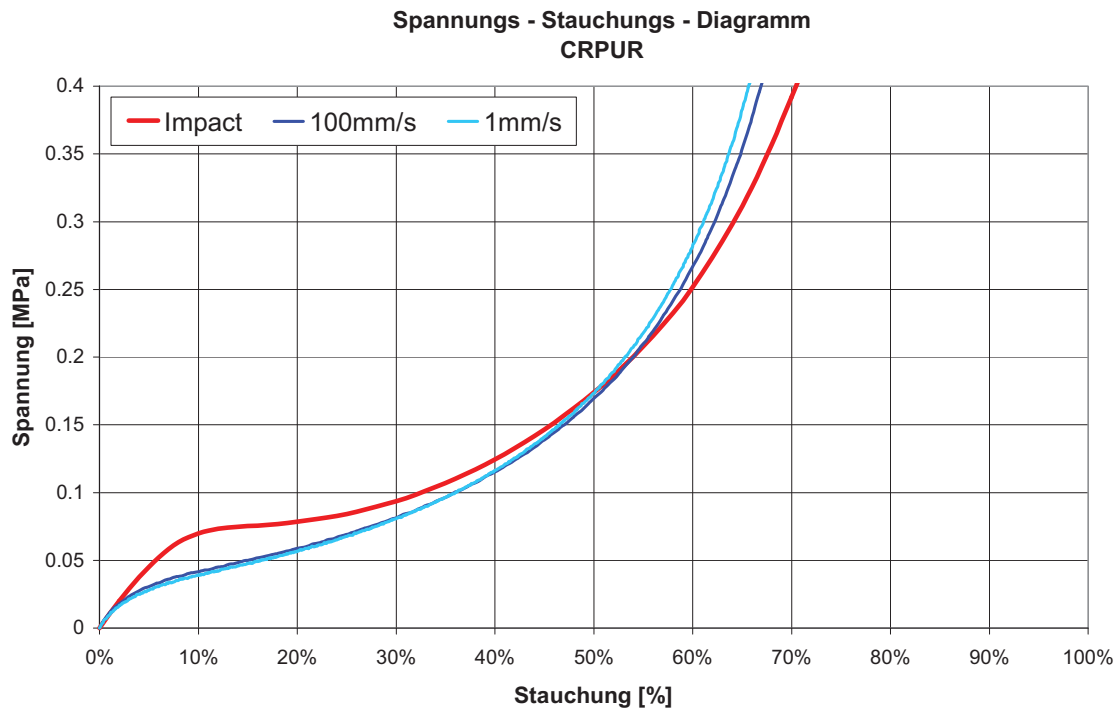


Abb. 4.36: Vergleich der Spannungsdehnungskurven bei monotoner Belastung und Impactbelastung; CRPUR

4.2.4 Vergleich von Impactversuch und Simulation

Für die Simulation der Impactversuche mit flachem Impaktor wurden die Materialkarten wiederum aus Kombination der Mittelwertkurve und einem Fit mit dem Rusch Modell erstellt. Die gültigen Realversuche wurden nun simuliert und die maximal auftretenden Beschleunigungen miteinander verglichen.

Für den Schaumstoff HRSM ergibt sich ein Abweichungsmittelwert von 5.7% von Simulationswert zu Versuchswert mit einer Standardabweichung von 7.1% (Tabelle 4.6).

Für den Schaumstoff HRSR ergibt sich ein Abweichungsmittelwert von -0.7% mit einer Standardabweichung von 6.2% (Tabelle 4.7).

Für den Schaumstoff CRPUR wurde ein Abweichungsmittelwert von -2.0% mit einer Standardabweichung von 8.6% bestimmt (Tabelle 4.8).

Tabelle 4.6: Vergleich der Maximalbeschleunigung zwischen Realversuch und Simulation der Versuche mit flachem Impaktor an HRSM

Versuch	amax [m/s ²]		Abweichung [%]
	Mess.	Sim.	
HRSM-80-01	905	883	-2.4%
HRSM-80-02	899	900	0.1%
HRSM-80-03	884	891	0.9%
HRSM-80-04	1258	1401	11.4%
HRSM-80-05	1263	1379	9.1%
HRSM-80-06	1276	1379	8.0%
HRSM-40-01	1369	1509	10.2%
HRSM-40-02	1488	1564	5.1%
HRSM-40-03	1378	1564	13.6%
HRSM-40-04	2972	2957	-0.5%
HRSM-40-05	3010	2947	-2.1%
HRSM-40-06	2679	2888	7.8%
HRSM-40-07	5383	5190	-3.6%
HRSM-40-08	4217	4135	-1.9%
HRSM-80-11	1227	1364	11.2%
HRSM-80-12	1249	1359	8.8%
HRSM-80-13	1111	1362	22.6%

Tabelle 4.7: Vergleich der Maximalbeschleunigung zwischen Realversuch und Simulation der Versuche mit flachem Impaktor an HRSR

Versuch	amax [m/s ²]		Abweichung [%]
	Mess.	Sim.	
HRSR-80-01	762	814	6.9%
HRSR-80-02	736	783	6.4%
HRSR-80-03	785	821	4.5%
HRSR-80-04	1844	1709	-7.3%
HRSR-80-05	1911	1753	-8.3%
HRSR-80-06	1928	1753	-9.1%
HRSR-40-02	2026	1963	-3.1%
HRSR-80-11	1734	1766	1.8%
HRSR-80-12	1673	1744	4.3%
HRSR-40-03	2054	1993	-3.0%

Tabelle 4.8: Vergleich der Maximalbeschleunigung zwischen Realversuch und Simulation der Versuche mit flachem Impaktor an CRPUR

Versuch	amax [m/s ²]		Abweichung [%]
	Mess.	Sim.	
CRPUR-80-01	918	977	6.4%
CRPUR-80-02	1510	1394	-7.7%
CRPUR-80-03	1680	1551	-7.7%
CRPUR-80-04	937	916	-2.2%
CRPUR-80-05	1571	1465	-6.8%
CRPUR-70-01	1906	1680	-11.9%
CRPUR-70-02	1964	1845	-6.1%
CRPUR-30-02	4455	4226	-5.1%
CRPUR-30-03	4246	4426	4.2%
CRPUR-30-04	3635	4246	16.8%

Die Abweichungen zwischen Versuch und Simulation besitzen Mittelwerte von 5.7%, -0.7% und -2.0% mit einer Schwankungsbreite sowohl ins Positive wie auch ins Negative. Man kann daher keinen Trend erkennen, dass dieses Verfahren tendenziell zu zu hohen bzw. zu zu niedrigen Beschleunigungswerten in der Simulation führt.

4.2.5 Bauteilähnliche Versuche mit Kugelimpaktor

Um nun die Übertragbarkeit dieser Materialdaten auf einen komplexeren Belastungsfall überprüfen zu können, wurden wiederum Impactversuche mit Kugelimpaktor durchgeführt. Aufgrund der reinen Freifallbeschleunigung betragen die Aufprallgeschwindigkeiten ca. 2.5 m/s.

Für die Schaumstoffe HRSM und CRPUR wurden Probengrößen von 100x150x40mm verwendet. Vom deutlich weicheren HRSR Schaum wurden 100x150x80mm Proben benutzt.

Aufgezeichnet wurden die Weg- und Beschleunigungsverläufe, die im nächsten Schritt dann mit der Simulation verglichen werden können.

4.2.6 Simulation der Kugelversuche und Vergleich mit Realversuch

Die vorher durchgeführten Versuche mit Kugelimpaktor können nun mit den gleichen Anfangsbedingungen und den Materialdaten aus den Impactversuchen mit flachem Impaktor nachgerechnet werden. Die Beschleunigungs- und Wegverläufe werden im Folgenden verglichen.

Die Schaumstoffe HRSM und HRSR wurden als massive Schaumstoffblöcke modelliert. Die Beschleunigungsverläufe (Abb. 4.37 und Abb. 4.39) zeigen im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung. Es fällt aber auf, dass die Beschleunigungen bei der Entlastungsphase in der Simulation stärker als im Realversuch abfallen. Um dies zu verbessern müssten die Parameter HU und SHAPE, die die Entlastung beschreiben, ggf. noch optimiert werden.

Beim Vergleich des Weges ist die Aussage nicht so eindeutig. Hier wird der Eindringweg einmal zu hoch (HRSM, Abb. 4.38) und einmal zu niedrig (HRSR, Abb. 4.40) berechnet.

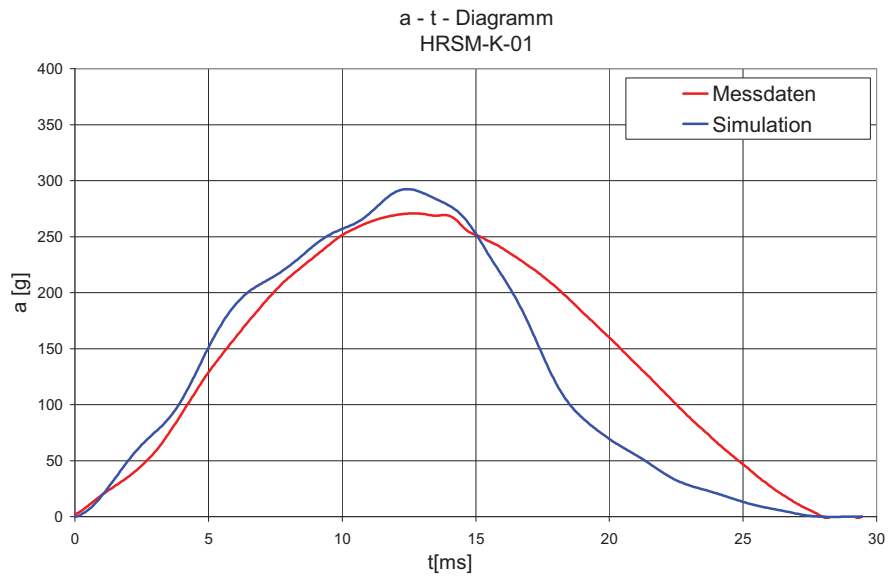


Abb. 4.37: Vergleich der Beschleunigungsverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit Kugelimpkator; HRSM

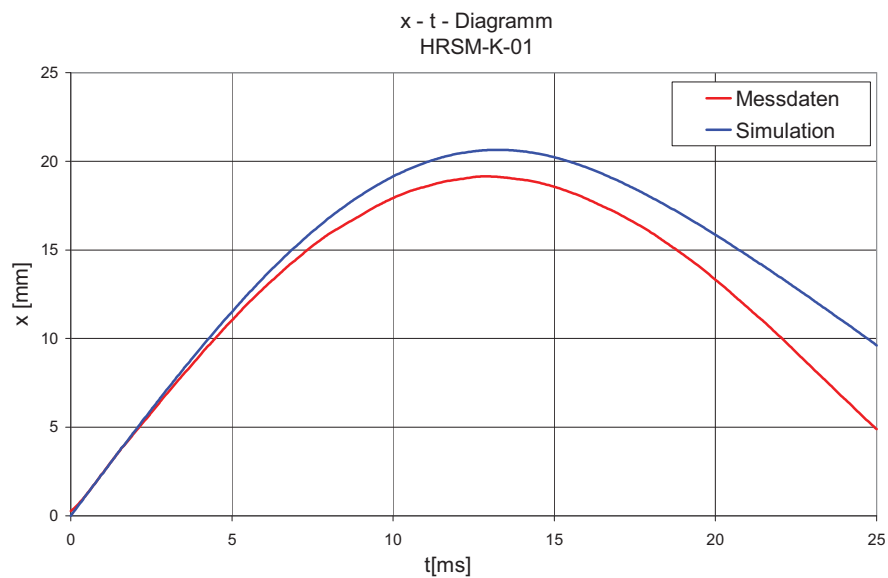


Abb. 4.38: Vergleich der Wegverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit Kugelimpkator; HRSM

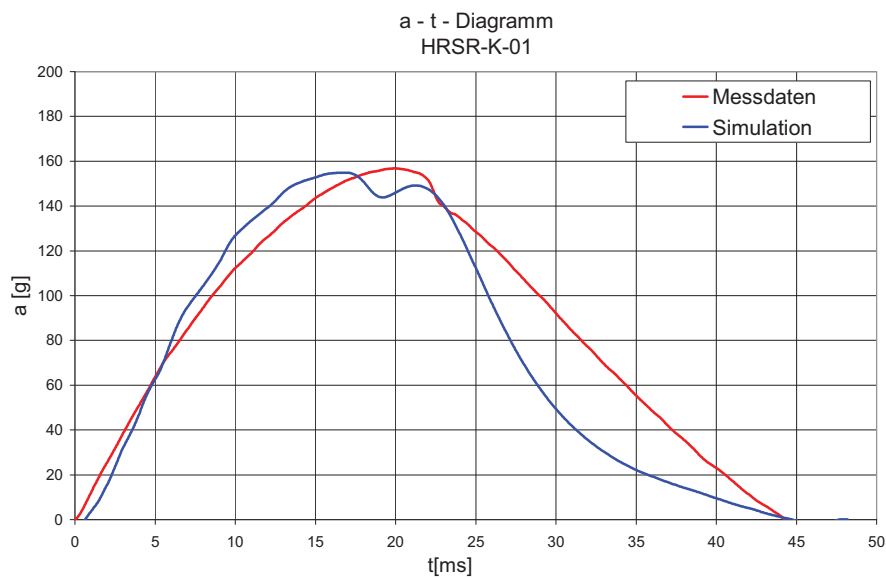


Abb. 4.39: Vergleich der Beschleunigungsverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit Kugelimpaktor; HRSR

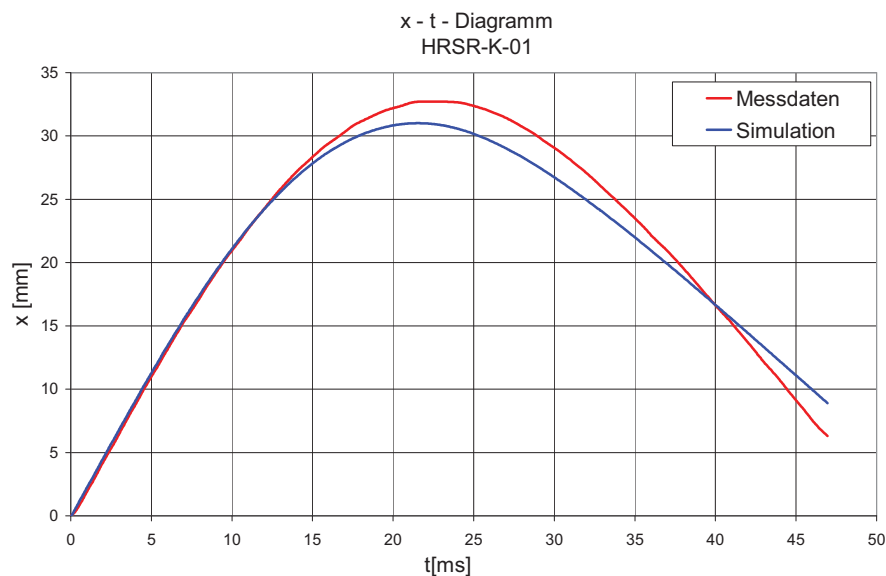


Abb. 4.40: Vergleich der Wegverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit Kugelimpaktor; HRSR

Der Schaumstoff CRPUR wurde im Ggs. zu HRSM und HRSR einmal als massiver Schaumblock und einmal mit dem gesamten Schichtaufbau modelliert. Dies wurde deshalb gemacht, da sich in der Videoaufzeichnung (Abb. 4.41) die einzelnen 5mm dicken Schichten beim Aufprall merklich voneinander abhoben und somit schon rein optisch ein deutlich anderes Verhalten als bei einem

massiver Block erkennbar war. Für die Simulation wurden die einzelnen Schichten aus jeweils zweilagigen Solid-Elementen aufgebaut. Für die einzelnen Schichten wurde ein automatischer surface-to-surface Kontakt mit einem Reibungskoeffizient von 0.8 definiert. Es wurde darauf verzichtet den Reibungskoeffizienten genauer zu bestimmen, da sich bei einer Variation jenes praktisch keine Unterschiede im Ergebnis zeigten.

In der Videoausgabe der Simulation (Abb. 4.42) ist dieses Verhalten mit dem Schichtaufbau sehr gut nachgebildet.

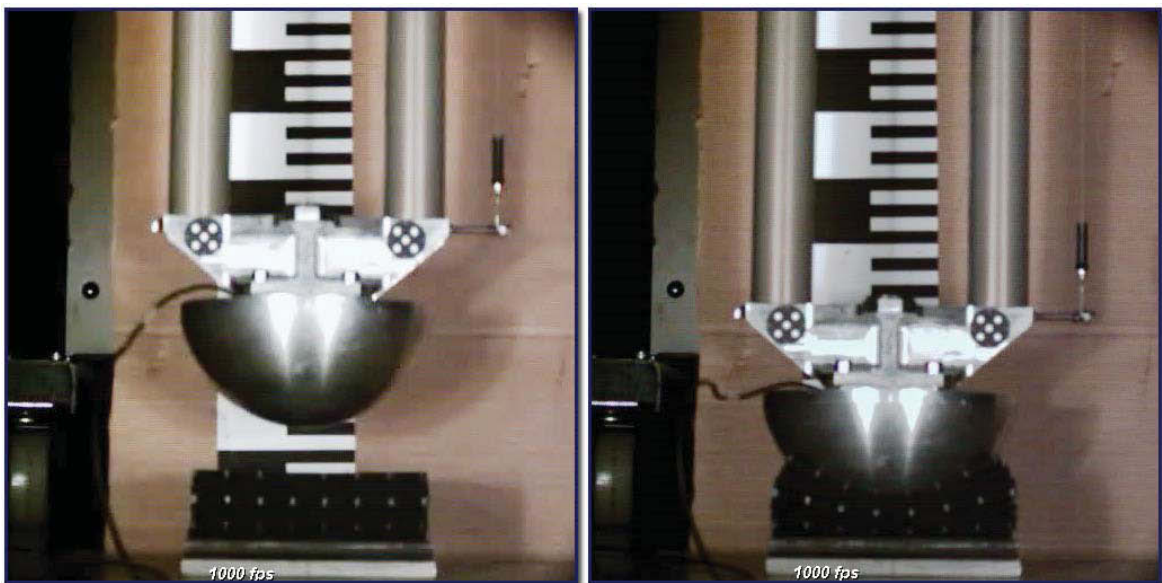


Abb. 4.41: Ausschnitt aus der Videoaufzeichnung eines Versuchs mit Kugelimpaktor an CRPUR

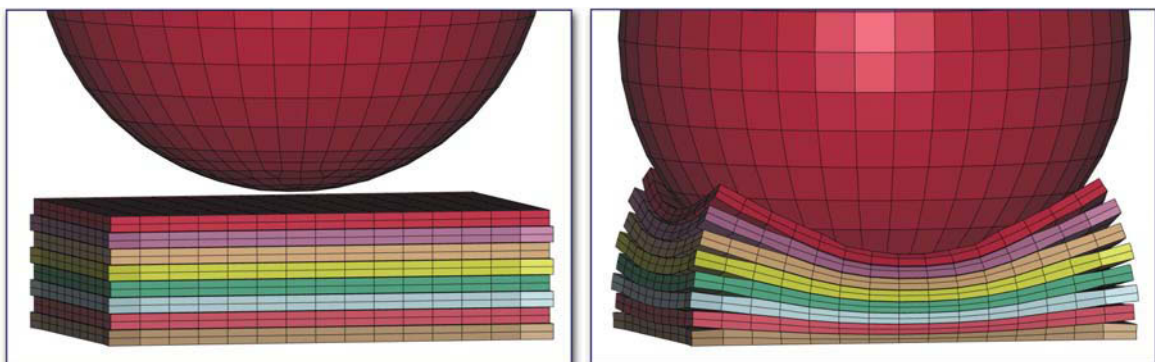


Abb. 4.42: Simulation mit Schichtaufbau der Schaumstoffprobe eines Versuchs mit Kugelimpaktor an CRPUR

In Abb. 4.43 und Abb. 4.44 werden nun die Beschleunigungs- und Wegverläufe von Realversuch, Simulation mit massiver Schaumstoffprobe und Simulation mit Schichtaufbau miteinander verglichen.

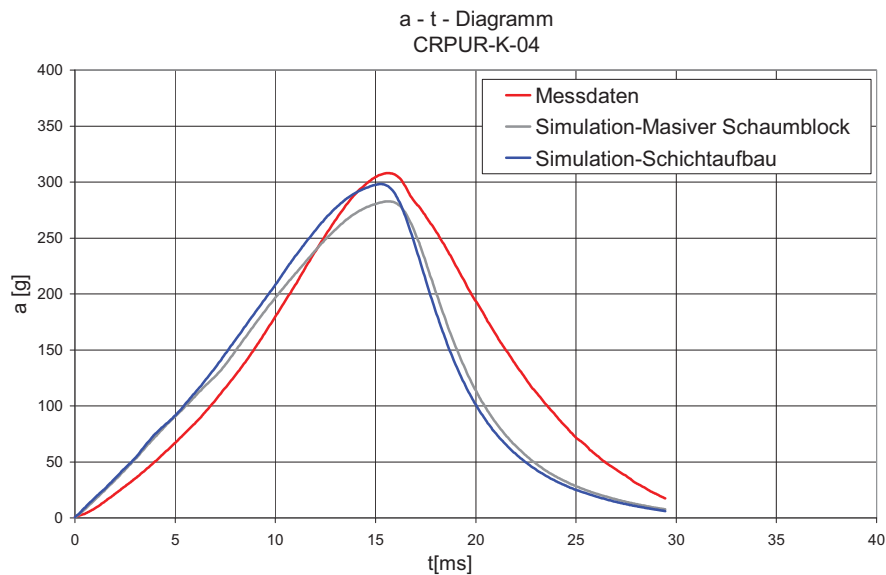


Abb. 4.43: Vergleich der Beschleunigungsverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit Kugelimpaktor; CRPUR

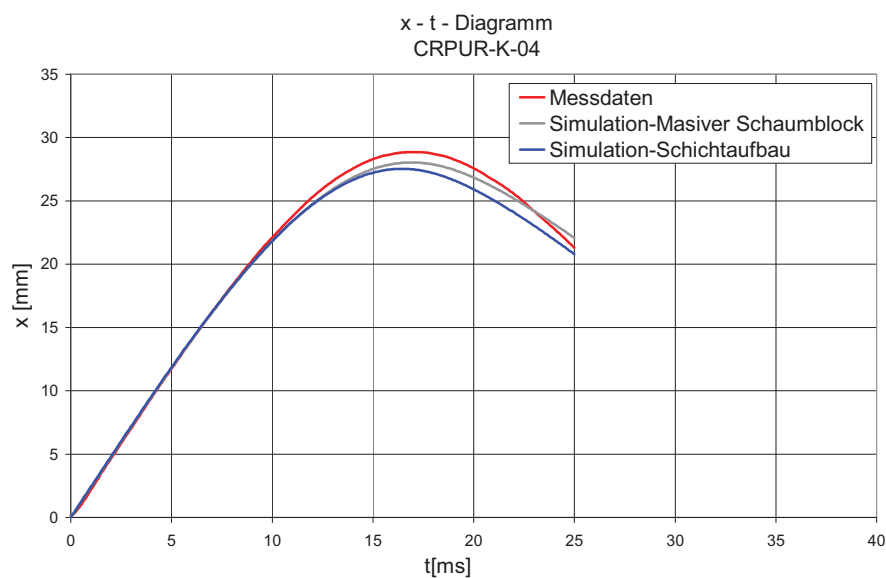


Abb. 4.44: Vergleich der Wegverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit Kugelimpaktor; CRPUR

Man sieht deutlich, dass der genauer modellierte Schichtaufbau zu einem verbesserten Ergebnis im Beschleunigungsverlauf führt. Es tritt hier aber wie bei den anderen Schaumstoffen wiederum das Problem einer zu schnell abfallenden Beschleunigung auf. Der Eindringweg wird durch den Schichtaufbau etwas geringer, aber dieser Unterschied ist nur sehr marginal.

Im Großen und Ganzen zeigen die Simulationen der Impactversuche mit Kugelimpaktor eine Übereinstimmung, die für eine Bauteilentwicklung bzw. eine Bauteilauslegung mehr als ausreichend ist. Somit ist gezeigt, dass die Materialdaten aus den uniaxialen Impactversuchen auch auf komplexere Impactbelastungen übertragbar sind. Die Druckbelastungsphase wird sehr gut nachgebildet. Bei der anschließenden Entlastung sind die auftretenden Abweichungen hingegen größer. Dies liegt in erster Linie daran, dass die Belastungsphase exakt über die angegebene Spannungs-Stauchungskurve beschrieben wird. Die Entlastung wird allerdings nur über die beiden Parameter HU und SHAPE abgebildet. Will man dieses Ergebnis weiter verbessern, ist es noch möglich diese Parameter mit Hilfe eines iterativen Verfahrens wie z.B. einer Response Surface Methode weiter zu optimieren.

Nichts desto trotz sind diese Ergebnisse sehr gut, wenn man bedenkt, dass die verwendeten Materialmodelle weder Belastungsgeschwindigkeit noch Temperatur berücksichtigen. In der Zukunft wird aber kein Weg daran vorbeiführen an diesen Materialmodellen anzusetzen und hier noch mehr Entwicklungsarbeit zu investieren, um in der Lage zu sein mit ein und demselben Modell verschiedenste Belastungen, wie Zug und Druck, langsam und schnell aber auch globale und lokale Temperatureinflüsse zu simulieren.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Jeder Automobilhersteller muss, wenn er ein neues Fahrzeug auf den Markt bringen will, eine Reihe von gesetzlichen Bestimmungen bezüglich der Crashesicherheit erfüllen. Dies bezieht sich nicht nur auf den Schutz der Insassen sondern auch auf den Schutz von Fußgänger. Bei den Fußgängerschutztests werden verschiedene Impaktoren, die z.B. einen menschlichen Kopf oder einen Fuß repräsentieren auf verschiedene Punkte am Fahrzeug geschossen. Die dabei aufgezeichneten Beschleunigungen dürfen bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Da bei diesen Crashesituationen viel weniger Energie als bei einem Gesamtfahrzeugcrash abgebaut werden muss, werden als Crashabsorber, die in direkten Kontakt mit dem menschlichen Körper treten, immer häufiger Polymerschäume eingesetzt. Sie besitzen die Fähigkeit relativ viel Energie unter einer niedrigen Spannung abzubauen. Niedrige Spannungen bedeuten auch niedrige Beschleunigungen und diese sind schließlich die entscheidende Messgröße bei den meisten Crashversuchen.

Für jeden Fahrzeughersteller ist es nun nicht nur wichtig diese Test zu erfüllen, sondern auch schon im Vorhinein berechnen zu können, ob der Test bestanden wird. Somit kann man aufwendige und sehr kostspielige Versuche während der Entwicklungsphase einsparen. Das Ziel ist es ein Auto am Computer bis zu der gesetzlichen Abnahme ohne einen einzigen Crashtest zu entwickeln. Um diesem Ziel näher zu kommen, müssen die Vorhersagegenauigkeiten noch empfindlich gesteigert werden. Diese Vorhersagen beruhen auf der Methode der finiten Elemente, deren Genauigkeit nun stark von den in diesen Programmen integrierten Materialmodellen und den Parametern, die das jeweilige Material beschreiben, abhängt. Die Materialmodelle bilden auf mathematische Art und Weise das prinzipielle Verhalten eines Werkstoffs ab. Um nun ein bestimmtes Material beschreiben zu können, benötigen diese Modelle genaue Parameter.

Deshalb ist es das Ziel dieser Arbeit, eine Methodik zu entwickeln, um Materialparameter für bereits vorhandene Materialmodelle möglichst kosten- und zeiteffizient bestimmen zu können. Die Parameter sollen dahingehend optimiert werden, dass damit eine Crashesituation simuliert werden kann. Bei den Werkstoffen handelt es sich um Polymerschäume, die im Automobilbau als

crashabsorbierende Bauteile eingesetzt werden können. Es wurden zwei PUR-Schäume, ein Chloropren-Schaum und ein thermoplastischer EPP-Schaum untersucht.

Materialmodelle für Polymerschäume

Für die Auswertung der Versuche werden im Wesentlichen zwei Materialmodelle, die das Schaumstoffverhalten unter einer Druckbelastung beschreiben, benötigt. Zum einen das modifizierte Rusch Modell und zum anderen das im FE-Programm LS-DYNA integrierte Low Density Foam Modell (MAT57). Mit Ersterem ist es möglich den Zusammenhang zwischen nomineller Dehnung und Stauchung wie folgt mathematisch unter Verwendung von vier Parametern auszudrücken.

$$\sigma = A \times \varepsilon^m + B \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^n \quad (5.1)$$

Das Low Density Foam Modell beschreibt das Materialverhalten im Großen und Ganzen mit Hilfe einer tabellarisch angegebenen Spannungs-Stauchungs-Kurve und Parameter, die das Entlastungs- und Hystereseverhalten beschreiben. Beide Modelle gehen von einer temperaturunabhängigen Verformung aus, d.h. sie berücksichtigen weder die globale Temperatur noch lokale Temperaturveränderungen, die durch die Verformung hervorgerufen werden. Die Stauchung entspricht hier einer rein volumetrischen Kompression, was einer Querkontraktionszahl von Null gleichkommt. Des Weiteren ist es nicht möglich Effekte, die durch eine unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeit hervorgerufen werden, zu berücksichtigen. Die Annahme einer Unabhängigkeit von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit stellt für die Anwendung auf Polymerschäume eine sehr starke Vereinfachung dar, da die meisten Polymere hier eine starke Abhängigkeit zeigen.

Uniaxiale Druckprüfung bei monotoner Belastung

Zu Beginn wurden die Schäume mit Hilfe einer klassischen uniaxialen Druckprüfung charakterisiert. Es wurden Versuche mit monotonen Belastungsgeschwindigkeiten von 1 und 100mm/s durchgeführt. Entscheidend ist hierbei, dass Kraft und Weg gemessen wurden, die dann in nominelle Spannungen und Stauchungen umgerechnet werden können. In Abb. 5.1 ist der

prinzipielle Berechnungsweg zu sehen, wie aus uniaxialen Druckversuchen die für die Simulation nötigen Spannungsdehnungskurven erzeugt werden können.

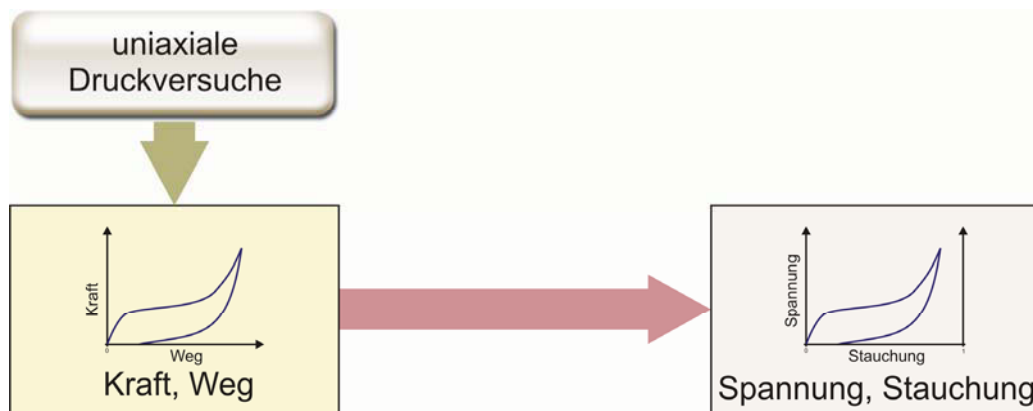


Abb. 5.1: Ablauf einer Materialcharakterisierung über einen uniaxialen Druckversuch

Bei diesen Versuchen wurden, wie in Abb. 5.3 zu sehen ist, 6 Belastungszyklen hintereinander gefahren. Dabei kann man erkennen, dass nach jedem Zyklus das Kraftniveau abnimmt und sich der Schaumstoff nicht mehr zu 100% zurückformt. Diese beiden Beobachtungen widersprechen den Annahmen, des für die Simulation verwendeten Materialmodells.

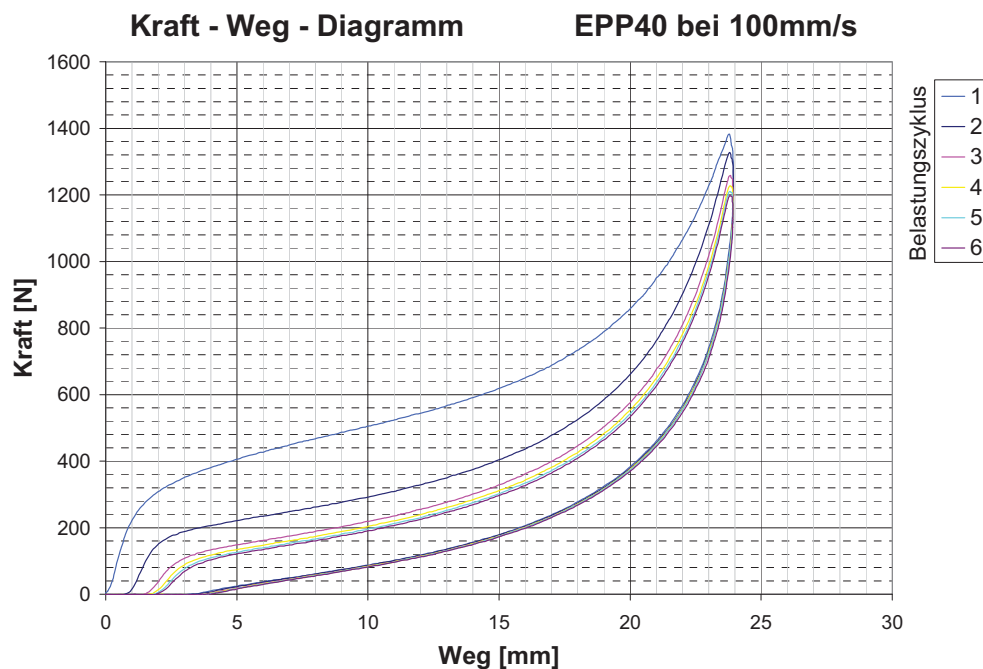


Abb. 5.2: Kraft-Weg-Diagramm einer monotonen uniaxialen Druckbelastung mit 100mm/s und 6 Belastungszyklen; EPP40

Dynamische Materialcharakterisierung

Bei der neuen Prüfmethode sollen nun die Schäume mit Hilfe eines Impactversuchs charakterisiert werden. Der erste große Unterschied zur Druckprüfung unter monotoner Belastung ist der Verlauf der Belastungsgeschwindigkeit (Abb. 5.3). Bei einer Impactbelastung tritt bei geringen Stauchungen, also zum Zeitpunkt des Aufpralls, die höchste Belastungsgeschwindigkeit auf, die schließlich bis zum Erreichen einer bestimmten maximalen Stauchung auf Null absinkt. Der genaue Verlauf hängt dabei von der Aufprallgeschwindigkeit und der Masse des Aufprallkörpers ab. Dieser ganze Prozess ist im Ggs. zur uniaxialen Druckprüfung energie- und nicht geschwindigkeitsgesteuert.

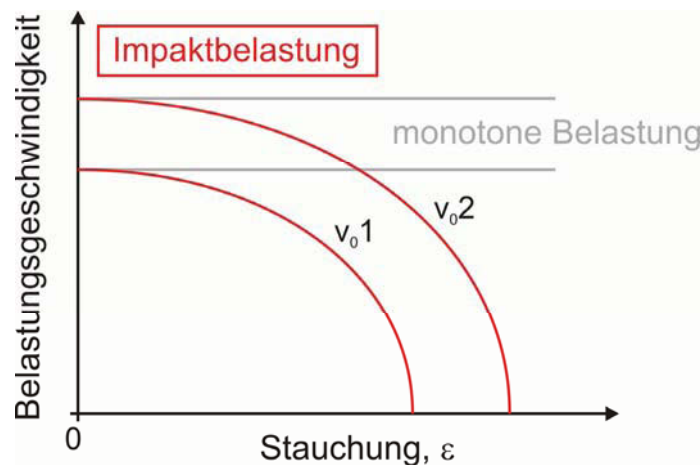


Abb. 5.3: Typischer Verlauf der Belastungsgeschwindigkeit bei einer Impactbelastung im Vgl. zu einer monotonen Belastung

Der zweite wichtige Unterschied liegt in den Messgrößen. Bei dieser Prüfung wird an Stelle von Kraft und Weg nur der Beschleunigungsverlauf im Aufprallkörper aufgezeichnet.

Der Versuchsaufbau besteht aus einer pneumatischen Abschussvorrichtung, mit der ein flacher Impaktor senkrecht nach unten auf eine quaderförmige Probe geschossen werden kann. Der Impaktor trifft hierbei frei fliegend auf die Probe.

Unter der Annahme einer Querkontraktion von null und einer uniaxialen Belastung, kann nun aus diesem gemessenen Beschleunigungsverlauf der Zusammenhang

zwischen Spannung, Stauchung und Dehnrate berechnet werden. Um aussagekräftige Kurven zu ermitteln, werden ca. 10 bis 15 Versuche mit unterschiedlichen Aufprallgeschwindigkeiten und Massen benötigt. Dabei sollen sich Aufprallgeschwindigkeiten und Aufprallenergien ergeben, wie sie später bei den zu simulierenden Bauteilen auftreten. Aus all diesen Versuchen werden Spannungs-Stauchungs-Kurven erzeugt und anschließend mit dem modifizierten Rusch Modell bzw. einer arithmetischen Mittelwertsberechnung in eine einzige Masterkurve zusammengeführt, die anschließend als Basis der FE-Berechnung dient. Wenn man diese so erzeugten Masterkurven mit denen aus der monotonen Druckprüfung vergleicht (Abb. 5.4), sieht man, dass das Spannungsniveau von 1mm/s auf 100mm/s bis hin zur Impactbelastung merklich ansteigt.

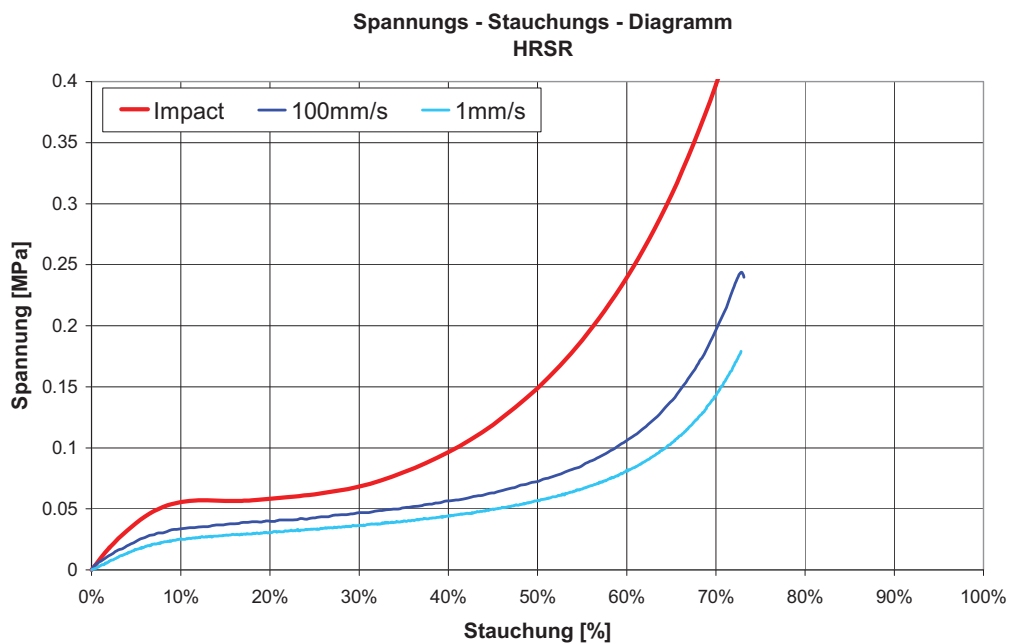


Abb. 5.4: Vergleich der Spannungsdehnungskurven bei monotoner Belastung und Impactbelastung; HRSR

Nachdem die Materialkarten, die das Materialverhalten für die Simulation beschreiben, erzeugt wurden, wird jeder Versuch mit der FE-Software LS-DYNA simuliert. Das Ergebnis dieser Simulation liefert ebenfalls einen Beschleunigungsverlauf, der nun mit dem Realversuch verglichen werden kann. Hieraus erhält man, im Ggs. zu den monotonen Druckversuchen, sofort eine Abschätzung der Genauigkeit der Materialdaten bezüglich der Simulation. Der

prinzipielle Beschleunigungsverlauf stimmte bei allen Versuchen gut überein (Abb. 5.5). Bei den Peak-Beschleunigungen ergaben sich Abweichungen unter 10%. Dieses Ergebnis bietet für eine Bauteilauslegung und eine Entwicklung eine ausreichende Genauigkeit. Der Abweichungsmittelwert aller Versuche lag bei den einzelnen Schaumstoffen nahe an 0% und hatte eine Schwankungsbreite sowohl ins Positive wie auch ins Negative. D.h. es war keine Tendenz zu erkennen, dass die Simulationsergebnisse eher zum Über- bzw. Unterschätzen der Beschleunigungen neigen.

Optional wäre es hier auch noch möglich eine iterative Parameteroptimierung zwischen Versuch und Simulation durchzuführen. Bei den in dieser Arbeit gemachten Versuchen, war dies allerdings nicht notwendig, da die Ergebnisse bereits eine ausreichende Genauigkeit aufwiesen und es außerdem ein wichtiges Ziel war, ein Verfahren zu entwickeln, welches prinzipiell ohne iterative Optimierungsprozesse auskommt.

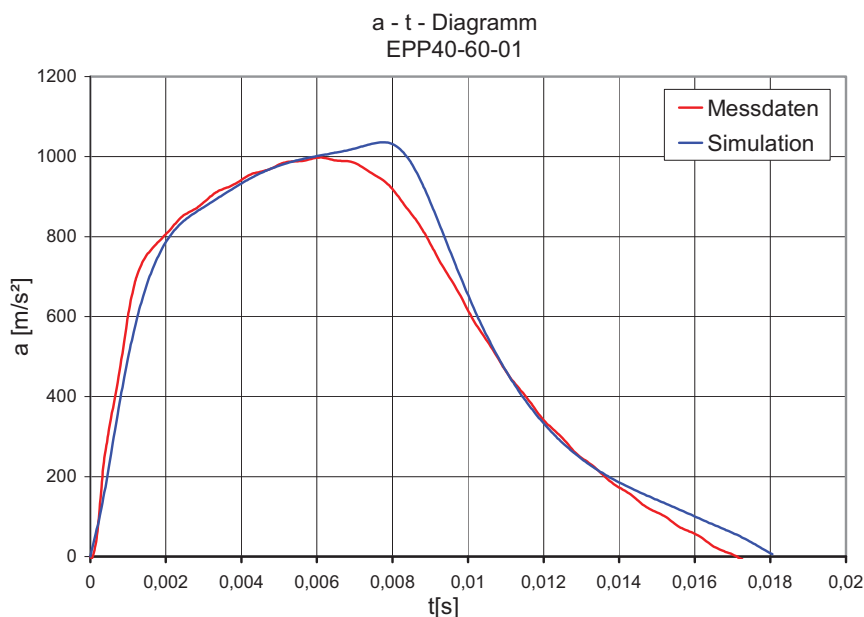


Abb. 5.5: Vergleich der Beschleunigungsverläufe zwischen Realversuch und Simulation des Impactversuchs mit flachem Impaktor; EPP40

Zusammenfassend stellt sich der Verfahrensablauf dieser Prüfmethode, wie er in Abb. 5.6 skizziert ist, dar. Aus den Beschleunigungsverläufen der Impactversuche mit einem flachen Aufprallkörper werden unter der Annahme einer uniaxialen Belastungen und einer Querkontraktionszahl von null Spannungs-

Stauchungskurven erstellt. Daraus können die für die Simulation notwendigen Materialkarten erzeugt werden.

Der erste große Vorteil besteht bei dieser Methodik darin, dass die Versuche sofort simuliert werden können und somit eine Fehlerabschätzung der Parameter möglich wird. Der zweite Vorteil liegt darin, dass zur Bestimmung der Parameter kein aufwendiges iteratives Verfahren, wie es z.B. ein reiner Bauteilversuch notwendig macht, erforderlich ist.

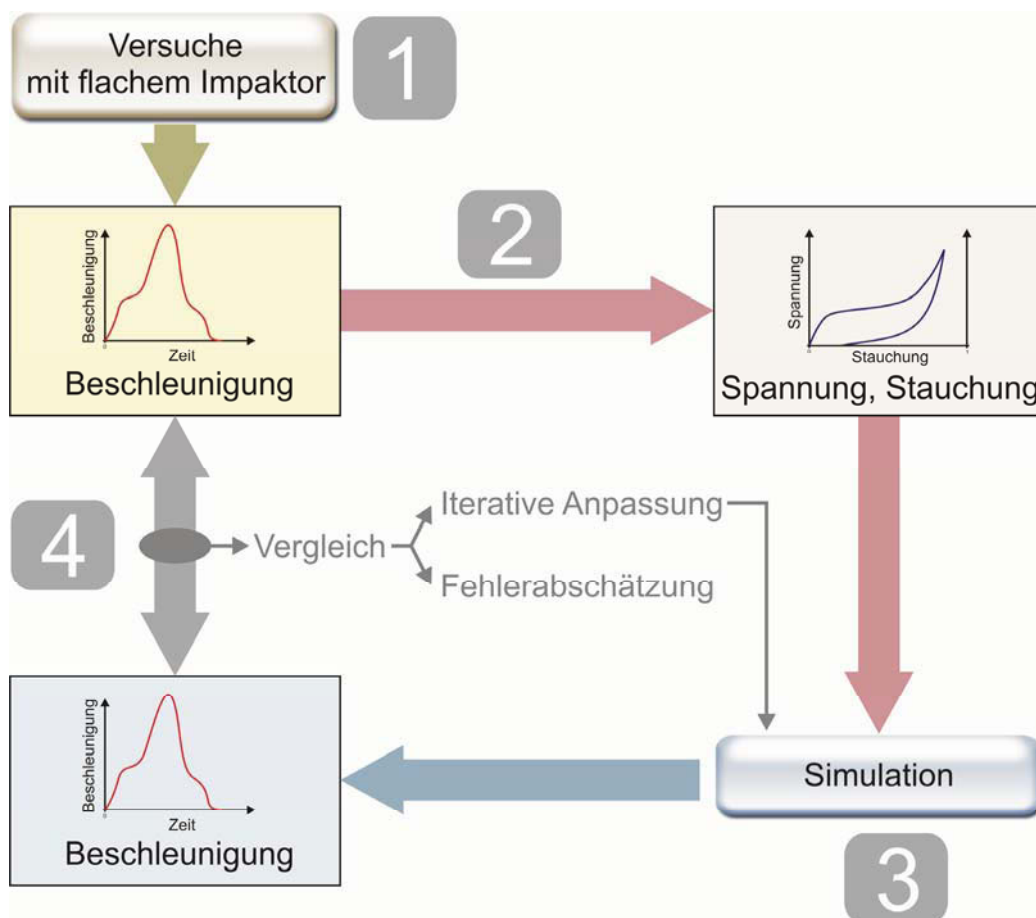


Abb. 5.6: Schematischer Ablauf einer nicht iterativen dynamischen Parameterbestimmung

Impactversuche mit Kugelimpaktor

Als nächster Schritt wird untersucht, wie sich diese Materialdaten, die aus einem uniaxialen Impactversuch bestimmt wurden, auf eine komplexere Belastungssituation anwenden lassen. Dazu wird ein Aufprall eines kugelförmigen Körpers auf dieselben quaderförmigen Proben als Realversuch und als Simulation

durchgeführt. Gemessen werden hierbei der zurückgelegte Weg und die Beschleunigung des Impaktors.

Bei diesen Versuchen zeigt sich eine gleich gute Übereinstimmung, wie bei den Versuchen mit flachem Impaktor. Daraus folgt, dass die aus den uniaxialen Impactversuchen gewonnenen Materialparameter ebenso für die Simulation einer komplexeren Crashsituation angewandt werden können.

Mit dieser Methodik ist es also möglich in sehr kurzer Zeit Materialparameter für eine Crash-Simulation zu erhalten, die aus einem realen Impactversuch ermittelt wurden. Aufgrund der stark vereinfachten Darstellung des Materialverhaltes in den entsprechenden Materialmodellen ist es wichtig, dass bei diesem Verfahren die Schaumstoffe unter sehr ähnlichen Belastungen geprüft werden, wie es ihrem späteren Einsatzzweck entspricht. Bei diesem Verfahren ist im Ggs. zu einem herkömmlichen Bauteilversuch kein aufwendiges iteratives Bestimmen der Materialparameter nötig. Des Weiteren ist es auch sofort möglich eine Aussage über die Genauigkeit der ermittelten Parameter zu treffen. Mit dieser Methodik können alle Werkstoffe geprüft werden, die ein rein volumetrisches Kompressionsverhalten bzw. eine Querkontraktion von Null besitzen. Da bei den Versuchen leichte Verkippen des Impaktors aufgrund des freien Flugs nicht ausgeschlossen werden können, ist es sinnvoll nur Proben mit mindestens 20mm Dicke zu prüfen. Je dünner die Proben werden, umso größer wird die Fehleranfälligkeit gegenüber einem nicht exakten Aufprall.

Aufgrund der Einschränkungen in den Materialmodellen können hier weder Temperatur- noch Belastungsgeschwindigkeitseinflüsse berücksichtigt werden. Da das Verhalten polymerer Werkstoffe stark von diesen Einflüssen abhängt, wird es in Zukunft notwendig sein, auch die Materialmodelle dahingehend zu modifizieren. So müssen sowohl globale Temperatureinflüsse, wie auch lokale Temperaturänderungen, die durch eine Verformung induziert werden, in die Berechnungen mit einbezogen werden. Ein anderer Aspekt wäre es, auch die mikromechanischen Vorgänge in das Materialmodell einfließen zu lassen und die makroskopischen Eigenschaften als Folge der Mikrostruktur zu betrachten. Erst diese Schritte werden einen weiteren großen Sprung in der Vorhersagegenauigkeit ermöglichen.

6 LITERATUR

AVALLE M., BELINGARDI G., IBBA A. (2004), "Experimental testing of cellular solids and model parameters identification", 12th International Conference on Experimental Mechanics

ASHBY M.F. (2000), "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth Heinemann, Boston

BAHLMANN N. (2004), „Validierung von Insassensimulationsmodellen an realen Crashversuchen mit Hilfe der stochastischen Optimierung“, CAE-Optimierung der Fahrzeugentwicklung, Hamburg

CHEN C., LU T.J., FLECK N.A. (1999), "Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams", Journal of Mechanics and Physics of Solids

BATHE K.J. (1996), "Finite element procedures", Prentice Hall, NJ

DEGISCHER H.P., KRISZT B. (2002), "Handbook of Cellular Metals", Wiley-VCH

DROSTE A. (2002), „Dissertation: Beschreibung und Anwendung eines elastisch-plastischen Materialmodells mit Schädigung für hochporöse Metallschäume“, Univ. Stuttgart

DU BOIS P., HIRTH A. (1999), „From complex 3D-foam parts to ready LS-DYNA inputdata in less than one hour?“, Götheburg

DU BIOS P.A., KOESTERS M., FRANK T., KOLLING S. (2004), „Crashworthiness analysis of structures made from polymers“, LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg

FELIPPA C.A. (2004), "Introduction to Finite Element Methods", Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado at Boulder

FELIPPA C.A. (2001), "Nonlinear Finite Element Methods", Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado at Boulder

FRITZ M. (2003), "Diplomarbeit: Ermittlung von Werkstoffparametern für die Fahrzeug-Crashsimulation aus Biegeversuchen", Montanuniv. Leoben

GIBSON L.J., ASHBY M.F. (1997), „Cellular Solids, Structure and Properties“, Cambridge University Press

- GUPTA K.K., MEEK J.L. (2000), "Finite element multidisciplinary analysis", AIAA, Reston, Virginia, USA
- HAFELLNER R. (2004), "Neue flexible Methoden der Materialdatenermittlung für die dynamische Simulation", LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg
- HALLQUIST J.O. (1998), "LS-DYNA Theoretical Manual", Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA
- HALLQUIST J.O. (2001), "LS-DYNA v960 Users Manual", Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA
- HASSAN J., SCHUSTER P., FREDERICK G. (2000), „Polyurethane Material Models for Simulating Leg-Form Impact in Explicit Transient Dynamics“, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA
- KLEMPNER D. (1991), "Handbook of polymeric foams and foam technology", Hanser Verlag, München, Wien
- LEMAITRE J. (2001), "Handbook of Material Behavior Models", Academic Press, San Diego, CA, USA
- MARCZYK J. (2001), "Automotive Crash Simulation: A Personal Perspective", EASi Engineering GmbH
- MILLS N.J., GILCHRIST A. (2000), „Modelling the Indentaion of Low Density Polymer Foams“, Cellular Polymers 19, University of Birmingham, UK
- MILLS N.J. (2000), "Micromechanics of Polymeric foams", 3rd Nordic meeting on Materials and Mechanics, Aalborg, Dänemark
- MÜLLERSCHÖN H., FRANZ U., MÜNZ T., STANDER N. (2001), "The identification of rate-dependent material properties in foams using LS-OPT", Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA
- OBERBACH K. (2001), "Kunststoff Taschenbuch 28. Ausgabe", Hanser Verlag, München, Wien
- PILZ E. (1997), "Dissertation: Werkstoffliche Wiederverwertung von PUR-Weichschaumstoffen", Montanuniv. Leoben

- RUSCH K.C. (1969), "Load-compression behaviour of flexible foams", Journal of Applied Polymer Science; Volume 13, Issue 11
- RUSCH K.C. (1970), "Energy-absorbing characteristics of foamed polymers", Journal of Applied Polymer Science; Volume 14, Issue 6
- SAMBAMOORTHY B., HALDER T. (2001), "Characterization and component level correlation of energy absorbing polyurethane foams using LS-Dyna material models", Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA
- SERIFI E., HIRTH A., MATTHAEI S., MÜLLERSCHÖN H. (2003), "Modelling of Foams using MAT83 – Preparation and Evaluation of Experimental Data", 4th European LS-DYNA Users Conference
- STANDER N., CRAIG K.C., MÜLLERSCHÖN H., REICHERT R. (2001), "Material identification in structural optimization using response surfaces", Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, USA
- WANG. W.M., LEMMEN P.P.M. (2001), "Constitutive modelling of aluminium foams", European Automotive Congress, Bratislava
- WEAIRE D., HUTZLER S. (1999), "The Physics of Foams", Clarendon Press
- WESCH K. (2001), "Lightweight car body construction by use of structural foam", European Automotive Congress, Bratislava
- WRIGGERS P. (2001), "Nichtlineare Finite-Element-Methoden", Springer, Berlin
- ZHANG J. (1997), "Constitutive modelling and optimal design of polymeric foams for crashworthiness", Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Michigan