

IVW - Schriftenreihe Band 16

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Julius Schluppkotten

Ein Beitrag zur methodischen
Integration von neuen Werkstoffen
in die Fahrzeugcrashberechnung

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Schluppkotten, Julius:

Ein Beitrag zur methodischen Integration von neuen Werkstoffen in die
Fahrzeugcrashberechnung / Julius Schluppkotten. – Kaiserslautern : IVW, 2001
(IVW -Schriftenreihe ; Bd. 16)

Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-934930-12-3

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Erwin-Schrödinger-Straße
Universität Kaiserslautern, Gebäude 58
67663 Kaiserslautern

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: Universität Kaiserslautern
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D-386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2001

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1615-021X

ISBN 3-934930-12-3

Ein Beitrag zur methodischen Integration von neuen Werkstoffen in die Fahrzeugcrashberechnung

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Julius Schluppkotten
aus Neuwied / Rhein

D 386

Prüfungsvorsitz: Prof. Dr.-Ing. Renz
Referent: Prof. Dr.-Ing. Maier
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Wallentowitz

Tag der mündlichen Prüfung: 02.10.2000

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1996 bis 1999 während meiner Tätigkeit als Doktorand der BMW AG in München und an der IVW GmbH in Kaiserslautern.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Maier für die Betreuung und Förderung dieser Arbeit sowie die Übernahme des Referats. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wallentowitz bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats, bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Renz für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin danke ich Herrn Dr.-Ing. Holzner, der diese Arbeit initiierte, für die wohlwollende Unterstützung und für viele anregende Diskussionen. Herrn Paßmann gilt mein Dank für die gute Zusammenarbeit und viele wertvolle Ideen, durch die er mich innerhalb des gesamten Zeitraums der Entstehung dieser Arbeit wesentlich unterstützt hat.

Der Bayer AG in Leverkusen und GE Plastics in Bergen op Zoom, Niederlande, danke ich für die Bereitstellung von Werkstoffproben. Der Firma Hibbitt, Karlsson & Sorensen in Pawtucket, USA, danke ich für die zielführende und unkomplizierte Zusammenarbeit. Hervorheben möchte ich Frau Dr. Iordache und Herrn Dr. Cheng, von denen ich viel lernen durfte.

Dank auch allen Mitarbeitern der BMW AG und der IVW GmbH, die mit ihrer Hilfe zu dieser Arbeit beigetragen haben. Hervorheben möchte ich Herrn Huisman. Die angenehme Arbeitsatmosphäre in der Abteilung 'Berechnung und Konstruktion' wie auch an der gesamten IVW GmbH, sowie der durch die BMW AG ermöglichte Freiraum für ein kreatives Arbeiten waren für das Gelingen der Arbeit von entscheidender Bedeutung.

Kaiserslautern im Januar 2001

Julius Schluppkotten

3.2	Projektziele	50
3.3	Projektplan	52
3.3.1	Analyse der bisherigen Erfahrungen	52
3.3.2	Festlegung der Vorgehensweise	53
3.3.2.1	Materialcharakterisierung	53
3.3.2.2	Materialmodellierung	58
3.3.3	Auswahl von Validierungskriterien	59
3.4	Risikoabschätzung	61
4	Die Integration von polymeren Hartschaumstoffen: Durchführung.	63
4.1	Materialcharakterisierung	63
4.1.1	Vorbereitung	63
4.1.1.1	Probenentnahme	64
4.1.1.2	Prüf- und Meßtechnik	64
4.1.2	Durchführung	65
4.1.3	Auswertung und Analyse	66
4.1.3.1	Berechnung der Validierungskriterien	66
4.1.3.2	Auswertung der Materialcharakterisierung	67
4.1.3.2.1	Materialtests	67
4.1.3.2.2	Anwendungsnahe Grundlagentests	82
4.1.3.3	Analyse der Materialcharakterisierung	86
4.2	Modellierung des Materialverhaltens	95
4.2.1	Untersuchung von existierenden Materialmodellen	95
4.2.1.1	Übersicht	95
4.2.1.2	Eignung der Materialmodelle	100
4.2.2	Weiterentwicklung des Materialmodells nach N. Fleck	106
4.2.2.1	Beschreibung des modifizierten Materialmodells	107
4.2.2.1.1	Fließfläche	107
4.2.2.1.2	Plastisches Potential	108
4.2.2.1.3	Plastische Verfestigung	109
4.2.2.1.4	Dehnratengesetz	109
4.2.2.1.5	Schädigungsmodell	110
4.2.2.2	Implementierung und Kalibrierung	115
4.2.2.3	Verifikation	115
4.3	Validierung des Materialmodells	118
4.3.1	Erläuterung der Validierungsbeispiele	118

4.3.2	Auswertung.....	120
4.3.2.1	Simulation von Materialtests	120
4.3.2.2	Simulation von anwendungsnahen Grundlagentests	123
5	Die Integration von polymeren Hartschaumstoffen: Bewertung und Knowhow-Gewinn	127
5.1	Bewertung.....	127
5.1.1	Ergebnisaufbereitung.....	127
5.1.2	Ergebnisinterpretation.....	128
5.1.2.1	Beurteilung der Prozeßschritte	128
5.1.2.2	Validierung der Annahmen über das Materialverhalten.....	128
5.1.2.3	Analyse der Modellvalidierung	129
5.1.2.4	Begründung und Bewertung von Abweichungen.....	133
5.1.2.5	Validierung der Anforderungen an das Materialmodell	134
5.1.3	Entscheidung.....	135
5.1.4	Festlegung von Qualitätsvorschriften	135
5.1.4.1	Anforderungen an das Bauteil	135
5.1.4.2	Vorschriften für den Einsatz des Materialmodells	136
5.2	Knowhow-Gewinn.....	138
5.2.1	Sicherung von Erfahrungen	138
5.2.2	Sicherung von Ergebnissen.....	140
6	Beispiele aus dem produktiven Einsatz.....	141
6.1	Allgemeines	141
6.2	Berechnung eines Stoßfängertests nach NHTSA, Teil 581	141
6.2.1	Beschreibung des Testverfahrens	142
6.2.2	Beispiel: 4 km/h Barrierenaufprall mit 100% Überdeckung	142
6.2.3	Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse.....	144
6.3	Berechnung eines Kopfaufpralls nach FMVSS 201	146
6.3.1	Zusammenfassung der gesetzlichen Regelung	147
6.3.2	Beispiel: Aufprallbereich Dachhimmel im Übergang zur B-Säule	148
6.3.3	Ergebnis der Untersuchung.....	150
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	153

Anhang	157
A1 Ergänzungen zur Planung	157
A2 Ergänzungen zur Durchführung.....	159
A2.1 Materialcharakterisierung	159
A2.2 Materialmodellierung	162
A2.2.1 Implementierung.....	162
A2.2.2 Verifikation	164
A2.3 Validierung	166
A3 Ergänzungen zur Bewertung.....	175
Literatur	179
Liste der Studien- und Diplomarbeiten	187
Lebenslauf	

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

- ADAC Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
- AIS Abbreviated Injury Scale
- CAE Computer Aided Engineering
- DMU Digital Mock-up
- EA Energieabsorber
- ECE Economic Commission for Europe
- EPP Expandiertes Polypropylen
- EPS/PPE Compound aus expandiertem Polystyrol und Polyphenylenether
- ESV Experimental Safety Vehicle
- FEM Finite Elemente Methode
- FG Fußgänger
- FMH Free Motion Headform
- FMVSS Federal Motor Vehicle Safety Standard
- FR Fahrrad
- HIC Head Injury Criterion
- HIC(d) Modified Head Injury Criterion
- MZ Motorisierte Zweiräder
- NCAP New Cars Assessment Program
- NFZ Nutzfahrzeug
- NHTSA National Highway Traffic Safety Administration
- PKW Personenkraftwagen
- PUR Polyurethan
- PVC Polyvinylchlorid
- QIP Quality Improvement Paradigm
- RT Raumtemperatur
- SID Side Impact Dummy
- StVZO Straßenverkehrs-Zulassungsordnung
- VDA Verband der deutschen Automobilindustrie
- VP Virtueller Prototyp
- WE Wertung für die Beurteilung eines Materialmodells
- WI Wichtung für die Beurteilung eines Materialmodells

Lateinische Symbole

Symbol	Dimension	Bedeutung
C_{ijkl}	N/mm ²	Steifigkeitstensor
C_i, C_i'	-	Materialkonstanten
d	mm	Zelldurchmesser
D	-	Schädigungsparameter
D_{eff}	-	Effektiver Schädigungsparameter
e^p	-	Effektive deviatorische Stauchung
ΔE	Nm	Deformationsenergie
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
E_0	N/mm ²	Elastizitätsmodul des ungeschädigten Werkstoffes
E_{max}	Nmm	Maximale, durch Deformation absorbierte Energie
E_P	N/mm ²	Elastizitätsmodul des Polymers
E_R	Nmm	Energie der Rückverformung
E_s	N/mm ²	Elastizitätsmodul des Schaumstoffes
E_S	N/mm ²	Elastizitätsmodul des geschädigten Werkstoffes
f	mm	Prüfstempelverschiebung bei Dreipunktbiegung
$F(\sigma_{ij})$	N/mm ²	Fließbedingung
G	N/mm ²	Gleitmodul
$G(\sigma_{ij})$	N/mm ²	Plastisches Potential
G_I^I	N/mm	Mode I-Bruchenergie
h	mm	Probenhöhe
J_i	N/mm ²	Spannungsinvarianten
k	-	Reduktionsparameter des Schädigungsmodells
K	N/mm ²	Kompressionsmodul
l_{el}	mm	Charakteristische Länge des Elements
l_v	mm	Auflagerabstand bei Dreipunktbiegung
n	-	Parameter für die Potenzfunktion des Dehnratengesetzes
n_{ij}	-	Einheitstensor der deviatorischen Spannungen
p	N/mm ²	Hydrostatischer Druck
P	1/s	Parameter für die Potenzfunktion des Dehnratengesetz
q	N/mm ²	Vergleichsspannung nach von Mises
q_e	-	Entlastungsquotient
r	-	Skalierungsfaktor für das Schädigungsmodell
T	°C	Temperatur
T_g	°C	Glasübergangstemperatur
x_i	-	Einflußgrößen der Regressionsanalyse

Symbol	Dimension	Bedeutung
y	-	Zielgröße der Regressionsanalyse
Y	N/mm ²	Fließspannung bei Plastizität

Griechische Symbole

Symbol	Dimension	Bedeutung
α	-	Gestaltparameter für die Fließfläche bei Plastizität
β	-	Gestaltparameter für das Fließgesetz bei Plastizität
β_i	-	Regressionskoeffizienten der Regressionsanalyse
ε	-	Totale Dehnung
ε^e	-	Totale elastische Dehnung
ε^{eB}	-	Elastische Bruchdehnung bei Nachversagen
ε_{ij}	-	Dehnungstensor
ε'_{ij}	-	Deviatorischer Anteil des Dehnungstensors
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	1/s	Dehnratentensor
$\varepsilon_{kk} = \varepsilon_{Vol}$	-	Effektive Volumendehnung
ε^p	-	Totale plastische Dehnung
ε^p_{ij}	-	Tensor der plastischen Dehnung
ε^p_{Vol}	-	Effektive volumetrische Stauchung
ε_v	-	Äquivalente plastische Vergleichsdehnung
ϕ	-	Polymervolumenanteil des Schaumstoffes
Φ	-	Fließfläche bei Plastizität
γ^e	-	Elastische Gleitung
γ_{ij}	-	Tensor der Gleitungen
φ	-	Polymeranteil in den Zellwänden des Schaumstoffes
$\Delta\lambda$	-	Inkrement des plastischen Multiplikators
λ	-	Plastischer Multiplikator
ν^e	-	Elastische Querszahl
ν^p	-	Plastische Querszahl
ν_p	-	Querszahl des Polymers
ν_s	-	Querszahl des Schaumstoffes
ρ	g/l	Dichte
ρ_p	g/l	Dichte des Polymers

Symbol	Dimension	Bedeutung
ρ_s	g/l	Dichte des Schaumstoffes
$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$	-	Hauptspannungen
$\sigma_{d40\%}$	N/mm ²	Druckspannung bei 40% Stauchung
σ_{ij}	N/mm ²	Cauchy-Spannungstensor
σ'_{ij}	N/mm ²	Deviatorischer Anteil des Cauchy-Spannungstensors
σ_{ij}^e	N/mm ²	Tensor der elastischen Prädiktorspannung
σ_{kk}	N/mm ²	Hydrostatischer Anteil des Cauchy-Spannungstensors
σ_{mittel}	N/mm ²	Mittlere Plateauspannung
σ_p	N/mm ²	Fließgrenze des Polymers
σ_s	N/mm ²	Fließgrenze des Schaumstoffes
σ_v	N/mm ²	Äquivalente Fließspannung

Abstract

In the automotive industry, the market share of innovative and individual product variants has increased dramatically in recent years. The vehicle-independent requirements relating to quality and equipment are growing. Summarizing, the expenditure on product development is rising, forcing car producers to reduce development times and costs. The need for reengineering of the product development process is increasingly being met by virtual product development. A key factor is the reduction of time- and cost-consuming prototype tests by pre-designing automotive components virtually. The prerequisite for this are numerical methods which meet a high quality standard and allow predictive statements to realize concept decisions on the basis of calculation results. Questions of product liability are becoming increasingly important and may also concern test results based on numerical results in future.

An example of these methods of calculation is the crash calculation using the finite elements method, which is being used increasingly to improve passive safety within the general context of reengineering. In view of the growing requirements relating to occupant safety, this method of calculation, which is established highly efficient in the design of the body-in-white, will have to be improved in a way, that realizes a virtual design of interior safety components in the future. This will include especially simulating the complex material behaviour of the materials used in the vehicle interior. Describing these materials with sufficient material models affords a high quality of reproduction, which often can only be achieved at considerable cost and effort. This paper introduces a general process for the methodical integration of these new materials in the crash calculation. The objectives of the integration process are to improve and assure detail reproduction quality, as well as to increase efficiency using standardizable material modelling procedures.

The integration process will be developed on the basis of the so-called Quality Improvement Paradigm and subdivided into four phases: the **planning** phase, the **performance** phase, the **evaluation** phase and the **know-how acquisition** phase. During the **planning** phase, the necessary fundamental data on the material, the areas of application of the material within the vehicle and the associated application boundary conditions will be formulated. Targets will be defined for the integration process on the basis of these fundamentals. They will include a clear definition of assumptions regarding material behaviour and requirements relating to the planned material model. Under consideration of the validity of these assumptions and requirements, further action will be described in a project plan and assessed on the basis of a risk appraisal. Material characterization, as well as material modelling and validation will take place in the **performance** phase of the integration process. Material characterization involves formulating all the fundamental data required for development of the model so that material behaviour can be described. The first step - material modelling - involves examining the models existing in

commercial calculation programs and literature, and validating their suitability for detail reproduction of material behaviour. The objective is to select a model that can be used for crash calculation in the productive development process, or for the necessary further developments. Further development of the model will be subdivided into formulation of the materials equation, implementation of the materials equation in the finite element tool and verification of development steps. The implemented material model has to be validated. During the **evaluation** phase of the process, the process steps will be analyzed in detail and validated. The quality of the developed material model will be proved. This will include a definition of quality specifications for the model and for components to be designed by numerical simulation. The final step in the integration process is the **know-how acquisition** phase, which serves to improve the quality of material models and leads to a long-term improvement of the process efficiency. In addition to empirical process data acquisition, this phase will include saving all experimental and numeric data. In addition, know-how will be derived by using the material model in the productive development process.

The integration process will be shown for the first time within this paper by using a polymer brittle foam with high energy absorption capacity as an example. The fundamental data required for this purpose will be formulated in the process **planning** phase. The foams are synthetically manufactured materials with a low specific weight and a cellular structure. The material behaviour of the foams is affected by the properties of the basic materials and the characteristics of the cellular structure. Mechanical behaviour is characterized by the compressive plateau- or crush-stress over a large compression strain and by a low elastic recovery rate after pressure relief. The usual areas of application with regard to occupant protection are the headliner trim, the instrument panel and the side door trim. These foams are also used in bumpers for vehicle protection in lower impact collisions and for pedestrian safety. Regardless of the area of application, polymer brittle foams are primarily subjected to compressive stresses. As a result of the formulated fundamental data, it is necessary to account for the changes in mechanical properties in dependence on varying conditions, such as strain rate, temperature and the application of force - characterized by varying sample and impactor geometries - in order to characterize the material.

Classifying polymer brittle foams, two representative materials are determined which are used for material characterization. The thermoplastic and closed-cell particle foam system Noryl[®] EF will be considered in addition to the thermoset and nearly open-cell polyurethane-based Bayfill[®] EA foam system. Based on the procedure defined by the integration process, the material characterization will be realized by material tests such as the uniaxial compression test and the shear test, as well as application-oriented basic tests in accordance with the actual area of application of the foams. These tests will be conducted under varying application boundary conditions. Evaluation and analysis of the test results shows that the material behaviour of the two foam systems can be described by an elastic-plastic approach. The main characteristic of

this approach is the dependence of plasticity on the first and second stress invariants which is represented by a closed yield surface the multi-axial stress space. The material behaviour observed, is heavily dependent upon the application boundary conditions strain rate and temperature, as well as the density of the foam system. Failure of the Bayfill[®] EA also occurred when it was subjected to tensile and shear stresses, which have a strong influence on the behaviour of components under application-oriented loads.

The examination of existing material models which have the potential to reproduce the polymer brittle foam, leads to the selection of a model developed for aluminium foams by Professor N. Fleck at Cambridge University. The material model will be improved based on the results of the material characterization. This further development necessitates adapting the flow rule, introducing a law for the strain rate dependency of the material behaviour and formulating a damage model for modelling the failure mechanism of brittle polymer foams. The modified material model will be implemented as a user material in the ABAQUS/Explicit finite elements program and validated on the basis of the material tests and application-oriented tests.

The potential of the integration process will be established during the **evaluation** phase. Though being of a pilot nature, this process supports the quality-controlled modelling of polymer brittle foams to a high degree. This is clearly reflected in the detailed process descriptions which allow a target-oriented distribution of labour among the development partners involved. Thus, the material characterization will be performed in close cooperation with IVW GmbH and material modelling will be carried out in cooperation with HKS Inc. The transparency and reproducibility of the process are also essential for long-term quality improvement and assurance.

Analysis of the model validation in the **evaluation** phase leads to an acceptance of the developed material model for numerical simulation of the material behaviour of polymer brittle foams. A prerequisite for use is compliance with various quality specifications for the material model and for components to be designed based on numerical simulation. The components are required to exhibit a homogeneous density distribution and little scatter within defined bounds of production. The main requirement for use of the material model is quality-controlled calibration of the material parameters. The necessary material tests must be conducted on the foam system used for the component. The parameters also have to be validated by application-oriented basic tests. Calibration and the validation should be supervised by the component manufacturer and carried out by a test institute with the necessary equipment and experience. Following the implementation of the integration process, two different calculation models which are representative of the area of application of the foams - the bumper test according to NHTSA, Part 581 and the head impact test according to FMVSS 201 – demonstrate the productive use.

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die Entwicklung von Verkaufszahlen in der Automobilindustrie hat in den letzten Jahren deutlich gezeigt, daß mit innovativen und individuellen Produktvarianten erhebliche Marktanteile erzielt werden. Als Beispiele können die seit Ende der 80er Jahren erfolgreichen Roadster und die sog. Sports Activity Vehicles genannt werden. Um diesen zunehmenden Kundenwünschen nach innovativen Konzepten zu entsprechen und die damit verbundene Vielzahl von verschiedenen Fahrzeugvarianten realisieren zu können, ist eine Verkürzung der Entwicklungszeiten unvermeidlich [HLRS95], [SPSHM98]. Außerdem steigen, nicht zuletzt durch strengere gesetzliche Richtlinien, die Anforderungen an die Fahrzeuge und somit der mit einer Produktentwicklung verbundene Aufwand. Die Automobilindustrie reagiert auf diese zunehmenden Ansprüche und Anforderungen mit einem Reengineering des Produktentstehungsprozesses. Ein Ziel des Reengineerings, die Einsparung von kosten- und zeitintensiven Prototypentests, hat dazu geführt, daß der Prozeß heute durch eine virtuelle Produktentwicklung unter Aufbau und Einsatz von Digital Mock-up's (DMU) und virtuellen Prototypen (VP) dominiert wird. Diese virtuelle Produktentwicklung setzt Produkt-Datenmodelle und eine ganzheitliche Beherrschung der durchgängig rechnergestützten Bearbeitung voraus. Die Teilschritte des virtuellen Prozesses sind in Anlehnung an [BLNW98]:

- Fahrzeugdesign und -packaging,
- Konstruktion,
- Auslegung.

Die Umsetzung dieser Teilschritte erfordert eine entsprechende Arbeitsumgebung, die durch die folgenden Kriterien gekennzeichnet ist:

- Realitätsnahe Visualisierung,
- Online-Kooperation,
- effiziente Informations- und Kommunikationssysteme,
- umfassendes Produktdatenmanagementsystem.

Ein Bereich, in dem aufgrund der großen Komplexität und dem damit verbundenen Entwicklungsaufwand erst durch das Reengineering des Produktentstehungsprozesses deutliche Verbesserungen ermöglicht werden, ist die Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Nach [HGM96]

wird durch die konsequente Einbindung der Fahrzeugcrashberechnung in den Bereich 'Konstruktion/Auslegung' eine erhebliche Verringerung des mit der Entwicklung von Sicherheitsmaßnahmen verbundenen Kosten- und Zeitaufwands erreicht. Ein weiterer Vorteil der Crashberechnung gegenüber den Prototypentests ist die Möglichkeit, mehr Varianten testen zu können. Zusätzlich sind im Anschluß an einen simulierten Crashtest mehr Daten verfügbar, als bei den vergleichbaren Hardware-Tests, wodurch bei einer Auswertung das Verständnis der komplexen physikalischen Zusammenhänge bei einer Kollision erleichtert wird. Zusammenfassend ist somit durch die Einführung der Fahrzeugcrashberechnung eine effiziente und umfassende Optimierung der Passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen möglich.

1.2 Zur Passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen

1.2.1 Grundlagen und Testverfahren

Mit der steigenden Verkehrsdichte und Reisegeschwindigkeit von Kraftfahrzeugen hat die Zahl der Unfälle mit leicht und schwer verletzten Verkehrsteilnehmern in Europa kontinuierlich zugenommen. So sind Verkehrsunfälle in den Industrienationen heute eine der Hauptursachen für Todesfälle bei Personen jüngeren und mittleren Alters. Die Bedeutung der Passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen nimmt deshalb auch unter volkswirtschaftlicher Betrachtung zu [Kr98]. Maßnahmen, die der Unfallfolgenminderung dienen, haben eine große Bedeutung bei der Neuentwicklung von Kraftfahrzeugen und gehen aus Untersuchungen der Unfallforschung hervor [Sei97]. Dabei werden die Aufprallbereiche mit ihrer Häufigkeit (vgl. Bild 1.1) und die durchschnittliche Unfallschwere bei definierten Kollisionsszenarien berücksichtigt.

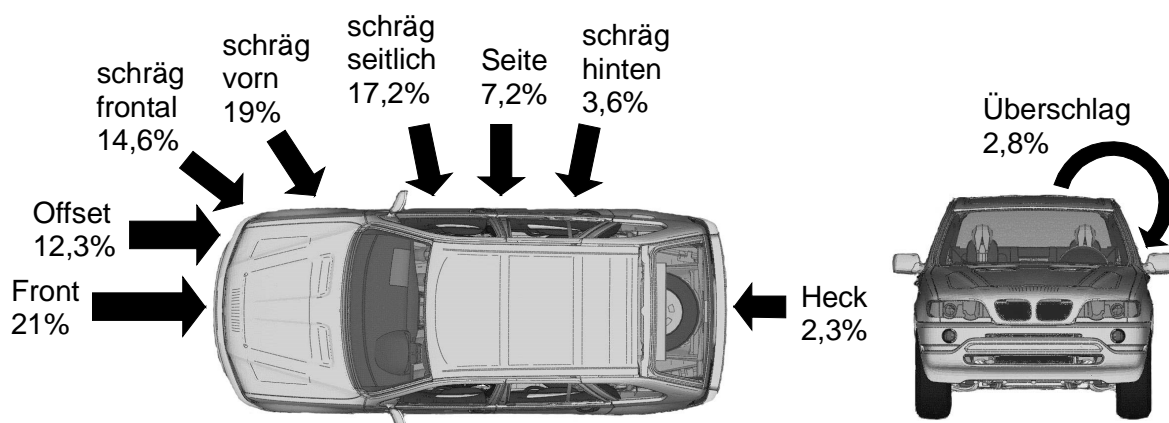


Bild 1.1: Aufprallbereiche und ihre Häufigkeit bei PKW/PKW-Kollisionen [San93]

Für die Gesamtbeurteilung eines Unfalls unter dem Gesichtspunkt des Insassenschutzes schlägt die Arbeitsgruppe 'Fahrzeugsicherheit' des Verbands der Automobilindustrie (VDA) zusammen-

fassend die in Bild 1.2 dargestellten Kriterien vor. Neben den Grundlagen aus der Unfallforschung gehen zusätzliche Kriterien, wie die Reproduzierbarkeit und die objektive Quantifizierbarkeit ein, die eine allgemeingültige Beurteilung ermöglichen sollen [VDA98]. Die Kompatibilität von Fahrzeugen verschiedener Klassen und somit der Partnerschutz, gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung [VDA98], [Sei97], [Kr98].

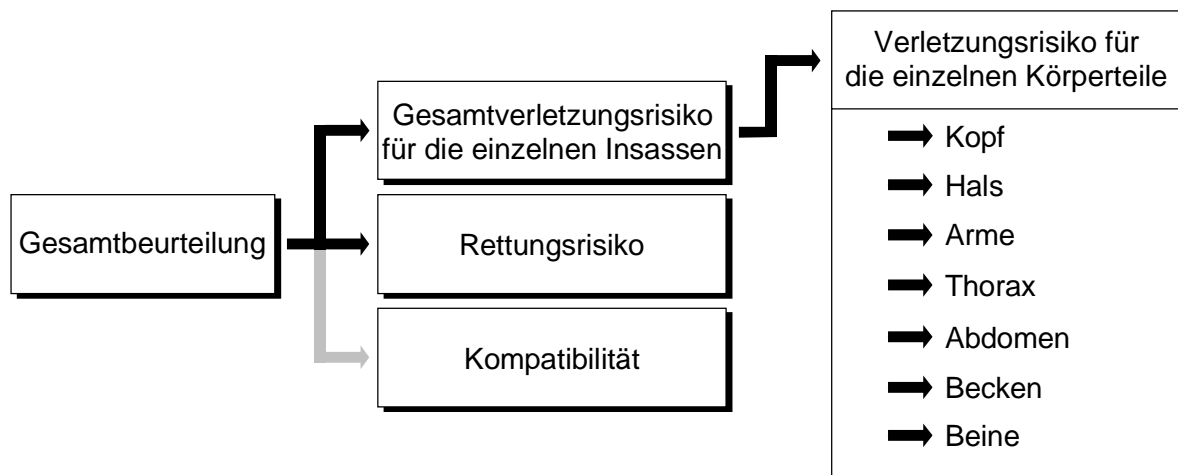


Bild 1.2: Gesamtbeurteilung eines Crashtests [VDA98]

Eine Differenzierung der eigentlichen Unfallschwere hinsichtlich des Insassenschutzes erfolgt beispielsweise durch die Einstufung nach der AIS (Abbreviated Injury Scale) [Wa95]. Die AIS beurteilt die Einzel- bzw. Gesamtverletzung anhand einer Skalierung, die den Grad der Lebensbedrohung, der aus einer Verletzung folgt, mit einem Katalog von Verletzungsbeschreibungen in Beziehung setzt. Die Einstufung reicht von Kategorie 0 = unverletzt über leichte, mittlere und schwere Verletzungen bis zu Kategorie 6 = schwere, nicht überlebende Verletzungen. Die Verletzungsschwere wird auf der Basis von biomechanischen Grenzwerten beurteilt. Diese Grenzwerte sind von biologischen Faktoren, wie Alter, Körpergröße und den körperlichen Konditionen eines Menschen abhängig und müssen auf der Basis einer sehr beschränkten Anzahl von Freiwilligen- und Leichenversuchen festgestellt werden. Die Einteilung von Belastungsgrenzen in eine erträgliche und eine nicht erträgliche Verletzung ist im wesentlichen von der Betrachtungsweise der Unfallschwere abhängig, so daß sich die Definition von biomechanischen Kriterien ausgesprochen schwierig gestaltet. Aus den Belastungsgrenzen werden Schutzkriterien für die Fahrzeuginsassen abgeleitet und auf meßtechnische und rechnerische Testverfahren übertragen. Eine Übersicht verschiedener Kriterien gibt [Sei92].

Die ersten Grundlagen zu einer Verbesserung der Passiven Sicherheit wurden am Anfang der 50er Jahre mit einem Patent über die sichere Insassenzelle geschaffen [San93], [Sei97]. Eine weltweite Einführung von Sicherheitsstandards begann mit den Experimental Safety Vehicle

(ESV) Konferenzen Mitte der 60er Jahre. Zunehmende gesetzliche Anforderungen und das gestiegene Kundeninteresse an der Fahrzeugsicherheit haben bis heute zu einer Vielzahl von teilweise sehr unterschiedlichen Testverfahren zur Beurteilung der Passiven Sicherheit geführt. Diese Testverfahren können in vier Gruppen unterteilt werden:

- gesetzlich geforderte Verfahren,
- interne Verfahren der Hersteller,
- Testverfahren zum Verbraucherschutz,
- Tests der Automobilversicherer.

Die gesetzlichen Anforderungen, die ein Fahrzeug hinsichtlich der Insassensicherheit vor der Zulassung zu erfüllen hat, sind sehr umfangreich und weichen länderspezifisch voneinander ab. Die wesentlichen Regelwerke sind:

- StVZO = Straßenverkehrs-Zulassungsordnung (D),
- ECE = Regelungen der Economic Commission for Europe (EU),
- EG = Direktiven der Europäische Gemeinschaft (EU),
- FMVSS = Federal Motor Vehicle Safety Standards (USA).

Durch die Legislative ist der Insassenschutz für verschiedene Unfallszenarien, wie die Frontalkollision (FMVSS 208, ECE R94), den Seitencrash (FMVSS 214, ECE R95) und den Heckaufprall (FMVSS 224/301) geregelt. Ergänzend hierzu gibt es verschiedene Regelungen zur Beurteilung von Rückhaltesystemen und der Verletzungsschwere bei dem Aufprall des Insassen auf Innenraumkomponenten. Ein Beispiel hierfür ist eine Ergänzung der FMVSS 201, die eine Verringerung der Verletzungsschwere bei einem Aufschlag der Insassen (Kopfaufprall) auf Fahrzeuginnenraumkomponenten oberhalb der Brüstung zum Ziel hat.

Die heutigen Testverfahren zur Beurteilung des Insassenschutzes sind nicht unumstritten. Die Vielzahl der Testbedingungen, der Meßeinrichtungen und der erfaßten Meßgrößen kann erhebliche Unterschiede bei der Entwicklung von Maßnahmen zur Verbesserung der Passiven Sicherheit zur Folge haben [Sei97]. Weiterhin wird die Tendenz zu einer kontinuierlichen Vergrößerung der Fahrzeugrelativgeschwindigkeiten bei Crashtests kritisiert, die zu einer ungünstigen Versteifung der Karosserie führt und somit kontraproduktiv zu der Forderung nach einer Kompatibilität von Fahrzeugen ist [VDA98]. Ein zukünftiges Ziel zur Verbesserung der Testverfahren wird deshalb auch die Überarbeitung und weltweite Vereinheitlichung der eingesetzten Tests sein [Sei97], [NHTSA97].

Die über die gesetzlichen Testverfahren hinausgehenden, internen Verfahren der Hersteller sind üblicherweise um Lastfälle ergänzt oder verlangen die Einhaltung strengerer Kriterien. Bei den Testverfahren zum Verbraucherschutz handelt es sich um die NCAP (New Cars Assessment Program)-Versuche der Behörden in den USA, Japan, Australien und Europa und um zusätzliche Verfahren externer Institute wie dem ADAC oder „Auto-Motor und Sport“. Ergänzend zu diesen Testverfahren führen die Versicherer Tests zur Untersuchung des Fahrzeugschutzes durch. Ziel dieser Tests ist eine Einstufung der Fahrzeuge in Schadensklassen [An97].

1.2.2 Maßnahmen zur Verbesserung der Passiven Sicherheit

Die Maßnahmen zur Verbesserung der Passiven Sicherheit umfassen Schutzmaßnahmen, die dazu beitragen, Verletzungen zu vermeiden oder die Unfallfolgen für alle in Unfälle verwickelten Personen zu vermindern. Dies umfaßt neben dem Schutz von Fahrzeuginsassen, dem sogenannten Eigenschutz, auch äußere Verkehrsteilnehmer, wie Fußgänger und Zweiradfahrer. Zusätzlich werden nach [Kr98] auch Maßnahmen zur Verbesserung des Fahrzeugschutzes der Passiven Sicherheit zugeordnet. Üblicherweise werden Schutzmaßnahmen für den Selbstschutz und für den Partnerschutz unterschieden (Bild 1.3).

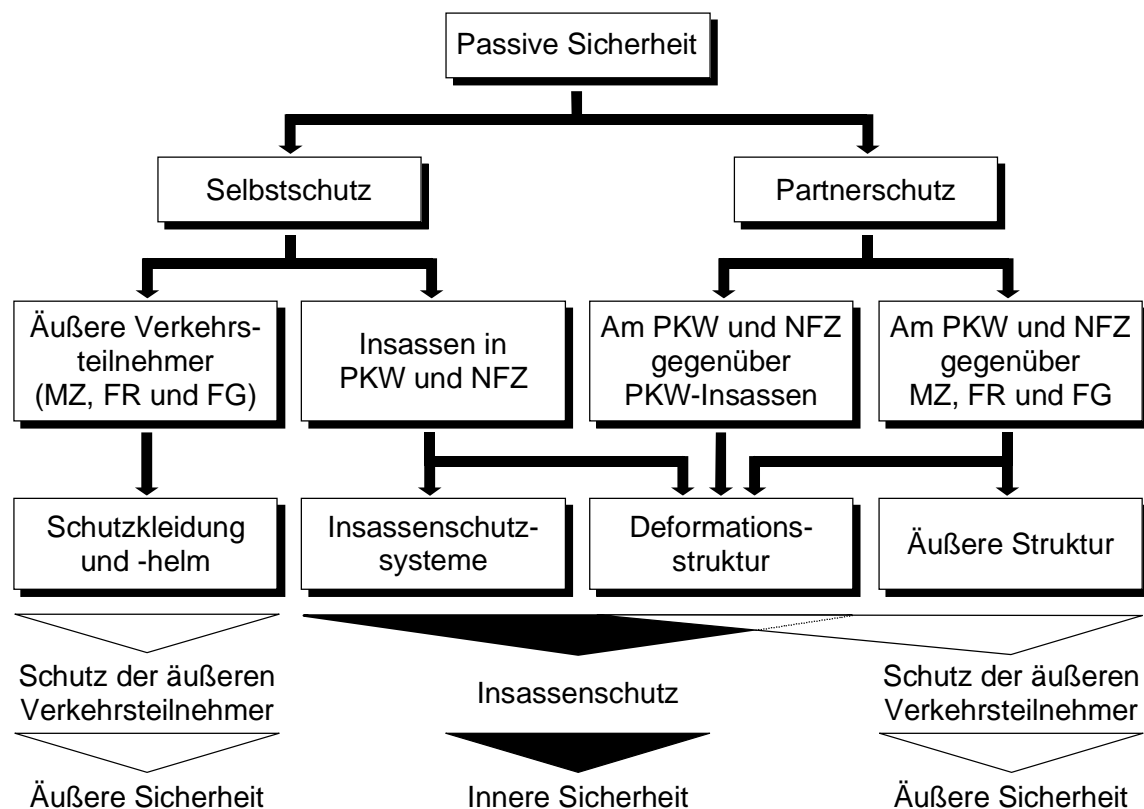


Bild 1.3: Einteilung von Schutzmaßnahmen der Passiven Sicherheit [Kr98]

Entsprechend ihrer Wirkrichtung sind die Maßnahmen in Maßnahmen der inneren und der äußeren Sicherheit unterteilt. Maßnahmen der inneren Sicherheit sind Insassenschutzsysteme wie das Gurtsystem, der Airbag und die Polsterung von Innenraumkomponenten. Unter Maßnahmen der äußeren Sicherheit sind die Deformationsstruktur und die Gestaltung der Fahrzeugaußenform zusammengefaßt.

Bei allen Maßnahmen steht der Abbau der kinetischen Energie der an einer Kollision beteiligten PKW's im Mittelpunkt. Dies geschieht hauptsächlich durch eine Umwandlung der kinetischen Energie in Deformationsenergie. Unter dem Gesichtspunkt des Eigenschutzes werden zwei relevante Relativsysteme unterschieden, die Fahrzeugstruktur und die Insassen. Die Aufgabe der Fahrzeugstruktur bei einer Kollision ist die Bereitstellung von Deformationsraum, der sog. Knautschzone, bei gleichzeitig hoher Steifigkeit im Bereich der Fahrgastzelle. Der Deformationsraum wird benötigt, um bei einer gegebenen Kraft ausreichend kinetische Energie zu absorbieren. Dabei müssen der Frontal-, der Seiten- und der Heckcrash unterschieden werden. Abgesehen von Kleinstfahrzeugen wie dem Smart, die eine Kombination von Knautschzone und sogenanntem Stoßgürtel aufweisen, besitzen heutige PKW's meist eine ausreichend dimensionierte Vorderwagenstruktur als Deformationsraum für den Frontalcrash. Die Verzögerungen der Fahrgastzelle sind durch das Deformationsverhalten des Fahrzeugs im Bereich der Knautschzone bestimmt, das somit eine insassenverträgliche Verzögerungscharakteristik aufweisen muß. Dieser Deformationsraum steht bei einem Seitencrash nicht zur Verfügung, wodurch eine ausreichend hohe Steifigkeit der Karosserie im Bereich der Fahrgastzelle den erforderlichen Überlebensraum für die Insassen sicherstellen muß. Eine ausführliche Beschreibung der Charakteristiken von verschiedenen Fahrzeugtypen erfolgt bei [Kr98] und [Sei92].

Ohne zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen werden die Insassen und die Fahrgastzelle zeitlich versetzt verzögert. Bei einem Aufprall auf Innenraumkomponenten und der Windschutzscheibe haben die Fahrzeugzelle und die Insassen deshalb eine vergleichsweise hohe Relativgeschwindigkeit. Aufgrund des begrenzten Deformationsraums im Fahrzeuginnenraum führt dies zu hohen Verzögerungen der PKW-Insassen. Ziel von geeigneten Systemen zum Insassenschutz ist aus diesem Grund eine Verzögerung der Insassen nach dem Prinzip des Geschwindigkeitsangleichs [Kr98]. Die Systeme beruhen auf einer Rückhaltung der Insassen und können wie folgt unterteilt werden:

- Gurtsysteme und -komponenten,
- Airbagsysteme und -komponenten und
- deformierbare Innenraumverkleidungen.

Bei der Entwicklung von deformierbaren Innenraumkomponenten werden zunehmend neue Materialien oder Bauweisen mit einem hohen Energieabsorptionsvermögen eingesetzt. Ähnlich der Knautschzone einer PKW-Karosserie wird die Energieabsorption durch eine elastisch-plastische Deformation und durch gezielt ausgelegtes lokales Versagen der verwendeten Materialien und Bauweisen erreicht. Aufgrund des geringen Bauraums innerhalb des Fahrzeuginnenraums sind die Anforderungen an das Absorptionsvermögen der Materialien und Bauweisen sehr hoch.

Unter Berücksichtigung von Randbedingungen, wie der Kompatibilität von Fahrzeugen und der verschiedenen Kollisionsarten, tragen aufeinander abgestimmte Maßnahmen zum Schutz der Fahrzeuginsassen heute erheblich zur Verringerung des Verletzungsrisikos bei.

1.3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Hinsichtlich der Auslegung der Insassensicherheit kann der Entwicklungsprozeß in drei Phasen eingeteilt werden [PHSGB98]. In der ersten Phase werden das Fahrzeugdesign und das -package in Verbindung mit dem Sicherheitskonzept festgelegt. Die zweite Phase beinhaltet die Konstruktion und die Auslegung der einzelnen Sicherheitsbauteile. Die Optimierung der Bauteile wird unter Einhaltung von geforderten Auslegungskriterien innerhalb eines iterativen Prozesses durch Bauteil- und Komponententests und eine kontinuierliche Überarbeitung der Konstruktionen erreicht. Zum Abschluß des Entwicklungsprozesses wird in der dritten Phase die Funktionalität der Sicherheitsbauteile mit Hilfe von Gesamtfahrzeugtests verifiziert.

Die konventionelle Durchführung von Komponententests zur Fahrzeugentwicklung geschieht durch experimentelle Versuche mit Hardware-Prototypen. Die Planung, Vorbereitung, Durchführung und Auswertung solcher Hardware-Tests ist mit einem erheblichen Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Insbesondere in der wichtigen frühen Entwicklungsphase, in der über das Konzept der einzelnen Sicherheitsbauteile entschieden wird, stehen keine Versuchsträger zur Verfügung oder sind mit einem zu großen Kostenaufwand verbunden. Die Anzahl möglicher Iterationen, die einen wesentlichen Einfluß auf die spätere Qualität des Produkts hat, ist bei der konventionellen Vorgehensweise deshalb begrenzt.

Im Zuge des erwähnten Reengineering des Produktentstehungsprozesses werden die Hardware-Tests zunehmend durch die Software-Simulation ersetzt [PHSGB98]. Die Einführung und Etablierung von Berechnungsmethoden wie der Finite Elemente Methode (FEM) war ein wichtiger Schritt in Richtung der geforderten, virtuellen Produktentwicklung. Voraussetzung für den produktiven Einsatz einer solchen Berechnungsmethode ist eine hohe Qualität und Effizienz des Verfahrens und der Modelle. Erst eine erhebliche Verbesserung der Hardware-Plattformen, der mechanischen Grundlagen und der Numerik von Berechnungsprogrammen in Verbindung mit einem effizienten Ablauf des Modellaufbaus führte zu dem produktiven Einsatz der

Methoden für komplexe Probleme, so daß die Crashauslegung der Fahrzeugkarosserie durch den Einsatz der Software-Simulation heute Stand der Technik ist [HM96].

Langfristig muß die Sicherheitsauslegung mit dem Ziel einer rechnergestützten Entwicklung des Gesamtfahrzeugs ganzheitlich innerhalb eines sogenannten 'virtuellen Crashlabors' realisiert werden. Nach [HGM98] ist hierzu eine Erweiterung der momentanen CAE-Methoden entsprechend den in Bild 1.4 dargestellten Bereichen erforderlich. Der dabei notwendige Detaillierungsgrad von Crashmodellen hinsichtlich methodisch bedingter Parameter und der Qualität von mechanischen Grundlagen muß kontinuierlich zunehmen. Berücksichtigt man weiterhin, daß mit einer rechnerischen Auslegung von sicherheitsrelevanten Bauteilen die Funktion dieser Bauteile bis hin zu einer Produkthaftung gewährleistet werden muß, so ist eine Zertifizierung der eingesetzten Berechnungsprogramme basierend auf einer entsprechenden Qualitätssicherung langfristig unvermeidbar. Nur so werden nach [SSPM99] mit Hilfe der Crashberechnung zukünftig ganzheitliche, prognosefähige Aussagen möglich und wesentliche Konzeptentscheidungen auf der Basis von Berechnungsergebnissen verantwortbar.

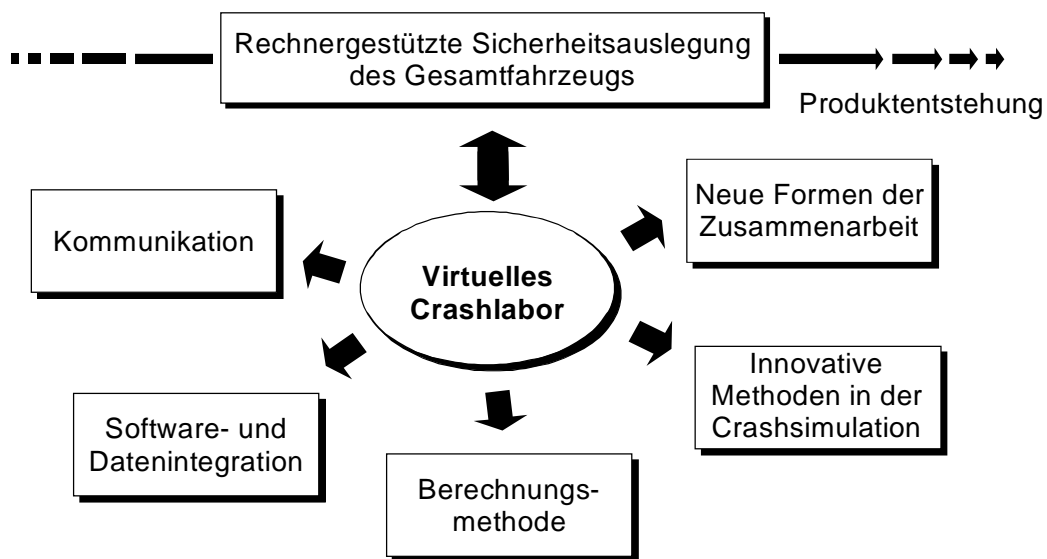


Bild 1.4: Weiterentwicklung der CAE-Methoden für die Crashauslegung

Der Detaillierungsgrad von Crashmodellen ist durch eine konsequente Weiterentwicklung der Methode erreichbar. In Anlehnung an [SSPM99] sind hierzu folgende Maßnahmen erforderlich:

- Verbesserung der Materialmodelle,
- Modellierung von Bauteilverbindungen,
- Modellierung des lokalen Versagens von Bauteilen und Verbindungen,
- Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen.

Als Beitrag zur Weiterentwicklung der Berechnungsmethode hat die vorliegende Arbeit die Verbesserung der Qualität von numerischen Materialmodellen bei einer zunehmenden Effizienz der Modellentwicklung zum Ziel. Die Bedeutung der Qualität von Materialmodellen für die Fahrzeugcrashberechnung wird am Beispiel der aufwendigen Abstimmung von Rückhaltesystemen deutlich. Die Abstimmung erfordert die Simulation des Energieabsorptionsverhaltens von Innenraumkomponenten, basierend auf einer prognosefähigen Modellierung der eingesetzten Materialien. Im PKW-Innenraum sind dies beispielsweise:

- Polymere Hartschaumstoffe mit hohem Energieabsorptionsvermögen,
- Teppich- und Sitzschaumstoffe,
- Thermoplaste,
- faserverstärkte Kunststoffe für Innenraumverkleidungen.

Eine umfangreiche Charakterisierung und eine mathematische Beschreibung des Materialverhaltens durch eine Materialgleichung unter Berücksichtigung von hohen Verformungsgraden bis hin zu einem Versagen, bzw. einem Nachversagensverhalten, ist bisher im wesentlichen für Stahl und eingeschränkt für einige Aluminiumlegierungen umgesetzt. Die im Automobilbau eingesetzten, nichtmetallischen Werkstoffe haben ein stark variierendes, von den Eigenschaften von Stahl oder Aluminium abweichendes mechanisches Verhalten. In den meisten Fällen sind keine ausreichenden Kenntnisse über das Materialverhalten der jeweiligen Materialien vorhanden und bei bekanntem Verhalten kann dieses mit den verfügbaren Materialmodellen nicht ausreichend genau simuliert werden. Die qualitativ abgesicherte Modellierung von Materialien ist mit einem großen Kosten- und Zeitaufwand verbunden, so daß die Integration von neuen Werkstoffen in die Fahrzeugcrashberechnung heute eine der größten Herausforderungen an die Weiterentwicklung der Berechnungsmethode ist.

Bis zu der vollständigen Integration, d.h. dem produktiven Einsatz eines solchen Materialmodells, ist die Durchführung einer Vielzahl von Entwicklungsschritten erforderlich. Die einzelnen Schritte sind bei den verschiedenen Materialien durchaus vergleichbar, was in der heutigen Praxis nicht ausgenutzt wird. Bei der Integration jedes neuen Materials wird kurzfristig auf einen Bedarf der Fahrzeugcrashberechnung reagiert, ohne die bisherigen Informationen und Erfahrungen aus der Modellierung von bereits integrierten Materialien zu nutzen. Wesentliche Probleme sind eine uneinheitliche Dokumentation der Vorgehensweise und der Ergebnisse sowie das Fehlen eines gezielten Aufbaus von Knowhow. Die heutige Praxis ist somit nicht effizient und es ist insbesondere bei Materialien mit einem komplexen Aufbau unmöglich, eine ausreichende Qualität des Materialmodells zu erreichen.

Als BMW gegen Ende des Jahres 1996 Bedarf konkretisierte, polymere Hartschaumstoffe mit großem Energieabsorptionsvermögen in die Fahrzeugcrashberechnung aufzunehmen, bot sich diese Werkstoffgruppe als Demonstrator für den Aufbau eines Prozesses zur Materialmodellierung an. Die Werkstoffe werden in verschiedenen Bereichen innerhalb des Automobils eingesetzt, um die Insassensicherheit und die Fahrzeugsicherheit bei einer Kollision zu erhöhen. Zu dem damaligen Zeitpunkt waren über diese Gruppe von Werkstoffen nur geringe Kenntnisse zu dem crashrelevanten Materialverhalten verfügbar. Aus diesem Grund wurde die vorliegende Arbeit in enger Kooperation zwischen BMW und der IVW GmbH, Kaiserslautern, initiiert, die im Bereich der Werkstoffcharakterisierung von polymeren und metallischen Schaumstoffen bereits ein umfangreiches Knowhow aufgebaut hatte. Von Beginn an wurden Werkstofflieferanten und Softwarehersteller einbezogen, um ein zielorientiertes und pragmatisches Vorgehen zu ermöglichen.

Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Integrationsprozeß soll eine allgemeingültige und reproduzierbare Integration von neuen Werkstoffen in die Fahrzeugcrashberechnung ermöglichen. Ziel des Prozesses ist eine Verbesserung der Qualität der für den produktiven Einsatz freigegebenen Materialmodelle und die Festlegung einer Vorgehensweise zur Gewährleistung dieser Qualität. Zusätzlich soll durch den Prozeß eine Effizienzsteigerung bei der Entwicklung von numerischen Materialmodellen und bei deren Implementierung in produktiv genutzte Simulationsprogramme erreicht werden. Der Integrationsprozeß basiert auf der oben erwähnten Tatsache, daß die mit der Entwicklung und der Implementierung eines Materialmodells verbundenen Abläufe werkstoffunabhängig und somit auf jedes neue Material übertragbar sind [SPSHM98]. Im Anschluß an dieses Kapitel erfolgt eine Vorstellung des Prozesses und eine ausführliche Diskussion an dem Beispiel der beschriebenen Gruppe von polymeren Hartschaumstoffen.

2 Ein Prozeß zur methodischen Integration von neuen Werkstoffen in die Fahrzeugcrashberechnung

2.1 Beschreibung des Integrationsprozesses

Im Vorfeld der Beschreibung des Integrationsprozesses werden kurz die üblichen Abläufe bei der Entwicklung und Implementierung eines Materialmodells betrachtet. Zusammenfassend beinhalten diese Abläufe bis hin zu dem produktiven Einsatz eines Materialmodells die folgenden Entwicklungsschritte:

- Materialcharakterisierung,
- Formulierung und Implementierung der Materialgleichungen.

Im Rahmen der Materialcharakterisierung wird das Materialverhalten mit Hilfe von experimentellen oder numerischen Untersuchungen charakterisiert. Auf der Basis dieser Charakterisierung erfolgt eine Modellierung des Verhaltens mit Hilfe von geeigneten Materialgleichungen. Das hierdurch definierte Materialmodell wird in das eingesetzte Finite Elemente Programm implementiert. In [SPSHM98] wurde dieser allgemeine Ablauf noch um eine Validierung des endgültigen Materialmodells ergänzt. Die Abläufe sind meist nicht oder nur in Teilbereichen reproduzierbar, was eine Beurteilung der Qualität des Modells nahezu unmöglich macht und langfristig aufgrund einer Verschwendung von Erfahrungen und Knowhow uneffizient ist. Darüber hinaus ist eine Berücksichtigung von Erfahrungen aus dem produktiven Einsatz, die für eine kontinuierliche Verbesserung des Modells, bzw. eine Modellpflege auf dem jeweils aktuellen Stand der Technik erforderlich ist, nicht vorgesehen. Eine Qualitätssicherung ist somit nicht zu realisieren. Aus diesem Grund wird basierend auf den allgemeinen Abläufen ein Integrationsprozeß mit folgender Zielsetzung festgelegt,

- eine Qualitätssteigerung und –sicherung der eingesetzten Materialmodelle zu gewährleisten,
- einen Beitrag zur Qualitätssteigerung und –sicherung der Berechnung der Passiven Sicherheit insgesamt und somit einen Beitrag zu zukünftigen Produkthaftungsfragen zu leisten,
- eine Effizienzsteigerung bei der Entwicklung und Implementierung von Materialmodellen zu erreichen.

Der Integrationsprozeß muß zur Umsetzung dieser Ziele verschiedene Grundanforderungen erfüllen. Wesentliche Grundanforderung des Prozesses hinsichtlich der Qualitätssicherung ist

eine Standardisierung der Prozeßabläufe. Durch eine ausführliche Dokumentation der einzelnen Phasen und Schritte des Prozesses nach dem Stand der Technik wird eine Reproduzierbarkeit und Transparenz der Abläufe gewährleistet. Darüber hinaus müssen alle Arbeitsschritte durch eine Validierung abgesichert werden. Die Darstellung der erreichten Qualität des Materialmodells und damit verbunden die Festlegung des Einsatzbereichs, in dem das Materialmodell mit der so dokumentierten Qualität eingesetzt werden kann, muß auf der Basis von geeigneten Beispielen erfolgen. Hierbei sind Erfahrungen aus dem produktiven Einsatz des Materialmodells kontinuierlich zur Steigerung bzw. Sicherung der Modellqualität zu berücksichtigen.

Die bisher erläuterten Grundanforderungen, die aus der Erfahrung bei der Modellierung von verschiedenen Werkstoffen folgen, tragen gleichermaßen zu einer Effizienzsteigerung bei der Materialmodellentwicklung bei. Ausgehend von einer in der frühen Phase des Integrationsprozesses wohl definierten Anforderung an den abzudeckenden Einsatzbereich des Materialmodells ist darüber hinaus für eine effiziente Entwicklung die Vorgabe einer anwendungsorientierten und pragmatischen Zielsetzung für das Modell wesentlich. Weiterhin müssen Erfahrungen bei der Modellierung vergleichbarer Werkstoffe berücksichtigt werden. Hierzu ist der Aufbau einer Erfahrungsdatenbank, basierend auf der erwähnten Dokumentation der einzelnen Arbeitsschritte, erforderlich. Dieser Aufbau von Knowhow muß Erfahrungen mit dem Prozeß selbst, Erfahrungen aus der Materialcharakterisierung und aus der Materialmodellierung inklusive der Implementierung des jeweiligen Modells umfassen.

Die mit der Einführung des Integrationsprozesses verbundene Standardisierung von Abläufen führt zu einer weiteren, wesentlichen Anforderung. Aufgrund der breiten Streuung von Knowhow sind neben der Automobilindustrie grundsätzlich verschiedene Entwicklungspartner, wie Rohstofflieferanten, Softwareentwickler und Prüfinstitute beteiligt. Die klare Festlegung von Abläufen und deren Übertragbarkeit auf beliebige Werkstoffe ermöglicht von Beginn an eine übersichtliche Definition von Schnittstellen zwischen den einzelnen Partnern. Dies umfaßt die Festlegung der einzelnen Arbeitsschwerpunkte und die zur Umsetzung erforderliche Verfügbarkeit von Daten zu abgestimmten Zeitpunkten.

Der Aufbau des Integrationsprozesses wurde in Anlehnung an das Quality Improvement Paradigm (QIP) nach [FM97] und [BCR94] entwickelt und ist in Bild 2.1 dargestellt. Im Vorfeld des eigentlichen Prozeßbeginns wird der Bedarf für den Einsatz eines neuen Materials in der Fahrzeugcrashberechnung festgestellt. Dies erfolgt in der Regel bei der Bearbeitung von Vorentwicklungsthemen des Automobilbaus.

Der Integrationsprozeß ist in vier Phasen unterteilt. In der ersten Phase erfolgt die **Planung** der Prozeßabläufe. Eine ausführliche Planung der folgenden Prozeßphasen kann zu einer erheblichen Reduktion der Entwicklungszeit und -kosten führen und hat deshalb einen hohen Stellenwert innerhalb des Gesamtprozesses. Die zweite Phase beinhaltet die eigentliche **Durch-**

führung der Materialmodellierung, die wie bereits erwähnt die Materialcharakterisierung, die Formulierung und Implementierung der Materialgleichungen und die Validierung des Materialmodells umfaßt. In der **Bewertungs**phase des Integrationsprozesses erfolgt eine umfassende Analyse und Absicherung der Prozeßabläufe und die Beurteilung der Qualität des entwickelten Materialmodells. Die Abläufe des Prozesses sind iterativ, da aufgrund von unzureichenden Prozeßablaufplänen oder fehlerhaften Annahmen bis zu der Zulassung eines Materialmodells mehrere Entwicklungsschleifen erforderlich sind.

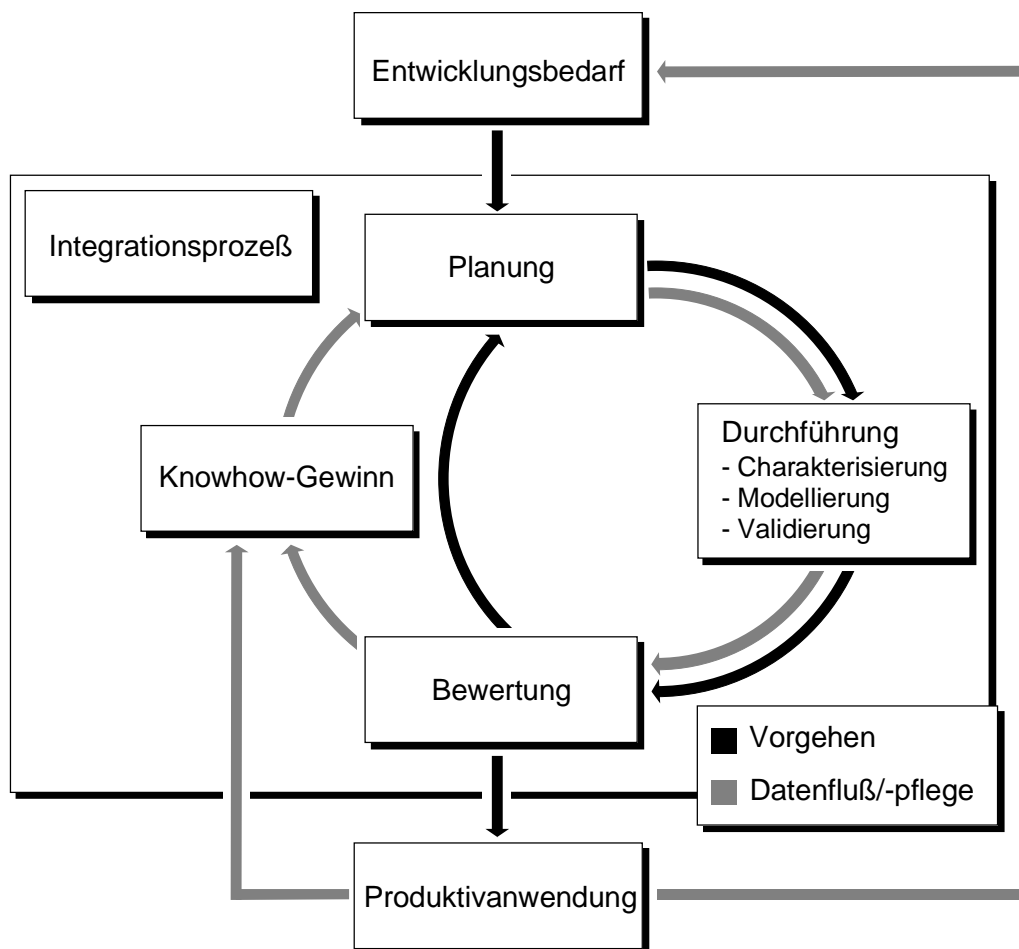


Bild 2.1: Aufbau des Integrationsprozesses

Ein wesentlicher Teilschritt des Integrationsprozesses ist der **Knowhow-Gewinn**. Dieser beinhaltet neben der Sicherung von Erfahrungen mit dem Prozeß die Sicherung aller experimentellen und numerischen Daten. Zusätzlich wird Knowhow aus dem produktiven Einsatz des Materialmodells in der Fahrzeugcrashberechnung aufgebaut und gesichert, wodurch eine kontinuierliche Qualitätssteigerung und -sicherung des Modells erreicht wird.

2.2 Planung

Die Abarbeitung der Planungsphase des Integrationsprozesses erfolgt in vier Teilschritten. Innerhalb dieser Teilschritte werden materialspezifische Randbedingungen erfaßt, festgelegt und in die Planung der Folgephasen umgesetzt. Der Aufbau der Planungsphase ist in Bild 2.2 dargestellt.

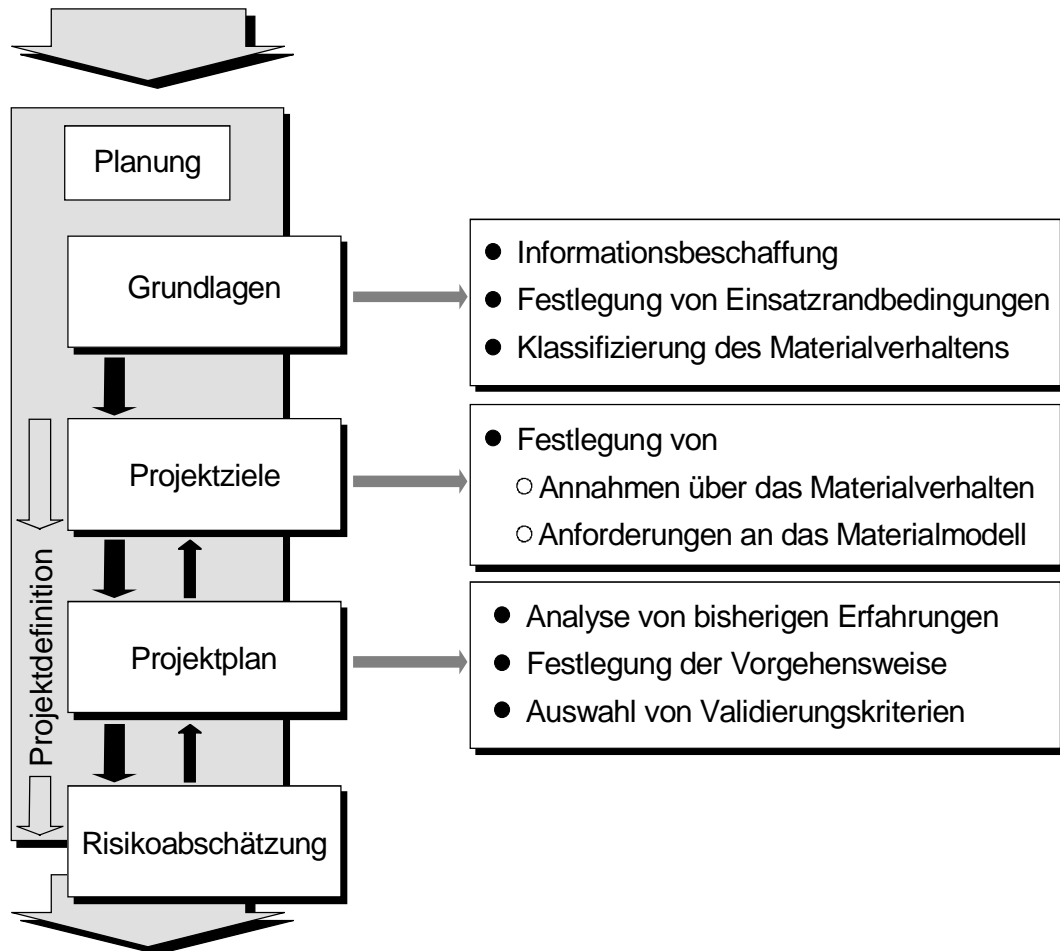


Bild 2.2: Planung

Innerhalb des ersten Teilschritts werden die erforderlichen **Grundlagen** erarbeitet. Eine ausführliche Aufbereitung dieser Grundlagen ist für den weiteren Ablauf des Integrationsprozesses von großer Bedeutung, um in späteren Entwicklungsphasen aufwendige Korrekturen der Vorgehensweise zu vermeiden. Zu Beginn der Erarbeitung von Grundlagen erfolgt eine Informationsbeschaffung und -auswertung. Im Mittelpunkt dieser Informationsbeschaffung

müssen von Beginn an relevante kontinuumsmechanische Kenntnisse stehen, die eine Modellierung des Materials unterstützen. Dies beinhaltet Informationen zu folgenden Bereichen:

- Materialverhalten,
- Einsatzbereich des Materials,
- Erfahrungen mit der Modellierung ähnlicher Materialien,
- Prüfverfahren zur Materialcharakterisierung.

Für die Beschaffung der Informationen stehen verschiedene Quellen zur Verfügung. Neben einer Literaturrecherche und dem Zurückgreifen auf die eigenen Erfahrungsdatenbanken ist es in dieser frühen Phase der Modellerstellung erforderlich, Erfahrungen des Werkstofflieferanten und des Softwareentwicklers zu nutzen. Zusätzlich bietet sich ein Austausch mit Instituten an, die Erfahrungen mit der Untersuchung und der Modellierung gleicher oder ähnlicher Materialien haben. Anschließend werden die Einsatzrandbedingungen für das Material festgelegt. Darunter wird eine Eingrenzung des möglichen Belastungsprofils verstanden, durch die der Modellierungsaufwand verringert wird. Die Festlegung der Einsatzrandbedingungen kann auf der Basis von bisherigen Erfahrungen oder durch die rechnerische Simulation von anwendungsnahen Lastfällen erfolgen. Unter der Berücksichtigung der gesammelten Daten über das Material und der festgelegten Einsatzrandbedingungen kann das Materialverhalten klassifiziert werden. Hierdurch wird bereits in einer frühen Phase des Modellierungsprozesses eine zielorientierte Planung der weiteren Vorgehensweise ermöglicht.

Im Anschluß erfolgt die eigentliche **Projektdefinition**. Sie beinhaltet die Festlegung der **Projektziele**, des **Projektplans** und eine **Risikoabschätzung**. Mit den **Projektzielen** werden auf der Basis der erarbeiteten Grundlagen notwendige Annahmen über das Materialverhalten und darauf aufbauend die Definition von Anforderungen an das Materialmodell festgelegt. Durch eine geeignete Wahl der Annahmen kann der weitere Aufwand erheblich reduziert werden. Dabei muß durch eine Gewährleistung der Validität der Annahmen sichergestellt sein, daß dies keinen negativen Einfluß auf die Modellqualität hat. In Anlehnung an [LM96] können folgende Richtlinien für die Definition der Annahmen festgelegt werden:

- Eine Annahme soll eine bestimmte Beziehung zwischen verschiedenen Materialeigenschaften ausdrücken,
- eine Annahme soll einfach und eindeutig formuliert sein,
- eine Annahme soll anhand der gesammelten Daten überprüfbar sein.

Die Definition von Anforderungen an das Materialmodell, die sich von den festgelegten Einsatzrandbedingungen und von den Annahmen über das Materialverhalten ableiten, legen bereits von Beginn an den groben Aufbau des Materialmodells fest.

Innerhalb des anschließenden Teilschritts der Projektdefinition wird der **Projektplan** erstellt. Ausgehend von der Analyse bisheriger Erfahrungen und unter Berücksichtigung der definierten Ziele und Annahmen wird die weitere Vorgehensweise festgelegt. Es erfolgt die Aufteilung der Aufgabenbereiche und die Festlegung des Zeitplans. Weiterhin werden zur Gewährleistung der Validität des Integrationsprozesses bereits in der Planungsphase die erforderlichen Validierungskriterien definiert. Zeigt sich bereits bei der Festlegung des Projektplans, daß die definierten Ziele nicht erreicht und die Annahmen nicht validiert werden können, so muß eine Überarbeitung der Projektziele bzw. der Annahmen erfolgen.

Zum Abschluß der Projektdefinition und somit der Planungsphase erfolgt eine **Risikoabschätzung**. Die Risikoabschätzung beinhaltet eine Beurteilung der weiteren Durchführbarkeit des Integrationsprozesses. Hierzu müssen der Zeit- und der Mittelbedarf für die Entwicklung des Materialmodells bestimmt werden. Der Zeit- und Mittelbedarf werden jeweils mit *gering* oder *hoch* bewertet. Als weiteres Kriterium wird die Bedeutung jedes Teilschritts für den Gesamterfolg des Prozesses berücksichtigt. Die Bewertung der Bedeutung erfolgt entsprechend dem erläuterten Schema für den Zeit- und Mittelbedarf. Somit wird neben dem mit der Durchführung verbundenen Risiko eine Wichtung jedes Teilschritts berücksichtigt. Wird das Risiko für die Entwicklung des Materialmodells als zu hoch eingestuft, ist eine Überarbeitung der Projektziele und des Projektplans erforderlich. Führt die Risikoabschätzung zu einer positiven Einschätzung der weiteren Vorgehensweise, kann mit der Durchführung begonnen werden.

2.3 Durchführung

Die Durchführung gliedert sich in die Teilschritte **Materialcharakterisierung**, **Modellierung** und **Validierung**. Bei der Durchführung handelt es sich um einen iterativen Teilprozeß des gesamten Integrationsprozesses. Insbesondere bei der Integration von neuen Werkstoffen, die sich erheblich von bisher modellierten Werkstoffen unterscheiden, ist nicht zu erwarten, daß ohne Wiederholung von Teilschritten eine vollständige Validierung des zu entwickelnden Materialmodells möglich ist. Eine Übersicht der einzelnen Teilschritte ist in Bild 2.3 dargestellt.

Ziel der **Materialcharakterisierung** ist eine phänomenologische Beschreibung des Materialverhaltens. Diese Beschreibung erfolgt üblicherweise auf der Basis von experimentellen Untersuchungen [MSD97]. Insbesondere bei Materialien, wie Verbundwerkstoffen oder Schaumstoffen, deren Verhalten aufgrund ihres mikroskopischen Aufbaus nur mit großem

experimentellen Aufwand durch kontinuumsmechanische Ersatzmodelle beschrieben werden kann, wird heutzutage, ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen, das mechanische Verhalten des Materials durch die numerische Simulation der Mikrostruktur bestimmt [AB93b], [Bu91]. Hierbei wird der mikroskopische Aufbau des Werkstoffes durch die Modellierung eines entsprechenden Einheitsvolumens modelliert und das Verhalten dieses Einheitsvolumens unter verschiedenen Belastungen betrachtet. Hieraus sind Rückschlüsse auf das reale Werkstoffverhalten möglich, die eine kontinuumsmechanische Beschreibung des Verhaltens erleichtern können. Dabei ist zu beachten, daß die materialspezifische Entwicklung eines solchen mikro-mechanischen Ersatzmodells mit einem hohen Kosten- und Zeitaufwand verbunden ist.

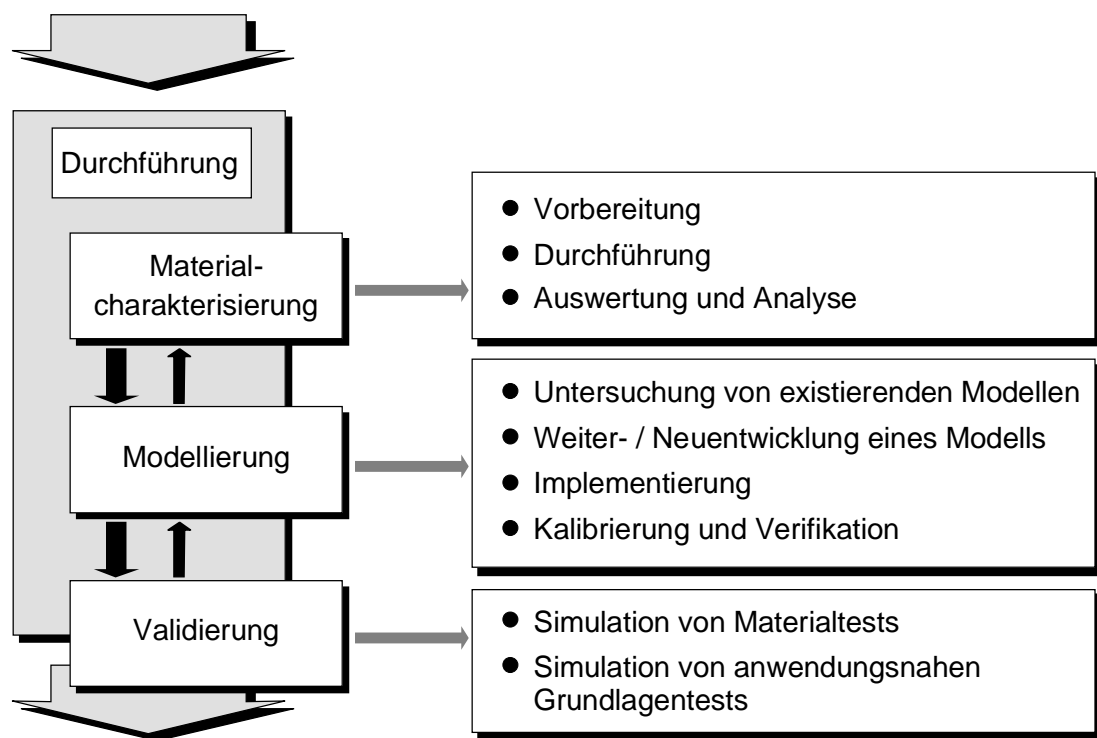


Bild 2.3: Durchführung

Unabhängig von dem betrachteten Material beinhaltet die Materialcharakterisierung die in Bild 2.3 dargestellten Einzelschritte. In Anlehnung an den Aufbau des gesamten Integrationsprozesses werden die Vorbereitung, die Durchführung und die Auswertung, bzw. Analyse unterschieden. Im Vorfeld einer experimentellen Durchführung der Materialcharakterisierung erfolgen im Rahmen der Vorbereitung:

- die Probenbeschaffung und –herstellung,
- die Vorbereitung der Versuchsdurchführung und –auswertung.

Die Vorbereitung der Versuchsdurchführung umfaßt eine Einplanung der erforderlichen Prüf- und Meßtechnik sowie eine Kalibrierung der verwendeten Technik. Darüber hinaus werden im Rahmen der Vorbereitung die Berechnung der Kennwerte für eine Auswertung der Materialcharakterisierung festgelegt. Anschließend werden die Versuche gemäß der geplanten Vorgehensweise durchgeführt. Im Rahmen der Auswertung wird der Einfluß von vorhandenen Streuungen auf die Versuchsergebnisse beurteilt. Anschließend erfolgt die Auswertung der Einzelversuche, die Erstellung und Auswertung von Mittelwertkurven sowie die Berechnung und Auswertung der definierten Kennwerte. In der Analyse erfolgt eine Validierung der festgelegten Annahmen über das Materialverhalten und eine Beurteilung, ob die Entwicklung eines geeigneten Materialmodells auf der Basis der Materialcharakterisierung durchzuführen ist. Werden wesentliche Annahmen nicht bestätigt und die eigentlichen Zielsetzungen nicht erfüllt, so sind Folgeversuche zu definieren.

Die **Modellierung** des Materialverhaltens erfolgt in den vier, in Bild 2.3 zusammengefaßten Entwicklungsschritten:

- Untersuchung von existierenden Materialmodellen,
- Weiter-, bzw. Neuentwicklung,
- Implementierung,
- Kalibrierung und Verifikation

eines Materialmodells. Im Rahmen der *Untersuchung von existierenden Materialmodellen* werden aus den verschiedenen Finite Elemente Programmen und aus der Literatur Materialmodelle ausgewählt. Die Modelle müssen ein Potential aufweisen, das in der Materialcharakterisierung festgestellte Materialverhalten unter Berücksichtigung von Weiterentwicklungsmaßnahmen abbilden zu können. Bei der Untersuchung und Bewertung jedes dieser Materialmodelle sind die folgenden Kriterien zu beachten:

- Kriterien zur Beurteilung der theoretischen Modellbasis
 - Formulierung der Materialgleichungen,
 - Entwicklungspotential,
- Kriterien zur Beurteilung der Modelltauglichkeit für den produktiven Einsatz
 - Kalibrierungsaufwand,
 - Ergebnis der Validierung.

Die Beurteilung der theoretischen Modellbasis erfolgt durch einen Vergleich des im Rahmen der Charakterisierung festgestellten Materialverhaltens und der Formulierung der Materialgleichungen, die dem Modell zugrunde liegen. Hiervon ausgehend wird das Entwicklungspotential des Modells beurteilt. Dies beinhaltet Aspekte, die das Verhalten der betrachteten Werkstoffe betreffen und Aspekte, die langfristig eine Modellierung ähnlicher Werkstoffe berücksichtigen. Die Beurteilung der Modelltauglichkeit wird durch die Simulation von Beispielen entsprechend der später erläuterten Validierung realisiert. Im Vorfeld erfolgt eine Kalibrierung des Materialmodells. Für den möglichen produktiven Einsatz des Modells wird der Kalibrierungsaufwand beurteilt, um nachzuweisen, daß die Parameter für das Materialmodell auf der Basis von einfachen, anwendungsorientierten Materialtests reproduzierbar bestimmt werden können. Auf der Basis dieser Untersuchung der verfügbaren Materialmodelle ist ein geeignetes Modell für den produktiven Einsatz oder für erforderliche Weiterentwicklungen auszuwählen.

Bei der *Weiter-, bzw. Neuentwicklung* des Materialmodells müssen die erforderlichen Änderungen, d.h. die Änderungen der Materialgleichungen, hergeleitet und ausführlich dokumentiert werden. Bei der anschließenden *Implementierung* der neuen Materialgleichung ist entsprechend den vorangegangenen Erläuterungen neben der numerischen Effizienz des Modells zu gewährleisten, daß die *Kalibrierung* des Materialmodells auf der Basis von einfach durchzuführenden und reproduzierbaren Versuchen möglich ist. Anschließend erfolgt eine erste Untersuchung des Modells, die eine Festlegung von Parametern und deren Bestimmung für eine Kalibrierung des Modells und eine ausführliche *Verifikation* der implementierten Materialgleichungen beinhaltet. Die Verifikation kann beispielsweise mit Hilfe eines Vergleichs der für die Kalibrierung benötigten, experimentellen Testdaten und simulierten Testdaten durchgeführt werden. Hierfür sind Tests mit homogener Elementdeformation und Tests unter Berücksichtigung von komplexeren, der Anwendung entsprechenden, Spannungszuständen vorzusehen. Diese Tests müssen unter Variation von verschiedenen Randbedingungen, wie beispielsweise der Netzgeometrie und der Belastungsart, durchgeführt werden.

Die eigentliche Validierung des Materialmodells umfaßt eine umfangreichere Berechnung von Materialtests und von anwendungsnahen Grundlagentests. Bei den Materialtests werden einfache Versuche, wie Druck-, Zug- und Schubversuche betrachtet. Mit diesen Tests kann der zulässige Einsatzbereich des Materialmodells bereits in weiten Umfängen festgelegt werden. Mit den anwendungsnahen Grundlagentests werden Lastfälle simuliert, die dem Einsatzbereich des Materials entsprechen. Auf der Basis dieser Tests wird die Qualität des Materialmodells gezielt beurteilt. Hierauf aufbauend wird mit Hilfe der Tests eine längerfristige Aussage über die zu erwartenden Abweichungen zwischen dem berechneten und dem realen Materialverhalten innerhalb einer Fahrzeugkomponente ermöglicht. Als Referenz zur Beurteilung von

Abweichungen zwischen dem realen und dem berechneten Materialverhalten dient dementsprechend immer die Streuung der experimentellen Versuchsergebnisse.

2.4 Bewertung

Die einzelnen Teilschritte der Bewertungsphase des Integrationsprozesses sind in Bild 2.4 zusammengefaßt. Im Rahmen der Bewertung erfolgt eine ganzheitliche **Aufbereitung** aller Teilergebnisse, die **Interpretation** dieser Ergebnisse und eine **Entscheidung** über Annahme oder Ablehnung des Materialmodells. Entsprechend der Entscheidung muß mit der Planung von erforderlichen Folgemaßnahmen begonnen oder die **Qualitätsvorschriften** für den produktiven Einsatz des Materialmodells festgelegt werden.

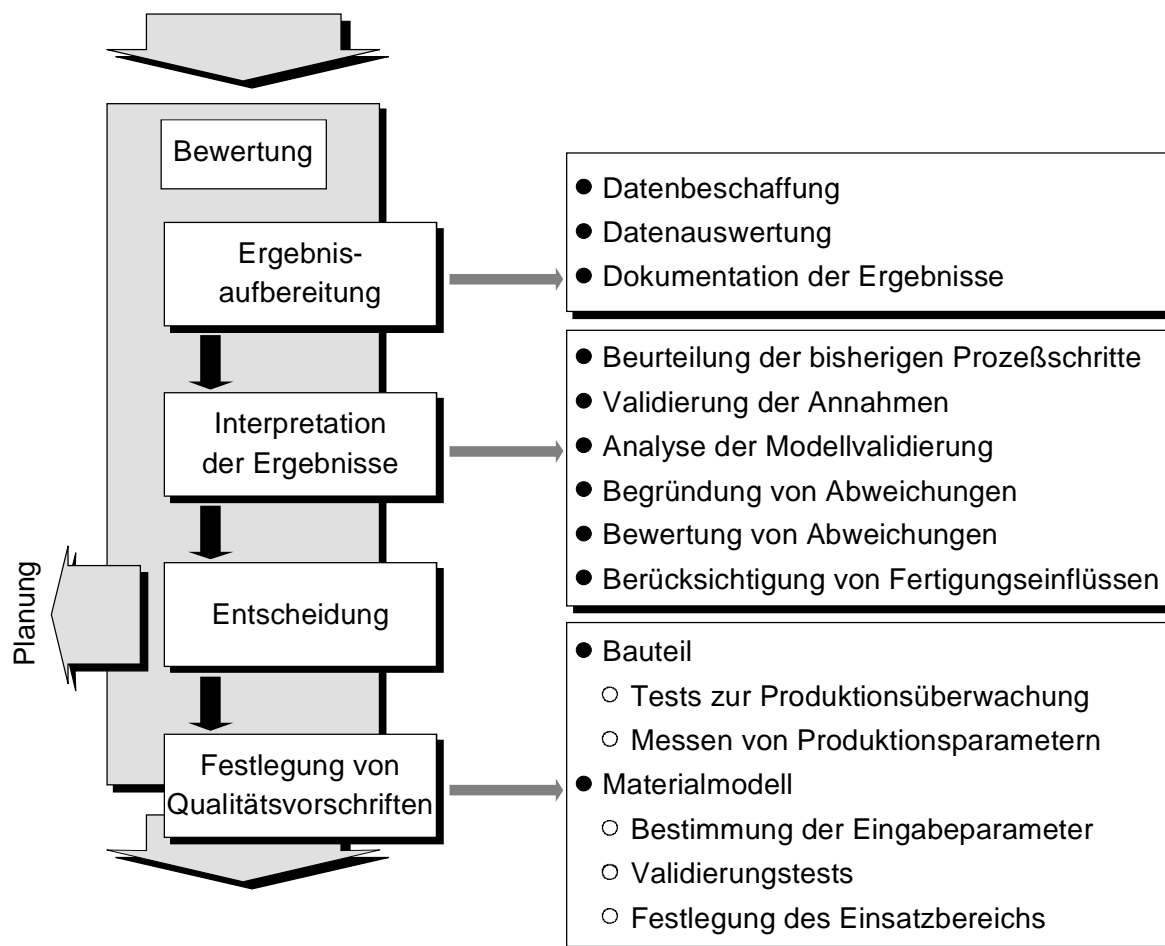


Bild 2.4: Bewertung

Die ausführliche **Ergebnisaufbereitung** ist eine grundlegende Anforderung zur Umsetzung der weiteren Teilschritte des Integrationsprozesses. Insbesondere die folgende Ergebnisinterpretation und der später erläuterte Knowhow-Gewinn hängen in ihrer Qualität hiervon ab.

Hierzu müssen die während der bisherigen Teilschritte produzierten Daten zusammengetragen, ganzheitlich ausgewertet und vollständig dokumentiert werden.

Ausgehend von dieser Aufbereitung der Daten erfolgt die **Ergebnisinterpretation**. Zu Beginn müssen die einzelnen Prozeßschritte hinsichtlich ihrer Transparenz und ihrer Reproduzierbarkeit beurteilt werden. Anschließend wird geprüft, ob die innerhalb des Integrationsprozesses definierten Annahmen bzw. Anforderungen erfolgreich validiert werden konnten. Mit Hilfe dieser beiden Teilschritte erfolgt somit eine Beurteilung der Prozeßabläufe. Die folgenden Teilschritte der Ergebnisinterpretation beinhalten eine Beurteilung des entwickelten Materialmodells im Rahmen des geplanten Einsatzbereichs. Erster Schritt ist eine ausführliche Analyse der Ergebnisse der durchgeführten Modellvalidierung. Die Analyse wird auf der Basis der innerhalb der Planung festgelegten, werkstoffspezifischen Validierungskriterien durchgeführt. Die Abweichungen zwischen dem festgestellten und dem simulierten Materialverhalten werden aufgezeigt, begründet und im Sinne einer Qualitätssicherung für den produktiven Einsatz bewertet, um den festgelegten Einsatzbereich des Materialmodells zu bestätigen. Darüber hinaus müssen für eine Beurteilung des Materialmodells Erfahrungen aus dem Fertigungsprozeß von anwendungsspezifischen Bauteilen aus den Materialien berücksichtigt werden. Somit werden Abweichungen aufgrund einer unvollständigen Beurteilung des Materialmodells auf der Basis von idealisierten Meßdaten vermieden.

Anschließend erfolgt die **Entscheidung** über die Annahme oder Ablehnung des Materialmodells. Werden nach der Berücksichtigung von fertigungsbedingten Einflüssen erhebliche Abweichungen zwischen dem realen und dem simulierten Materialverhalten festgestellt, so ist das Materialmodell abzulehnen und eine Neudefinition von Zielsetzung und Annahmen in der Planungsphase erforderlich. Sind demgegenüber alle bisher erläuterten Maßnahmen durchgeführt und eine positive Beurteilung der Prozeßdurchführung und des Materialmodells erfolgt, so kann das Modell für den produktiven Einsatz freigegeben werden.

Im Vorfeld eines produktiven Einsatzes des Materialmodells in der Fahrzeugcrashberechnung müssen die **Qualitätsvorschriften**, die der Freigabe zugrunde lagen, festgelegt werden. Die Vorschriften umfassen Anforderungen an das Bauteil und an das Materialmodell. Die Qualitätsvorschriften für das Bauteil sind erforderlich, da das Materialmodell unter Berücksichtigung von definierten Voraussetzungen ausgewählt bzw. entwickelt wurde. Das Bauteil muß diesen Voraussetzungen entsprechen. Üblicherweise sind zur Überprüfung der geforderten Qualität des Bauteils Tests zur Produktionsüberwachung erforderlich, die werkstoffspezifisch festzulegen sind. Darüber hinaus ist es erstrebenswert, daß die Anforderungen an das Bauteil meßbaren Produktionsparametern zugeordnet werden können, die einer kontinuierlichen Kontrolle unterliegen. Zur Qualitätssicherung des Materialmodells muß der zulässige Einsatzbereich des Modells basierend auf den Erfahrungen aus dem

Integrationsprozeß festgelegt werden, bei denen die definierten Annahmen, die Ergebnisse der Modellvalidierung und die Erkenntnisse aus der Beurteilung des Fertigungsprozesses von anwendungsspezifischen Bauteilen zugrunde liegen. Ausgehend von dieser Festlegung des Einsatzbereichs werden die Tests für eine Kalibrierung und eine Vorgehensweise zur Auswertung dieser Tests ausgewählt. Da bei der Materialmodellentwicklung nur eine repräsentative Auswahl von Materialien der jeweiligen Materialgruppe berücksichtigt werden kann, müssen zusätzlich experimentelle und numerische Vergleichstests festgelegt werden, die eine Validierung der Materialparameter und somit eine Validierung des Modells für jedes weitere Material aus dieser Gruppe ermöglichen.

2.5 Knowhow-Gewinn

Ein für die Steigerung der Effizienz bei der Materialmodellierung wesentlicher Teilschritt des vorgestellten Prozesses zur Integration von Materialien in die Fahrzeugcrashberechnung ist die als Knowhow-Gewinn bezeichnete Phase. Dieser Knowhow-Gewinn, der mit jeder Umsetzung des Prozesses erweitert wird, beinhaltet eine **Sicherung der Erfahrungen** und eine **Sicherung von Ergebnissen**, die mit der Planung und Durchführung und Bewertung des Integrationsprozesses verbunden sind. Die Teilschritte des Knowhow-Gewinns sind in Bild 2.5 dargestellt.

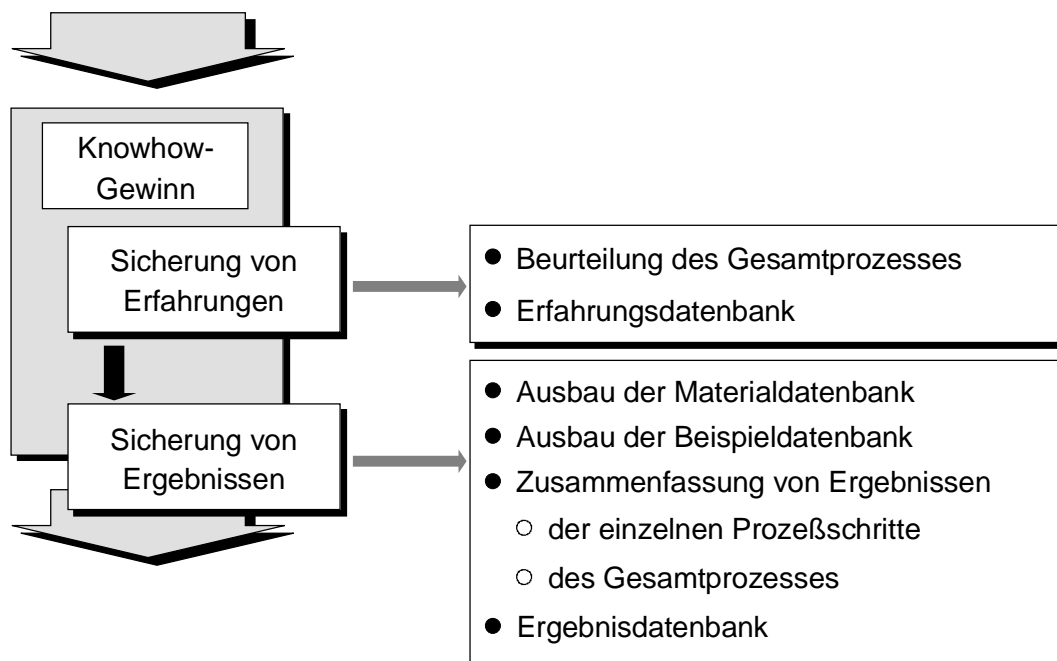


Bild 2.5: Knowhow-Gewinn

Die Basis für den Knowhow-Gewinn ist eine ausführliche Dokumentation der einzelnen Teilschritte des Integrationsprozesses und die Verwendung eines vorgegebenen, einheitlichen

Daten- und Dateiformats, das von allen Prozeßbeteiligten einzuhalten ist. Die **Sicherung von Erfahrungen** beinhaltet im wesentlichen das Zusammenführen und Archivieren von Erfahrungen mit dem eigentlichen Ablauf des Prozesses. Für eine Sicherung von Erfahrungen bietet sich nach [LM96] der Aufbau einer Erfahrungsdatenbank an. Auf diese Datenbank kann in jedem Folgeprojekt zugegriffen werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit eines Wiederholens von Fehlabläufen oder unnötigen Teilschritten verringert wird. In dieser Datenbank müssen entsprechend den oben erwähnten Zielsetzungen die Abläufe jedes Integrationsprozesses festgehalten werden, wobei hier insbesondere die konkrete Vorgehensweise, die jeweils zu der erfolgreichen Umsetzung der definierten Projektziele geführt hat, von Bedeutung ist. Dies beinhaltet beispielsweise Erfahrungen mit der Eignung und Durchführung von experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung von definierten Materialeigenschaften oder Informationen über Möglichkeiten zur erfolgreichen Validierung von Annahmen. Die Sicherung der Erfahrungen aus dem Prozeßablauf dient im wesentlichen dazu, den Integrationsprozeß hinsichtlich der Durchführung der einzelnen Teilschritte effizienter zu gestalten und mit der Integration jedes neuen Materials ein zielgerichteteres Vorgehen umsetzen zu können.

Die **Sicherung von Ergebnissen** beinhaltet die ausführliche Dokumentation und Archivierung der mit dem Integrationsprozeß verbundenen Daten in einer Ergebnisdatenbank. Zu diesen Daten gehören die gesammelten Informationen über das Materialverhalten und die entsprechenden Parameter für das Materialmodell, die in einer Materialdatenbank abgelegt und zugänglich gemacht werden müssen. Darüber hinaus sind alle mit der Kalibrierung, Verifikation und Validierung des Materialmodells verbundenen Datensätze in einer Beispieldatenbank abzulegen. Diese Beispiele werden bei einer Überarbeitung des Materialmodells grundsätzlich als Referenz dienen, um die mit dieser Überarbeitung verbundenen Änderungen des Materialmodells hinsichtlich des produktiven Einsatzes beurteilen und bewerten zu können.

Die mit der Sicherung von Erfahrungen und Ergebnissen verbundene Dokumentation und Aufbereitung von Daten muß so erfolgen, daß die innerhalb des Integrationsprozesses verwendeten Dokumente und Hilfsmittel in einer Form aufgearbeitet und zur Verfügung gestellt werden, die anderen bei einer Wiederholung des Prozesses von Nutzen ist. Damit wird langfristig die Reproduzierbarkeit und die Transparenz jedes einzelnen Integrationsprozesses gewährleistet und bei Weiterentwicklungen ein einmal erreichter Qualitätsstandard garantiert.

Über den erläuterten Knowhow-Gewinn aus dem Integrationsprozeß hinausgehend müssen die Erfahrungen aus der Produktivanwendung gesichert werden. Probleme und Einschränkungen, die während der Umsetzung des Integrationsprozesses nicht absehbar waren oder festgestellt werden konnten, müssen festgehalten, analysiert und dokumentiert werden, um auch langfristig die steigenden Anforderungen an die Qualität der Berechnung zu erfüllen und bei einer

erforderlichen Klärung von Fragestellungen, die mit einer Produkthaftung verbunden sind, ein Arbeiten nach dem Stand der Technik nachweisen zu können.

Mit den Erläuterungen zu dem Teilschritt Knowhow-Gewinn des Integrationsprozesses ist der im Rahmen der vorliegenden Arbeit geleistete Beitrag zur methodischen Integration von neuen Werkstoffen in die Fahrzeugcrashberechnung zusammengefaßt. Im Anschluß an diese Zusammenfassung werden die Abläufe des Integrationsprozesses am Beispiel der polymeren Hartschaumstoffe demonstriert, um die standardisierte Vorgehensweise auf eine konkrete Anwendung zu übertragen und damit zu verdeutlichen.

3 Die Integration von polymeren Hartschaumstoffen: Planung

3.1 Grundlagen

Unter Berücksichtigung des spezifischen Aufbaus von Schaumstoffen werden im Rahmen der Informationsbeschaffung als erstem Schritt der Grundlagen Daten über den mikroskopischen Aufbau von Polymerschaumstoffen, über die Grundwerkstoffe und über Fertigungsverfahren von polymeren Schaumstoffen mit einem Einsatz in der Automobilindustrie zusammengefaßt. Hiervon ausgehend werden, basierend auf in der Literatur verfügbaren Informationen, die für eine weitere Durchführung des Integrationsprozesses wesentlichen Erkenntnisse zu dem Materialverhalten der polymeren Hartschaumstoffe beschrieben.

3.1.1 Informationsbeschaffung

Polymere Schaumstoffe haben in der industriellen Nutzung eine Vielzahl von Anwendungen [Kn75], [MSD97], [GA97]. In der Automobilindustrie finden sie wegen ihres gewichtsspezifisch günstigen Verhaltens und der geringen Werkstoff- und Fertigungskosten in verschiedenen Einsatzbereichen Verwendung (Bild 3.1).

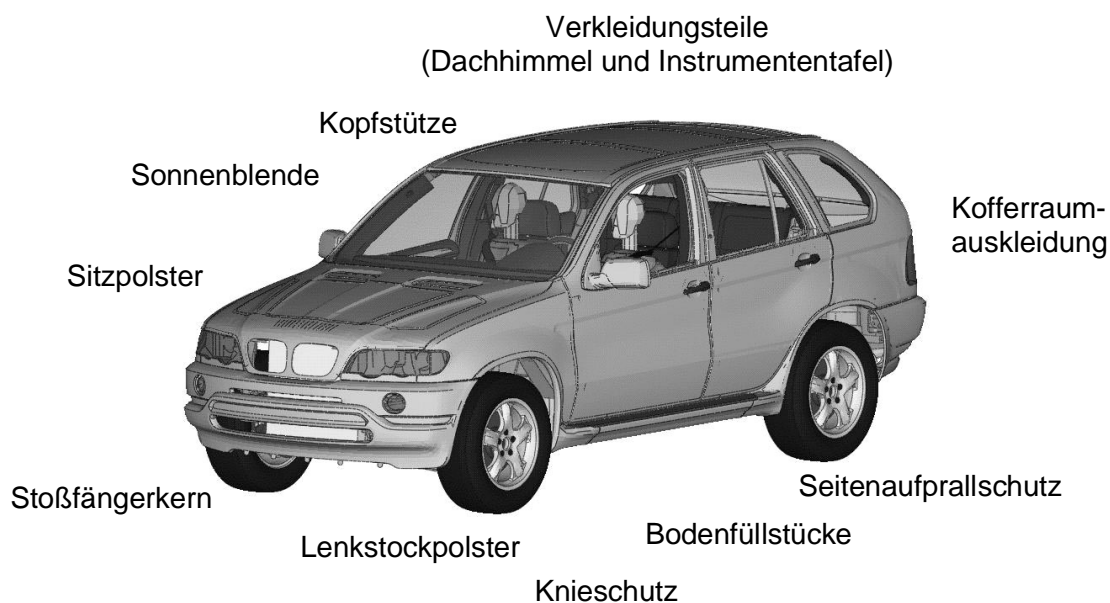


Bild 3.1: Einsatzbereiche von polymeren Schaumstoffen im PKW

Den verschiedenen Einsatzbereichen entsprechend haben Polymerschaumstoffe sehr variable Eigenschaftsprofile, die durch unterschiedliche Parameter beeinflusst und festgelegt werden

können [Kn75], [Sa86]. Nach [Sa86], [KF91] und [GA97] handelt es sich bei Schaumstoffen um künstlich hergestellte, spezifisch leichte Werkstoffe mit einer zellularen Struktur. Sie können als solides Zellgerüst mit eingelagertem Fluid oder generell als eine Zweiphasenmischung aus einem festen Werkstoff und einem Fluidanteil betrachtet werden [Kn75]. Bei kommerziell genutzten Schaumstoffen handelt es sich bei dem Fluid üblicherweise um Luft. Aufgrund des hohen Gasanteils in diesen Schaumstoffen ist die Dichte des Zweiphasensystems deutlich geringer als die Dichte des eigentlichen Gerüstwerkstoffes. Als Ausgangsmaterial für die Zellstruktur künstlich aufgeschäumter Werkstoffe werden heute neben den im folgenden betrachteten Polymeren auch Metalle, Glas, Kohlenstoff oder Keramik eingesetzt.

Das Zusammenwirken von strukturmechanischen Eigenschaften, bedingt durch den zellularen Aufbau, und von materialspezifischen Eigenschaften charakterisiert das mikromechanische und damit auch das phänomenologisch beschriebene Verhalten von Polymerschaumstoffen. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Arbeit kurz der Aufbau der zellularen Struktur von Schaumstoffen erläutert.

3.1.1.1 Die zellulare Struktur von polymeren Schaumstoffen

Der Aufbau des Zellgerüsts von polymeren Schaumstoffen ist sehr vielfältig. Charakteristische Größen zur Beschreibung des Zellgerüsts sind nach [Kn75], [KF91], [Sa86] und [GA97] die Rohdichte, d.h. das Verhältnis aus Polymermasse und Volumen des Schaumstoffes, und die Porosität, die den Volumenanteil der Zellhohlräume an dem Schaumstoffvolumen berücksichtigt. Eine genauere Beschreibung der Zellstruktur erfolgt durch die Betrachtung der Geometrie, d.h. der Art und der Form der einzelnen Zellen und durch die Abmessungen. So werden 'echte' Schaumstoffe, mit Kapillarrohräumen innerhalb der Wandungen und 'unechte' Schaumstoffe mit massiven Zellwandungen unterschieden [Sa86]. Hinsichtlich der Abmessungen werden bei polymeren Schaumstoffen nach [Kn75] mikrozellige (Zelldurchmesser $d \leq 0,3$ mm), feinzellige ($d \leq 2,0$ mm) und grobzellige ($d \geq 2,0$ mm) Schaumstoffe unterschieden. Bedingt durch einen geringeren Einfluß von Inhomogenitäten ist das Materialverhalten von feinzelligeren Schaumstoffen im Gegensatz zu dem Verhalten von grobzelligeren Schaumstoffen als isotrop zu bezeichnen [Kn75].

Die ideale Form einer Schaumstoffzelle ist die Kugel, bei der die Hohlräume nur an minimalen Schnittflächen aneinandergrenzen [Kn75]. Mit zunehmendem Gasanteil wird aus der Idealform ein polyederförmiges Gebilde. Infolge von Fließvorgängen bei der Fertigung kann es zu einer Orientierung von Schaumzellen kommen, durch die die Eigenschaften des Schaumstoffes gezielt beeinflußt werden [Kn75], [GA97]. Neben [Kn75] fassen [Re77], [KF91] und [GA97]

verschiedene geometrische Modelle zusammen, die den Aufbau von polymeren Schaumstoffen mathematisch beschreiben.

Das wesentliche Merkmal zur Beschreibung der zellularen Form ist nach [Sa86] und [GA96] die Unterteilung der Zellstruktur in einen offen- und geschlossenzelligen Aufbau. Sind die einzelnen Zellhohlräume miteinander verbunden, so kann ein Schaumstoff als räumliches Stab-, Balken- oder Rahmentragwerk, also als offenzellig betrachtet werden. Umschließen die Zellwände die Hohlräume vollständig, handelt es sich um einen geschlossenzelligen Schaumstoff, dessen Zellen als räumliche Platten-, Scheiben- oder Schalentragwerke bezeichnet werden können [Kn75]. Fertigungsbedingt liegen in einem Schaumstoff immer beide Zellformen vor. Nach DIN 7766 genügt ein Anteil von 80% der jeweiligen Zellform für die Einteilung. Ein Sonderfall der geschlossenzelligen Schaumstoffe sind die sogenannten Partikelschaumstoffe, die aus einzelnen geschäumten Partikeln aufgebaut sind. In Bild 3.2 ist die zellulare Struktur von verschiedenen Schaumstoffen dargestellt.

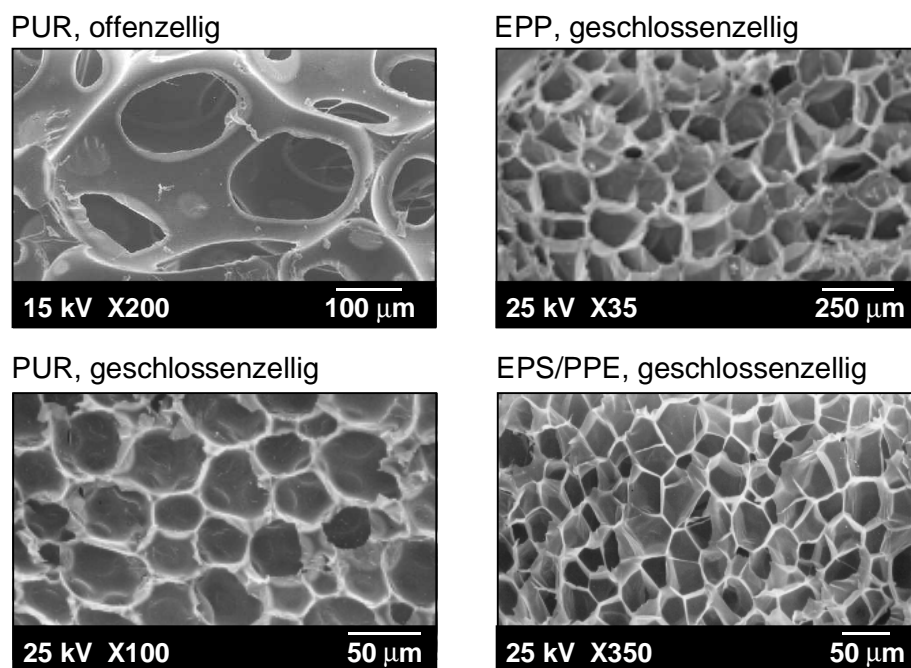


Bild 3.2: Der zellulare Aufbau von polymeren Schaumstoffen

Bei den geschlossenzelligen Schaumstoffen wird die Verteilung des Polymers innerhalb des Zellgerüsts unterschieden. So kann das Grundmaterial in den Zellstegen oder in den Zellwänden konzentriert sein. Dementsprechend wird bei den Zellwänden zwischen membranartigen und massiven Zellwänden differenziert, die sich wiederum durch vollkommen unterschiedliche mikromechanische Eigenschaften auszeichnen. Bild 3.3 faßt die verschiedenen Möglichkeiten einer Verteilung des Grundwerkstoffes in der zellularen Struktur zusammen.

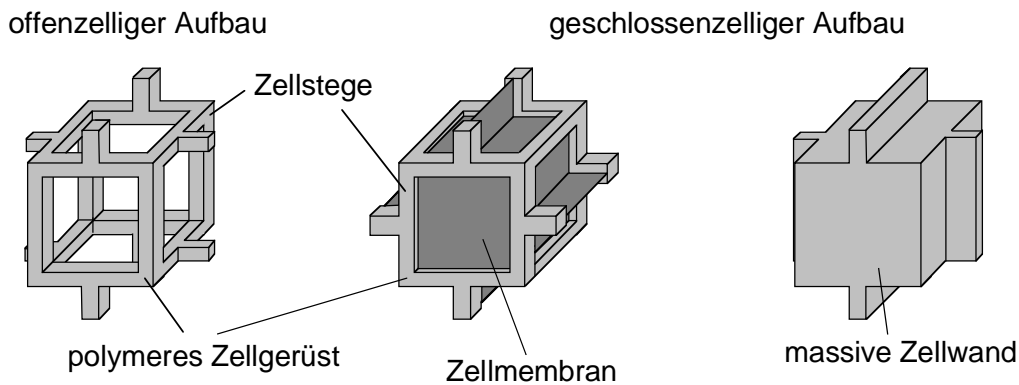


Bild 3.3: Verteilung des Grundwerkstoffes innerhalb der Zellstruktur

Der Aufbau der Zellstruktur eines Schaumstoffes ist von einer Vielzahl verschiedener Parameter abhängig. So beeinflusst beispielsweise neben der Rohdichte der makromolekulare Aufbau der aufgeschäumten Grundwerkstoffe den Anteil geschlossener oder offener Zellen und somit das Verhalten des Schaumstoffes [Kn75], [Le73].

3.1.1.2 Eigenschaften der Grundwerkstoffe

Polymere werden durch Polymerisation, Polyaddition oder Polykondensation von verschiedenen Monomeren hergestellt. Sie können eine kettenförmige, ringförmige oder räumliche Struktur aufweisen. Der chemische Aufbau der Polymere beeinflusst deren Viskosität und Dehnfähigkeit in der Schmelze während der Schaumbildung und hierdurch die Schaumdichte und die Zellstruktur des späteren Schaumstoffes. Polymere, die industriell genutzt werden, enthalten neben den Grundpolymeren in der Regel Additive zur Verbesserung des Verarbeitungsverhaltens und der physikalischen, chemischen und mechanischen Gebrauchseigenschaften.

In Anlehnung an die DIN 7724 werden die verschiedenen Polymere in thermoplastische, duroplastische, elastomere und thermoelastische Polymere eingeteilt. Thermoplastische Kunststoffe bestehen aus linearen oder leicht verzweigten Polymeren. Sie erreichen bei Erwärmung wiederholbar Fließbarkeit und verfestigen durch Abkühlen. Beim Umformen durchlaufen sie reversible Zustandsänderungen. Ein Maß zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit von Thermoplasten ist die Glasübergangstemperatur T_g . Ein duroplastisches Polymer entsteht beim Umformen aus fließbaren, nicht makromolekularen Vorprodukten unter Bildung von chemisch eng vernetzten Makromolekülen. Die Härte der irreversibel ausgehärteten Duroplaste ist bis zu den Grenztemperaturen des thermochemischen Abbaus der Polymere wenig temperaturabhängig. Elastomere Polymere verhalten sich innerhalb eines ausreichenden Gebrauchstemperaturbereichs um Raumtemperatur weich-gummielastisch. Die elastomeren Polymere enthalten weitmaschig vernetzte Molekülketten. Thermoelastische

Polymere sind oberhalb des Gebrauchstemperaturbereichs elastomerartig und zeigen bis zu dem Erreichen der Grenztemperatur des thermomechanischen Abbaus keine Fließbarkeit.

In der Schmelze weisen Polymere mit kettenförmig linearen oder verzweigten Molekülen mit zunehmender Kettenlänge ein hochviskoses, nicht-Newtonsches Fließverhalten auf. Im festen Zustand verhalten sie sich in der Regel entgegen dem Hooke'schen Gesetz nicht ideal-elastisch. Über einen weiten Dehnratenbereich zeigen Polymere ein stark dehnratenabhängiges Materialverhalten [Sa86], [ZBRH95], [AB95], so daß ihr Verhalten idealisiert als eine Kombination aus Feder- und Dämpferelementen beschrieben werden kann. Bei Thermoplasten ist hierbei zusätzlich eine enge Kopplung der thermischen und der dehnratenabhängigen Eigenschaften der Polymere zu berücksichtigen [ZBRH95], [AB95]. So kommt es bei hohen Geschwindigkeiten zu einer lokalen Überschreitung der Glasübergangstemperatur, ab der sich die sogenannten Nebervalenzbindungen der Polymere lösen und es zu einer Erweichung des Materials kommt. Bei Duroplasten ist dieser Effekt aufgrund des hohen Grads chemischer Vernetzung weniger stark ausgeprägt.

Innerhalb des Automobilbaus werden üblicherweise duroplastische Polyurethanschaumstoffe (PUR) und thermoplastische Systeme aus expandiertem Polypropylen (EPP) oder einem Compound aus expandiertem Polystyrol und Polyphenylenether (EPS/PPE) eingesetzt. Bei EPS/PPE wird mit einem zunehmendem Anteil des Polyphenylenethers die oben beschriebene Glasübergangstemperatur des Compounds erhöht.

3.1.1.3 Fertigungsverfahren von polymeren Schaumstoffen

Für die Herstellung von handelsüblichen Polymerschaumstoffen, die im Automobilbau eingesetzt werden, stehen eine Vielzahl von verschiedenen Fertigungsverfahren zur Verfügung. Verfahrensunabhängig erfolgt das Aufschäumen der Polymere mit Hilfe eines Treibmittels. Es werden physikalische, chemische und physikalisch-chemische Treibmittel unterschieden. Ihr Zustand kann fest, flüssig oder gasförmig sein. Die Variation der Treibmittelmenge beeinflusst die Rohdichte des aufgeschäumten Polymers. Die Wahl des Treibmittels modifiziert die erzeugten Zellen in Größe und Form und beeinflusst so die Eigenschaften des Schaumstoffes. Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften werden zusätzlich Keimbildner, Aktivatoren, Zellregulatoren, Vernetzer und Schaumbildner beigefügt, deren Funktion ausführlich in [Kn75], [Le95] und [Hü96] erläutert wird. Als Beispiele für die verschiedenen Herstellungsverfahren werden im folgenden die Verfahren zur Herstellung von geschäumten Bauteilen aus Polyurethan und EPS/PPE bzw. EPP erläutert.

Polyurethane entstehen durch die Polyaddition von Diisocyanaten und Polyolen. Diese Ausgangswerkstoffe werden üblicherweise durch einen Rohstoffhersteller bereitgestellt und

durch den eigentlichen Aufschäumer für die Herstellung des aufgeschäumten Bauteils verwendet. Die beiden Rohstoffe werden hierzu mit einem Mischkopf bei definierter Temperatur miteinander vermischt. Dabei werden das Hochdruck- und das Niederdruckmischen unterschieden. Das Gemisch wird in die Bauteilform eingebracht, wo es verfahrensabhängig in einer geschlossenen oder offenen Form unter Ausfüllung des Formvolumens zu dem Aufschäumvorgang kommt. Für das Aufschäumen von Polyurethanen werden chemische und physikalische Treibmittel verwendet. Harte PUR-Schaumstoffe werden nach [Sa86] überwiegend mit Halogenalkanen als Treibmittel hergestellt. Hierdurch wird ein Anteil von geschlossenen Zellen $> 95\%$ erzielt. PUR-Weichschaumstoffe werden üblicherweise im sogenannten One-Shot-Verfahren in Kombination mit Wasser hergestellt [Kn75], [Sa86].

Das Fertigungsverfahren von PUR-Schaumstoffen bedingt teilweise erhebliche Unterschiede der Rohdichte innerhalb eines Bauteils. Insbesondere bildet sich bei der Herstellung von Bauteilen in geschlossenen Formen im Bereich der Bauteiloberfläche eine Schaumstoffschicht, die sogenannte Schäumhaut, mit Zellen geringeren Durchmessers und somit nach [KF91] mit einer höheren Dichte. Die beschriebenen Dichteunterschiede werden im folgenden als Inhomogenitäten bezeichnet. In Bild 3.4 sind Inhomogenitäten der Zellstruktur am Beispiel einer PUR-Schaumstoffstruktur dargestellt. Neben diesen Dichteunterschieden wird eine Vorzugsrichtung, d.h. eine Orientierung von Schaumzellen festgestellt, die auf den Fließvorgang durch das Aufschäumen bei der Bauteilentstehung zurückzuführen ist. Auf den Einfluß dieser fertigungsbedingten Inhomogenität und Orientierung der Zellstruktur wird im Rahmen einer Zusammenfassung der wesentlichen mechanischen Eigenschaften von polymeren Hartschaumstoffen noch näher eingegangen

Für die Herstellung von Bauteilen aus aufgeschäumtem Polystyrol sind Formmassen ohne chemische Treibmittel, treibmittelhaltige Konzentrate und gebrauchsfertige Massen erhältlich [Sa86]. Vorprodukte für die Herstellung von Bauteilen aus EPS/PPE-Partikelschaum sind Polymerisatperlen, in denen bereits leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe als Treibmittel enthalten sind. Die Polymerisatperlen werden von dem Rohstofflieferanten bezogen und lose geschüttet bei ca. 100°C mit Dampf auf die gewünschte Enddichte vorgeschäumt. Nach einer Lagerung bei ca. 110°C bis 120°C zum Druckausgleich werden die aufgeschäumten Partikel unter Zusatz von Wasserdampf bei einem Betriebsdruck von 0,5 bar bis 1,3 bar zu einem Bauteil verschweißt [Sa86]. Die Herstellung von Bauteilen aus EPP-Partikelschaumstoff ist vergleichbar. Üblicherweise werden hier allerdings durch den Rohstoffhersteller bereits die vorgeschäumten Partikel geliefert [Ta93]. Die Herstellung von Bauteilen aus Partikelschaumstoffen ist im Vergleich zu dem Einsatz von Polyurethanschaumstoffen mit geringeren Inhomogenitäten verbunden [SH99], wobei insbesondere bei Bauteilen größerer Dichte ebenfalls die Bildung einer Schäumhaut festzustellen ist.

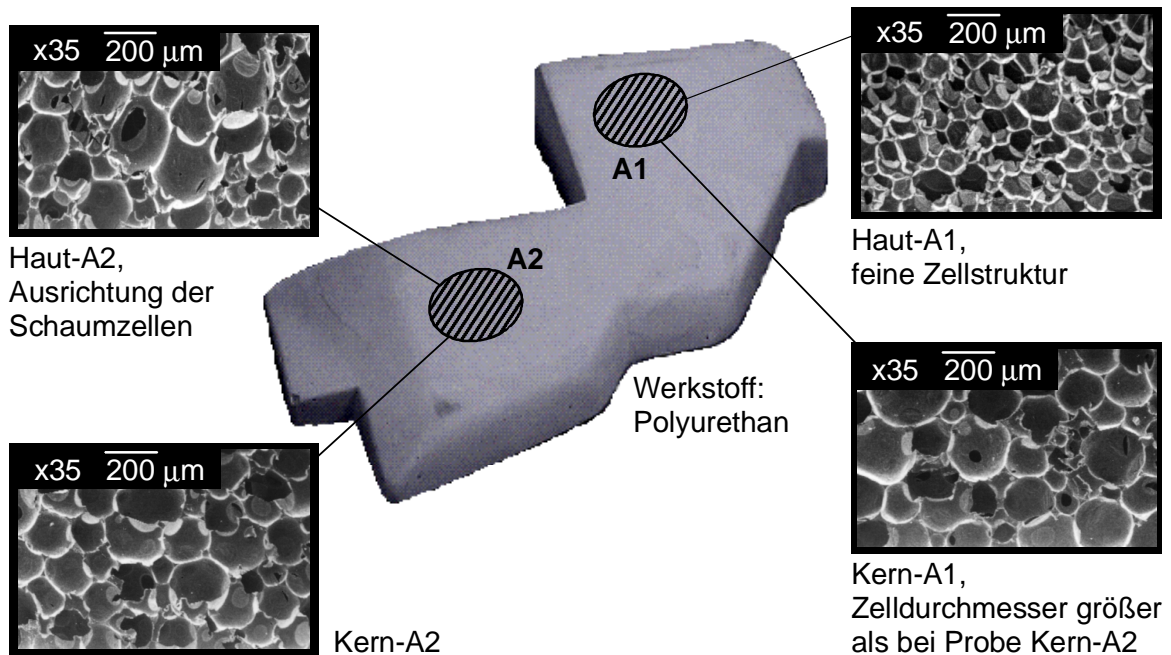


Bild 3.4: Fertigungsbedingte Inhomogenitäten der Zellstruktur eines PUR-Bauteils

3.1.1.4 Die polymeren Hartschaumstoffe

Nach dieser allgemeinen Einführung in den Aufbau, die Grundwerkstoffe und verschiedene Fertigungsverfahren von polymeren Schaumstoffen werden die charakteristischen Eigenschaften von den im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten polymeren Hartschaumstoffen ausführlich beschrieben. Die Beschreibung erfolgt auf der Basis des mechanischen Verhaltens, wobei der Einfluß der bisher erläuterten Eigenschaften auf das Verhalten der polymeren Hartschaumstoffe berücksichtigt wird.

Eine einfache, eigenschaftsbezogene Einteilung der polymeren Schaumstoffe ist entsprechend der DIN 7726 in Weich-, Halbhart- und Hartschaumstoffe üblich. Unter der Härte eines Schaumstoffes versteht man dabei einen charakteristischen Wert der Druckfestigkeit, die bei 10% Stauchung gemessen wird. Diese Härte ist somit eine Größe zur Beschreibung des Einsatzbereichs. Die Einteilung nach DIN 7726 ergibt sich wie folgt:

- Weicher Schaumstoff Druckfestigkeit $< 0,015 \text{ N/mm}^2$,
- Halbharter Schaumstoff $0,015 \text{ N/mm}^2 < \text{Druckfestigkeit} < 0,08 \text{ N/mm}^2$,
- Harter Schaumstoff Druckfestigkeit $> 0,08 \text{ N/mm}^2$.

Die Härte wird durch die Funktionalität, d.h. durch den Vernetzungsgrad, den Verzweigungsgrad und die Kettenlänge des polymeren Grundwerkstoffes, sowie durch den zellularen Aufbau bestimmt. Nach [Kn75] und [Le95] haben weiche und halbhartes Schaumstoffe üblicherweise einen offenzelligen Aufbau, während sich Hartschaumstoffe durch eine geschlossenzellige Struktur auszeichnen. Über diese Einteilung nach der DIN 7726 hinausgehend werden heute mit den verschiedenen Schaumstoffgruppen entsprechend ihrer Einsatzbereiche weitere charakteristische mechanische Eigenschaften verbunden. Polymere Weichschaumstoffe, die beispielsweise im PKW als Bodenfüllstücke oder als Sitzpolster eingesetzt werden, lassen sich leicht deformieren und nehmen nach einer Belastung bis hin zu großen Deformationen elastisch rückverformend wieder nahezu ihre ursprüngliche Gestalt an. Halbhartes Schaumstoffe haben, wie oben erläutert, eine relativ hohe Druckfestigkeit, bzw. einen hohen Verformungswiderstand und zeichnen sich durch ein großes Rückstellvermögen nach einer elastisch-plastischen Deformation aus. Sie eignen sich zur Schallisolierung und zur Energieabsorption mit hohen Anforderungen an das Rückstellvermögen. Hartschaumstoffe werden rein qualitativ durch das Bruchverhalten unter Druckbelastung in zähhartes und sprödhartes Schaumstoffe unterschieden. Zähhartes Schaumstoffe deformieren elastisch-plastisch unter Belastung, bevor sie durch Bruch versagen, während sprödhartes Schaumstoffe vor dem Bruch nur geringe, elastische Deformationen zeigen. In PKW's werden zähhartes Schaumstoffe wegen ihres guten Rückstellvermögens in Stoßfängersystemen eingesetzt, während sprödhartes Schaumstoffe aufgrund ihres hohen Energieabsorptionsvermögens für den Insassenschutz im Fahrzeuginnenraum verwendet werden. Entgegen der Einteilung der Schaumstoffe nach der DIN 7726 werden in der Literatur zähhartes häufig als halbhartes Schaumstoffe und sprödhartes als hartes Schaumstoffe bezeichnet.

Bei den hier betrachteten polymeren Hartschaumstoffen handelt es sich nahezu ausschließlich um geschlossenzellige Schaumsysteme mit einem hohen Energieabsorptionsvermögen. Die bisherigen Erläuterungen zur Festlegung des Eigenschaftsprofils dieser Schaumstoffe ergänzend, ist in Bild 3.5 der quasistatische Druckspannungs-Stauchungsverlauf von Noryl[®] EF, eines Schaumstoffes auf Polystyrolbasis, dargestellt. Bei dem Schaumstoff handelt es sich um ein zähhartes Schaumsystem mit einem besonders geringen Rückverformungsvermögen, das üblicherweise im PKW-Innenraum eingesetzt wird. Der für die betrachteten Schaumstoffe charakteristische Verlauf kann in drei Deformationsbereiche unterteilt werden [SD92], [GA97], [CZLS98], [ZKLYN98]. Zu Beginn der Belastung deformiert die zelluläre Struktur der Schaumstoffe unter elastischem Biegen von Zellstegen, bzw. Beulen von Zellwänden. Das makroskopische Verhalten der Schaumstoffe ist innerhalb dieses Bereiches nahezu linearelastisch. In Abhängigkeit von den mechanischen Eigenschaften des Schaumstoffes geht das Verhalten entsprechend Bild 3.5 mit dem Erreichen einer charakteristischen Druckspannung zu einem lokalen Deformieren der Zellstruktur durch plastisches Fließen bei zähhartes oder lokales Bruchversagen der Struktur bei sprödharten Schaumstoffen über [KF91], [GA97]. Durch

das Fortschreiten der lokalen Effekte entsteht das ausgeprägte Druckspannungsplateau. Mit zunehmender Deformation werden die Zellen bzw. die Zellbruchstücke verdichtet, was zu einem progressiven Verhalten bei hohen Stauchungen führt.

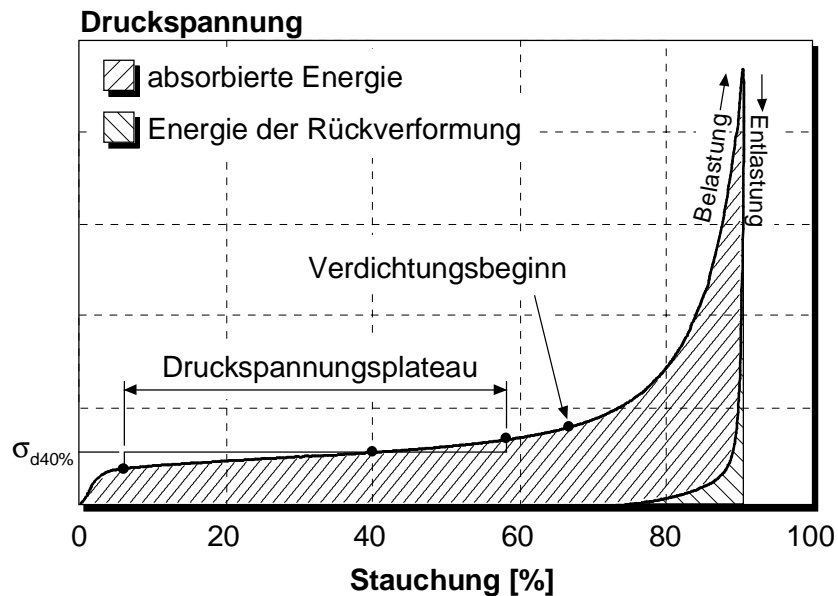


Bild 3.5: Druckspannungs-Stauchungsverhalten von Noryl® EF

Um die Gruppe der polymeren Hartschaumstoffe mit hohem Energieabsorptionsvermögen über die unzureichende Einteilung nach ihrer Härte hinausgehend vergleichend beurteilen zu können, wurden in enger Zusammenarbeit zwischen BMW und dem IVW weitere mechanische Kenngrößen definiert. Die Definition dieser Kennwerte erfolgt ausgehend von dem charakteristischen Merkmal des Druckspannungs-Stauchungsverlaufs, dem ausgeprägten Druckspannungsplateau. Innerhalb dieses Plateaubereichs verhält sich der Schaumstoff nach [SPHKM98] und [MSD97] über einem großen Deformationsbereich nahezu wie ein idealer Energieabsorber. Das Druckspannungsplateau wird durch den Wert der Druckfestigkeit bei 40% Stauchung, $\sigma_{d40\%}$, bestimmt (Bild 3.5). Die weiteren Kennwerte ergeben sich bezüglich dieser Druckspannung wie folgt:

- Plateaubeginn Stauchung bei 75% der Spannung $\sigma_{d40\%}$,
- Plateauende Stauchung bei 125% der Spannung $\sigma_{d40\%}$,
- Plateaulänge Differenz aus Plateauende und Plateaubeginn,
- Mittlere Plateauspannung Mittlere Druckspannung über der Plateaulänge,
- Verdichtungsbeginn Stauchung bei 150% der Spannung $\sigma_{d40\%}$.

Polymere Hartschaumstoffe mit einer guten Eignung zur Energieabsorption zeichnen sich durch eine Plateaulänge $\geq 0,4$ und durch einen Progressionsbeginn $\geq 0,6$ aus. Neben diesen beschriebenen Kennwerten ist zusätzlich eine Beurteilung des Rückverformungsverhaltens der Schaumstoffe sinnvoll. Hierfür kann beispielsweise das Verhältnis aus der Energie der Rückverformung und der absorbierten Energie betrachtet werden. Im Anschluß an diese Betrachtung der polymeren Hartschaumstoffe aus der Gruppe der Polymerschaumstoffe werden die für eine Modellierung der mechanischen Eigenschaften wesentlichen Erkenntnisse aus der Literatur zusammengefaßt. Neben einer allgemeinen Eigenschaftsbeschreibung beinhaltet dies zusätzlich eine Hervorhebung von crashrelevanten Eigenschaften unter Berücksichtigung von spezifischen Anforderungen aus dem Automobilbau.

3.1.1.5 Mechanische Eigenschaften: Grundlagen

In einer Vielzahl der zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Schaumstoffen veröffentlichten Arbeiten werden mit Hilfe von analytischen Ansätzen, die den mikroskopischen Aufbau berücksichtigen, und experimentellen Untersuchungen halbempirische Modelle zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens hergeleitet [KF91], [GA97]. In großem Umfang sind Ergebnisse von Untersuchungen des elastischen Materialverhaltens und des Übergangs zu plastischem Fließen, bzw. Bruchversagen der zellularen Struktur verfügbar [Kn75], [Re77], [KF91], [GA97]. Die Untersuchung und Beschreibung des mechanischen Verhaltens von energieabsorbierenden Schaumstoffen bei großen Deformationen wird nur in sehr wenigen Veröffentlichungen ausführlicher behandelt [Bu91], [GA97]. Umfangreiche Untersuchungen des Einflusses der zellularen Struktur auf die mechanischen Eigenschaften von Aluminiumschaumstoffen werden in [GMG98], [SG98a], [SG98b] und [SG98c] durchgeführt und gehen teilweise in die Interpretation des Materialverhaltens der polymeren Hartschaumstoffe ein.

Wie bereits erwähnt, können für eine Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von polymeren Hartschaumstoffen ein linearelastischer und ein inelastischer Deformationsbereich unterschieden werden. Innerhalb des linearelastischen Deformationsbereichs zeigen polymere Hartschaumstoffe entsprechend den Grundmaterialien ein viskoelastisches Materialverhalten [Kn75]. Aufgrund des zellularen Aufbaus von Schaumstoffen ist das Hookesche Gesetz im Gegensatz zu den massiven Werkstoffen nicht ausreichend zur Beschreibung der elastischen Eigenschaften. Nach [Ho66] ist jeder Hookeschen Verformung in den Zellwänden ein nicht näher bekannter Anteil an der Zellgesamtverformung überlagert, der durch Winkeländerungen der Zellwände zueinander und in Bezug auf ihre Knotenpunkte, also durch einen Biegeanteil im Bereich der Knoten, gekennzeichnet ist. In [GA97] wird auf der Basis von analytischen Modellen für unterschiedliche zelluläre Strukturen ein Ansatz entwickelt, der, ausgehend von der Rohdichte und des Verhaltens des Grundmaterials, elastische Verformungsanteile der

Zellstruktur berücksichtigt und somit die Berechnung eines äquivalenten Elastizitätsmoduls für den Schaumstoff ermöglicht. Die oben erwähnte, durch den Fertigungsprozeß beeinflusste Anisotropie aufgrund einer Zellorientierung wird als Formanisotropie bezeichnet, wobei das Verhalten, bedingt durch die Orientierung in Richtung des Materialflusses, transversal-isotrop ist. Der Elastizitätsmodul liegt in Richtung des Materialflusses auf einem höheren Niveau. Hierfür werden in der Literatur verschiedene Gründe genannt [Kn75], [GA97]. Mit Hilfe der beschriebenen analytischen Modelle ist ein Rückschluß von einer Orientierung der Schaumzellen auf die experimentell nachgewiesene Anisotropie eines Schaumstoffes in Form eines richtungsabhängigen Elastizitätsmoduls möglich. Die analytischen Ansätze ermöglichen allerdings keine Aussage über eine Lastabhängigkeit der elastischen Kennwerte, wie sie in [Kn75] für einige polymere Hartschaumstoffe am Beispiel von unterschiedlichen Elastizitätsmodulen bei einachsiger Druck- und Zugbelastung gezeigt wurden. Für das Verhalten der Schaumstoffe unter reiner Schubbeanspruchung wird nachgewiesen, daß die elastischen Verformungsanteile durch die Biegung der Zellstruktur im Bereich der Knotenpunkte dominiert sind. Experimentelle Untersuchungen an verschiedenen offen- und geschlossenzelligen Schaumstoffen [GA97] und numerische Untersuchungen an zweidimensionalen Wabenstrukturen [Bu91] haben gezeigt, daß bei kleinen Verformungen Querszahlen im Bereich von $\nu_s = 0,2$ bis $\nu_s = 0,33$ den Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul und dem Gleitmodul ausreichend beschreiben. Der Einfluß der bei geschlossenzelligen Schaumstoffen eingelagerten Luft auf das linearelastische Verhalten von Schaumstoffen wird allgemein vernachlässigt. Untersuchungen in [RMB94] haben ergeben, daß ein Einfluß für polymere Schaumsysteme erst ab Stauchungen von mehr als 25% nachweisbar ist.

Neben der zellularen Struktur und dem Grundwerkstoff hat insbesondere die Rohdichte, ρ_s , eines Schaumstoffes einen großen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften. Untersuchungen in [Kn75] und [Re77] zeigen deutlich, daß bei PVC- und PUR-Hartschaumstoffen mit steigender Rohdichte die Steifigkeit zunimmt. In [GA97] sind zur Beurteilung des Rohdichteinflusses bei geschlossenzelligen Schaumstoffen halbempirische Zusammenhänge zwischen der Rohdichte und ausgewählten mechanischen Kenngrößen hergeleitet. Auf der Basis dieser Ansätze kann der Einfluß der Rohdichte auf den Elastizitätsmodul wie folgt formuliert werden:

$$\frac{E_s}{E_p} = C_1 \left((1 - \phi) \frac{\rho_s}{\rho_p} \right)^2 + C_1' \phi \left(\frac{\rho_s}{\rho_p} \right). \quad (3.1)$$

Innerhalb des inelastischen Deformationsbereichs werden unabhängig von dem Schaumsystem bei makroskopischer Betrachtung erhebliche Unterschiede des Materialverhaltens in Abhängigkeit der Belastungsart festgestellt. Das Verhalten auf mikroskopischer Ebene, das nach

[TZSGA89] und [GA97] durch eine lokale plastische Deformation der Zellstruktur bei zäharten oder ein lokales Bruchversagen der Struktur bei sprödharten Polymerschaumstoffen gekennzeichnet ist, kann dabei durchaus vergleichbar sein. Bei zunehmender, einachsiger Druckbelastung entsteht bei makroskopischer Betrachtung aufgrund dieser Überlagerung des elastischen Materialverhaltens mit inelastischen Anteilen ein ausgeprägtes Druckspannungsplateau. Der Beginn des inelastischen Deformationsbereichs ist durch eine charakteristische Grenzspannung beschrieben, die in Abhängigkeit des mikroskopischen Verhaltens nach [GA97] als Fließ-, bzw. als Bruchfestigkeit bezeichnet wird. Ähnlich, wie der Elastizitätsmodul, ist auch die Grenzspannung durch die Rohdichte des Schaumstoffes beeinflusst [Kn75], [Re77]. Die Abhängigkeit der Grenzspannung von der Rohdichte kann durch den in [GA97] formulierten, halbempirischen Zusammenhang beschrieben werden:

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_p} = C_2 \left((1 - \varphi) \frac{\rho_s}{\rho_p} \right)^{\frac{3}{2}} + C_2' \varphi \left(\frac{\rho_s}{\rho_p} \right). \quad (3.2)$$

Bei einer Darstellung der Zusammenhänge nach Gleichung 3.1 und 3.2 für den polymeren Hartschaumstoff Bayfill® EA muß der geringe Anteil $\varphi = 0,03$ des Zellmaterials an den Zellmembranen des betrachteten Polyurethansystems berücksichtigt werden. Die mechanischen Kennwerte des Grundwerkstoffes, $E_p \sim 1600 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_p \sim 127 \text{ N/mm}^2$, sind für einen spröden Polyurethanschaumstoff [GA97] entnommen. Die weiteren Konstanten werden mit Hilfe von quasistatischen einachsigen Druckversuchen ermittelt. Die Darstellungen in Bild 3.6 zeigen den deutlichen Einfluß der Rohdichte. Für das betrachtete Schaumsystem ergibt sich bei einer Erhöhung der Dichte um 10 % eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls um ca. 20 % und eine Erhöhung der Fließgrenze um ca. 15 %.

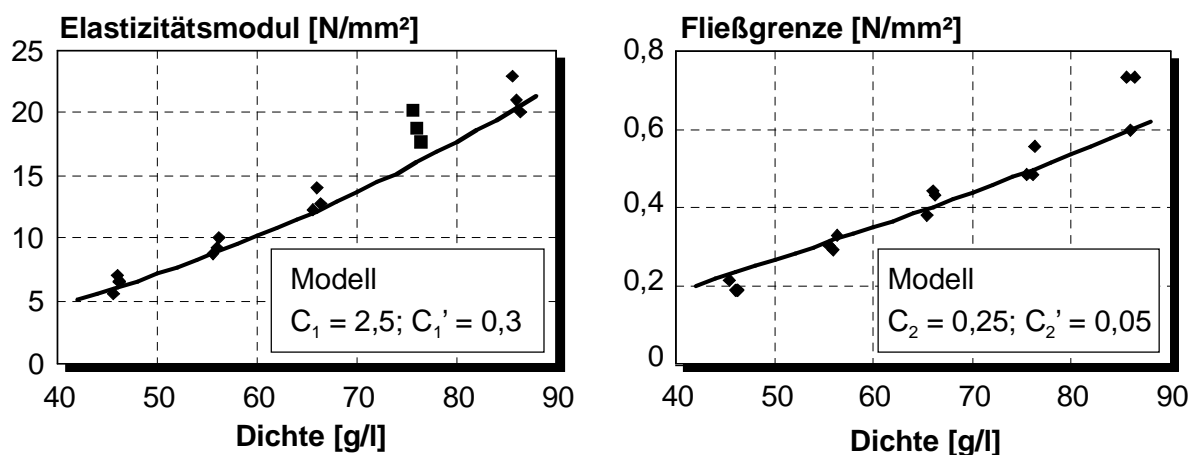


Bild 3.6: Rohdichteeinfluß am Beispiel Bayfill® EA

Das unter einachsiger Druckbelastung mit dem Erreichen der inelastischen Grenzspannung beginnende, nahezu konstante Druckspannungsplateau kann nach [KF91] wie folgt begründet werden. Bei sprödharten Schaumstoffen mit niedriger Dichte versagt die Zellstruktur durch Stabilitätsversagen der Zellstege, was zu erheblichen Schwankungen des Spannungs-Stauchungsverlaufs führt. Kleinporige Schaumstoffe verhalten sich unkritischer. Hier wird der Effekt auf eine Vielzahl von Zellen verschmiert. Bei grobzelligen zäharten Schaumstoffen wird der überlagerte Anteil eines elastischen Biegekollaps festgestellt. Die umliegenden Zellen werden schrittweise beeinflusst, so daß ein ausgeprägtes Spannungsplateau entsteht. Sprödharte Schaumstoffe mit großer Dichte neigen zu einem bröselartigen Verhalten, bei dem große Bruchstücke aus dem Probekörper brechen. Teilweise kommt es auch zu einer faßförmigen Aufweitung der Proben senkrecht zur Belastungsrichtung. Das Verhalten des Schaumstoffes innerhalb des Plateaubereichs ist im Gegensatz zu dem elastischen Deformationsbereich neben der Zellstruktur durch das Verhalten der Luft innerhalb der Schaumstoffzellen beeinflusst. Verschiedene Untersuchungen an geschlossen- und offenzelligen Schaumstoffen haben gezeigt, daß offenzellige Schaumstoffe häufig nahezu keine Steigung innerhalb des Plateaubereichs aufweisen, während die Druckspannung bei geschlossenzelligen Schaumstoffen auch innerhalb des Plateaubereichs zunimmt [TZSGA89], [GA97]. Dieser Anstieg wird bei Schaumstoffen mit geringer Dichte durch die eingeschlossene Luft dominiert [GA97]. Untersuchungen an mischzelligen Polyurethanen haben gezeigt, daß es bei niedrigdichten Schaumstoffen mit sehr dünnen Zellmembranen zu einem Aufplatzen der geschlossenen Zellen kommt [RMB94]. Bei offenzelligen Schaumstoffen beeinflusst das Entweichen der Luft die Dehnratenabhängigkeit des Materialverhaltens [SMCL94], [GA97]. Der Einfluß der Luft auf das Energieabsorptionsvermögen ist allerdings gering. Die Energieabsorption erfolgt abhängig von dem Schaumsystem nahezu vollständig durch die lokale plastische Deformation, bzw. durch das lokale Versagen der Zellstruktur und die Reibung zwischen den entstandenen Bruchstücken [SMCL94]. Die Rohdichte des Schaumstoffes hat dabei einen ähnlichen Einfluß auf die mittlere Plateauspannung, wie der bereits beschriebene Einfluß auf den Elastizitätsmodul und die Grenzspannung. Über die Rohdichte wird somit in erheblichem Maß das Verhalten eines Schaumstoffbauteils mit großem Energieabsorptionvermögen definiert. Dementsprechend beeinflusst auch der Fertigungsprozeß die Eigenschaften eines Schaumstoffbauteils erheblich, da es, bedingt durch die Fertigung, zu Dichtestreunungen zwischen einzelnen Bauteilen und zu der erwähnten inhomogenen Dichteverteilung innerhalb eines Bauteils kommen kann [Kn75], [AH85], [Mu99]. Eine richtungsabhängige Variation des für das Energieabsorptionsvermögen eines Schaumstoffes charakteristischen Druckspannungsplateaus aufgrund der Formanisotropie wird nicht festgestellt.

Die experimentell festgestellte Querdehnung innerhalb des Plateaubereichs bei großen Deformationen unter einachsiger Druckbelastung ist bei den polymeren Hartschaumstoffen sehr

gering [ZKLYN98], [YS87], [GA97]. Eine numerische Untersuchung des Querdehnungsverhaltens von zweidimensionalen, elastischen Wabenstrukturen über den elastischen Kollaps hinaus führt zu dem gleichen Ergebnis [Bu91], verdeutlicht durch den in Bild 3.7 dargestellten Verlauf der Querzahl über der Stauchung.

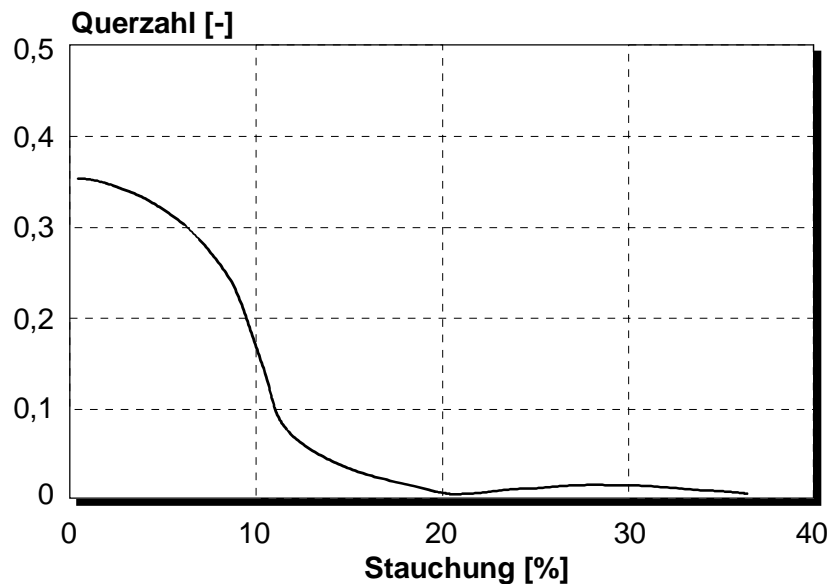


Bild 3.7: Verlauf der Querzahl von elastischen Wabenstrukturen [Bu91]

Mit zunehmender Druckbelastung kommt es zu der erwähnten Verdichtung der zellularen Struktur. Gegenüberliegende Zellwände, bzw. -stäbe, berühren sich und es folgt eine lokale Kompression des massiven Grundwerkstoffes. Die Spannung steigt mit geringfügig zunehmender Stauchung erheblich an. Eine einfache modellhafte Annahme läßt vermuten, daß die Verdichtung bei einer Stauchung von $(1 - \rho_s / \rho_p)$, bei der die gesamte Luft aus den Schaumzellen verdrängt wurde, beginnt. In der Realität folgt der Verdichtungsbereich übergangslos aus dem Plateaubereich, wodurch die Festlegung des Verdichtungsbeginns erschwert ist.

Wie oben erwähnt, wird unter einachsiger Zugbelastung nach dem Überschreiten der Grenzspannung ein von dem Verhalten unter Druckbelastung abweichendes Materialverhalten festgestellt [Re77], [GA97], [ZKLYN98]. Im Vergleich zu dem in Bild 3.5 dargestellten, repräsentativen Druckspannungs-Stauchungsverlauf entspricht das Verhalten von unterschiedlichen polymeren Hartschaumstoffen bei einachsiger Zugbelastung den in Bild 3.8 dargestellten Verläufen. Auch unter Zugbelastung zeigt sich der deutliche Einfluß der Rohdichte auf das Materialverhalten.

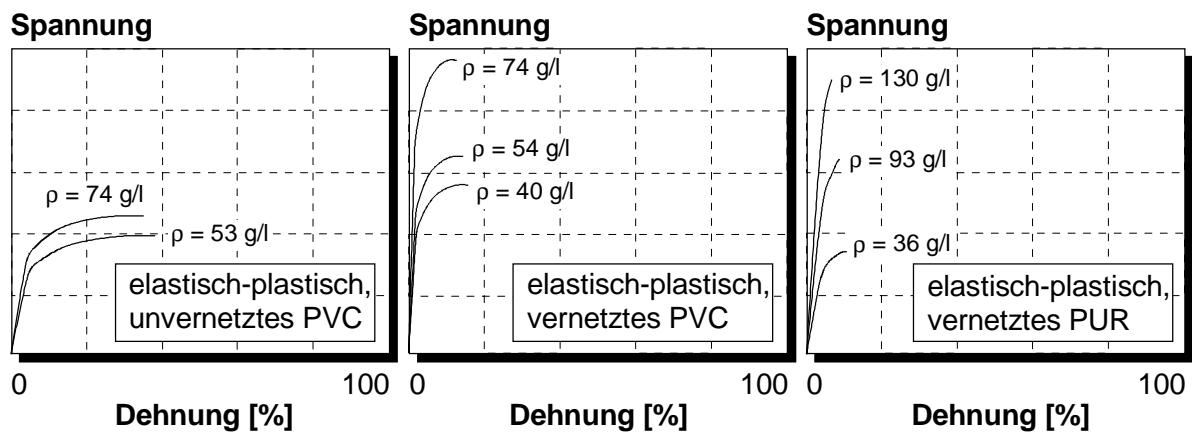


Bild 3.8: Verhalten von Hartschaumstoffen unter Zugbelastung [Re77]

Das Verhalten von polymeren Hartschaumstoffen unter reiner Schubbelastung über den elastischen Deformationsbereich hinaus wurde bisher nur in wenigen Untersuchungen betrachtet, wobei erhebliche Unterschiede zwischen dem Druck- bzw. Zugverhalten von Schaumstoffen und dem Verhalten unter Schub ermittelt wurden. In [ZKLYN98] wird beispielsweise für PP- und PUR-Schaumstoffe unter Schubbelastung eine Ausrichtung der Schaumstoffzellen in Richtung der maximalen Dehnung festgestellt. Andere Untersuchungen weisen ein Versagen von PVC- und PUR-Hartschaumstoffen durch Knicken von Zellstegen nach [Kn75].

Über das bisher betrachtete, einachsige Verhalten hinausgehend muß für eine weiterführende Materialcharakterisierung untersucht werden, welches Materialverhalten Schaumstoffe unter einer mehrachsigen Belastung zeigen. Für verschiedene Aluminiumschaumstoffe wurde eine elliptische Gestalt der Fließgrenze innerhalb des ebenen σ_I - σ_{II} -Spannungsraums nachgewiesen [DF98], [GMG98]. Bei den polymeren Schaumstoffen wird für verschiedene zäh-, bzw. sprödharte Polyurethan- und Polystyrolschaumstoffe eine rechteckige Fließ-, bzw. Bruchgrenze nachgewiesen [Za73]. Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Verhalten von massiven Werkstoffen und einem Polymerschaumstoff ist das Materialverhalten unter dreiachsiger Belastung. Bei einer Vielzahl von Werkstoffen ist das inelastische Materialverhalten im wesentlichen von den deviatorischen Belastungsanteilen dominiert. Im Gegensatz dazu ist das Materialverhalten von aufgeschäumten Polymeren durch eine enge Kopplung deviatorischer und hydrostatischer Einflüsse gekennzeichnet [DH69], [NMK87]. Der Einfluß dieser Kopplung auf die Bruchfestigkeit ist am Beispiel eines sogenannten syntaktischen Schaumstoffes in Bild 3.9 dargestellt.

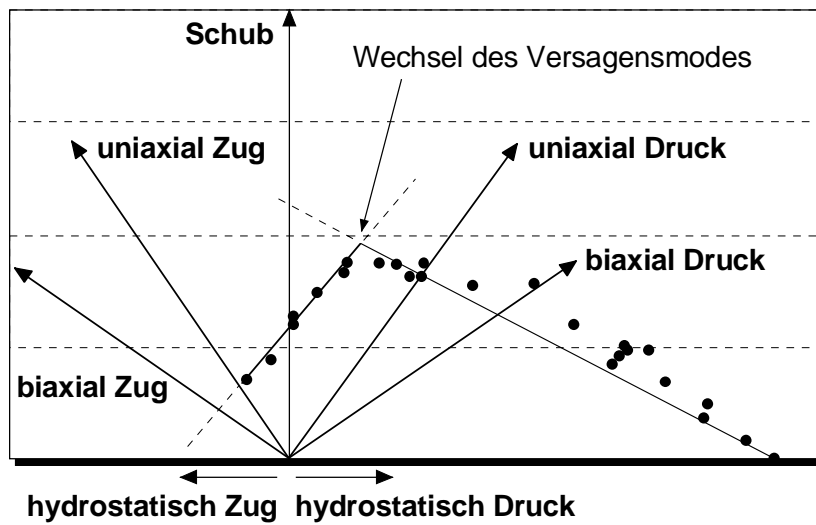


Bild 3.9: Die Bruchfestigkeit von syntaktischen Schaumstoffen [DH69]

Das Verhalten von polymeren Hartschaumstoffen ist mit dem in Bild 3.9 gezeigten Verhalten vergleichbar [ZKLYN98], wobei üblicherweise die sogenannte Fließgrenze als mechanisches Kriterium verwendet wird. Die Übertragung des Verhaltens in den Hauptspannungsraum führt dann, im Gegensatz zu üblichen Fließkriterien, zu einer geschlossenen Fließfläche. In Bild 3.10 ist ein solches Beispiel einer Fließgrenze im Vergleich zu dem Fließkriterium nach von Mises dargestellt.

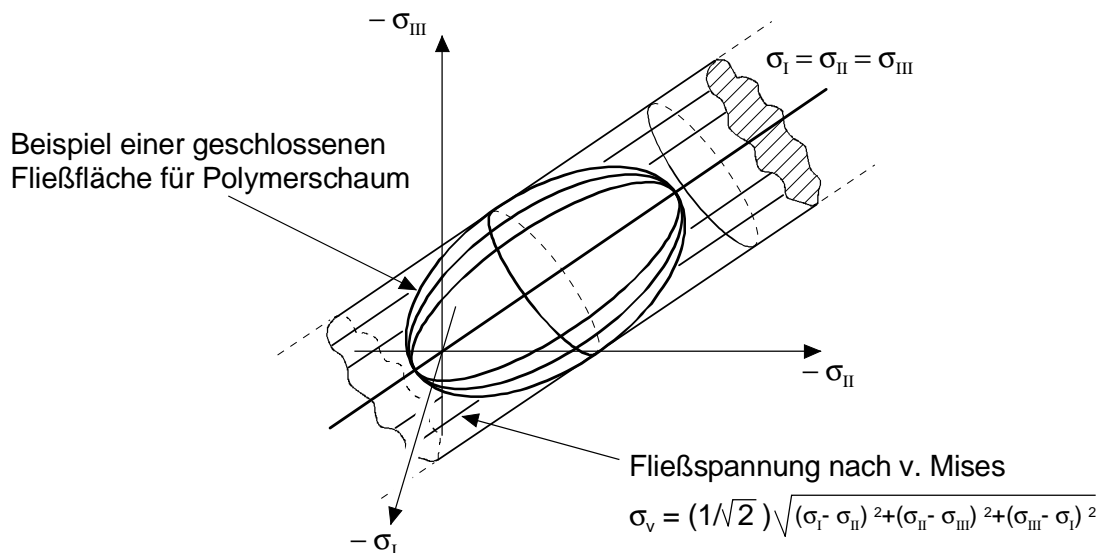


Bild 3.10: Beispiel einer geschlossenen Fließfläche innerhalb des Hauptspannungsraums im Vergleich mit dem Fließkriterium nach von Mises

3.1.1.6 Mechanische Eigenschaften: Ergänzungen für die Fahrzeugcrashberechnung

Mit den bisherigen Erläuterungen wurden die grundlegenden mechanischen Eigenschaften von polymeren Hartschaumstoffen und der Einfluß von werkstoffspezifischen Kennwerten zusammengefaßt. Darüber hinaus erfordert die Auslegung eines Schaumstoffbauteils mit hohem Energieabsorptionsvermögen die Berücksichtigung von Randbedingungen, die mit dem Einsatzbereich der Schaumstoffe verbunden und somit für den Fahrzeugcrash charakteristisch sind. Schwerpunkt der Erläuterungen ist deshalb die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von den entsprechend der Literatur für eine Crashauslegung relevanten Parametern:

- Belastungsgeschwindigkeit,
- Temperatur,
- Luftfeuchtigkeit,
- Bauteil- und Impaktorgeometrie.

Der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf die mechanischen Kennwerte, insbesondere auf die mittlere Plateauspannung, ist für die Crashauslegung von energieabsorbierenden Schaumstoffbauteilen von sehr großer Bedeutung. Die verfügbare Literatur zusammenfassend, nimmt die Festigkeit von Polymerschaumstoffen mit der Belastungsgeschwindigkeit zu. Die mechanischen Kennwerte sind aufgrund der viskosen Eigenschaften des polymeren Grundwerkstoffes und aufgrund von Interaktionen zwischen der eingeschlossenen oder entweichenden Luft und der Zellstruktur dehnraten-, also geschwindigkeitsabhängig [TZSGA89], [RMB94], [GA97], [CZLS98]. In [GA97] werden die sog. 'innere' Dehnratenabhängigkeit der Zellstruktur und der für Schaumstoffe charakteristische Einfluß durch das Verhalten der Luft bei Druckbelastung unter Variation der Belastungsgeschwindigkeit unterschieden. Der Einfluß der Zellstruktur ist ausführlich in [GA97] erläutert. Hinsichtlich eines Lufteinflusses wird das Verhalten von offen- und geschlossenzelligen Schaumstoffen unterschieden [RMB94], [GA97]. Bei offenzelligen Schaumstoffen kann die Luft aus den einzelnen Zellen entweichen, wobei dies, bedingt durch die Porosität der zellularen Struktur, mit Reibungsverlusten verbunden ist. Für industriell genutzte, offenzellige Polymerschaumstoffe kann der Luftbeitrag vernachlässigt werden [GA97]. Bei geschlossenzelligen Schaumstoffen werden zwei mögliche Zustände über der Deformation unterschieden. Bei einer ausreichenden Festigkeit der Zellmembranen wird über dem gesamten Deformationsbereich unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit der Luftdruck innerhalb der Zellen aufgebaut und die Luft kann nicht entweichen. In diesem Fall leistet die Luft keinen geschwindigkeitsabhängigen Beitrag [GA97]. Kommt es im Gegensatz hierzu bei hohen Kompressionen zu einem Aufplatzen der

Zellmembranen, so hat die Luft indirekt einen Anteil an der Dehnratenabhängigkeit des Materialverhaltens [RMB94]. Die Stauchung, bei der es durch das Aufplatzen der Zellmembranen zu einem Verlust des Luftdrucks kommt, ist, bedingt durch die Viskosität des Grundwerkstoffes, dehnratenabhängig.

Neben dem Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit muß für die Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von polymeren Hartschaumstoffen der Einfluß des für automobiler Anwendungen charakteristischen Betriebstemperaturbereichs von -20°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ berücksichtigt werden. Das temperaturabhängige Verhalten der polymeren Schaumstoffe ist mit dem erläuterten Verhalten der jeweiligen Grundwerkstoffe vergleichbar [GA97]. Die Festigkeit von polymeren Schaumstoffen nimmt mit zunehmender Temperatur ab, wobei dieser Einfluß bei Schaumsystemen auf Thermoplastbasis größer ist. Darüber hinaus ist die Variation des Materialverhaltens in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit zu beachten, wobei die im Automobilbau eingesetzten polymeren Hartschaumstoffe nur gering feuchtigkeitsbeeinflusst sind [Hü96].

Eine Abhängigkeit des Materialverhaltens von der Proben- und der Impaktorgeometrie ist durch den zellularen Aufbau der Schaumstoffe begründet. Die Geometrieabhängigkeit des Materialverhaltens beschreibt einen nachweisbaren Wechsel von Deformationsmechanismen der Zellstruktur, wobei in der Literatur hierzu nur wenige Untersuchungen verfügbar sind. Etwas ausführlicher wird die Problematik in [GA97] anhand von Eindruckversuchen unter Variation der Impaktorgrundfläche behandelt. Untersucht werden niedrigdichte offenzellige, sprödharte Metallschaumstoffe. Die Impaktorgrundfläche ist dabei deutlich größer als der mittlere Zelldurchmesser. Im Rahmen der Untersuchung wird eine Abhängigkeit nachgewiesen. Darüber hinaus wird in [CZCCL96] für ein zähhartes Polyurethansystem nachgewiesen, daß die Probengröße bei einer Abmessung, die deutlich über dem mittleren Zelldurchmesser liegt, keinen Einfluß auf die charakteristischen Eigenschaften hat. Ein Einfluß der beiden Parameter kann aber aufgrund der nur geringen, verfügbaren Erkenntnisse nicht ausgeschlossen werden.

3.1.1.7 Eigenschaftsvergleich von polymeren Hartschaumstoffen

Abschließend werden im folgenden die Ergebnisse von Untersuchungen an verschiedenen, am IVW im Umfeld der vorliegenden Arbeit betrachteten, Schaumstoffen zusammengefaßt. Im Mittelpunkt steht der Einfluß der

- Rohdichte,
- Belastungsgeschwindigkeit,
- Temperatur

auf die mittlere Plateauspannung. Hierbei werden verschiedene polymere Hartschaumstoffe von unterschiedlichen Rohstofflieferanten unterschieden. Bei den Schaumsystemen handelt es sich um Polyurethanschaumstoffe der Bayer AG und der Elastogran GmbH, um verschiedene Polypropylenpartikelschaumstoffe und um Noryl[®] EF, ein Partikelschaumstoff auf Polystyrolbasis von GE Plastics.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Bildern 3.11 bis 3.13 dargestellt. Die dynamischen Versuche sind unter vollständiger Verzögerung des Impaktors durchgeführt, so daß es sich bei den angegebenen Geschwindigkeiten um die Anfangsgeschwindigkeiten handelt. Die Bilder verdeutlichen den erheblichen Dichte-, Temperatur- und Geschwindigkeitseinfluß. Dabei zeigen die dargestellten PUR-Schaumstoffe einen relativ großen Einfluß der Geschwindigkeit bei einem geringen Einfluß der Temperatur auf die mittlere Plateauspannung. Das Schaumsystem Noryl[®] EF weist nur eine geringe Geschwindigkeits- bei einer etwas größeren Temperaturabhängigkeit auf, während die Schaumsysteme auf EPP-Basis die jeweils größte Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit zeigen.

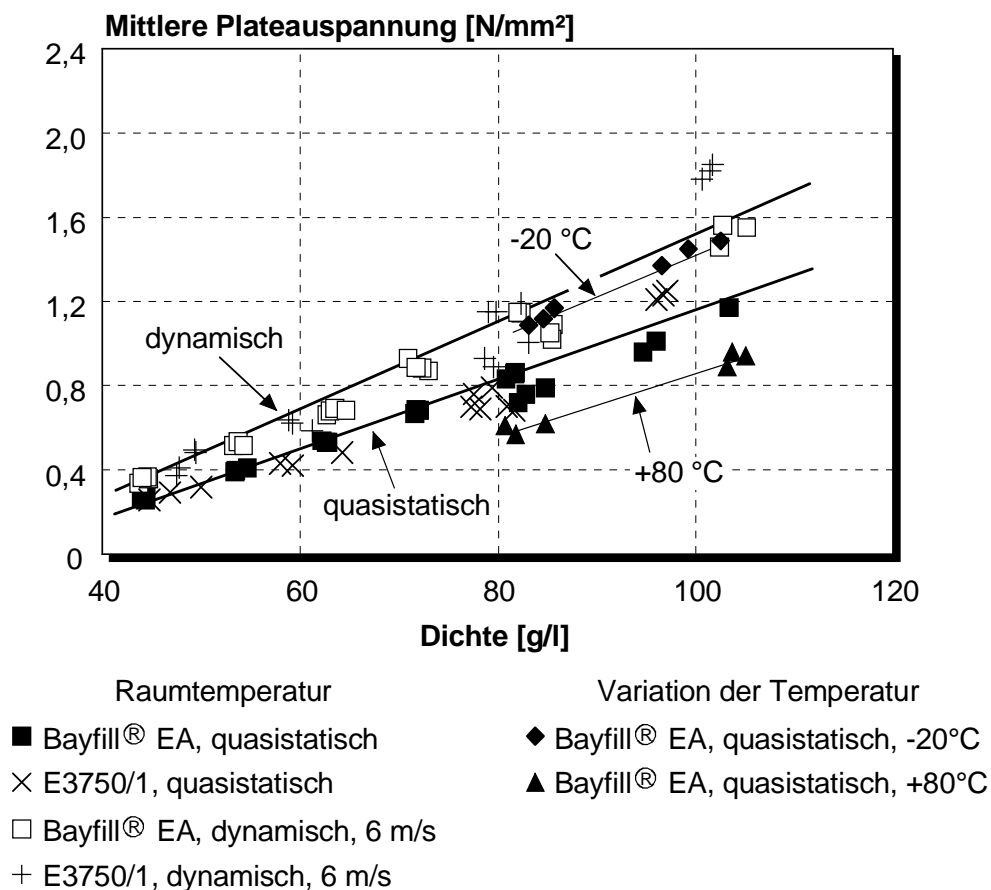


Bild 3.11: Variation der mittleren Plateauspannung für ausgewählte PUR-Schaumstoffe

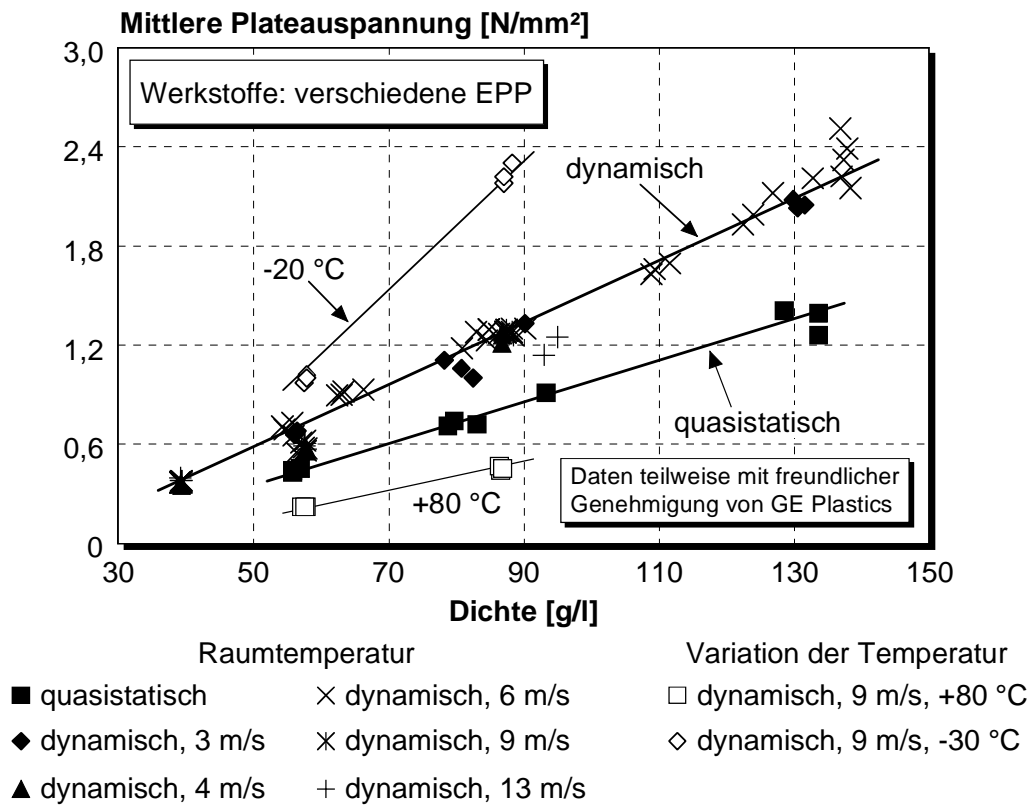


Bild 3.12: Variation der mittleren Plateauspannung für verschiedene EPP-Schaumstoffe

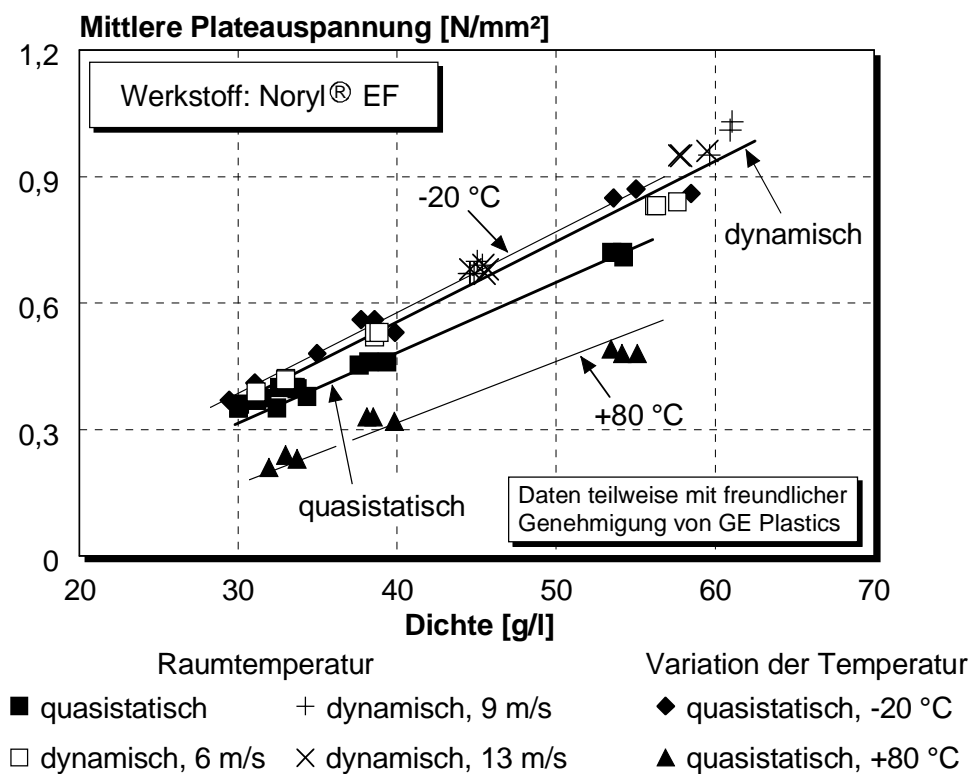


Bild 3.13: Variation der mittleren Plateauspannung für Noryl[®] EF

Neben den bisherigen Informationen zu den Eigenschaften der polymeren Hartschaumstoffe müssen innerhalb der Informationsbeschaffung die verfügbaren Erkenntnisse zu dem Einsatzbereich, zu möglichen Prüfverfahren für eine weiterführende Materialcharakterisierung und zu den existierenden Materialmodellen gesammelt werden, die für eine Abbildung des festgestellten Materialverhaltens in Frage kommen.

3.1.2 Definition von Einsatzrandbedingungen

Ausgehend von den in Bild 3.1 dargestellten Einsatzbereichen von Polymerschaumstoffen führt eine Einschränkung auf die Gruppe der Hartschaumstoffe mit großem Energieabsorptionsvermögen zu den folgenden Bereichen innerhalb des Fahrzeugs:

- Dachhimmelverkleidung,
- Instrumententafel,
- Seiten- und Türverkleidung,
- Stoßfänger.

In der Dachhimmelverkleidung werden die Schaumstoffe für den Kopfschutz, in der Instrumententafel für den Knieschutz, in der Seiten- und Türverkleidung für den Becken- und den Rippenschutz der Fahrzeuginsassen verwendet. Im Stoßfänger dienen die Schaumstoffe dem Fahrzeugschutz. In allen Einsatzbereichen zum Insassenschutz werden polymere Hartschaumstoffe eingesetzt, wenn aufgrund des geringen Bauraums die Anforderungen an das Absorptionsvermögen der eingesetzten Materialien und Bauweisen besonders hoch sind und eine gleichmäßige Verteilung von lokal eingeleiteten Lasten auf tragende Strukturbauteile erfolgen muß. Ein Vergleich der Einsatzbereiche zeigt, daß für eine ausführliche Betrachtung folgende Randbedingungen zu berücksichtigen sind:

- Wesentliche Belastung: Mehrachsiger Druck,
- Variation der Probengeometrie und der Krafteinleitung,
- Belastungsgeschwindigkeit: bis $v_0 = 50 \text{ km/h}$,
- Einsatztemperatur: $-20^\circ\text{C} \leq T \leq +80^\circ\text{C}$,
- Luftfeuchtigkeit.

In Bild 3.14 sind einige Schaumstoffbauteile für den Insassenschutz aus verschiedenen Einsatzbereichen dargestellt. Eine ausführliche Zusammenfassung der Einsatzbereiche von polymeren

Hartschaumstoffen unter Berücksichtigung des jeweils spezifischen Anforderungsprofils erfolgt in Tabelle A1.2 des Anhangs A1.

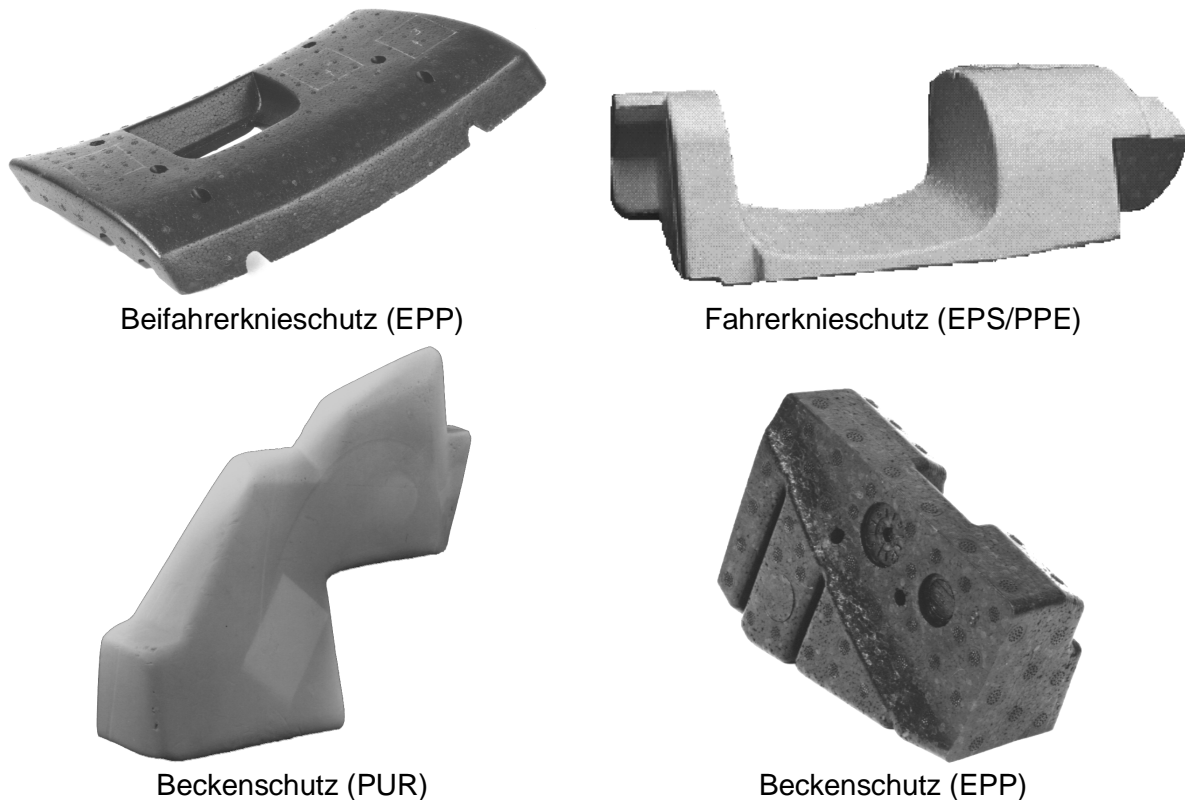


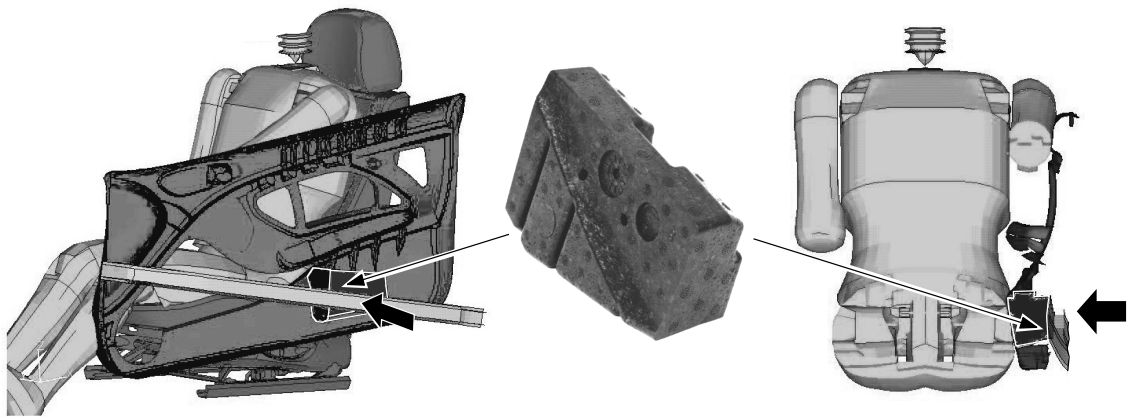
Bild 3.14: Schaumstoffbauteile aus verschiedenen Einsatzbereichen des Fahrzeuginnenraums

Unabhängig von dem jeweiligen Einsatzbereich sind die Schaumstoffbauteile nahezu über der gesamten Fläche gestützt. Die Krafteinleitung und –weiterleitung an tragende Strukturbauteile ist dabei variabel, da die Abstützung im Vergleich zu dem Schaumstoff sehr steif sein kann, wie beispielsweise bei der Abstützung an einem Stoßfängerträger, oder nachgiebig, wie bei der Abstützung durch einen Handschuhfachkasten. Die Wirkkette ist deshalb für eine Auslegung von großer Bedeutung und die Abbildung des vollständigen Lastpfads erforderlich. Hierbei kann das Entlastungsverhalten meist vernachlässigt werden, da die Erfahrung zeigt, daß eine elastische Rückfederung in der Wirkkette unabhängig von dem jeweiligen Einsatzbereich durch die tragenden Strukturbauteile dominiert ist.

Zur Verdeutlichung der Variation der Krafteinleitung, bzw. der Impaktorgeometrie, sind in Bild 3.15 zwei Bereiche dargestellt, ein Beckenschutz für den Seitenaufprall und ein Knieschutz für den Frontalaufprall. Bei dem Beckenschutz erfolgt die Belastung des Schaumstoffes über die Türverkleidung auf der gesamten Bauteilfläche. Der Beckenschutz wird unter einer geringen, exakt definierten Energieabsorption hauptsächlich zu dem Anchieben des Beckens eingesetzt, um große Relativbewegungen zwischen Becken und Oberkörper zu vermeiden. Der Aufprall des

Fahrerknies auf dem Knieschutz erfolgt direkt an dem Schaumstoffbauteil und entspricht, bedingt durch die Geometrie des Knies, einer sehr lokalen Lasteinleitung. Der Knieschutz dient dabei der Energieabsorption und der Verteilung der lokal eingeleiteten Last auf tragende Bauteile, und vermeidet eine große Belastung des Oberschenkels. Aufgrund der nachgiebigen Lagerung ist der Belastung des Schaumstoffbauteils durch einen mehrachsigen Druck eine Biegung überlagert, bei der aufgrund der Anbindung Zug- und Schubanteile auftreten.

Beckenschutz (EPP)



Fahrerknieschutz (EPS/PPE)

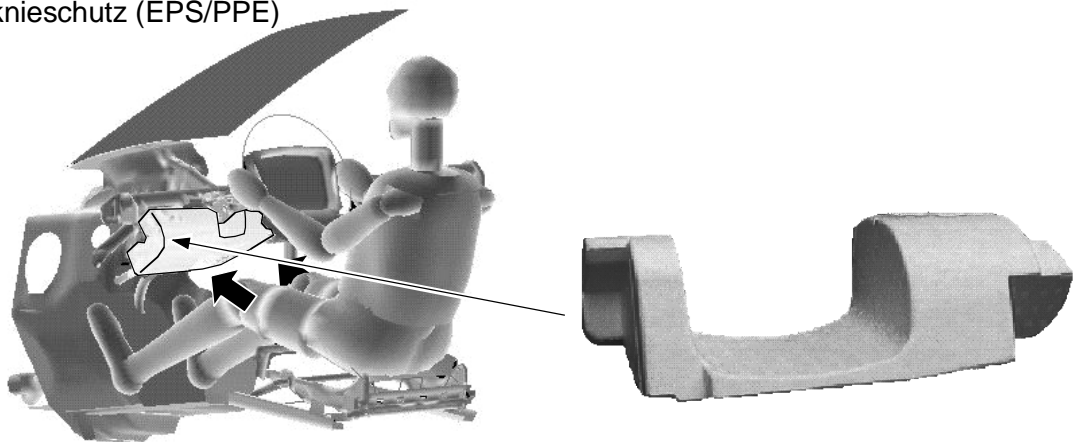


Bild 3.15: Einsatzbereiche von polymeren Hartschaumstoffen mit hohem Energieabsorptionsvermögen am Beispiel eines Becken- und eines Knieschutzes

Das Beispiel des Fahrerknieschutzes verdeutlicht, daß sich, bedingt durch die Gestalt des für energieabsorbierende Bauteile verfügbaren Bauraums und die Lasteinleitung, komplexe Spannungszustände innerhalb von Schaumstoffkomponenten bilden. Insbesondere bei sprödharten Schaumstoffen kann dies durch überlagerte Zug- und Schubanteile zu der Entstehung von Rissen und zu dem Herausbrechen von Teilen aus dem Bauteil führen, wodurch das Energieabsorptionsvermögen des Bauteils erheblich beeinflußt wird.

3.1.3 Klassifizierung der polymeren Hartschaumstoffe

Eine Klassifizierung der polymeren Hartschaumstoffe mit hohem Energieabsorptionsvermögen erfolgt unter der Berücksichtigung von verschiedenen Kriterien. Die Kriterien basieren auf den Kenntnissen des mikroskopischen Aufbaus und des mechanischen Verhaltens der betrachteten Schaumstoffe. Ausgehend von dieser Klassifizierung muß eine Einteilung der Schaumstoffe in verschiedene Werkstoffgruppen erfolgen, die sich deutlich voneinander abgrenzen. Das Materialverhalten der Werkstoffe aus jeder dieser Gruppen muß mit Abschluß des Integrationsprozesses qualitativ abgesichert simuliert werden können. Um den erforderlichen Aufwand zu reduzieren, muß aus den tatsächlich eingesetzten Schaumsystemen eine möglichst geringe Anzahl von unterschiedlichen Klassen hervorgehen, ohne daß wesentliche Materialeigenschaften vernachlässigt werden.

Im Vorfeld der Klassifizierung werden die relevanten Schaumstoffe auf die tatsächlich eingesetzten Systeme eingeschränkt. Die im Automobilbau eingesetzten, polymeren Hartschaumstoffe können auf verschiedene Polyurethansysteme, Systeme aus expandiertem Polypropylen und Systeme aus einem Compound aus expandiertem Polystyrol und Polyphenylenether reduziert werden. Grund für den Einsatz dieser Werkstoffe ist:

- das hohe Festigkeits-Gewichtsverhältnis,
- das große Energieabsorptionsvermögen,
- die geringen Werkstoff- und Fertigungskosten,
- die Erfüllung aller automobilspezifischen Anforderungen (Prozeßsicherheit, Brandverhalten, Emissionen, etc.).

Im direkten Vergleich gibt es allgemeine Unterschiede zwischen den verschiedenen Schaumsystemen. Beispielsweise ist das Recycling der duroplastischen PUR-Schaumstoffe mit einem wirtschaftlich höheren Aufwand verbunden, als das Recycling der thermoplastischen EPS/PPE- und EPP-Schaumstoffe. In der Tabelle A1.1 in Anhang A1 sind einige dieser charakteristischen Daten zusammengefaßt.

Die Klassifizierung dieser Schaumstoffe muß unter der Berücksichtigung von crashrelevanten Eigenschaften erfolgen. Hierbei bietet sich aufgrund der im Vorfeld erläuterten Grundlagen eine Definition von verschiedenen **qualitativen** und **quantitativen Kriterien** an. Die Einteilung der Schaumstoffe in verschiedene Gruppen erfolgt auf der Basis der qualitativen Kriterien. In einer späteren Auswahl von Materialien für die Durchführung der Materialcharakterisierung sind auch die quantitativen Kriterien berücksichtigt.

Für die Klassifizierung der beschriebenen und von vergleichbaren Schaumsystemen werden folgende Kriterien betrachtet:

i.) Qualitative Kriterien

- Schaumstoffhärte (zähhart, sprödhart),
- Mikrostruktur (Zellform und -größe, Partikel- oder Strukturschaum),
- Grundwerkstoff und Werkstoffgruppe (Duroplast, Thermoplast),
- Fertigungsprozeß (Aufschäumvorgang chemisch, physikalisch),
- Rückstellvermögen (hoch, gering).

ii.) Quantitative Kriterien

- Rohdichte, bzw. mittlere Plateauspannung,
- Energieanteil der Rückverformung.

Die Zusammenfassung der mechanischen Eigenschaften hat gezeigt, daß bei zähhartem Schaumstoffen ein elastisch-plastisches und bei sprödharten ein elastisch-sprödes Materialverhalten zu erwarten ist. Eine Klassifizierung der Schaumstoffe entsprechend ihrer Härte ist deshalb zweckmäßig. Gleiches gilt für die Berücksichtigung der Mikrostruktur. Hier muß allerdings aufgrund des erheblich variierenden Aufbaus der Zellstruktur differenziert werden. Als wesentliche Parameter werden für die Klassifizierung eine Unterteilung in offen- und geschlossenzellige Schaumstoffe und in Struktur- und Partikelschaumstoffe berücksichtigt. Eine Klassifizierung auf der Basis der Grundwerkstoffe ist aufgrund der Vielfalt der eingesetzten Polymere uneffizient. Die bisher erarbeiteten Grundlagen zeigen, daß eine Klassifizierung entsprechend der Werkstoffgruppe, wie den Duroplasten oder den Thermoplasten, zielführend ist.

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften bedingt der Fertigungsprozeß im wesentlichen Streuungen in Form von Dichteschwankungen, die für eine spätere Beurteilung des Verhaltens von Schaumstoffbauteilen relevant werden können und eine Formanisotropie, deren Einfluß auf das Energieabsorptionsvermögen als gering eingestuft wird. Ein weiterer Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften über die bisherigen Kriterien hinaus kann nicht festgestellt werden. Eine Klassifizierung nach dem Fertigungsverfahren wird deshalb ausgeschlossen. Bei der Auswertung von Versuchen ist das Kriterium zu berücksichtigen, um Verfälschungen der Ergebnisse durch Dichtestreuungen zu vermeiden.

Die Interpretation des Rückstellvermögens von Schaumstoffen ist für eine Klassifizierung nach den mechanischen Eigenschaften schwierig. Dies ist durch die erhebliche Schädigung der zellularen Struktur bei großen Deformationen begründet. Das Entlastungsverhalten wird mit dem Ziel einer pragmatischen Beschreibung von wesentlichen Materialeigenschaften im

folgenden nur eingeschränkt berücksichtigt. Auf eine Klassifizierung nach diesem Parameter wird deshalb verzichtet. Somit ergibt sich die in Tabelle 3.1 dargestellte Matrix zur Einteilung von den im Automobilbau zum Abbau von kinetischer Energie eingesetzten, polymeren Hartschaumstoffen.

Werkstoff	Härte		Mikrostruktur				Werkstoffgruppe	
	zähhart	sprödhart	offen	geschlossen	Struktur-schaum	Partikel-schaum	Duroplast	Thermoplast
PUR	✓		✓	(✓)	✓		✓	
		✓	(✓)	✓	✓		✓	
EPS/PPE	✓			✓		✓		✓
EPP	✓			✓		✓		✓

Tabelle 3.1: Die Einteilung von polymeren Hartschaumstoffen mit hohem Energieabsorptionsvermögen im Serieneinsatz

Aus der in Tabelle 3.1 zusammengefaßten Einteilung folgen zwei generelle Klassen von Schaumstoffen, die für die Modellierung berücksichtigt werden müssen, die duroplastischen Schaumsysteme auf Polyurethanbasis und die thermoplastischen Partikelschaumsysteme. Aus beiden Klassen müssen für eine weiterführende Materialcharakterisierung repräsentative Schaumsysteme ausgewählt werden.

3.2 Projektziele

Mit den Projektzielen werden innerhalb der Planungsphase auf der Basis der bisher erarbeiteten Grundlagen die Zielsetzungen für den Integrationsprozeß definiert. Im Rahmen dieser Zieldefinition werden verschiedene Annahmen über das Materialverhalten der polymeren Hartschaumstoffe getroffen, die für eine Modellierung des Materialverhaltens zu berücksichtigen sind und hiervon abgeleitet die Anforderungen an das Materialmodell festgelegt.

Gesamtziel des Integrationsprozesses ist eine kurzfristige, prognosefähige Craschauslegung von Schaumstoffbauteilen mit Hilfe der Software-Simulation. Dieses Ziel kann nur erfüllt werden, wenn das Verhalten der eingesetzten Polymerschaumstoffe durch ein geeignetes Materialmodell qualitativ abgesichert beschrieben werden kann.

Um dieses Gesamtziel des Prozesses effizient zu erreichen, müssen durch den Integrationsprozeß im wesentlichen die folgenden Zielsetzungen erfüllt werden:

- Das Energieabsorptionsvermögen der polymeren Hartschaumstoffe und die Weiterleitung von Lasten an Fahrzeugkomponenten zur Abbildung des vollständigen Lastpfads muß durch die Software-Simulation abgebildet werden,
- aufgrund der Einsatzbereiche ist als Minimalziel eine ausreichende Abbildung des Materialverhaltens unter Druckbelastung erforderlich,
- dabei müssen für eine Abbildung des Materialverhaltens die Einsatzrandbedingungen berücksichtigt werden.

Die effiziente Umsetzung dieser Zielsetzungen wird durch die **Annahmen über das Materialverhalten** unterstützt. Schwerpunkt dieser Annahmen sind Vereinfachungen, die den erforderlichen Aufwand für die Modellierung der polymeren Hartschaumstoffe verringern. Unter besonderer Berücksichtigung der oben definierten Zielsetzungen und Einsatzrandbedingungen werden die für eine Integration der Schaumstoffe wesentlichen Annahmen basierend auf den erarbeiteten Grundlagen festgelegt:

- polymere Hartschaumstoffe können für die Modellierung als Kontinuum betrachtet werden, d.h. eine makroskopische Beschreibung ist ausreichend,
- das Materialverhalten von polymeren Hartschaumstoffen ist unsymmetrisch unter Zug- und Druckbelastung,
- unter deviatorischer und unter hydrostatischer Druckbelastung des Kontinuums wird bei großen Deformationen ein inelastisches Materialverhalten festgestellt,
- das makroskopisch festgestellte Verhalten ist dabei elastisch-plastisch, d.h. ein lokales Bruchversagen der Zellstruktur unter Druckbelastung muß nicht berücksichtigt werden,
- das Energieabsorptionsvermögen der Schaumstoffe ist nicht von der Proben- und der Impaktorgeometrie anhängig,
- das Energieabsorptionsvermögen ist von der Dichte des Schaumstoffes, von der Belastungsgeschwindigkeit und von der Einsatztemperatur abhängig.

Hieraus leiten sich die folgenden **Anforderungen an das Materialmodell** ab:

- das Materialmodell muß das Verhalten der zellularen Struktur durch eine kontinuumsmechanische Formulierung abbilden,
- der Einfluß der in den Schaumstoffzellen eingeschlossenen Luft kann vernachlässigt werden,
- das Materialverhalten der Zellstruktur ist durch eine Materialgleichung auf der Basis eines isotropen, elastisch-plastischen Ansatzes mit einer Abhängigkeit der Plastizität von deviatorischen und hydrostatischen Spannungsanteilen ausreichend beschrieben,
- das unsymmetrische Verhalten unter Zug- und Druckbelastung muß dabei berücksichtigt werden,
- die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Materialverhaltens ist durch das Materialmodell zu berücksichtigen,
- die Dichte- und die Temperaturabhängigkeit des Materialverhaltens wird jeweils durch unabhängige Materialparameter berücksichtigt.

3.3 Projektplan

Auf der Basis der Projektziele wird unter Berücksichtigung von Erfahrungen aus der bisherigen Integration von Materialien in die Fahrzeugcrashberechnung die weitere Vorgehensweise festgelegt.

3.3.1 Analyse der bisherigen Erfahrungen

Ausgehend von der Analyse der bisherigen Erfahrungen wird eine werkstoffspezifische Detaillierung der weiteren Prozeßschritte ermöglicht. Im Rahmen der Analyse sind für die Integration der polymeren Hartschaumstoffe folgende Themen zu berücksichtigen:

- Generelle Vorgehensweise,
- erforderliche Prüfungen zur Materialcharakterisierung,
- Materialmodellierung.

Die Erfahrungen mit der generellen Vorgehensweise sollten Grundlagen zu der Planung, der Durchführung, der Dokumentation und der Gestaltung einer möglichen Zusammenarbeit zwischen der Automobilindustrie, verschiedenen Prüfinstituten und Softwareherstellern umfassen. Da es sich bei der Integration der polymeren Hartschaumstoffe um das Pilotprojekt für den Integrationsprozeß handelt, liegen zu Beginn des Projekts nahezu keine Erfahrungen vor, auf die für eine effiziente und qualitativ abgesicherte Planung der weiteren Vorgehensweise zurückgegriffen werden kann. Die erforderlichen Kenntnisse müssen innerhalb des Projekts erarbeitet und entsprechend für Folgeprojekte dokumentiert werden.

Bei der Planung der Materialprüfungen kann auf Erfahrungen zurückgegriffen werden. So baut die im folgenden Kapitel beschriebene Materialcharakterisierung auf den experimentellen Untersuchungen des Energieabsorptionsvermögens von verschiedenen polymeren Hartschaumstoffen auf, die im Vorfeld der vorliegenden Arbeit an der IVW GmbH in Kaiserslautern durchgeführt wurden [KDZ96]. Innerhalb dieser Untersuchungen wurden Versuchsaufbauten für einachsige Druckversuche unter Variation der Belastungsgeschwindigkeit und -temperatur und für Schubversuche unter Variation der Betriebstemperatur entwickelt. Die Vorrichtungen ermöglichten insbesondere eine Untersuchung des Materialverhaltens bei den für eine Craschauslegung wesentlichen, großen Deformationen. Die Prüfvorrichtungen wurden an verschiedenen Schaumsystemen verifiziert.

Für die Materialmodellierung sind keine ausreichenden Erfahrungen verfügbar. Hier sind insbesondere die hohen Anforderungen für den produktiven Einsatz des Modells und deren Absicherung durch eine geeignete Validierung von großer Bedeutung. Die Vorgehensweise hierfür wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit festgelegt.

3.3.2 Festlegung der Vorgehensweise

Die Festlegung der weiteren Vorgehensweise beinhaltet die der Durchführung des Integrationsprozesses zugeordneten Teilschritte **Materialcharakterisierung** und **–modellierung**.

3.3.2.1 Materialcharakterisierung

Die Materialcharakterisierung wird mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen durchgeführt. Für die Versuchsdurchführung werden hierzu im Rahmen einer **Materialauswahl** repräsentative Schaumsysteme festgelegt. Anschließend erfolgt die Versuchsplanung.

Die **Auswahl** von repräsentativen Materialien geht auf die erläuterte Klassifizierung der polymeren Hartschaumstoffe zurück. Durch die Materialauswahl muß gewährleistet werden, daß die Gruppe der im Automobilbau eingesetzten polymeren Hartschaumstoffe im Rahmen der

Materialcharakterisierung vollständig erfaßt wird. Hierzu müssen die ausgewählten Werkstoffe eine Validierung der Annahmen ermöglichen. Die Klassifizierung der Schaumstoffe hat gezeigt, daß für die Materialcharakterisierung ein duroplastischer Strukturschaum auf Polyurethanbasis und eines der beiden thermoplastischen Partikelschaumsysteme gewählt werden muß. Auf die Untersuchung des zäharten Polyurethansystems wird zur Reduzierung des Aufwands verzichtet, da es sich bei den Partikelschaumstoffen ebenfalls um Schaumsysteme mit zähartem Verhalten handelt. Die beiden Partikelschaumstoffe eignen sich gleichermaßen. Für die Materialcharakterisierung wird das zum Insassenschutz häufiger eingesetzte Schaumsystem auf Polystyrolbasis ausgewählt. Über die bisher berücksichtigten, qualitativen Kriterien der Klassifizierung hinausgehend wird die Rohdichte und damit indirekt die mit der Rohdichte zusammenhängende Plateauspannung als quantitatives Kriterium für die Auswahl von Schaumstoffen innerhalb des Einsatzbereichs verwendet. Hieraus ergibt sich die Auswahl der in Tabelle 3.2 dargestellten Schaumsysteme.

Bezeichnung	Dichte	Werkstoff	Härte	Mikrostruktur	Gruppe
Bayfill®EA 64IF80 Bayfill®EA67IF84	60 g/l 100 g/l	PUR	sprödhart	offen, Strukturschaum	Duroplast
Noryl®EF 170 FR Noryl®EF 170 FR	30 g/l 60 g/l	EPS/PPE	zähhart	geschlossen, Partikelschaum	Thermoplast

Tabelle 3.2: Auswahl der polymeren Hartschaumstoffe für die Materialcharakterisierung

Bei dem als Bayfill®EA bezeichneten Polyurethansystem handelt es sich um einen Strukturschaumstoff mit sehr dünnwandigen Zellmembranen, das von der Bayer AG zur Verfügung gestellt wird. Experimentelle Untersuchungen im Vorfeld dieser Arbeit haben gezeigt, daß die Zellmembranen bereits bei geringer Kompression durch den Luftdruck im Zellinneren zerstört werden, so daß für das Schaumsystem ein nahezu offenzelliges Verhalten nachgewiesen wird [KDZ96]. Bei dem als Noryl®EF bezeichneten Schaumstoff handelt es sich um ein Compound aus Polystyrol und Polyphenylenether, das die Firma GE Plastics zur Verfügung stellt. Beide Schaumsysteme werden im PKW-Innenraum zur Verringerung der Insassenbelastungen eingesetzt und im Rahmen der folgenden Versuchsreihe mit zwei, jeweils für die Einsatzbereiche charakteristischen Dichten untersucht.

Mit der Materialcharakterisierung müssen, bedingt durch die oben definierten Projektziele, die Annahmen über das Materialverhalten und vor allem die erforderlichen mechanischen Kenntnisse für eine Modellentwicklung erarbeitet werden. Dies ist bei einer Festlegung des

Versuchsplans zu berücksichtigen. Dabei sind entsprechend den Vorgaben des Integrationsprozesses Materialtests und anwendungsnahe Grundlagentests durchzuführen. Die Materialtests dienen der ausführlichen Untersuchung der mechanischen Grundlagen zur Beschreibung der elastischen und inelastischen Materialeigenschaften und somit als Basis für die Auswahl und Entwicklung eines geeigneten Materialmodells. Mit Hilfe der anwendungsnahe Grundlagentests wird das Verhalten der polymeren Hartschaumstoffe innerhalb des Einsatzbereichs ermittelt. Dies beinhaltet eine Abschätzung von Streuungen und darüber hinaus Versuche zur späteren Validierung des Materialmodells.

Basierend auf den bisher erarbeiteten Grundlagen werden für die Untersuchung des elastischen Materialverhaltens einachsige Druck- und Zugversuche, Dreipunktbiegeversuche und Schubversuche geplant. Mit Hilfe der Versuche wird die Steifigkeit und die Querdehnung unter Variation der Belastungsart bestimmt. Die Biegeversuche dienen einer Verifikation der Druck- und Zugeigenschaften.

Eine Beschreibung des plastischen Materialverhaltens der polymeren Hartschaumstoffe erfordert die Untersuchung des Materialverhaltens bei großen Deformationen. Zur numerischen Beschreibung des plastischen Verhaltens eines Werkstoffes müssen nach [Ba90] die Fließbedingung, das Fließgesetz und die plastische Verfestigung bekannt sein. Die Fließbedingung, d.h. der mehrachsige Spannungszustand, bei dem das plastische Fließen beginnt, wird unter Berücksichtigung der verfügbaren Prüftechnik durch einen einachsigen und einen hydrostatischen Druckversuch, durch einen einachsigen Zugversuch und durch einen Schubversuch bestimmt. Das Fließgesetz und die plastische Verfestigung müssen aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten auf der Basis von Erfahrungen und des einachsigen und hydrostatischen Druckversuchs bestimmt werden.

In der weiteren Planung der Versuchsreihe ist die Validierung der Annahmen zu berücksichtigen. Durch die Auswahl der Schaumsysteme wird gewährleistet, daß ein Nachweis der kontinuumsmechanischen Beschreibbarkeit von Schaumstoffen erfolgen kann. Die Untersuchung eines Einflusses des unsymmetrischen Materialverhaltens unter Zug- und Druckbelastung über die erwähnte inelastische Grenzspannung hinaus erfolgt mit Hilfe des einachsigen Zug- und Druckversuchs. Die Durchführung des einachsigen und des hydrostatischen Druckversuchs ermöglicht eine Beurteilung der Fließbedingung unter druckdominierten Belastungen. Damit kann zusätzlich der Nachweis erfolgen, daß deviatorische und hydrostatische Spannungsanteile das plastische Fließen von Schaumstoffen beeinflussen.

Über die bisher beschriebenen Materialtests hinausgehend werden verschiedene Variationen der Tests durchgeführt, um das Materialverhalten innerhalb des Einsatzbereichs über die geforderten Zielsetzungen hinaus besser einschätzen zu können. Untersucht werden Parameter, wie das

Entlastungsverhalten, die Schädigung der zellularen Struktur bei Belastung, das **Bruchverhalten** und der **Einfluß der Schäumhaut**.

Das Entlastungsverhalten der Schaumstoffe wird auf der Basis von einachsigen Druck- und Zugversuchen mit inkrementeller Belastung ermittelt. Die Versuche ermöglichen zusätzlich grundlegende Aussagen über die Schädigung der zellularen Struktur mit zunehmender Deformation. Zusammenfassend werden die in Tabelle 3.3 dargestellten Materialtests durchgeführt.

Belastung	Ergänzung	Variation
Druck	einachsig	inkrementelle Belastung, mit und ohne Schäumhaut
	hydrostatisch	-
Zug	einachsig	inkrementelle Belastung
Schub	-	-
Biegung	Dreipunktbiegung	-

Tabelle 3.3: Materialtests zur Materialcharakterisierung

Die beschriebenen Materialtests werden teilweise unter der Variation der relevanten Einsatzrandbedingungen durchgeführt. Ausgehend von den Annahmen über das Materialverhalten müssen hierfür die folgenden Parameter variiert werden:

- Belastungsgeschwindigkeit,
- Einsatztemperatur,
- Probengeometrie.

Auf eine Untersuchung des Einflusses der Luftfeuchtigkeit und der fertigungsbedingten Formanisotropie wird aufgrund der erarbeiteten Kenntnisse verzichtet. Für die Untersuchung der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Materialverhaltens werden neben den bisher beschriebenen, quasistatischen Tests Druckversuche mit einer Anfangsgeschwindigkeit des Impaktors von $v_0 = 3 \text{ m/s}$ und $v_0 = 6 \text{ m/s}$ durchgeführt. Die maximale Impaktorgeschwindigkeit wird auf die für einen Aufprall von Insassen im Fahrzeuginnenraum charakteristische Höchstgeschwindigkeit von 20-25 km/h eingeschränkt. Die Einsatztemperatur wird innerhalb des durch den Automobilbau geforderten Bereichs von $T = -20 \text{ °C}$ und $T = +80 \text{ °C}$ variiert.

Als Referenz für die Festlegung der Probengeometrie wird der Fahrzeuginnenraum als Einbaubereich gewählt. Der Innenraum erweist sich aufgrund des geringen, verfügbaren Bauraums als besonders kritisches Einsatzgebiet bei der Auslegung von Bauteilen aus polymeren Hartschaum-

stoffen. Der verfügbare Bauraum läßt dort zwischen Verkleidungselementen und der Fahrzeugkarosserie eine durchschnittliche Probenhöhe von 30 mm zu, von der die weiteren Abmessungen abgeleitet werden. Aufgrund der verfügbaren Prüftechnik zur Durchführung der dynamischen Druckversuche ergibt sich für die einachsigen Druckversuche eine Probengrundfläche von ca. 180x180 mm². Die Höhe der Proben, die unter Berücksichtigung der Schäumhaut geprüft werden, ist entsprechend des Anlieferungszustands der Probenrohlinge um 10 mm größer. Die Proben ohne Schäumhaut werden auf die entsprechende Höhe gesägt. Für die Schubversuche werden Proben mit den gleichen Abmessungen verwendet. Aufgrund der Vorgaben durch den Prüfstand wird für die hydrostatischen Druckversuche eine Probenabmessung von 100x100x60 mm³ gewählt. Die einachsigen Zugversuche werden mit einer Probengeometrie entsprechend der DIN 53430 durchgeführt. Für die Dreipunktbiegeversuche wird die Probenabmessung in Anlehnung an die DIN 53423 auf eine Probenhöhe von 30 mm skaliert. Die Variation der Probengeometrie erfolgt bei den Materialtests unter Druckbelastung. Die Variation wird durch eine Veränderung der Probenhöhe und der Probengrundfläche entsprechend der Darstellung in Tabelle 3.4 erreicht.

Probengeometrie	Grundabmessung [mm ³]	Anfangsgeschwindigkeit [m/s]
Quader (G1)	180x180x30	quasistatisch, 3, 6
Quader (G1S)	180x180x40*	quasistatisch, 6
Quader (G2)	180x180x60	quasistatisch, 6
Quader (G2S)	180x180x70*	quasistatisch, 6
Quader (G3)	90x90x30	quasistatisch, 6

* mit Schäumhaut

Tabelle 3.4: Variation der Probengeometrie und der Belastungsgeschwindigkeit bei ebenem Impaktor

Neben der Probengeometrie ist in Tabelle 3.4 die Variation der Belastungsgeschwindigkeit bei den Versuchen unter Druckbelastung dargestellt. Die Temperatur wird innerhalb des oben genannten Bereichs bei den quasistatischen und dynamischen Druckversuchen mit $v_0 = 6$ m/s unter Verwendung der Standardgeometrie von 180x180x30 mm³ variiert. Darüber hinaus erfolgt eine Variation der Temperatur für die quasistatischen Zug- und Schubversuche.

Im Anschluß an diese Festlegung der durchzuführenden Materialtests müssen die benötigten anwendungsnahen Grundlagentests definiert werden. Durch eine entsprechende Wahl der Randbedingungen dienen sie als Ersatzversuche zur Beurteilung des Materialverhaltens innerhalb des Einsatzbereichs. Aufbauend auf den Materialtests wird unter Berücksichtigung der Projektziele der Einfluß der Parameter **Belastungsgeschwindigkeit**, **Probengeometrie** und **Impaktorgeometrie** untersucht.

Die Variation der Belastungsgeschwindigkeit erfolgt entsprechend der Variation bei den Materialtests. In Anlehnung an Bauteile mit Verrippungen werden zur Variation der Probengeometrie eine u-förmige Probe mit einer Grundabmessung von 60x60x60 mm³ und einer mittig an der Probenunterseite vorgesehenen Aussparung der Abmessung 60x20x20 mm³ untersucht. Außerdem wird eine keilförmige Struktur mit der gleichen Grundabmessung geprüft. Zur Variation der Impaktorgeometrie werden neben der ebenen Platte Impaktoren mit halbzyklindrischer und halbkugelförmiger Geometrie verwendet. Der Durchmesser der Impaktoren wird in Anlehnung an die Erweiterung der FMVSS 201 zur Regelung des Kopfaufpralls auf 165 mm festgelegt. Die Versuchsplanung abschließend sind die Versuche unter Variation der Impaktorgeometrie in der Tabelle 3.5 zusammengefaßt.

Impaktorvariation	Probenabmessung [mm ³]	Anfangsgeschwindigkeit [m/s]
halbzyklindrischer Impaktor	180x180x30	quasistatisch, 6
	180x180x40*	quasistatisch, 6
halbkugelförmiger Impaktor	180x180x30	quasistatisch, 3
	180x180x40*	quasistatisch, 3

* mit Schäumhaut

Tabelle 3.5: Anwendungsnahe Grundlagentests unter Variation der Impaktorgeometrie und der Belastungsgeschwindigkeit

3.3.2.2 Materialmodellierung

Für die Simulation des Materialverhaltens von Materialien mit einem ähnlichen Aufbau, wie dem der betrachteten Hartschaumstoffe, werden in den kommerziellen Berechnungsprogrammen verschiedene Materialmodelle angeboten. Erster Schritt der Modellierung ist dementsprechend die ausführliche Untersuchung dieser Modelle. Bis zu der Annahme eines Materialmodells beinhaltet dies eine Validierung des Modells basierend auf der innerhalb der Planung festgelegten Kriterien und eine Analyse dieser Validierung. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen muß davon ausgegangen werden, daß keiner dieser Ansätze das Verhalten der betrachteten Schaumstoffe ausreichend genau beschreibt, weshalb die Weiter- oder Neuentwicklung eines geeigneten Ansatzes eingeplant werden muß. Die Entwicklung dieses Ansatzes umfaßt entsprechend den Vorgaben des Integrationsprozesses die Formulierung der Materialgleichungen, deren Implementierung in das eingesetzte Berechnungsprogramm und die Verifikation der durchgeführten Maßnahmen auf der Basis von ausgewählten Berechnungsbeispielen. Im Anschluß an die Verifikation des Materialmodells müssen erneut eine Validierung unter Berücksichtigung von allen durchgeführten Material- und Grundlagentests

und eine Analyse durchgeführt werden. Die Vorgehensweise bei der Modellierung des festgestellten Materialverhaltens ist in Bild 3.16 zusammengefaßt und demonstriert die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Phasen und somit den iterativen Charakter des Integrationsprozesses.

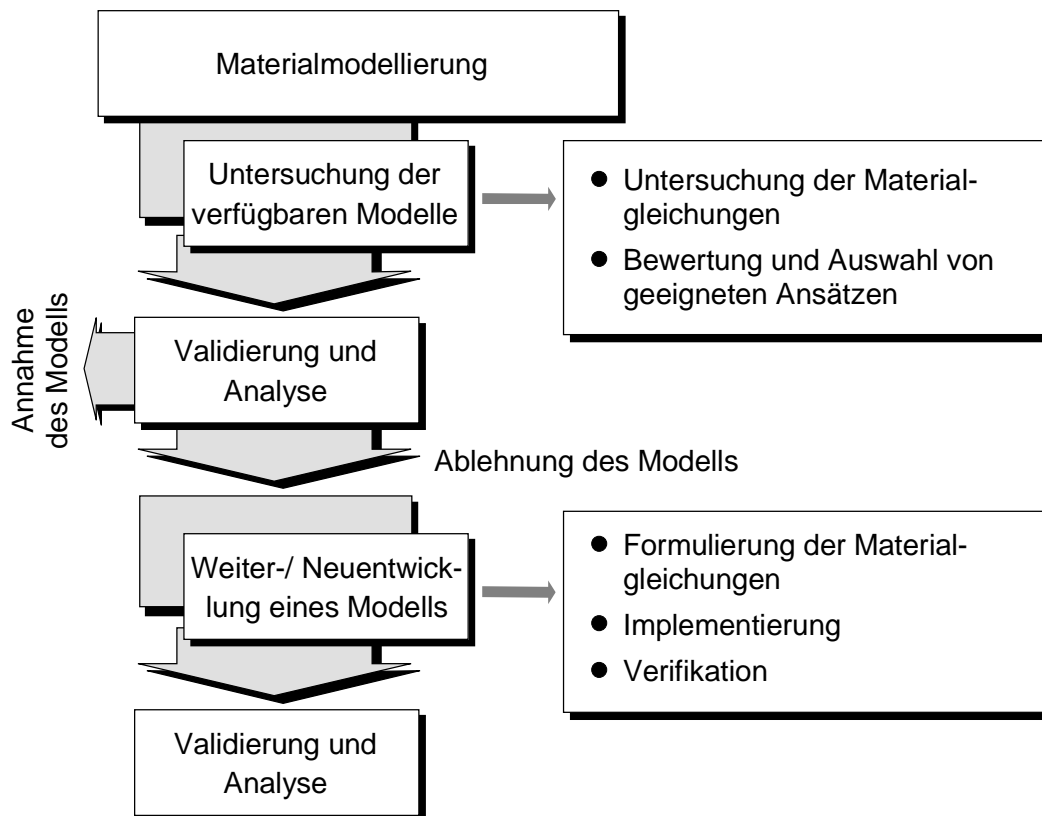


Bild 3.16: Modellierung des Materialverhaltens

Im Anschluß an die Annahme des Materialmodells muß die Festlegung der Qualitätsvorschriften und der mit einer ausführlichen Dokumentation des Knowhow-Gewinns verbundene Aufwand eingeplant werden.

3.3.3 Auswahl von Validierungskriterien

Im Rahmen der Bewertungsphase des Integrationsprozesses erfolgt eine Bewertung der einzelnen Teilschritte des Prozesses und eine ausführliche Analyse der Validierung des Materialmodells, was bei der Definition von Validierungskriterien berücksichtigt werden muß.

Die Bewertung der einzelnen Teilschritte des Integrationsprozesses erfordert den Nachweis der Reproduzierbarkeit und der Transparenz aller Maßnahmen. Hierbei muß insbesondere die Werkstoffprüfung betrachtet werden. Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Prüfungen,

die im Rahmen der Materialcharakterisierung durchgeführt werden, ist der Einsatz einer erheblich variierenden Prüf- und Meßtechnik erforderlich. Um abweichende Ergebnisse zwischen den einzelnen Prüfungen zu vermeiden, muß im Vorfeld der Materialcharakterisierung eine Kalibrierung der einzelnen Versuchseinrichtungen erfolgen. Als Kriterium wird ein Vergleich des Kraft-Wegverhaltens von gleichen Materialproben gefordert.

Im Mittelpunkt der Auswahl von Validierungskriterien steht die Validierung des Materialmodells auf der Basis eines Vergleichs von experimentellen und berechneten Ergebnissen aller durchgeführten Prüfungen. Die ausführliche Analyse dieser Validierung erfolgt mit Hilfe von geeigneten Kriterien, die auch zur Auswertung und Analyse der Materialcharakterisierung und somit als Basis für die Materialmodellierung verwendet werden können. Mit der Definition der Validierungskriterien wird dementsprechend auch das Ziel verfolgt, auf der Basis der geplanten Versuche die mechanischen Eigenschaften der polymeren Hartschaumstoffe möglichst vollständig zu beschreiben.

Unter Berücksichtigung der Projektziele muß das Verhalten von polymeren Hartschaumstoffen mit Hilfe eines kontinuumsmechanischen, elastisch-plastischen Ansatzes ausreichend genau beschrieben werden können. Aus diesem Grund wird bei der Definition der folgenden Validierungskriterien im wesentlichen die Beschreibung der elastisch-plastischen Eigenschaften betrachtet. Zur Beurteilung der elastischen Eigenschaften werden als Validierungskriterien die Anfangssteifigkeit und die elastische Querszahl für den jeweiligen Lastfall betrachtet. Die lastabhängige Definition der Größen erfolgt entsprechend den zugrunde liegenden Prüfnormen. Die Ermittlung der Kennwerte erfolgt im Ursprung der jeweiligen Spannungs-Dehnungskennlinien. Zur Beurteilung der plastischen Eigenschaften ist die Definition von weiteren Validierungskriterien erforderlich. Für die Beschreibung der Fließbedingung wird bei allen Materialtests die plastische Grenzspannung, im folgenden als Fließbeginn bezeichnet, ermittelt. Aufgrund der vergleichsweise hohen Nachgiebigkeit der polymeren Hartschaumstoffe wird als Fließbeginn die Spannung bei 0,2% plastischer Stauchung festgelegt. Zusätzlich wird für eine qualitative Beurteilung der plastischen Verfestigung der Verlauf der wahren Spannung über der plastischen logarithmischen Dehnung verwendet. Die Beurteilung der plastischen Verfestigung bei großen Deformationen erfolgt durch den einachsigen und den hydrostatischen Druckversuch.

Das Bruchverhalten der Hartschaumstoffe soll mit Hilfe von Zug-, Schub- und Biegeversuchen untersucht werden. Als Analyse Kriterien für eine Beurteilung des Bruchverhaltens werden die Bruchspannung und die zugeordnete Bruchdehnung, bzw. -scherung verwendet.

Die bisher definierten Kriterien sind für eine kontinuumsmechanische Beschreibung des Materialverhaltens mit dem Ziel, die erforderlichen Materialgleichungen zu finden und zu validieren, geeignet. Darüber hinaus ist die Beurteilung des Materialverhaltens anhand der für den Einsatzbereich charakteristischen, anwendungsnahen Grundlagentests erforderlich.

Ergänzend zu den oben beschriebenen Kriterien werden für eine Validierung auf der Basis dieser Tests die folgenden Kriterien betrachtet:

- mittlere Plateauspannung,
- maximale Druckkraft,
- maximale Verschiebung,
- Entlastungsquotient ($q_e = E_R / E_{\max}$).

Die maximale Druckkraft, die maximale Verschiebung und der Entlastungsquotient werden insbesondere für eine Beurteilung der dynamischen Druckversuche verwendet. Bei dem Entlastungsquotienten handelt es sich um den Quotienten der bei Rückfederung freigesetzten und der maximal absorbierten Energie.

Für die ausführliche Analyse der Validierung des Materialmodells, d.h. für einen Vergleich zwischen Versuchs- und Berechnungsergebnissen wird zusätzlich die Abweichung zwischen den experimentell und numerisch ermittelten Validierungskriterien definiert:

$$\text{Abweichung} = \left| \frac{\text{Wert}_{\text{Berechnung}} - \text{Wert}_{\text{Versuch}}}{\text{Wert}_{\text{Versuch}}} 100\% \right|. \quad (3.3)$$

3.4 Risikoabschätzung

Zum Abschluß der Planungsphase muß das mit der folgenden Durchführung des Integrationsprozesses verbundene Risiko abgeschätzt werden. Die Risikoabschätzung berücksichtigt hierbei den Zeitbedarf und den mit der Umsetzung verbundenen Mittelbedarf von Teilschritten, deren Durchführung mit einem Risiko für den Erfolg des Prozesses verbunden ist. Sie ist in Tabelle 3.6 zusammengefaßt.

Die innerhalb der Planungsphase festgelegten Ziele und die geplante weitere Vorgehensweise sind mit einem vergleichsweise hohen Risiko verbunden. Dies ist auf das unzureichende Erfahrungspotential bei einer erstmaligen Durchführung des Prozesses zurückzuführen. Für den Prozeß muß deshalb mit einer geringen Effizienz gerechnet werden, was allerdings aufgrund des Pilotcharakters akzeptiert wird. Die umfangreichen Grundlagen über das Materialverhalten, den Einsatzbereich von polymeren Hartschaumstoffen und das vorhandene Knowhow im Bereich der Materialcharakterisierung führen in Verbindung mit einer Vielzahl von bereits verfügbaren Ansätzen für eine Modellierung des Materialverhaltens zu einer geringen bis mittleren Einstufung des Gesamtrisikos für den Integrationsprozeß von polymeren Hartschaumstoffen.

Projektschritt	Zeitbedarf	Mittelbedarf	Bedeutung	Risiko
Projektplanung	gering	gering	hoch	hoch: Erstmalige Durchführung, geringes Erfahrungspotential
Durchführung	hoch	gering	hoch	gering
• Materialcharakterisierung	hoch	hoch	hoch	gering: Durchführbarkeit von erforderlichen Experimenten, Materialstreuungen, umfangreiche Grundlagen
• Materialmodellierung	gering - hoch	gering	hoch	gering: Große Variation des Materialverhaltens unterschiedlicher Schaumstoffe, generelle Eignung eines kontinuumsmechanischen Ansatzes fraglich, aber: Mehrere Ansätze verfügbar
• Validierung	gering	gering	hoch	gering: Gute Einschätzung des Einsatzbereichs, strukturierte Definition der Kalibrierungs- und Validierungsbeispiele möglich
Bewertung	gering	gering	hoch	gering: Umfangreiche Definition der Beurteilungskriterien möglich
Optimierungsmaßnahmen	hoch	gering	hoch	gering: Zeit- und Mittelbedarf schwer einzuschätzen
Produktiver Einsatz	gering	gering	gering	gering: Beurteilung auf der Basis von verfügbaren Daten nahezu nur qualitativ möglich, unzureichende Datenbasis
				Gesamtrisiko: Gering

Tabelle 3.6: Risikoabschätzung

4 Die Integration von polymeren Hartschaumstoffen: Durchführung

4.1 Materialcharakterisierung

Die Materialcharakterisierung der polymeren Hartschaumstoffe umfaßt entsprechend der Festlegung des Integrationsprozesses in Kapitel 2 die Teilschritte **Vorbereitung, Durchführung, Auswertung und Analyse**. Die **Vorbereitung** beinhaltet eine kurze Dokumentation der Probenentnahme und der eingesetzten Prüf- und Meßtechnik. Im Rahmen der **Durchführung** werden verschiedene Randbedingungen erläutert, die aufgrund der eingesetzten Prüf- und Meßtechnik und aufgrund von Erfahrungen berücksichtigt werden. Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit stehen die für die Entwicklung des Materialmodells wesentliche **Auswertung und Analyse** der Materialcharakterisierung.

4.1.1 Vorbereitung

Im Vorfeld der Materialcharakterisierung wird in Ergänzung des Prüfplans der mögliche Einfluß einer Schäumhaut auf das Verhalten von Noryl[®] EF untersucht. Da es sich bei der Schäumhaut um eine Dichteerhöhung im Randbereich von Schaumbauteilen handelt, müssen bei einer Untersuchung des Einflusses der Haut keine zusätzlichen Membranspannungsanteile berücksichtigt werden. Die Durchführung von einachsigen Druckversuchen zur Untersuchung des Einflusses ist ausreichend. Das Ergebnis der Versuche ist in Bild 4.1 dargestellt und verdeutlicht, daß durch die Schäumhaut nahezu keine Veränderung des Materialverhaltens feststellbar ist.

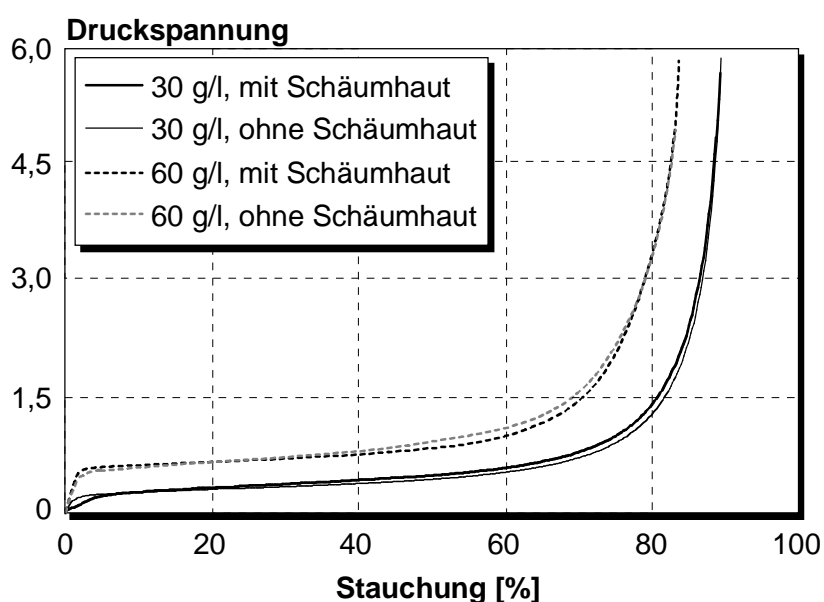


Bild 4.1: Einfluß der Schäumhaut bei Noryl[®] EF

4.1.1.1 Probenentnahme

Aufgrund der geforderten Variation der Probengeometrie erfolgt die Lieferung der Probenrohlinge in Blöcken mit Abmessungen, die über den erforderlichen Probenabmessungen liegen. Zur Entnahme der eigentlichen Proben werden die Probenrohlinge mit laufenden Nummern versehen und die Position und die Orientierung jeder einzelnen Probe innerhalb des Rohlings festgelegt und dokumentiert. Somit wird eine spätere Beurteilung von Inhomogenitäten und Dichteschwankungen ermöglicht. Bei der Probenentnahme wird ein Minimalabstand von 5 mm zur Rohlingoberfläche gewählt, um den möglichen Einfluß der als Schäumhaut bezeichneten Dichtegradienten zu vermeiden. Die Wahl des Minimalabstandes von 5 mm ist begründet durch Herstellerangaben und eigene Untersuchungen [Mu99].

Für die Durchführung der einachsigen Druckversuche und der Dreipunktbiegeversuche ist keine weitere Behandlung der Proben erforderlich. Im Vorfeld der hydrostatischen Druckversuche werden die Schaumquader im Wechsel mit Schichten aus Aluminiumfolie und Kunststoffolie verpackt, um eine ausreichende Dichtigkeit der Proben zu erreichen. Die Vorbereitung der Zug- und Schubversuche ist ausführlich in [KDZ96] und [SH99] beschrieben.

4.1.1.2 Prüf- und Meßtechnik

Die Durchführung der Materialcharakterisierung wird erheblich durch die Prüf- und Meßtechnik beeinflusst. Eine ausführliche Dokumentation der verwendeten Systeme ist deshalb erforderlich. Im Rahmen der Materialcharakterisierung werden vier verschiedene Prüfanlagen verwendet. Die quasistatischen Druck-, Zug-, Schub- und Biegeversuche werden mit zwei vergleichbaren servohydraulischen Prüfmaschinen durchgeführt. Die Kraftmessung erfolgt direkt über die Kraftmeßdose der Prüfmaschine, die Wegmessung mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers und eines Extensometers. Für die hydrostatischen Druckversuche wird eine mit Wasser gefüllte Druckkammer eingesetzt. Der Kammerdruck wird durch das Zuführen von Wasser mit Hilfe eines Kolbens erhöht. Die Messung der Volumenänderung erfolgt über die Umrechnung des Kolbenweges, die Druckmessung erfolgt über einen Drucksensor innerhalb der Druckkammer.

Zur Durchführung der dynamischen Druckversuche werden ein Crashprüfstand und ein Fallturm verwendet. Bei der Crashanlage handelt es sich um eine Katapultanlage mit kurzer, horizontaler Beschleunigungsstrecke. Die Schlagmasse besteht aus dem Schlitten, der daran angebrachten Prallplatte und austauschbaren Zusatzmassen. Die Beschleunigung des Schlittens erfolgt durch einen servohydraulischen Linearzylinder über ein Seil und einen Flaschenzug. Vor dem Aufprall registriert eine Lichtschranke die aktuelle Schlittengeschwindigkeit. Zur Messung der Stoßkraft dient eine piezoelektrische Kraftmeßplatte, auf der die Probekörper befestigt werden. Mit einem Laser-Wegsensor wird die Schlittenposition während des Stoßvorgangs erfaßt. Bei dem Fallturm

handelt es sich um eine Anlage mit vertikaler Beschleunigungsstrecke. Die Schlagmasse besteht aus dem Schlitten, der daran angebrachten Prallplatte und austauschbaren Zusatzmassen. Die Beschleunigung des Schlittens erfolgt ausschließlich durch die Erdbeschleunigung. Für die Meßdatenerfassung wird die für die Crashanlage beschriebene Meßtechnik verwendet.

4.1.2 Durchführung

Im Vorfeld der Versuchsdurchführung muß die Prüf- und Meßtechnik kalibriert werden. Die Kalibrierung der für die quasistatischen Druck-, Zug- und Schubversuche eingesetzten Prüf- und Meßtechnik erfolgt auf der Basis von Druckversuchen. Die Meßtechnik zur Kraftmessung für die dynamischen Druckversuche wird ebenso durch einen direkten Vergleich mit den anderen Systemen angeglichen, wobei wie oben beschrieben für die Crashanlage und den Fallturm die gleiche Meßtechnik verwendet wird. Ein direkter Abgleich der Prüf- und Meßtechnik für die hydrostatischen Druckversuche ist nicht möglich. Die Kalibrierung erfolgt im Vorfeld jeder Prüfreihe. Hierzu werden Versuche ohne Proben durchgeführt. Die gemessene Druck-/Volumenänderung ohne Proben wird daraufhin mit den eigentlichen Versuchsergebnissen überlagert, um die Berücksichtigung der anlagespezifischen Kennung bei der Auswertung der hydrostatischen Druckversuche zu vermeiden.

Im Anschluß an die Kalibrierung der Meß- und Prüftechnik erfolgt die Versuchsdurchführung. Die quasistatischen Versuche werden mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt, so daß eine maximale Anfangsdehnrate von ca. 0,0167 1/s erreicht wird. Dies ist auf Erfahrungen im Vorfeld dieser Versuchsreihe zurückzuführen, bei der für den einachsigen Druckversuch bei einer Probenhöhe von 30 mm die Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 mm/s festgelegt wurde. Die hydrostatischen Druckversuche werden aus prüftechnischen Gründen bei einem Volumenstrom von ca. 150 mm³/s durchgeführt.

Die Schaumstoffproben für Versuche unter Variation der Belastungstemperatur werden für eine Vortemperierung ca. 12 Stunden in einer separaten Wärme- bzw. Kältekammer gelagert. Da durch Messungen eine deutliche Veränderung der Probertemperatur durch die Entnahme aus der Vortemperierkammer und die Positionierung in der Versuchskammer festgestellt wird, müssen alle Proben zur Vermeidung von Streuungen der Prüftemperatur in der Prüfvorrichtung nachtemperiert werden.

Als Rohdaten aus jedem Versuch ergeben sich ein Weg-Zeitverlauf und ein Kraft-Zeitverlauf, aus denen ein Kraft-Wegverlauf ermittelt wird. Bei den hydrostatischen Druckversuchen wird der Verlauf des Drucks über der Volumenänderung gemessen. Die eigentliche Auswertung der Rohdaten ist Gegenstand des folgenden Unterkapitels.

4.1.3 Auswertung und Analyse

Zu Beginn der Auswertung erfolgt eine Filterung der Meßsignale und die Nullpunktbestimmung jedes Einzelversuchs. Auf die ausführliche Dokumentation dieser Teilschritte wird hier verzichtet, sie ist [SH99] zu entnehmen. Die Auswertung im Rahmen der vorliegenden Arbeit beginnt mit der Berechnung der Validierungskriterien, für die Ergebnisse von Einzelversuchen und gemittelte Versuchsergebnisse berücksichtigt werden. Die anschließende Analyse des Materialverhaltens erfolgt auf der Basis dieser Kriterien.

4.1.3.1 Berechnung der Validierungskriterien

Für die Auswertung des Einzelversuchs wird bei den einachsigen Druck- und Zugversuchen aus dem gemessenen Kraft-Wegverlauf entlang der Belastungsrichtung der Verlauf der nominellen Spannung σ über der nominellen Dehnung ε berechnet, aus dem unter Vernachlässigung der Querdehnung die elastischen Kennwerte abgeleitet werden. Zusätzlich wird für die Auswertung der Druckversuche unter Berücksichtigung von großen Deformationen die wahre, bzw. logarithmische Stauchung, ε_{ii} , eingeführt:

$$\varepsilon_{ii} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon). \quad (4.1)$$

Dabei ist l_0 die Ausgangslänge und l die aktuelle Länge der Probe. Zur Berechnung der wahren, oder Cauchy-Spannung wird im Rahmen der Auswertung die elastische Stauchung definiert:

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E} = \varepsilon - \varepsilon^p, \quad (4.2)$$

wobei ε^p der plastische Anteil der Stauchung ist. Unter Vernachlässigung der bei polymeren Schaumstoffen geringen plastischen Querkontraktion wird die wahre Spannung, σ_{ii} , näherungsweise wie folgt ermittelt:

$$\sigma_{ii} = \frac{F}{A_0}. \quad (4.3)$$

Aufgrund der bei den Schubversuchen gewählten Randbedingungen wird die Schubspannung wie folgt berechnet:

$$\tau = \frac{F}{A_0}. \quad (4.4)$$

Dabei ist die Fläche A_0 die Grundfläche der Probe bei Versuchsbeginn. Unter der Annahme kleiner Gleitungen gilt:

$$\gamma = \frac{s}{h_0}, \quad (4.5)$$

wobei s die Verschiebung und h_0 die Probenhöhe zu Beginn des Versuchs sind. Bei den hydrostatischen Druckversuchen folgt die Druckspannung direkt aus dem gemessenen Druck, der über der nominellen Volumendehnung aufgetragen wird. Bei den Biegeversuchen wird der Biegemodul unter der Annahme eines vergleichbaren Verhaltens unter Druck- und Zugbelastung mit dem Auflagerabstand l_v auf der Basis der Randfaserdehnung und -spannung berechnet:

$$|\varepsilon| = \frac{6h_0 f}{l_v^2}, \quad (4.6)$$

$$|\sigma| = \frac{3}{2} \frac{Fl_v}{A_0 h_0}. \quad (4.7)$$

Die Versuche mit halbzyklindrischem und -kugelförmigem Impaktor und die Versuche mit u- und keilförmiger Probe werden direkt auf der Basis des gefilterten Kraft-Wegverlaufs ausgewertet.

4.1.3.2 Auswertung der Materialcharakterisierung

Die Auswertung der Materialcharakterisierung von polymeren Hartschaumstoffen gliedert sich entsprechend dem Versuchsplan in eine getrennte Betrachtung der **Materialtests** und der **anwendungsnahen Grundlagentests**.

4.1.3.2.1 Materialtests

Die Ergebnisse der **einachsigen Druckversuche** sind für beide untersuchten Werkstoffe in den Bildern 4.2 und 4.3 dargestellt. Unabhängig von dem betrachteten Schaumsystem und der Dichte sind die drei charakteristischen Deformationsbereiche und das große Energieabsorptionsvermögen der Schaumstoffe zu erkennen. Der Übergang zwischen dem linearelastischen Deformationsbereich und dem Plateaubereich ist bei dem als PUR bezeichneten Bayfill® EA fließend (Bild 4.2), das als EPS/PPE bezeichnete Schaumsystem auf Polystyrolbasis, Noryl® EF, zeigt eine sehr deutlich ausgeprägte, lineare Anfangssteifigkeit (Bild 4.3). Der Volumenanteil des Polymers und somit die Rohdichte der Schaumstoffe beeinflusst das Materialverhalten erwartungsgemäß erheblich. Mit zunehmender Rohdichte nehmen die Steifigkeit und die mittlere Plateauspannung zu. Die Plateaulänge und der Progressionsbeginn sind nahezu konstant.

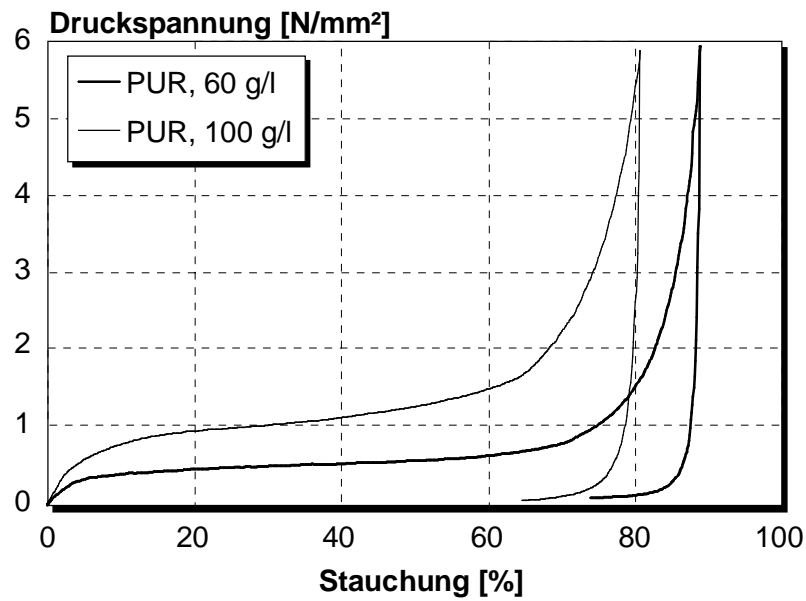


Bild 4.2: Einachsige Druckbelastung von PUR, 60 g/l und 100 g/l

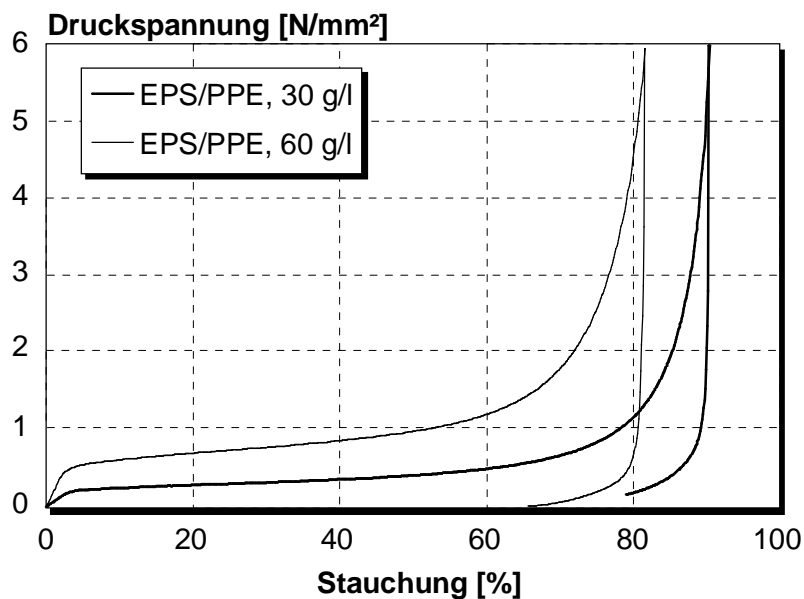


Bild 4.3: Einachsige Druckbelastung von EPS/PPE, 30 g/l und 60 g/l

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem mechanischen Verhalten des PUR- und des EPS/PPE-Schaumstoffes ist der Mechanismus, durch den Energie absorbiert wird. Das System auf Polystyrolbasis deformiert elastisch-plastisch bis zu einer großen Verdichtung der Zellstruktur. Die Energie wird durch die plastische Deformation und durch Reibung zwischen den Zellwänden absorbiert. Bei dem spröderen Polyurethansystem wird zusätzlich ein Teil der

Energie durch eine Zerstörung der zellularen Struktur absorbiert. Zur Verdeutlichung ist in Bild 4.4 die zelluläre Struktur von PUR mit 100 g/l und EPS/PPE mit 60 g/l nach einer Verdichtung um 80% der ursprünglichen Probenhöhe dargestellt.

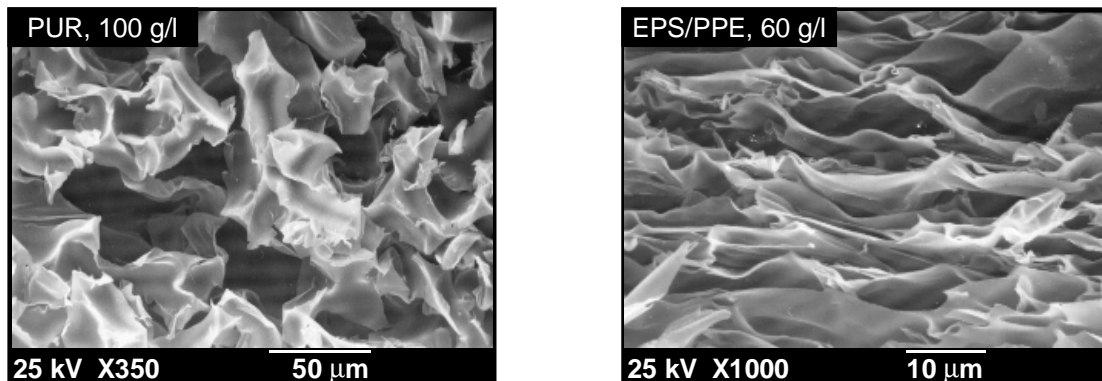


Bild 4.4: Die Zellstruktur von PUR der Dichte 100 g/l und EPS/PPE der Dichte 60 g/l nach quasistatischer Druckbelastung bis 80% Stauchung

Die Querdehnung wird mit Hilfe eines optischen Meßverfahrens ermittelt [Öc99]. In Bild 4.5 ist die über dem Probenquerschnitt gemittelte Querzahl über der Stauchung dargestellt, wobei deutlich zu erkennen ist, daß die Querzahl unabhängig von dem betrachteten Material mit der Stauchung abnimmt. Für EPS/PPE werden über dem gesamten gemessenen Deformationsbereich nur sehr geringe Querdehnungen festgestellt. Die bei $\varepsilon \sim 0$ ermittelte, elastische Querzahl von EPS/PPE liegt bei $\nu^e \sim 0,15$ bis 0,2, die elastische Querzahl von PUR beträgt $\nu^e \sim 0,3$.

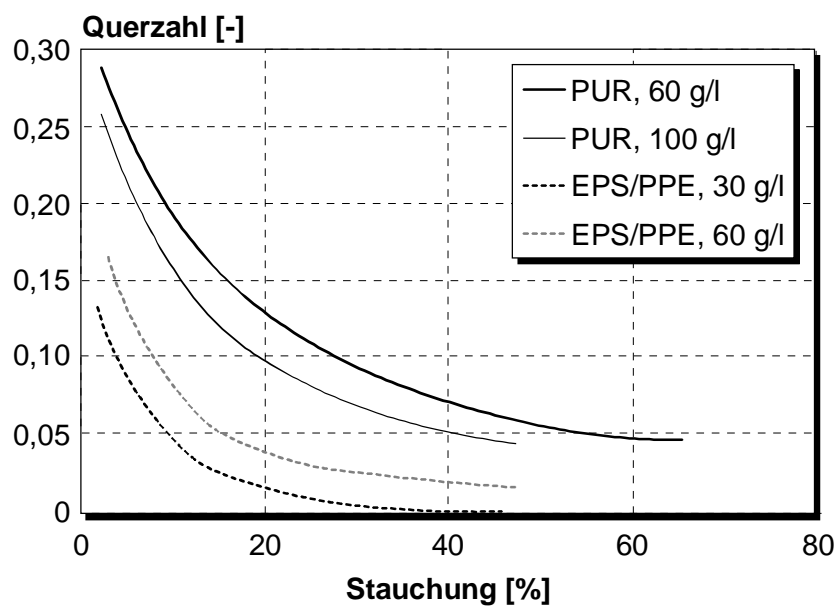


Bild 4.5: Variation der Querzahl mit der Stauchung unter einachsiger Druckbelastung

Das Verhalten der betrachteten Schaumstoffe unter **hydrostatischer Druckbelastung** ist mit dem Verhalten unter einachsiger Druckbelastung vergleichbar. Unter Berücksichtigung der geringen Querdehnung bei großen Stauchungen ist in Bild 4.6 die Druckspannung des einachsigen und des hydrostatischen Druckversuchs über der Volumenstauchung dargestellt. Durch den Vergleich des Kompressionsmoduls bei hydrostatischer und des Elastizitätsmoduls bei einachsiger Druckbelastung wird für das Polyurethansystem unabhängig von der Dichte die gemessene, elastische Querszahl von $\nu^e \sim 0,3$ und für das System auf Polystyrolbasis die elastische Querszahl von $\nu^e \sim 0,15$ bestätigt. Der Fließbeginn $\sigma_{0,2\%}$ ist für PUR bei hydrostatischer und einachsiger Druckbelastung vergleichbar. Bei EPS/PPE wird unter hydrostatischer Belastung ein geringerer Wert ermittelt. Weiterhin wird bei allen Schaumsystemen eine geringere mittlere Plateauspannung unter hydrostatischer Belastung festgestellt.

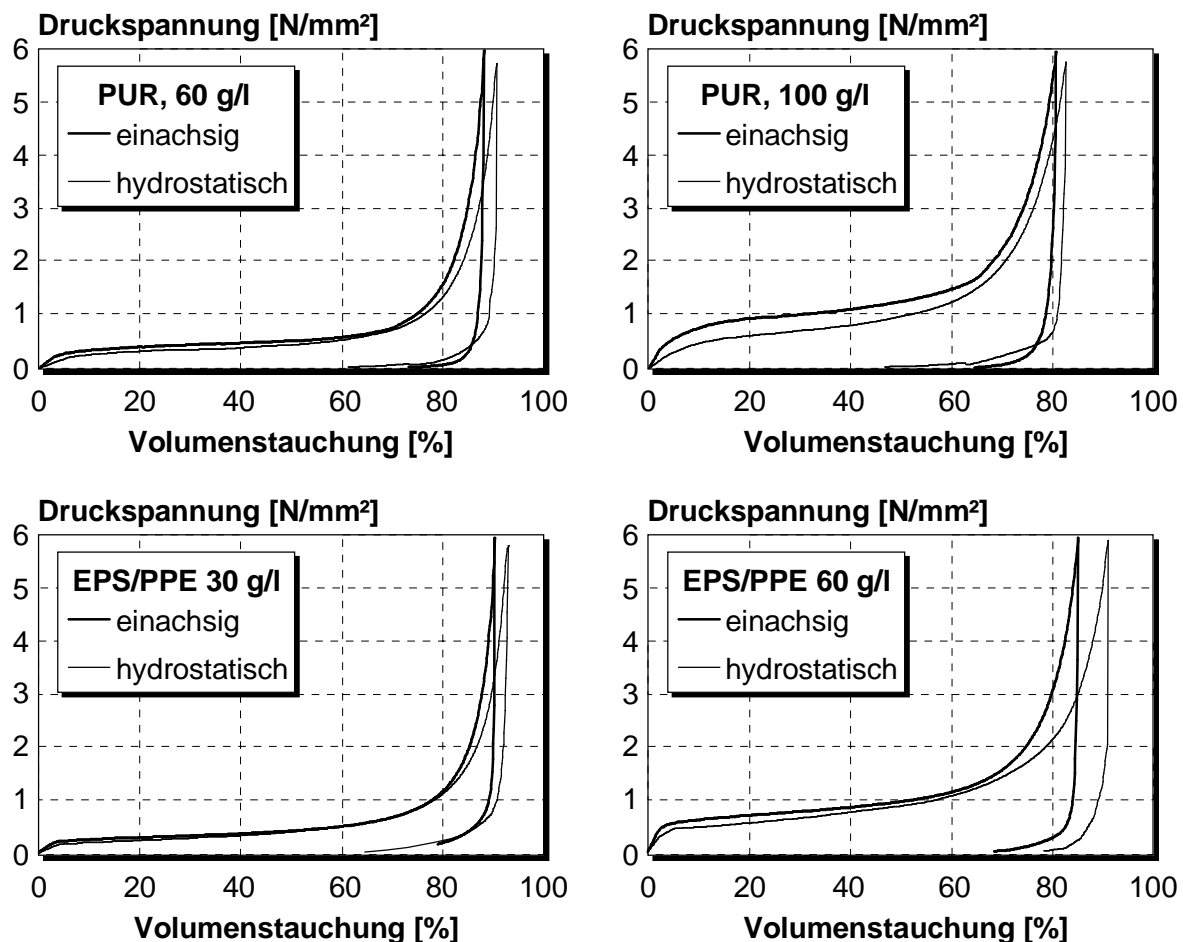


Bild 4.6: Vergleich unter einachsiger und hydrostatischer Druckbelastung

In Bild 4.7 ist ein Vergleich der Spannungs-Dehnungsverläufe für PUR und EPS/PPE unter Druck- und **Zugbelastung** dargestellt. Der Druckspannungs-Stauchungsverlauf ist dabei jeweils

nur bis 10% Stauchung innerhalb des dritten Quadranten gezeigt. Das Polyurethansystem verhält sich unabhängig von der betrachteten Dichte symmetrisch unter Zug- und Druckbelastung bis zum Erreichen einer maximalen Zugspannung, bei der es zu einem spröden Bruch der Proben kommt. Im Gegensatz zu dem PUR ist das Verhalten von EPS/PPE von Belastungsbeginn an unsymmetrisch unter Zug- und Druckbelastung. Die gemessene Steifigkeit von EPS/PPE ist unter Zugbelastung nahezu doppelt so groß, wie unter Druckbelastung. Ein ähnliches Phänomen wurde von [Kn75] auch für Schaumstoffe auf PVC-Basis festgestellt. Für den Partikelschaum EPS/PPE kann das Verhalten durch den zellularen Aufbau erklärt werden. Entsprechend dem in Bild 4.4 dargestellten Zellaufbau besteht das Innere der Schaumpartikel aus dünnwandigen Zellmembranen, die unter Zugbelastung bis zu der Entstehung von Rissen ein deutlich höheres Lastniveau aufbauen können, als unter Druckbelastung. Vergleichbar mit dem für das Polyurethansystem festgestellten Verhalten versagt EPS/PPE unter Zugbelastung sprödebruchartig, wobei die Bruchfläche grundsätzlich zwischen den Schaumpartikeln und nicht im Inneren eines aufgeschäumten Partikels entsteht.

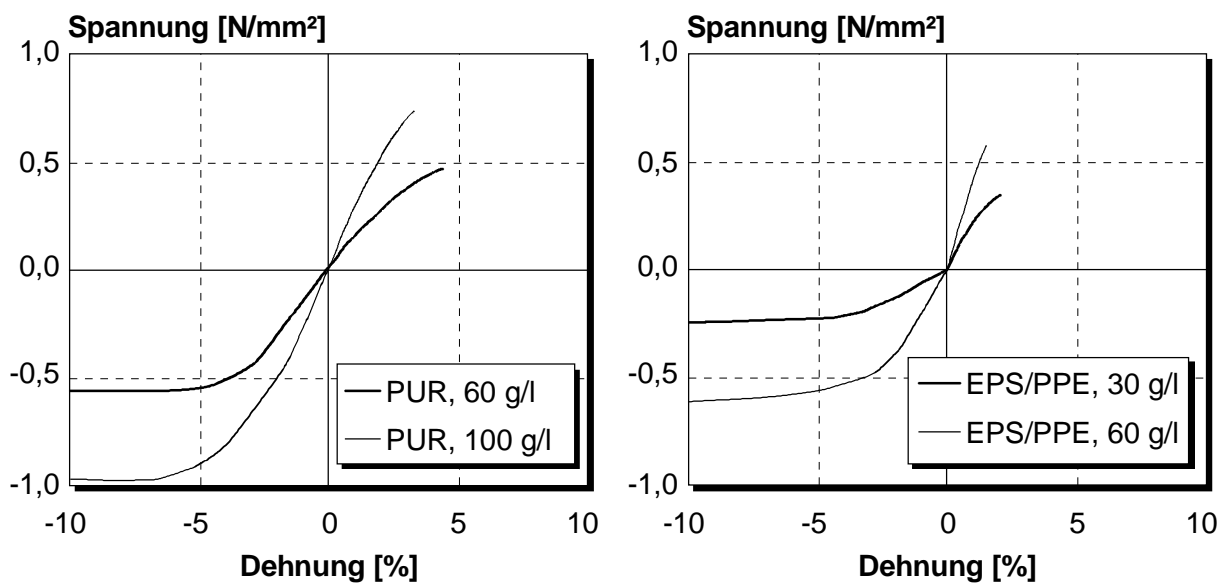


Bild 4.7: Vergleich des Materialverhaltens bei einachsiger Zug- und Druckbelastung (PUR und EPS/PPE)

Mit Hilfe von Druck- und Zugversuchen mit inkrementeller Belastung kann das Schädigungsverhalten der Schaumstoffe beurteilt werden. Die entsprechenden Spannungsverläufe für das untersuchte Polyurethansystem sind in Bild 4.8 dargestellt. Unabhängig von der Dichte von PUR wird eine abnehmende Steifigkeit mit zunehmendem Belastungsincrement und damit eine Schädigung des Materials festgestellt.

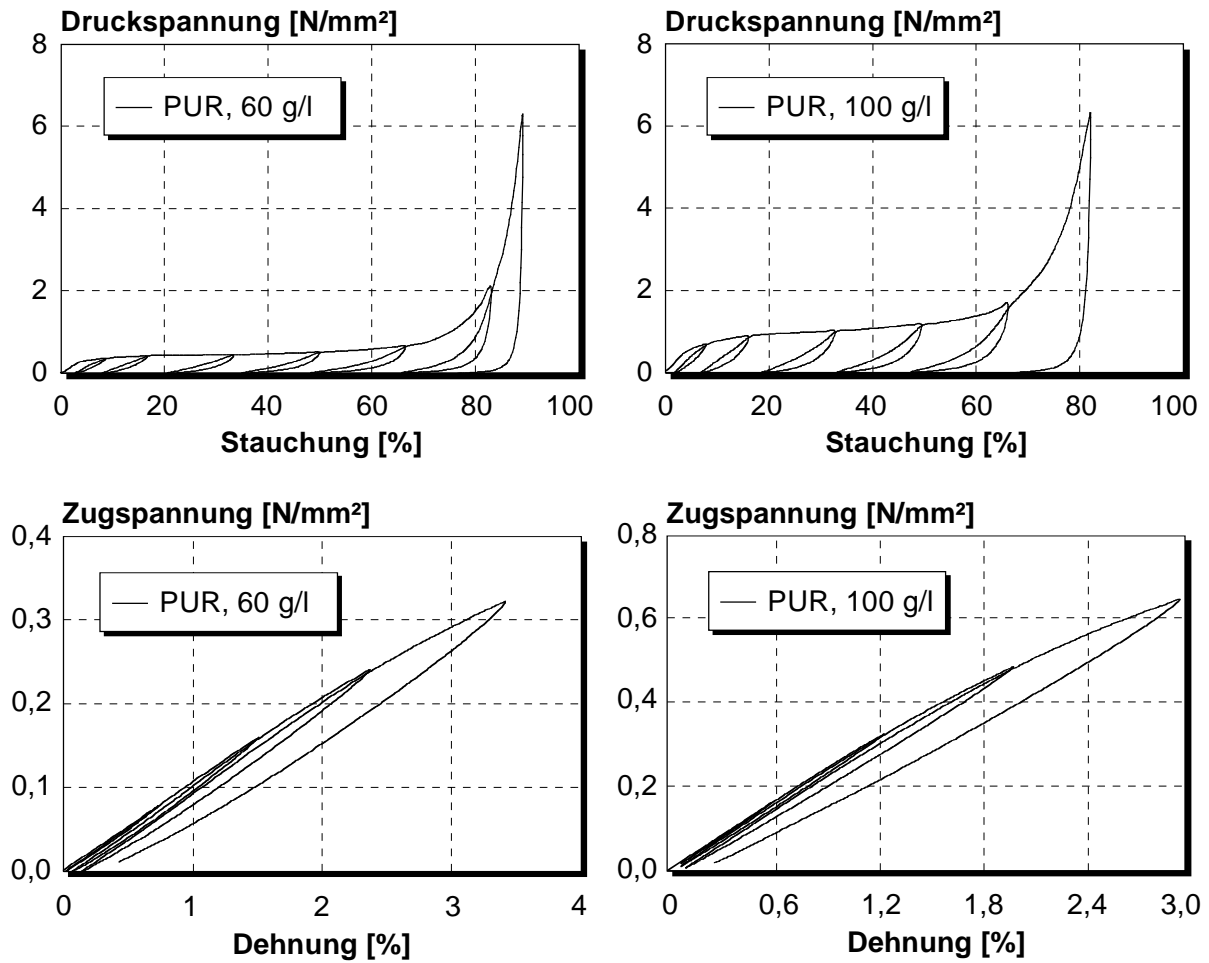


Bild 4.8: Verhalten von PUR bei inkrementeller Druck- und Zugbelastung

In Bild 4.9 ist die gemittelte Rückverformung und der Rückverformungsquotient aus den Druck- und Zugversuchen über dem Betrag der nominellen Dehnung aufgetragen. Der jeweilige Wert der Rückverformung ist auf die zugeordnete, maximale Dehnung bei Entlastung normiert.

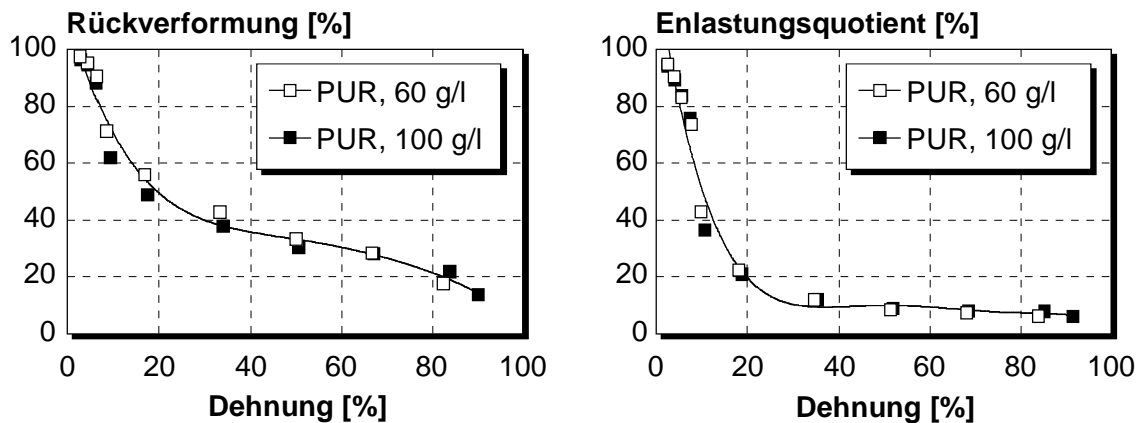


Bild 4.9: Rückverformung und Entlastungsquotient am Beispiel von PUR

Für die Berechnung des Rückverformungsquotienten wird die aufgenommene Energie bis zu der zugeordneten maximalen Dehnung bei Entlastung berücksichtigt. Zusammenfassend ist zu erkennen, daß das normierte Entlastungsverhalten für das betrachtete Polyurethansystem von der Dichte unabhängig ist. Sowohl die Rückverformung, als auch die Energie der Rückverformung weichen für PUR mit 60 g/l und 100 g/l nur geringfügig voneinander ab. Das läßt auf gleiche Verformungsmechanismen schließen. Die kontinuierliche Abnahme des Anteils der Rückverformung zeigt den geringen Einfluß der Luft, die bereits bei vergleichsweise geringen Stauchungen entweicht.

Das Verhalten von EPS/PPE bei inkrementeller Druck- und Zugbelastung ist in Bild 4.10 dargestellt. Im Vergleich zu PUR ist der Abfall der Steifigkeit mit zunehmender Deformation geringer. Insbesondere bei den geringen Dehnungen unter Zugbelastungen nur ein geringer Steifigkeitsverlust feststellbar. Das läßt auf ein elastisch-plastisches Materialverhalten ohne wesentliche Schädigung der zellularen Struktur schließen. Ein deutlicher Steifigkeitsverlust und damit eine Schädigung der Zellstruktur wird erst bei größeren Deformationen festgestellt.

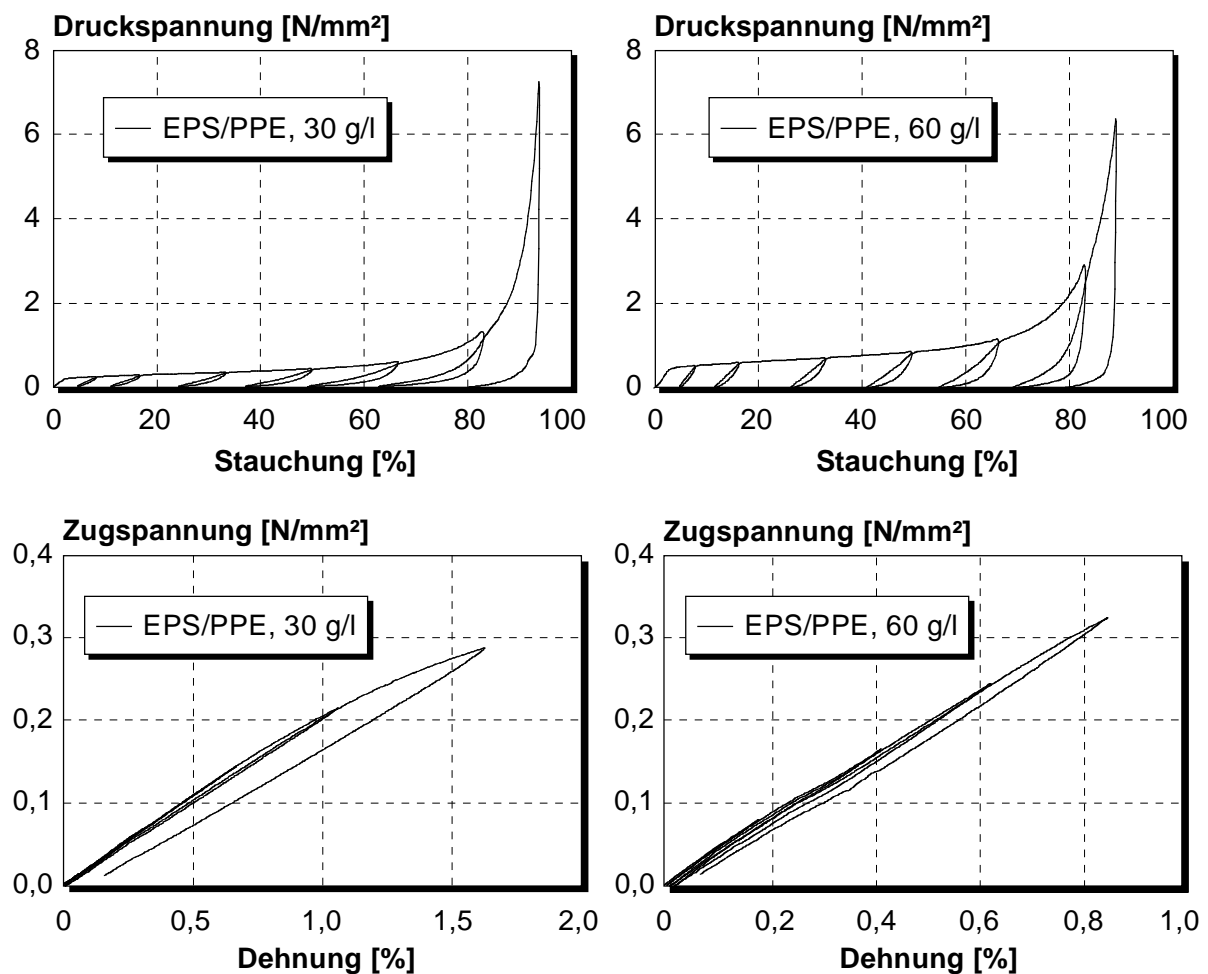


Bild 4.10: Verhalten von EPS/PPE bei inkrementeller Druck- und Zugbelastung

In Bild 4.11 sind die gemittelte Rückverformung und die Energie der Rückverformung aus den inkrementellen Druck- und Zugversuchen aufgetragen. Im Gegensatz zu dem untersuchten Polyurethansystem zeigt sich bei EPS/PPE eine Dichteabhängigkeit der beiden Kennwerte, die auf den Einfluß der eingeschlossenen Luft zurückgeführt werden kann. Da die Zellstruktur von EPS/PPE auch bei großen Deformationen nicht zerstört wird, kann die in den Zellen eingelagerte Luft nicht entweichen und beeinflusst das Entlastungsverhalten des Schaumstoffes.

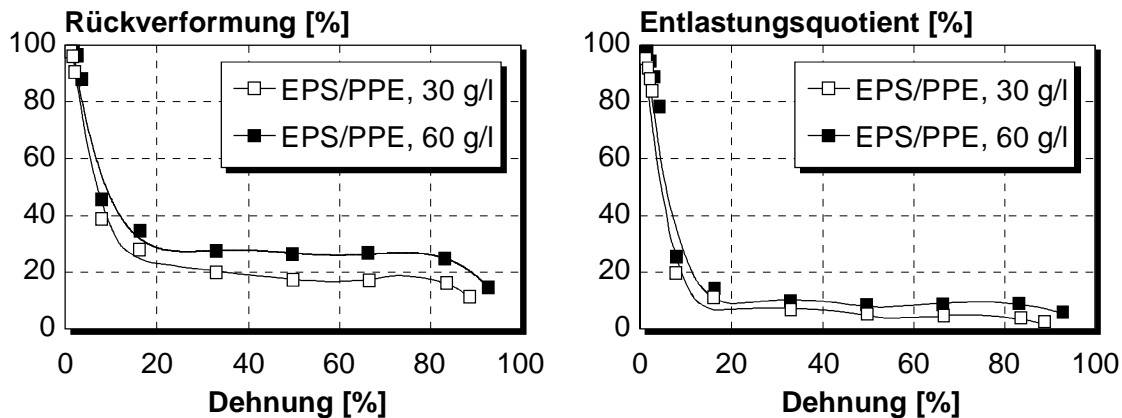


Bild 4.11: Rückverformung und Entlastungsquotient am Beispiel von EPS/PPE

Ziel der folgenden Überlegungen ist eine Isolierung des Anteils der zellularen Struktur an dem Gesamtentlastungsverhalten des Schaumsystems. Für die Berechnung des Einflusses der zellularen Struktur an dem Rückverformungsverhalten wird der Luftanteil an der Gesamtspannung benötigt. Unter der Annahme einer isothermen Verdichtung folgt:

$$\text{Gesamtspannung:} \quad \sigma = \sigma_{\text{Zellstruktur}} + \Delta p_{\text{Luft}}, \quad (4.8a)$$

$$\text{Luftanteil:} \quad \Delta p_{\text{Luft}} = \frac{p_0 \varepsilon_{\text{Vol}}}{1 - \varepsilon_{\text{Vol}} - \phi} \sim \frac{p_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon - \phi}, \quad (4.8b)$$

mit p_0 = Umgebungsluftdruck,

ϕ = Polymervolumenanteil (EPS/PPE, 30 g/l: $\phi \sim 3\%$; EPS/PPE, 60 g/l: $\phi \sim 6\%$).

Unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen dem Anteil der eingeschlossenen Luft an dem Gesamtlastniveau und dem Rückverformungsanteil der Luft kann der Zellanteil an Rückverformung und Energie der Rückverformung näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$\text{Rückverformung:} \quad \varepsilon_{\text{R Zellstruktur}} = \varepsilon_{\text{R gesamt}} \frac{\sigma - \Delta p_{\text{Luft}}}{\sigma} 100\%, \quad (4.9a)$$

Energie der Rückverformung:
$$E_{R \text{ Zellstruktur}} = E_{R \text{ gesamt}} \left(\frac{\sigma - \Delta p_{\text{Luft}}}{\sigma} \right)^2 100\% . \quad (4.9b)$$

Unter Berücksichtigung dieser Korrektur zeigt das isolierte Entlastungsverhalten der Zellstruktur für EPS/PPE nahezu keine Dichteabhängigkeit was auf vergleichbare Verformungsmechanismen schließen läßt (Bild 4.12).

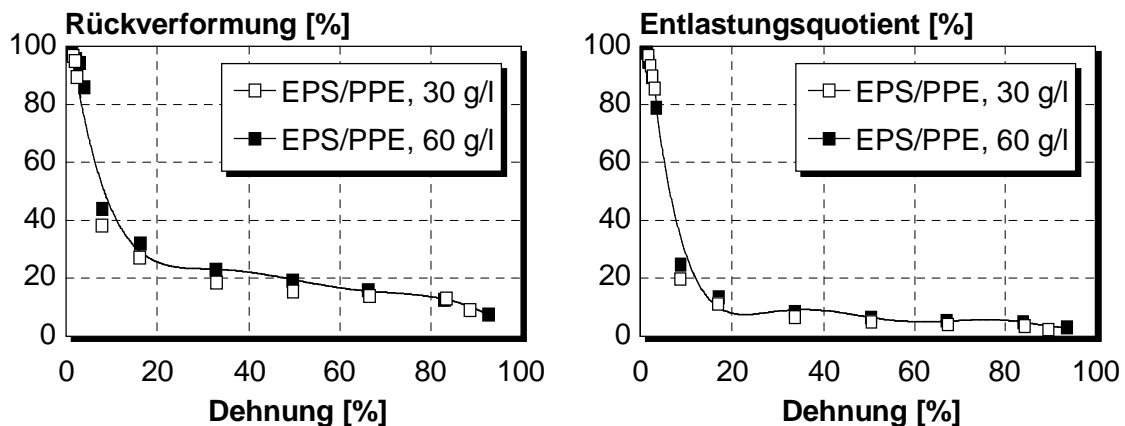


Bild 4.12: Korrigierte Rückverformung und korrigierter Entlastungsquotient am Beispiel von EPS/PPE

In Bild A2.1 des Anhangs A2 sind die Ergebnisse der **Schubversuche** dargestellt. Das Schubverhalten der untersuchten Schaumstoffe ist mit dem Verhalten unter Zugbelastung vergleichbar. Das Verhältnis zwischen dem Schubmodul und dem Elastizitätsmodul des betrachteten Polyurethansystems entspricht der unter Druckbelastung gemessenen Querszahl $\nu^c \sim 0,3$. Für das Schaumsystem auf Polystyrolbasis kann die Schubsteifigkeit unter Berücksichtigung der Querszahl $\nu^c \sim 0,15$ aus einem mittleren Wert der Druck- und Zugsteifigkeit ermittelt werden. Besonders auffällig ist, daß außer bei dem unter Schubbelastung vergleichsweise duktilen EPS/PPE mit einer Dichte von 30 g/l die in den Hauptdehnungsraum transformierten maximalen Scherungen für PUR und EPS/PPE jeweils von gleicher Größenordnung sind, wie die unter Zugbelastung gemessenen maximalen Dehnungen. Bei allen Proben tritt der Gleitbruch unter einem Winkel von 45° auf, was auf einen zugdominierten Versagensmode hinweist.

Auch das Verhalten unter **Biegebelastung** ist mit dem Zugverhalten vergleichbar. Für beide untersuchten Dichten von EPS/PPE wird mit Hilfe der Biegeversuche unter Berücksichtigung der neutralen Faser die Unstetigkeit zwischen Druck- und Zugsteifigkeit nachgewiesen. Ein Vergleich der Steifigkeit und des Fließbeginns für die verschiedenen Versuche ist in den Bildern A2.4-A2.7 von Anhang A2 dargestellt.

Variation der Einsatzrandbedingungen

Entsprechend der in Kapitel 3 definierten Versuchsplanung erfolgt im Rahmen der Materialtests eine Variation der **Belastungsgeschwindigkeit**, der **Einsatztemperatur** und der **Probengeometrie**. Darüber hinaus wird der Einfluß der Schäumhaut auf das Materialverhalten des Polyurethansystems unter einachsiger Druckbelastung untersucht. In Bild 4.13 ist am Beispiel von PUR der Dichte 60 g/l das Materialverhalten des Polyurethansystems unter einachsiger Druckbelastung bei Variation der **Belastungsgeschwindigkeit** dargestellt. Das Materialverhalten ist geschwindigkeitsabhängig, was insbesondere durch eine Erhöhung der Plateauspannung deutlich wird. Innerhalb des untersuchten Geschwindigkeitsbereichs ist das mittlere Spannungsplateau bei einer Erhöhung der Anfangsdehnrates von $\dot{\epsilon}_0 = 0,0167$ 1/s (~ quasistatisch) auf $\dot{\epsilon}_0 = 100$ 1/s ($v_0 = 3$ m/s) um ca. 25% angestiegen. Bei einer weiteren Erhöhung der Anfangsdehnrates auf $\dot{\epsilon}_0 = 200$ 1/s ($v_0 = 6$ m/s) ist kein weiterer Anstieg der Plateauspannung festzustellen.

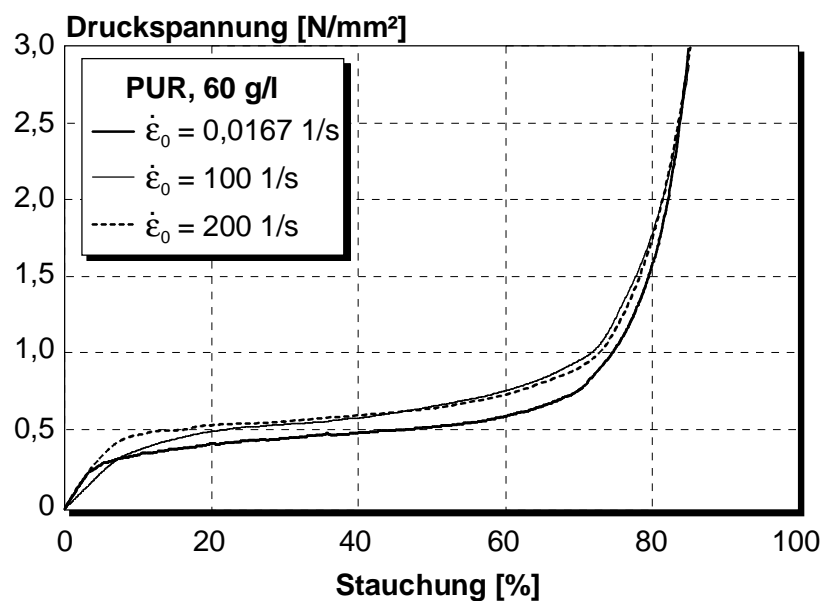


Bild 4.13: Geschwindigkeitsabhängigkeit des Druckverhaltens (PUR, 60 g/l)

Auch die Proben aus EPS/PPE zeigen ein geschwindigkeitsabhängiges Materialverhalten, wobei der Einfluß im Vergleich zu dem Polyurethansystem gering ist. In Bild 4.14 ist das Druckverhalten am Beispiel von EPS/PPE der Dichte 30 g/l dargestellt. Im Gegensatz zu dem Polyurethansystem steigt die mittlere Plateauspannung mit zunehmender Anfangsgeschwindigkeit nahezu kontinuierlich an, wobei die maximale Variation der Plateauspannung innerhalb des Geschwindigkeitsbereichs bis $v_0 = 6$ m/s geringer als 15% ist.

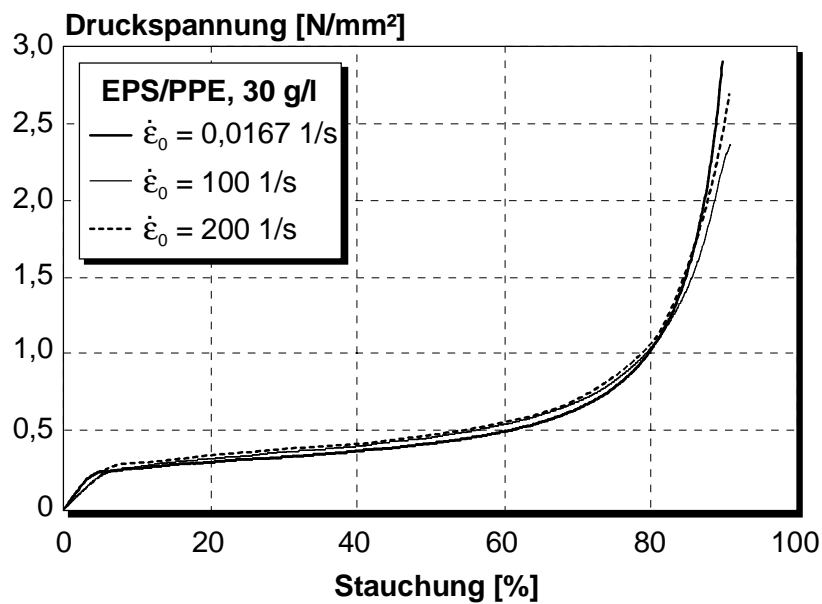


Bild 4.14: Geschwindigkeitsabhängigkeit des Druckverhaltens (EPS/PPE, 30 g/l)

In Bild 4.15 ist der Einfluß der **Einsatztemperatur** auf das Verhalten von PUR der Dichte 100 g/l unter einachsiger Druckbelastung dargestellt. Die Steifigkeit und die mittlere Plateauspannung nehmen mit zunehmender Temperatur ab. Insbesondere eine Erhöhung der Temperatur auf +80°C führt zu einer deutlichen Verringerung der mechanischen Kennwerte. Zusammenfassend variiert die mittlere Plateauspannung innerhalb des gesamten Temperaturbereichs von -20°C bis +80°C um bis zu 30%. Das Verhalten von PUR mit einer Dichte von 60 g/l ist vergleichbar.

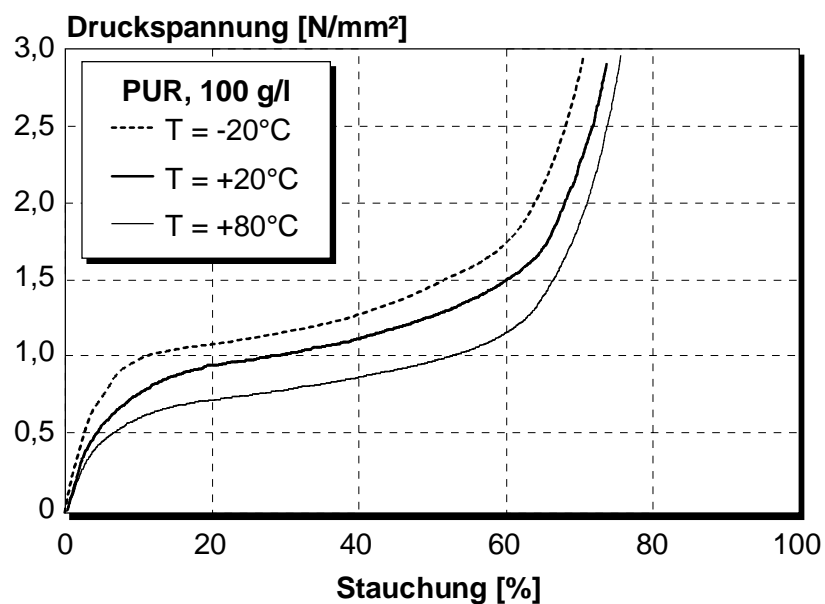


Bild 4.15: Temperaturabhängigkeit des Druckverhaltens (PUR, 100 g/l)

Für EPS/PPE wird innerhalb des untersuchten Temperaturbereichs eine größere Abhängigkeit des Materialverhaltens von der Betriebstemperatur festgestellt, als bei den Proben aus PUR. In Bild 4.16 ist das Druckverhalten von EPS/PPE mit einer Dichte von 60 g/l dargestellt. Insbesondere die Proben, die bei einer Temperatur von +80°C geprüft werden, zeigen ein deutlich geringeres Elastizitätsmodul, Fließbeginn und eine geringere mittlere Plateauspannung. Die Plateauspannung nimmt bei einer Temperaturerhöhung von +20°C auf +80°C um 40% ab.

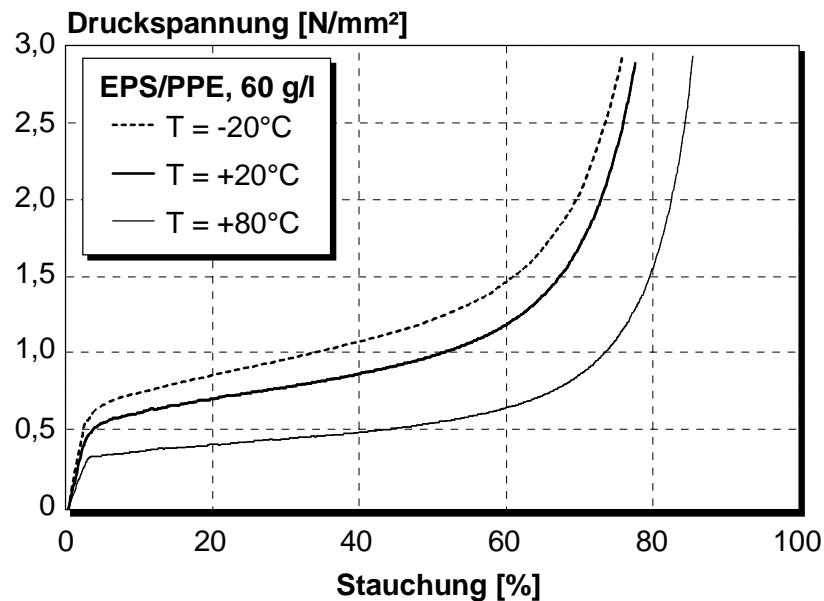


Bild 4.16: Temperaturabhängigkeit des Druckverhaltens (EPS/PPE, 60 g/l)

Gemäß dem Versuchsplan werden die Zug- und Schubversuche ebenfalls unter Variation der Betriebstemperatur durchgeführt. Der Einfluß der Temperatur ist mit dem für Druckbelastung nachgewiesenen Einfluß vergleichbar und in den Bildern A2.2 und A2.3 am Beispiel des Polyurethansystems dargestellt. Mit zunehmender Betriebstemperatur nehmen die Steifigkeit und die maximale Spannung bei Bruch der Proben ab, während die Bruchdehnung und die Bruchgleitung mit der Temperatur ansteigen. Dies zeigt sich besonders bei der Schubbelastung des Polyurethansystems mit einer Dichte von 60 g/l. Die verschiedenen Kennwerte sind in den Bildern A2.4-A2.7 des Anhangs A2 unter Berücksichtigung der variierten Betriebstemperatur und Belastungsarten zusammengefaßt. In Bild A2.5 ist im direkten Vergleich die Asymmetrie der Steifigkeit von EPS/PPE unter Druck- und Zugbelastung zu erkennen. Die Schub- und die Biegesteifigkeit können auf Mittelwerte der zugeordneten Druck- und Zugkennwerte zurückgeführt werden. In den Bildern A2.6-A2.7 des Anhangs A2 ist der Fließbeginn für die verschiedenen Schaumsysteme unter Variation der Belastungsart gezeigt.

Die bisherigen Versuche unter Variation der Belastungsgeschwindigkeit und der Einsatztemperatur zusammenfassend, sind in Bild 4.17 die Steifigkeit und die mittlere Plateauspannung

aus den einachsigen Druckversuchen dargestellt. Besonders die Ergebnisse der quasistatischen Versuche verdeutlichen die Abnahme der Steifigkeit und der mittleren Plateauspannung mit der zunehmenden Betriebstemperatur. Die Auswertung der Steifigkeit bei den dynamischen Versuchen ist, bedingt durch eine erschwerte Nullpunktbestimmung, nur mit Einschränkungen möglich. Für die hinsichtlich der Crashauslegung wesentliche mittlere Plateauspannung wird mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit ein Anstieg nachgewiesen. Darüber hinaus wird deutlich, daß die Rohdichte einen größeren Einfluß auf das Energieabsorptionsvermögen der Schaumstoffe hat, als alle anderen variierten Parameter.

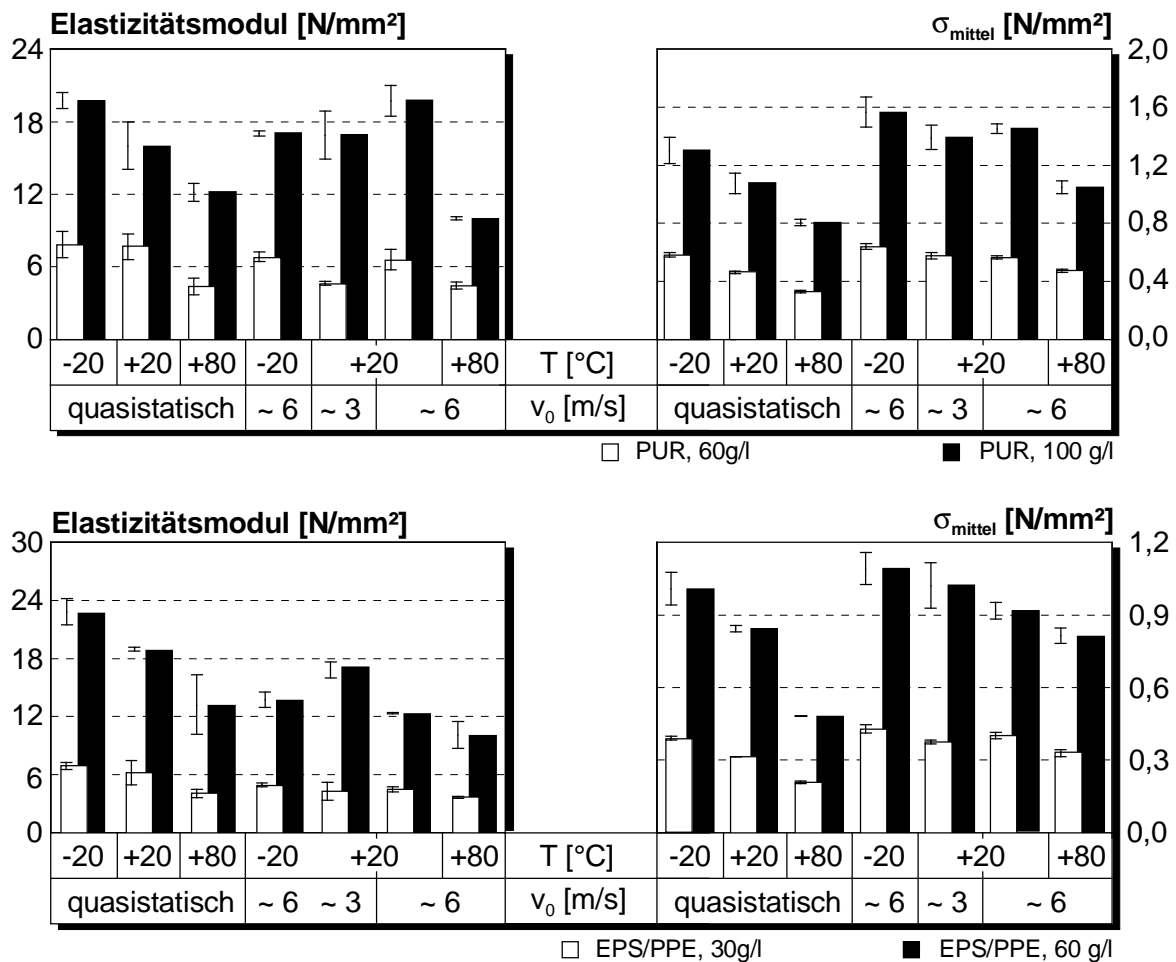


Bild 4.17: Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit am Beispiel des Elastizitätsmoduls und der mittleren Plateauspannung

Bei den Materialtests unter Variation der **Probengeometrie** werden zwei Teilabschnitte unterschieden. Innerhalb des ersten Teilabschnitts werden die Ergebnisse der einachsigen Druckversuche mit variiertes, quaderförmiger Geometrie unter der Berücksichtigung von verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten betrachtet (Proben G1, G2 und G3). Der zweite Teilabschnitt umfaßt die Untersuchung der Polyurethanproben mit Schäumhaut (Proben-

geometrie G1S und G2S), wobei auch bei diesen Versuchen eine Variation der Belastungsgeschwindigkeit erfolgt ist. Die Auswertung der sogenannten Geometrieabhängigkeit des Materialverhaltens erfolgt auf der Basis der Drucksteifigkeit und der mittleren Plateauspannung. Die Ergebnisse für den ersten Teilabschnitt sind in Bild 4.18 zusammengefaßt.

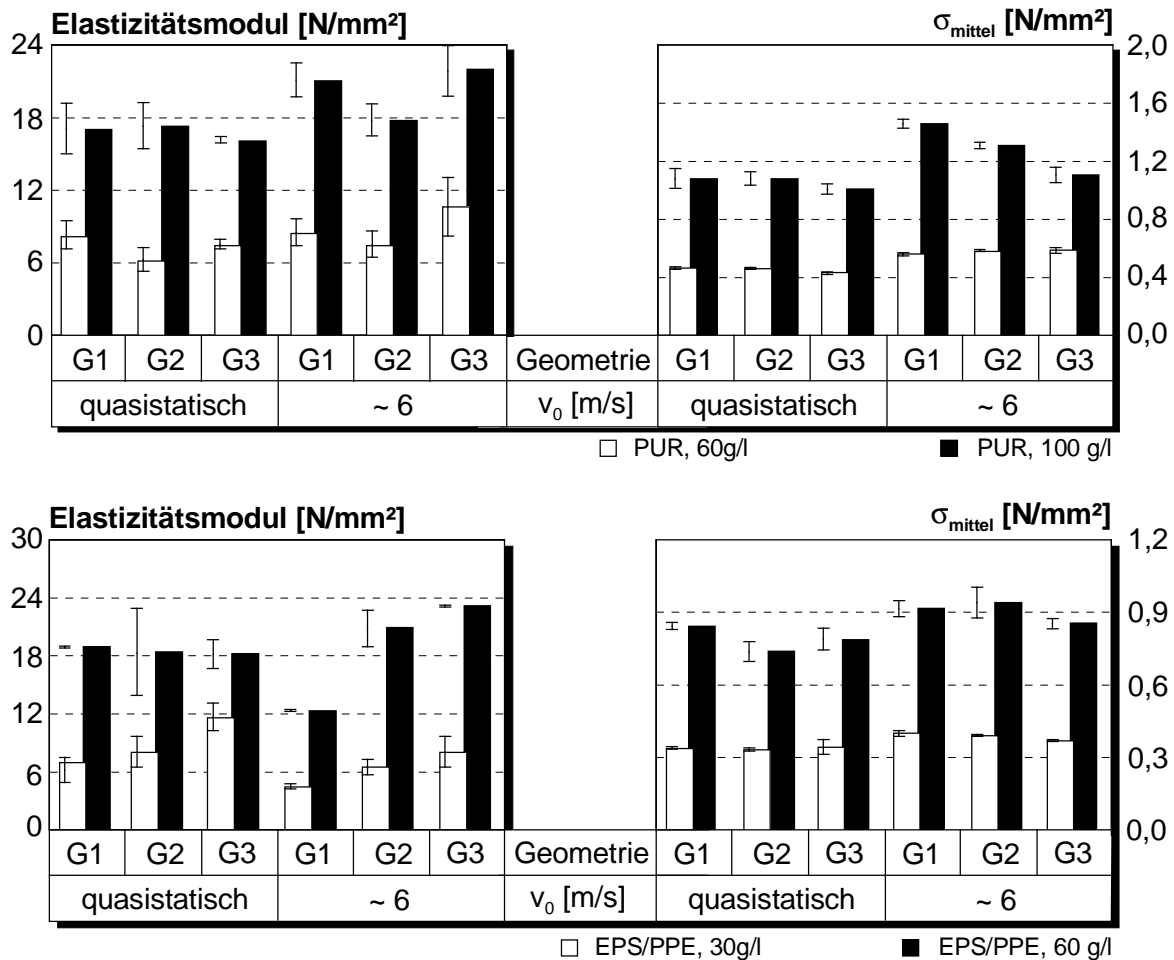


Bild 4.18: Geometrieabhängigkeit des Materialverhaltens am Beispiel der Drucksteifigkeit und der mittleren Plateauspannung

Weder für PUR noch für EPS/PPE wird eine Geometrieabhängigkeit festgestellt. Die Schwankungen der Steifigkeit des Polyurethanschaumstoffes liegen im Bereich der Versuchsstreuung. Für die mittlere Plateauspannung werden keinerlei geometriebedingte Abweichungen festgestellt. Die Abweichung der mittleren Plateauspannung bei einer dynamischen Belastung der PUR-Proben mit einer Dichte von 100 g/l ist nicht auf eine Geometrieabhängigkeit zurückzuführen und wird im folgenden noch kurz erläutert. Bei EPS/PPE sind die vergleichsweise großen Schwankungen der beiden Validierungskriterien auffällig. Die Schwankungen sind auf Dichtevariationen zurückzuführen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen

für das Polyurethansystem ist bei den EPS/PPE-Proben bei einer dynamischen Belastungsgeschwindigkeit keine Veränderung des mittleren Spannungsplateaus mit der Probengeometrie festzustellen.

Das bei den PUR-Proben mit einer Ausgangshöhe von 60 mm und einer Dichte von 100 g/l unter einer dynamischen Belastung festgestellte, geringere mittlere Spannungsplateau ist darauf zurückzuführen, daß bei dem einachsigen Druckversuch im Seitenbereich Schaumstücke herausbrechen (Bild 4.19). Dies beeinflusst besonders das Verhalten der Proben mit der geringeren Ausgangsgrundfläche von 90x90 mm².

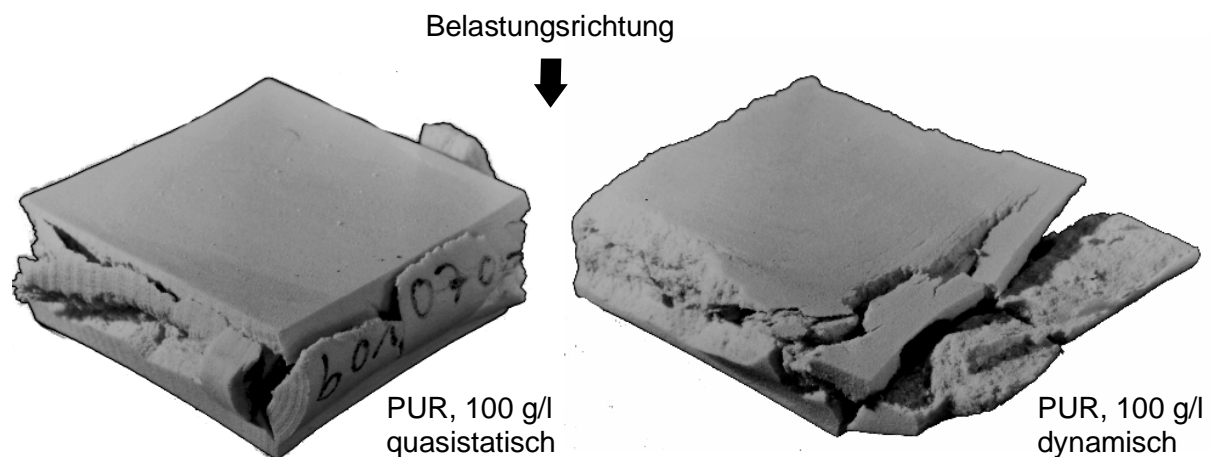


Bild 4.19: Deformierter Probekörper nach einachsiger Druckbelastung (PUR, 100 g/l)

Der innerhalb des zweiten Teilabschnitts zusammengefaßte Einfluß der Schäumhaut auf das Druckverhalten des Polyurethansystems ist in Bild 4.20 am Beispiel der Proben mit einer Dichte von 100 g/l dargestellt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, daß die Proben mit Schäumhaut durchschnittlich eine um 15% größere mittlere Dichte haben, als die bisher untersuchten Proben. Da in dem vorangegangenen Abschnitt keine Geometrieabhängigkeit des Materialverhaltens festgestellt wurde, können die Unterschiede zwischen dem Druckverhalten der Proben mit Schäumhaut und der Proben ohne Schäumhaut ausschließlich auf den Dichteunterschied zurückgeführt werden.

Zusammenfassend wird bei den Proben ohne Schäumhaut unter Berücksichtigung der Dichteabhängigkeit ein geringeres, mittleres Spannungsplateau festgestellt, als bei den Proben mit Schäumhaut. Der Einfluß der Schäumhaut ist unter einachsiger Druckbelastung generell von untergeordneter Bedeutung. Unterschiede zwischen dem Verhalten von Proben mit und ohne Schäumhaut werden im wesentlichen innerhalb des Verdichtungsbereichs festgestellt, was bei den Proben mit Schäumhaut innerhalb des Plateaubereichs auf eine Lokalisierung der Verformung auf den weicheren Kern schließen läßt. Eine weiterführende Beurteilung des

Einflusses der Schäumhaut erfolgt in der Auswertung der im folgenden betrachteten, anwendungsnahen Grundlagentests unter Variation der Impaktorgeometrie.

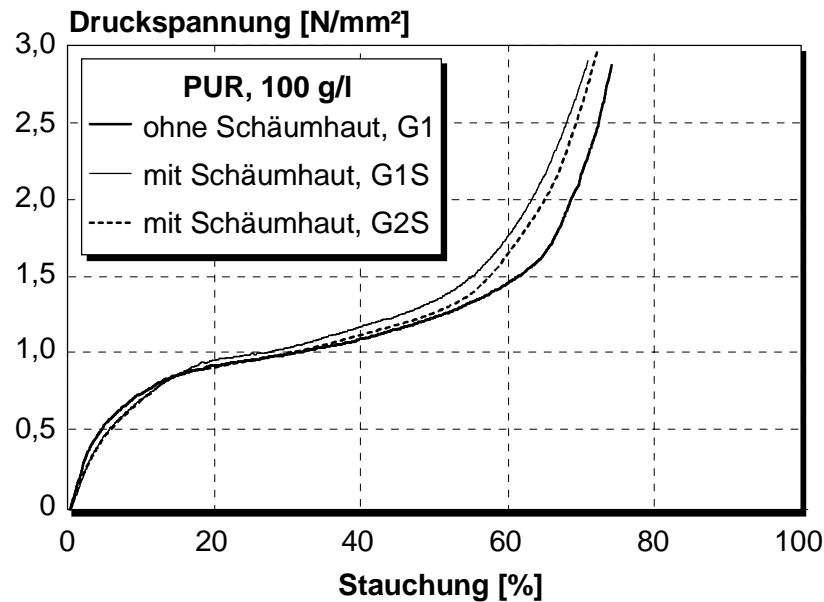


Bild 4.20: Einfluß der Schäumhaut auf das Materialverhalten bei einachsiger Druckbelastung(PUR, 100 g/l)

4.1.3.2.2 Anwendungsnahe Grundlagentests

Mit Hilfe der anwendungsnahen Grundlagentests wird das Materialverhalten der polymeren Hartschaumstoffe unter der Berücksichtigung von komplexeren Probengeometrien und von Impaktorgeometrien untersucht, bei denen die Krafteinleitung mehr den eigentlichen Einsatzbereichen entspricht. Die Durchführung dieser Grundlagentests unter **Variation der Proben- und der Impaktorgeometrie** erfolgt gemäß dem Projektplan zusätzlich unter Variation der Belastungsgeschwindigkeit. Die Ergebnisse der Grundlagentests unter **Variation der Probengeometrie** werden im Rahmen des vorliegenden Unterkapitels nur für die Proben mit u-förmiger Geometrie ausgewertet. Die Ergebnisse der Versuche mit keilförmiger Probengeometrie werden in der in Kapitel 4.3 erläuterten Validierung des Materialmodells ausführlicher betrachtet.

Bei den u-förmigen Schaumstoffproben aus Polyurethan ist das spröde Materialverhalten auffällig. Mit zunehmender Belastung bilden sich Risse, die in Bild 4.21 am Beispiel von PUR mit einer Dichte von 60 g/l dargestellt sind. Die Risse bilden sich innerhalb des Eckbereichs der Aussparung und verlaufen quer zur Lastrichtung, was auf ein Versagen durch Schubbelastung schließen läßt.

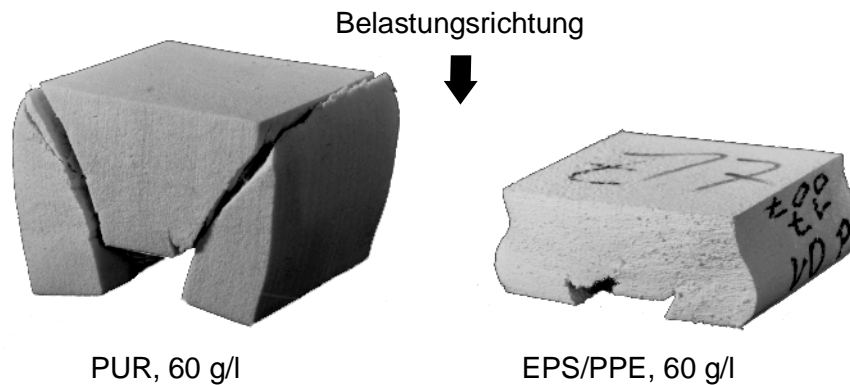


Bild 4.21: U-förmige Probekörper nach quasistatischer Belastung

Die Kraft-Wegverläufe der Einzelversuche sind in Bild 4.22 dargestellt. Die erheblichen Streuungen der Versuchsergebnisse sind deutlich zu erkennen.

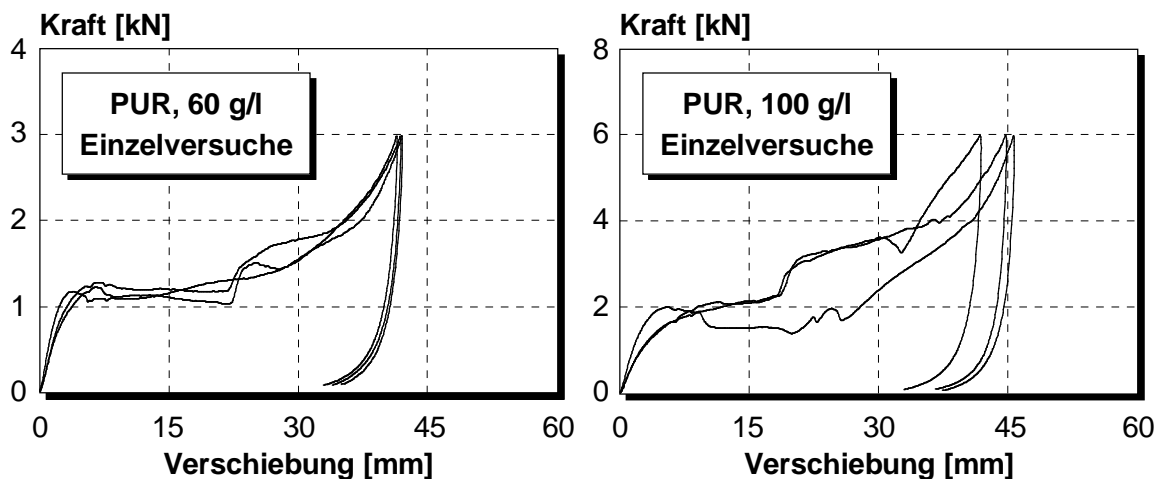


Bild 4.22: Ergebnisse der Druckversuche mit u-förmiger Probengeometrie (PUR)

Auch bei den Proben aus EPS/PPE wird die Bildung eines Risses festgestellt. Der Riß entsteht reproduzierbar mittig an der Oberkante der Aussparung, an der bei dieser Probengeometrie die größten Zugspannungen auftreten (Bild 4.21). Die Rißbildung beginnt bereits bei vergleichsweise geringen Deformationen der Gesamtstruktur, was mit dem unter Zugbelastung festgestellten, spröden Bruchverhalten übereinstimmt. Offensichtlich wird durch die mit dem Riß verbundene Umverteilung der Spannungen die Bildung einer Schubspannung innerhalb des Eckbereichs der Aussparung unterdrückt. Der Kraft-Wegverlauf der untersuchten Proben wird nur geringfügig durch die Bildung des Risses beeinflusst (Bild 4.23).

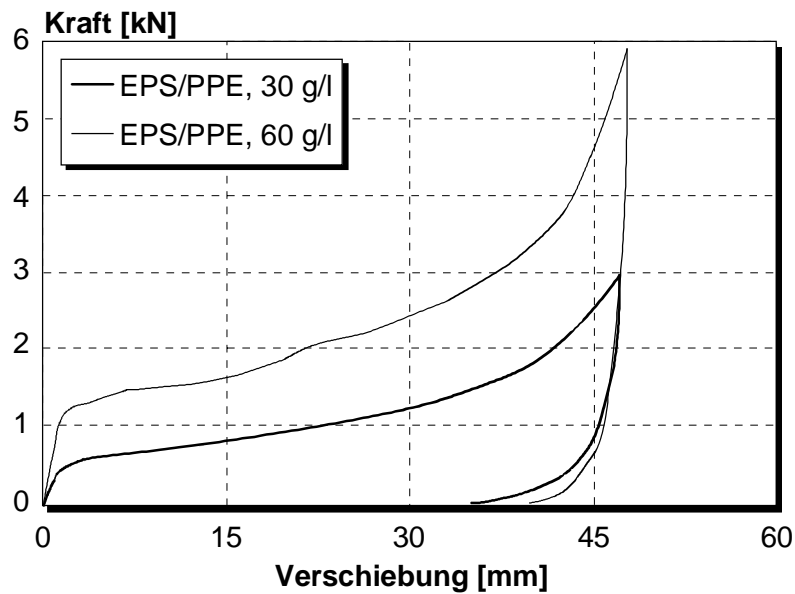


Bild 4.23: Ergebnisse der Druckversuche mit u-förmiger Probengeometrie (EPS/PPE)

Bei allen Versuchen unter Variation der Probengeometrie ist der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf das Materialverhalten von gleicher Größenordnung, wie bei den zuvor erläuterten einachsigen Druckversuchen im Rahmen der Materialtests [SH99]. Auf eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse wird hier verzichtet.

Mit den anwendungsnahen Grundlagentests unter **Variation der Impaktorgeometrie** werden die Ergebnisse der Versuche mit halbzyklindrischem und halbkugelförmigem Prüfkörper zusammengefaßt. Das Polyurethansystem wird hierbei ohne und mit Berücksichtigung der Schäumhaut betrachtet. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird hierzu der Verlauf der Kraft über dem relativen Weg (Weg / Probenanfangshöhe) ausgewertet.

Zu Beginn der Auswertung werden die Ergebnisse der Versuche für das Polyurethansystem betrachtet. Bei allen Versuchen wird nur eine sehr geringe Streuung der Versuchsergebnisse festgestellt. Die Ergebnisse der Druckbelastung des Polyurethansystems mit halbzyklindrischem Impaktor sind in Bild 4.24 am Beispiel der Proben mit einer Dichte von 60 g/l dargestellt. Der Einfluß der Schäumhaut ist im Gegensatz zu den einachsigen Druckversuchen etwas deutlicher zu erkennen. Für einen besseren Vergleich der Ergebnisse wird der Kraftverlauf der Probe ohne Schäumhaut am Beispiel von PUR mit einer Dichte von 60 g/l linear mit der Dichte skaliert. Diese Skalierung um die durch die Schäumhaut bedingte Dichteerhöhung führt zu einer geringen Abweichung zwischen den Versuchen ohne und mit Schäumhaut, die somit im wesentlichen auf den Dichteunterschied zurückzuführen sind (vgl. Bild 4.24).

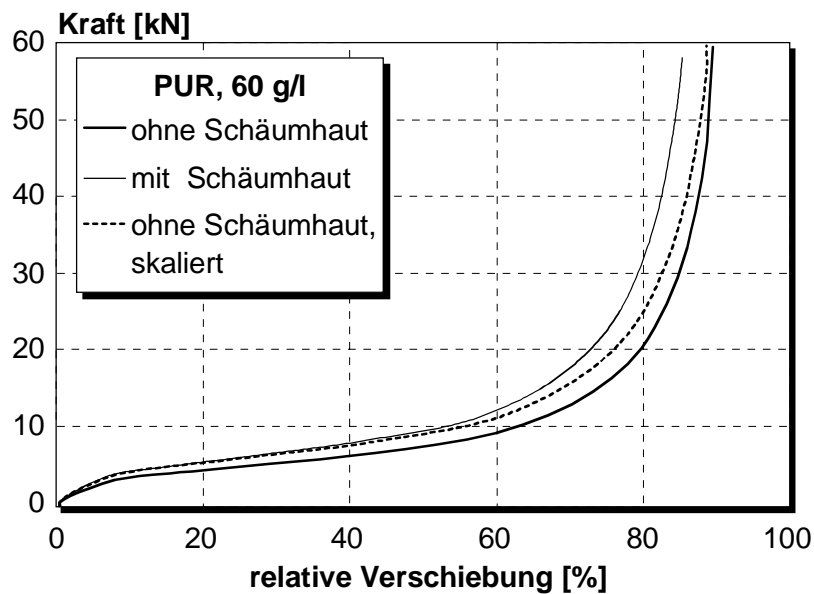


Bild 4.24: Ergebnis der Druckversuche mit halbzyllindrischem Impaktor (PUR, 60 g/l)

Die Ergebnisse der innerhalb dieses Kapitels nicht weiter erläuterten, dynamischen Versuche mit halbzyllindrischem Impaktor zeigen einen Geschwindigkeitseinfluß, der mit dem gezeigten Verhalten unter der einachsigen Druckbelastung vergleichbar ist [SH99].

Bei den Versuchen mit halbkugelförmigem Impaktor bilden sich bei den PUR-Proben mit Schäumhaut beider Dichten entsprechend der Impaktorgeometrie kreisförmige Risse (Bild 4.25).

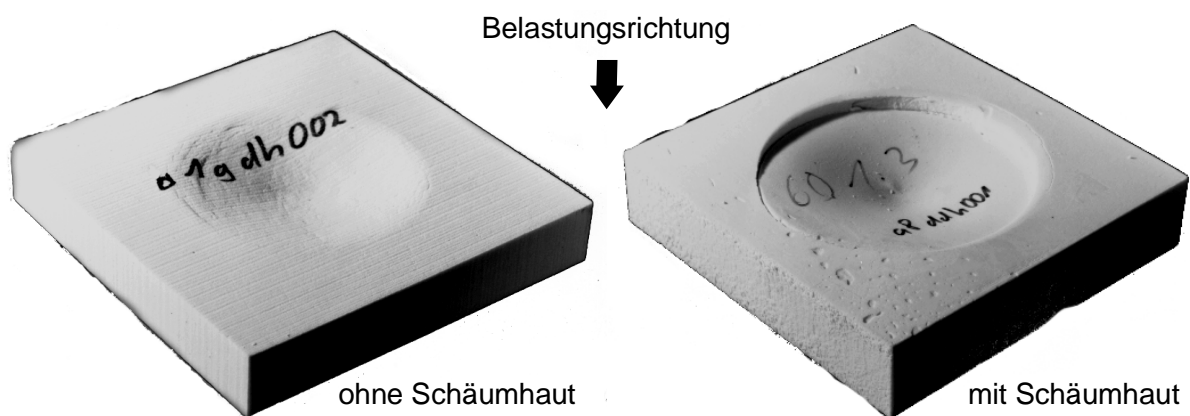


Bild 4.25: Deformierter Probenkörper nach Druckbelastung mit halbkugelförmigem Impaktor am Beispiel von Polyurethan mit einer Dichte von 60 g/l

Aufgrund des reproduzierbar großen Durchmessers der Risse haben diese keinen wesentlichen Einfluß auf den Kraft-Wegverlauf. In Bild 4.26 sind die Ergebnisse der quasistatischen Versuche am Beispiel des Polyurethansystems mit der Dichte von 60 g/l zusammengefaßt. Der Vergleich

des Kraft-Wegverlaufs der Probe ohne und der Probe mit Schäumhaut verdeutlicht, daß innerhalb des relevanten Deformationsbereichs bis ca. 60% kein wesentlicher Unterschied nachzuweisen ist. Dabei ist der Verlauf der Proben ohne Schäumhaut entsprechend der Vorgehensweise bei den Versuchen mit halbzyklrischem Impaktor in erster Näherung um den Dichteunterschied skaliert. Ein Einfluß der eigentlichen Schäumhaut ist erst mit Erreichen des Verdichtungsbereichs festzustellen.

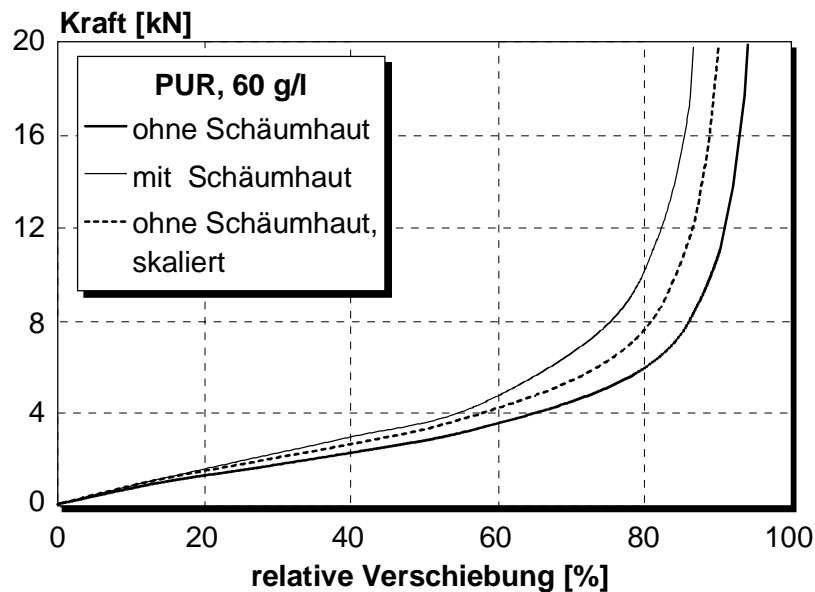


Bild 4.26: Ergebnis der Druckversuche mit halbkugelförmigem Impaktor (PUR, 60 g/l)

Bei den anwendungsnahen Grundagentests unter Variation der Impaktorgeometrie werden für EPS/PPE vergleichbar mit den Ergebnissen der untersuchten Polyurethanproben nur geringe Streuungen festgestellt. Bei den untersuchten Proben bilden sich unabhängig von der untersuchten Schaumstoffdichte und der Impaktorgeometrie keine Risse. Der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit ist entsprechend dem unter einachsiger Druckbelastung festgestellten Verhalten zu vernachlässigen. Auf die Darstellung der Versuchsergebnisse wird im vorliegenden Kapitel verzichtet. Die Darstellung der Kraft-Wegverläufe erfolgt im Rahmen der Validierung des Materialmodells in Kapitel 4.3.

4.1.3.3 Analyse der Materialcharakterisierung

Die Analyse der Materialcharakterisierung verfolgt im wesentlichen zwei Ziele, die Überprüfung und **Validierung der Annahmen** über das Materialverhalten und den **Aufbau von Grundlagen**, die für eine Modellierung des Materialverhaltens von polymeren Hartschaumstoffen benötigt werden. Die Analyse basiert nahezu vollständig auf den Ergebnissen der

Materialtests. Die anwendungsnahen Grundlagentests dienen der Bestätigung von Werkstoffeigenschaften, die im Rahmen der Materialtests festgestellt wurden.

Durch die **Validierung der Annahmen** erfolgt eine erste Überprüfung und damit Qualitätssicherung innerhalb des Integrationsprozesses. Wie die folgende Analyse bestätigt, zeigen die Ergebnisse der Materialcharakterisierung, daß die Validierung der Annahmen über das Materialverhalten der polymeren Hartschaumstoffe nur mit Einschränkungen möglich ist. Aus diesem Grund muß für den Einzelfall bewertet werden, inwieweit die unzureichende Validierung einer Annahme eine qualitativ abgesicherte Modellierung des Materialverhaltens gefährdet. Zur Verdeutlichung werden hierzu die Annahmen den Ergebnissen der Analyse gegenübergestellt.

Annahme: Polymere Hartschaumstoffe können für die Modellierung als Kontinuum betrachtet werden, d.h. eine makroskopische Beschreibung ist ausreichend.

Validierung: Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen wird nachgewiesen, daß das Materialverhalten des Polyurethansystems eine kontinuumsmechanische Beschreibung zuläßt. Im Gegensatz hierzu wird durch die Unsymmetrie der elastischen Eigenschaften von EPS/PPE unter Zug- und Druckbelastung ein Einfluß der zellularen Struktur nachgewiesen, dessen Abbildung eine mikromechanische Modellierung des Werkstoffes erfordern würde. Aufgrund der unter einachsiger und hydrostatischer Druckbelastung festgestellten Eigenschaften und der generellen Druckdominanz der Belastungen innerhalb des Einsatzbereichs, die mit Hilfe der anwendungsnahen Grundlagentests bestätigt werden konnte, wird diese Asymmetrie als Kriterium für die Auswahl eines geeigneten Materialmodells vorerst vernachlässigt.

Annahme: Das Materialverhalten von polymeren Hartschaumstoffen ist unsymmetrisch unter Zug- und Druckbelastung.

Validierung: Über die erwähnten elastischen Eigenschaften hinausgehend ist das Materialverhalten von beiden untersuchten Schaumsystemen unter Zug- und Druckbelastung unsymmetrisch. Dies ist bedingt durch das spröde Versagen der Schaumstoffe unter Zugbelastung, was allerdings nicht einer kontinuumsmechanischen Beschreibung der Werkstoffe widerspricht. Die anwendungsnahen Grundlagentests mit u-förmiger Probe verdeutlichen den Einfluß dieser Unsymmetrie unter Druck und Zug für das sprödere Polyurethansystem, während für EPS/PPE auch bei Belastungen mit komplexerem Spannungszustand kein Einfluß dieser Unsymmetrie festgestellt wird.

Annahme: Unter deviatorischer und unter hydrostatischer Druckbelastung des Kontinuums wird bei großen Deformationen ein inelastisches Materialverhalten festgestellt.

Validierung: Die Annahme ist mit Hilfe der einachsigen und hydrostatischen Druckversuche für beide Schaumsysteme validiert.

Annahme: Das Materialverhalten ist elastisch-plastisch, d.h. ein lokales Bruchversagen der Zellstruktur unter Druckbelastung ist nicht zu berücksichtigen.

Validierung: Ein Einfluß eines sprödbrechartigen, lokalen Bruchversagens kann mit Hilfe der Materialtests und der anwendungsnahen Grundlagentests unter Druckbelastung nicht nachgewiesen werden. Makroskopisch betrachtet verhalten sich die beiden Schaumsysteme elastisch-plastisch.

Annahme: Das Energieabsorptionsvermögen der Schaumstoffe ist nicht von der Proben- und der Impaktorgeometrie, allerdings von der Dichte des Schaumstoffes, von der Belastungsgeschwindigkeit und der Einsatztemperatur abhängig.

Validierung: Durch die Materialauswahl und die Versuche unter Variation der Einsatzrandbedingung erfolgt eine Bestätigung dieser Annahme.

Ziel des folgenden **Aufbaus von Grundlagen** über das Materialverhalten ist eine Festlegung von werkstoffspezifischen Eigenschaften, die bei der Abbildung des Materialverhaltens durch ein Materialmodell umgesetzt werden müssen. Die Grundlagen dienen dementsprechend der Auswahl und darüber hinaus bei Bedarf der Weiter-, bzw. Neuentwicklung des Modells. Durch die Validierung der Annahmen ist die generelle Beschreibung des Materialverhaltens von polymeren Hartschaumstoffen bereits eingeschränkt. Die Ergebnisse der Materialcharakterisierung zeigen, daß die polymeren Hartschaumstoffe bei einer beliebigen Belastung ein nichtlinear, irreversibles Materialverhalten haben. Unter der für den Einsatzbereich wesentlichen Druckbelastung bei großen Deformationen wird bei makroskopischer Betrachtung ein elastisch-plastisches Materialverhalten mit einer Abhängigkeit der Plastizität von der ersten und der zweiten Spannungsinvariante nachgewiesen. Dieses Verhalten ist bei dem Polyurethansystem zusätzlich durch eine Schädigung der zellularen Struktur bei großen Stauchungen überlagert, die für eine anwendungsorientierte Modellierung vernachlässigt werden kann.

Die Unsymmetrie des Materialverhaltens führt unter Zug- und Schubbelastung zu einer Dominanz der Elastizität bei geringen plastischen Verformungsanteilen. Mit dem Erreichen

einer maximalen Zug- oder Schubspannung versagen die Proben beider Schaumsysteme sprödebrüchig. Das Bruchversagen ist basierend auf [LOOO89] unabhängig von der Belastung durch ein zugdominiertes Versagen nach Mode I charakterisiert.

Zusammenfassend muß ein allgemeiner kontinuumsmechanischer Ansatz zur Beschreibung des Materialverhaltens von polymeren Schaumstoffen die Kopplung der folgenden Eigenschaften ermöglichen:

- **Elastizität,**
- **Plastizität,**
- **Versagen nach Mode I.**

Die **Elastizität** der untersuchten Schaumstoffe entspricht bei kleinen Deformationen einem linearelastischen Verhalten. Dabei wird für PUR eine vergleichsweise große Querdehnung von $\nu^e \sim 0,3$ festgestellt, während für EPS/PPE eine Querszahl von $\nu^e \sim 0,15$ gemessen wird. Diese Eigenschaften stimmen mit den Ergebnissen von Untersuchungen in [Kn75] und [GA97] überein. Aufgrund der geringen Bedeutung des elastischen Deformationsbereichs für das Energieabsorptionsvermögen kann die für EPS/PPE nachgewiesene Unsymmetrie der Druck- und Zugsteifigkeit vernachlässigt und isotropes Materialverhalten angenommen werden. Unter Berücksichtigung dieser Vereinfachungen ist unabhängig von der Klassifizierung eine allgemeine Beschreibung des elastischen Verhaltens von polymeren Hartschaumstoffen durch einen linearen, isotropen Ansatz ausreichend.

Für eine Beschreibung der **Plastizität** eines Werkstoffes müssen die *Fließbedingung*, das *Fließgesetz* und die *plastische Verfestigung* bekannt sein. Im folgenden werden zwei Darstellungen gewählt, um die *Fließbedingung* zu beschreiben. Die klassische Darstellung der Fließbedingung innerhalb des Hauptspannungsraums dient einer Verdeutlichung des Zusammenhangs zwischen dem unter Druck-, Zug- und Schubbelastung ermittelten Fließbeginn. Mit Hilfe der Darstellung des Fließbeginns in dem sogenannten p-q-Spannungsraum wird zusätzlich der Einfluß des hydrostatischen Anteils des Spannungstensors gezeigt. Innerhalb des p-q-Spannungsraums sind p die erste Spannungsinvariante, bzw. der hydrostatische Druck, und q die zweite Spannungsinvariante, die der Vergleichsspannung nach von Mises entspricht. In den Bildern 4.27 und 4.28 ist der Fließbeginn für beide Schaumsysteme innerhalb des Hauptspannungsraums dargestellt. Ergänzend hierzu ist in beiden Darstellungen die Vergleichsspannung nach von Mises gezeigt.

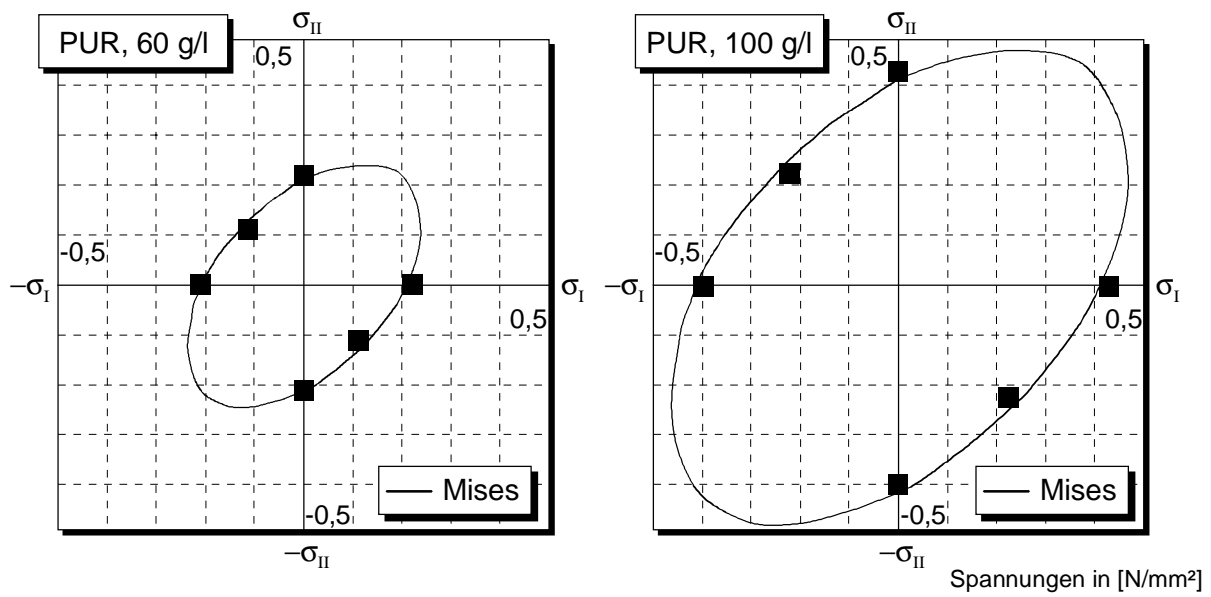


Bild 4.27: Fließbeginn von PUR innerhalb des Hauptspannungsraums

Anhand von Bild 4.27 ist zu erkennen, daß der Fließbeginn des Polyurethanschaumstoffes unabhängig von der Dichte durch eine Fließbedingung ähnlich der Vergleichsspannung nach von Mises beschrieben werden kann, wenn der Einfluß der plastischen Kompressibilität vernachlässigt wird. Aufgrund der erheblichen Unsymmetrie des Materialverhaltens unter Druck- und Zugbelastung ist eine vergleichbare Aussage für EPS/PPE nicht möglich (Bild 4.28).

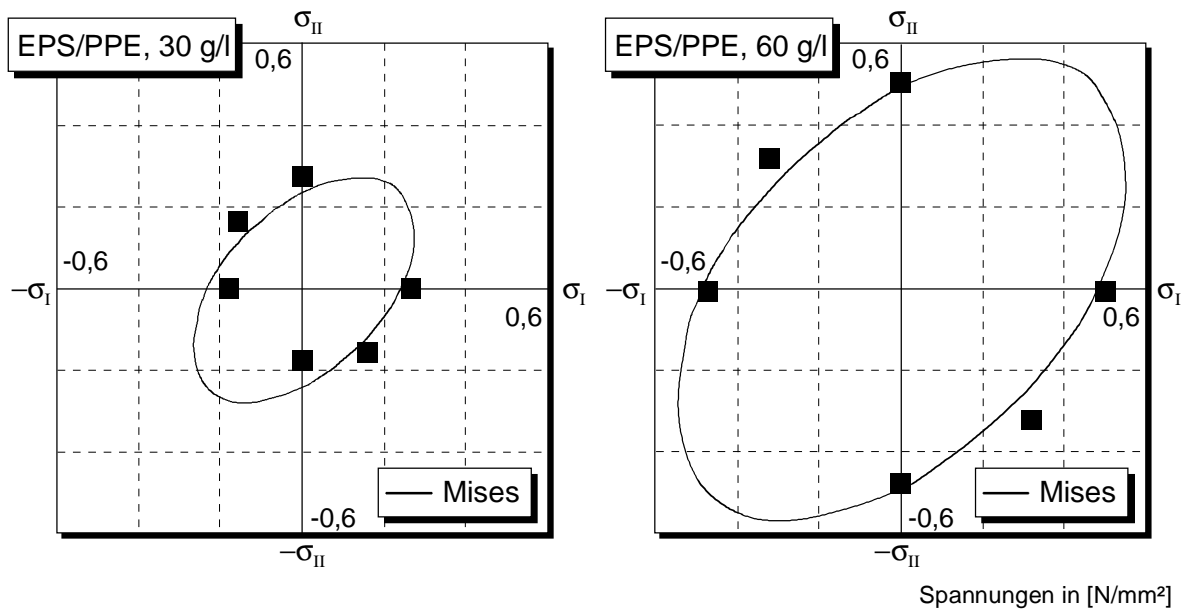


Bild 4.28: Fließbeginn von EPS/PPE innerhalb des Hauptspannungsraums

Insbesondere bei EPS/PPE mit einer Dichte von 30 g/l äußert sich die Unsymmetrie des Druck- und Zugverhaltens in einem deutlichen Unterschied des Fließbeginns unter Druck- und Zugbelastung.

Bisher wurde bei der Betrachtung des Fließbeginns die erste Spannungsinvariante vernachlässigt. Dies wird durch die Übertragung des Fließbeginns in die p-q-Ebene berücksichtigt. In den Bildern 4.29 und 4.30 erfolgt dies exemplarisch für PUR mit einer Dichte von 100 g/l und EPS/PPE mit einer Dichte von 60 g/l.

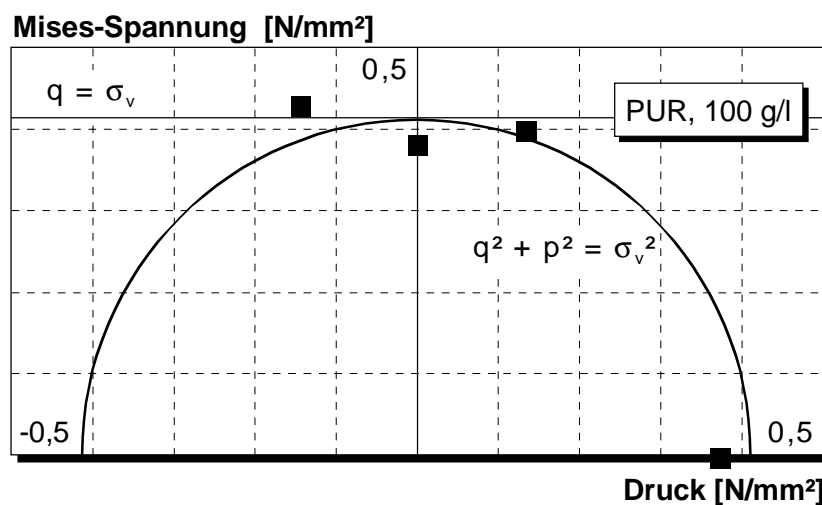


Bild 4.29: Der Fließbeginn von PUR mit einer Dichte von 100 g/l innerhalb des p-q-Spannungsraums

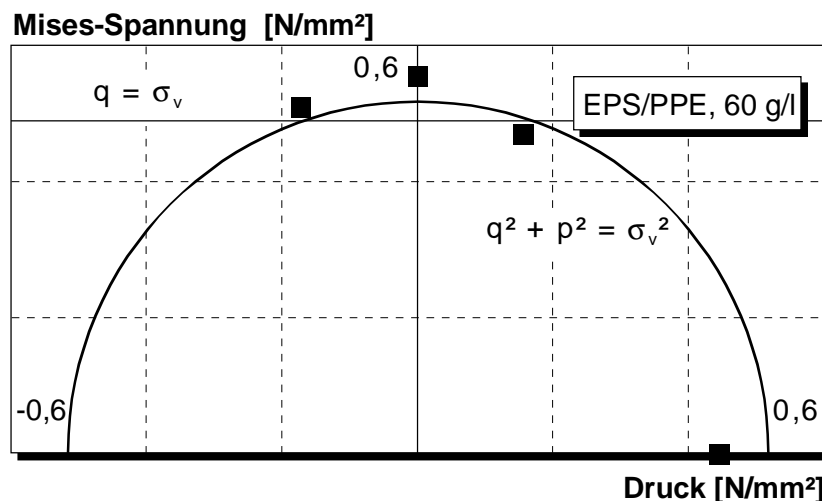


Bild 4.30: Der Fließbeginn von EPS/PPE mit einer Dichte von 60 g/l innerhalb des p-q-Spannungsraums

Als Vergleich ist neben der Vergleichsspannung nach von Mises zusätzlich ein durch eine einfache Kreisgleichung formulierter Zusammenhang zwischen der ersten und der zweiten Spannungsinvariante dargestellt. Die Kreisgleichung beschreibt in erster Näherung die einfachste, stetige und geschlossene Verknüpfung zwischen der ersten und der zweiten Invariante zur Formulierung einer Fließbedingung. Beide Darstellungen verdeutlichen, daß die Fließbedingung nur mit Einschränkung durch einen so einfachen Ansatz, wie die erläuterte Kreisgleichung formuliert werden kann. Zu einer ausführlicheren Beschreibung der Fließfläche sind weitere, komplexere Versuche, wie beispielsweise zweiachsige Druck- und Zugversuche erforderlich. Trotzdem ist es auf der Basis der durchgeführten Materialtests möglich, den gesuchten Zusammenhang zwischen der ersten und der zweiten Spannungsinvariante und somit die Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Materialmodells einzugrenzen.

Das *Fließgesetz* kann der Fließbedingung zugeordnet oder durch eine unabhängige Formulierung beschrieben sein. Ein zugeordnetes Verhalten ist für die polymeren Hartschaumstoffe bei geringen Deformationen zu erwarten, da es sich bei dem plastischen Fließen um eine lokale plastische Verformung der Zellstruktur handelt. Eine entkoppelte Formulierung des Fließgesetzes ist auf eine Dominanz von inneren Reibungseffekten zurückzuführen. Mit einer zunehmenden Deformation der Zellstruktur bis in den Verdichtungsbereich kommt es zu einem Kontakt von Zellwänden- und stäben, der mit einer Reibung verbunden ist, wodurch dieser Effekt einen zunehmenden Einfluß haben wird. Somit ist eine einheitliche Beschreibung des Fließgesetzes über dem gesamten Deformationsbereich nur mit Einschränkungen möglich. Aufgrund der großen Deformationen von polymeren Hartschaumstoffen innerhalb des Einsatzbereichs und unter Berücksichtigung der Schädigung der zellularen Struktur des Polyurethansystems wird die Reibung als dominierender Mechanismus identifiziert. Aus diesem Grund ist für eine Beschreibung der Plastizität eine entkoppelte Formulierung des Fließgesetzes zu wählen. Darüber hinaus wird die Formulierung des Fließgesetzes dadurch eingeschränkt, daß entsprechend dem in Bild 4.5 dargestellten Zusammenhang zwischen der gemessenen Querszahl und der Stauchung, die mit dem Fließgesetz verknüpfte, plastische Querszahl nahezu vernachlässigbar ist. Dies bedeutet, daß die plastischen Dehnungen in den unterschiedlichen Achsen entkoppelt sind.

Die durch das *Verfestigungsgesetz* beschriebene, plastische Verfestigung beschreibt die Veränderung der Fließfläche mit zunehmender Deformation. Aufgrund der Druckdominanz der Belastungen von polymeren Hartschaumstoffen innerhalb des Einsatzbereichs wird die plastische Verfestigung auf der Basis des einachsigen und des hydrostatischen Druckversuchs bestimmt. In den Bildern 4.31 und 4.32 ist unter Vernachlässigung der bei großen Stauchungen geringen plastischen Querdehnung die Druckspannung über der Volumenstauchung bei einer einachsigen und hydrostatischen Druckbelastung aufgetragen. Berücksichtigt man die große Übereinstimmung zwischen der plastischen Verfestigung unter einachsiger und unter

hydrostatischer Belastung, so ist zu erwarten, daß das Materialverhalten bei der Wahl einer geeigneten Fließbedingung bereits ausreichend durch ein isotropes Verfestigungsgesetz zu beschreiben ist.

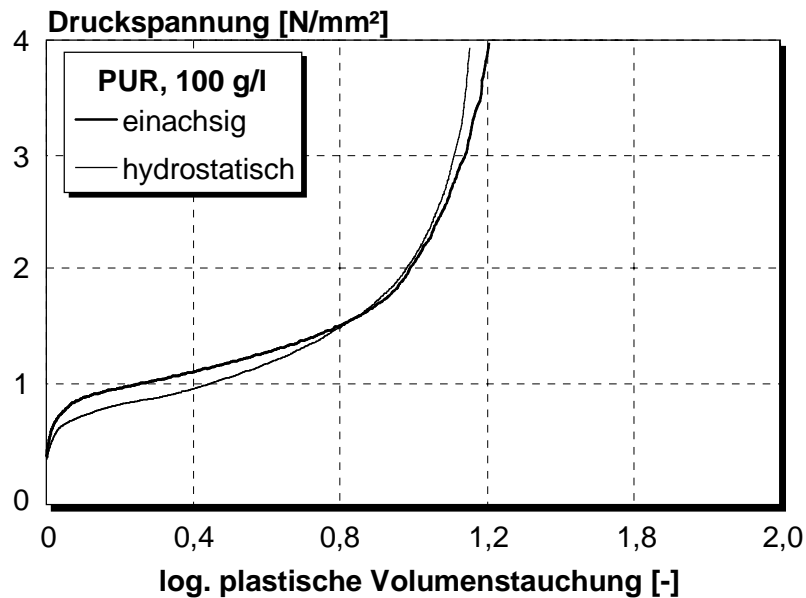


Bild 4.31: Einachsige und hydrostatische Verfestigung von PUR mit einer Dichte von 100 g/l

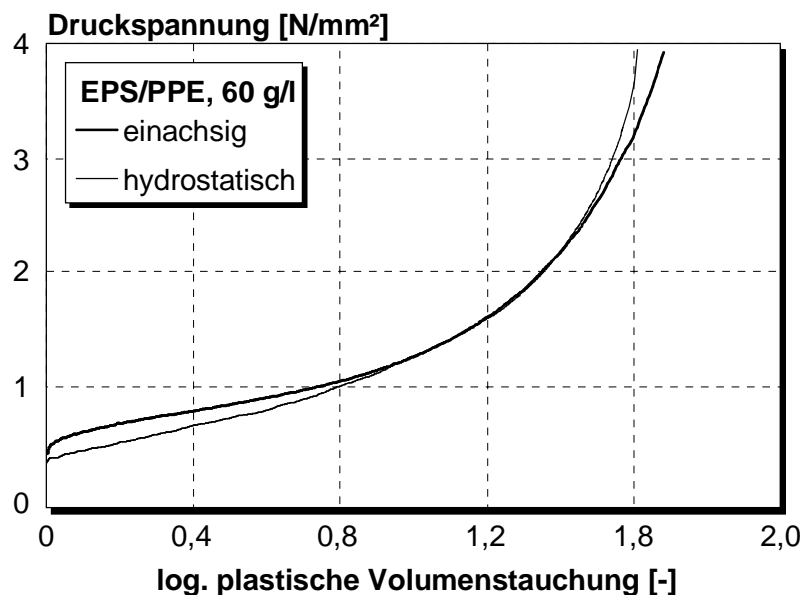


Bild 4.32: Einachsige und hydrostatische Verfestigung von EPS/PPE mit einer Dichte von 60 g/l

Im Anschluß an die Beschreibung der elastischen und plastischen Eigenschaften der betrachteten Schaumstoffe werden die Geschwindigkeits-, bzw. Dehnratenabhängigkeit, die Dichte- und die

Temperaturabhängigkeit des Materialverhaltens diskutiert. Am Beispiel der mittleren Plateauspannung wird deutlich, daß die Festigkeit der untersuchten Schaumstoffe und somit das Energieabsorptionsvermögen durch alle drei variierenden Einsatzrandbedingungen beeinflusst wird. Die Materialcharakterisierung hat dabei gezeigt, daß die mechanischen Eigenschaften für Schaumsysteme unterschiedlicher Dichte vergleichbar und somit skalierbar sind. Die Dichte ist somit nicht zwingend in der Formulierung von Materialgleichungen zu berücksichtigen. Ähnliches gilt für die Einsatztemperatur. Das Materialverhalten kann also für die Betrachtung eines Kollisionsereignisses auf die jeweilige Dichte und Betriebstemperatur kalibriert werden. Da sich die Belastungsgeschwindigkeit über dem Kollisionsereignis ändert, muß die Berücksichtigung dieses Einflußparameters anders erfolgen. Die erarbeiteten Grundlagen und die Materialcharakterisierung haben gezeigt, daß für eine umfassende Beschreibung der Geschwindigkeitsabhängigkeit ein sehr komplexes System, bestehend aus der Zellstruktur und der in den Zellen eingelagerten Luft, betrachtet werden muß. Dieses System ist meßtechnisch nur unzureichend zu erfassen. Aus diesem Grund wird die Auswahl eines phänomenologischen Ansatzes zur Abbildung der Dehnratenabhängigkeit vorgeschlagen.

Zum Abschluß der Materialcharakterisierung wird das **Bruchversagen** der Schaumstoffe unter Zug- und Schubbelastung betrachtet. Die Versuche mit PUR unter Variation der Proben- und der Impaktorgeometrie haben gezeigt, daß auf eine Berücksichtigung des Bruchversagens bei einer Modellierung des Materialverhaltens nicht verzichtet werden kann. Die Bauteile aus dem untersuchten Schaumsystem auf Polystyrolbasis zeichnen sich innerhalb des Einsatzbereichs durch ein unkritisches Bruchverhalten aus, was durch eine günstigere Lastverteilung zwischen den einzelnen Partikeln begründet werden kann. Unabhängig von der Dichte wird in den Materialtests bei dem Polyurethansystem die Bildung von Rissen senkrecht zu der Richtung der maximalen Hauptdehnung festgestellt, was, wie bereits erwähnt, auf ein zugdominiertes Versagen nach Mode I schließen läßt. Die Druckversuche mit einem halbzyklrischen Impaktor und mit einer u-förmigen Probengeometrie weisen ebenfalls auf einen zugdominierten Versagensmode hin. Die experimentellen Untersuchungen haben zusätzlich gezeigt, daß die Dehnung bei Bruch unter einachsiger Zugbelastung und die Gleitung bei Bruch unter Schubbelastung von vergleichbarer Größenordnung sind. Gleiches wird für die jeweils zugeordnete maximale Zugspannung und die maximale Schubspannung festgestellt. Aufgrund der verfügbaren Daten ist für die Modellierung des Materialverhaltens von PUR deshalb ein möglichst einfacher Ansatz zur Beschreibung des Versagens auf der Basis der maximalen Hauptdehnung sinnvoll.

Mit der Analyse der experimentellen Untersuchungen ist die Materialcharakterisierung abgeschlossen. Die innerhalb dieses Unterkapitels zusammengefaßten Untersuchungen beschreiben auf pragmatische Weise die wesentlichen Eigenschaften von polymeren Hartschaumstoffen mit hohem Energieabsorptionsvermögen. Basierend auf dieser Beschreibung des

Eigenschaftsprofils sind die Auswahlkriterien für ein geeignetes Materialmodell festgelegt. Sie ergänzen damit die auf der Basis der bisherigen Erfahrungen und Untersuchungen definierten Anforderungen an das Modell, das innerhalb der folgenden Teilschritte des Integrationsprozesses bestimmt und durch eine Validierung qualitativ abgesichert wird.

4.2 Modellierung des Materialverhaltens

Die eigentliche Modellierung des Materialverhaltens gliedert sich in Anlehnung an Kapitel 2 in zwei wesentliche Teilschritte, die **Untersuchung von existierenden Materialmodellen** und, bei Bedarf, die **Weiter-, bzw. Neuentwicklung eines Materialmodells**. Im Rahmen der Untersuchung von existierenden Materialmodellen werden die verschiedenen Informationen zu den bereits in kommerziellen FEM-Programmen implementierten oder in der Literatur erläuterten Modellen gesammelt und bewertet. Besteht der Bedarf an der Weiter- oder Neuentwicklung eines Materialmodells, so erfolgt im Anschluß eine Formulierung der erforderlichen Materialgleichungen und die Implementierung des Modells entsprechend den Anforderungen des Integrationsprozesses.

4.2.1 Untersuchung von existierenden Materialmodellen

4.2.1.1 Übersicht

Die in den kommerziellen Finite Elemente Programmen und in der Literatur verfügbaren Materialmodelle zur Berechnung von polymeren Schaumstoffen können im wesentlichen in vier Materialklassen unterteilt werden:

- nichtlinear elastisch,
- nichtlinear visko-elastisch,
- elastisch-plastisch,
- viskoelastisch-plastisch.

Bei den **nichtlinear-elastischen** Materialmodellen zur Beschreibung des Materialverhaltens von Weichschaumstoffen sind zwei Ansätze zu unterscheiden. Der Materialtyp *HYPERFOAM beispielsweise, der in ABAQUS/Explicit verfügbar ist, basiert auf einem Energiepotential ähnlich der zur Modellierung von Elastomeren üblichen Ogden-Form [HKS98a], [HKS98b]. Die Kompressibilität der Schaumstoffe wird durch eine gegenüber der ursprünglichen Formulierung nach Ogden veränderte Bestimmung des Kompressionsmoduls berücksichtigt.

Der zweite Ansatz entspricht den Materialtypen 21 von PAM-CRASH und 38 von RADIOSS [PSI98], [MS98]. Bei diesem Ansatz werden die Spannungen in die Hauptachsen transformiert, wodurch die für polymere Schaumstoffe charakteristische Querkontraktionszahl $\nu = 0$ realisiert wird. Innerhalb des Bereichs positiver Hauptspannungen, also unter Zugbelastung, wird ein linear elastisches Verhalten angenommen. Unter Druckbelastung erfolgt die Bestimmung der Hauptspannung ausgehend von einem nichtlinearen Spannungs-Stauchungsverlauf, der durch den Benutzer vorgegeben ist. Im Anschluß an die Berechnung der Hauptspannungen werden die Spannungen wieder in den ursprünglichen Spannungsraum transformiert. Der Ansatz ermöglicht in der jeweils implementierten Formulierung zusätzlich die Berücksichtigung einer Hysterese bei Entlastung aus dem Druckbereich und die Eingabe mehrerer Spannungs-Stauchungsverläufe bei unterschiedlichen Dehnraten.

Die verfügbaren **nichtlinear viskoelastischen** Materialmodelle dienen ebenfalls der Abbildung von Weichschaumstoffen. Ein einfaches, rheologisches Modell zur Beschreibung von viskoelastischem Verhalten ist das sog. Zener-Modell. Das Modell entspricht der Parallelschaltung einer Feder und eines Maxwell-Modells, d.h. einer in Reihe geschalteten Feder und eines Dämpfers. Bei Materialmodell 57 von LS-DYNA3D wird eine nichtlineare Federsteifigkeit, die mit der Formulierung des quasistatischen, nichtlinearelastischen Verhaltens von Materialtyp 21 in PAM-CRASH oder Materialtyp 38 von RADIOSS vergleichbar ist, mit dem rheologischen Modell gekoppelt. Die Berechnung der Spannungen erfolgt in dem Hauptachsensystem.

Das gleiche rheologische Modell ist in dem Materialtyp *VISCOELASTIC von ABAQUS/Explicit, Materialtyp 22 von PAM-CRASH, Materialtyp 35 von RADIOSS und dem Materialtyp 62 von LS-DYNA3D umgesetzt. Die Federsteifigkeit bei Materialtyp *VISCOELASTIC kann durch das mit *HYPERFOAM formulierte, nichtlinear elastische Verhalten beschrieben werden. Viskoelastische Anteile für Schub und hydrostatischen Druck werden getrennt betrachtet. Bei Materialtyp 22 von PAM-CRASH, Materialtyp 35 von RADIOSS und Materialtyp 62 von LS-DYNA3D wird die nichtlineare Federsteifigkeit durch eine Potenzfunktion in Abhängigkeit der Volumenstauchung beschrieben. Schubanteile und hydrostatische Druckanteile sind dabei durch die aus dem Druckversuch zu bestimmende, nichtlineare Federsteifigkeit gekoppelt. Der Materialtyp 73 von LS-DYNA3D entspricht dem Materialtyp 57. Das Modell erlaubt die Berücksichtigung von mehreren Maxwell-Elementen.

Die Formulierung des nichtlinear viskoelastischen Materialtyps 83 von LS-DYNA3D unterscheidet sich erheblich von den bisher beschriebenen Ansätzen. Es handelt sich um ein ganzheitliches Stoffgesetz, bei dem Kriech- und Relaxationseffekte durch eine Formulierung in Abhängigkeit einer effektiven Dehnung zusammengefaßt werden [CSLHFDT95]. Die Hauptspannungen werden entkoppelt behandelt. Das Verhalten innerhalb des Zugbereichs und des Druckbereichs ist nichtlinear und hysteretisch.

Auch die **elastisch-plastischen** Materialmodelle, die der Beschreibung von halbhartem und hartem Polymerschäumen dienen, basieren auf teilweise sehr unterschiedlichen Ansätzen. Ein vergleichsweise einfaches Materialmodell, basierend auf einem Ansatz von R. D. Krieg (vgl. [NMK87]), beschreibt das Verhalten von geschlossenzelligen Schaumstoffen. Der Spannungstensor ergibt sich wie folgt aus der Überlagerung eines elastisch-plastischen Anteils der zellularen Struktur und eines elastischen Anteils der in den Schaumstoffzellen eingeschlossenen Luft:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{\text{Zellstruktur}} + \delta_{ij} \Delta p^{\text{Luft}}. \quad (4.10)$$

Um laterale Dehnungen der zellularen Struktur bei Druckbelastung zu vermeiden, wird der Spannungsanteil der zellularen Struktur in dem System der Hauptspannungen berechnet:

$$\sigma_1^{\text{Zellstruktur}} \leq Y \quad (4.11)$$

und in den eigentlichen Spannungsraum zurücktransformiert. Die Fließspannung Y ergibt sich unter Berücksichtigung einer volumetrischen Verfestigung aus den folgenden Fließflächen:

$$F = A + B(1 + C\varepsilon_{\text{Vol}}) - Y = 0, \text{ für } \sigma'_{ij} \neq 0, \quad (4.12)$$

$$F = B(1 + C\varepsilon_{\text{Vol}}) - Y = 0, \text{ für } \sigma'_{ij} = 0. \quad (4.13)$$

Die Druckdifferenz Δp^{Luft} ergibt sich für eine isotherme Verdichtung unter Berücksichtigung des Volumenanteils ϕ der zellularen Struktur wie folgt:

$$\Delta p^{\text{Luft}} = p_0^{\text{Luft}} \frac{\varepsilon_{\text{Vol}}}{\varepsilon_{\text{Vol}} + 1 - \phi}. \quad (4.14)$$

Aufgrund der linearen Verfestigung in Abhängigkeit der Volumenstauchung wird die Verdichtung der zellularen Struktur mit zunehmender Stauchung durch das beschriebene Stoffgesetz nicht abgebildet. Das Materialmodell entspricht dem in PAM-CRASH implementierten Materialtyp 20 und dem in LS-DYNA3D implementierten Materialtyp 53. Der Materialtyp 63 von LS-DYNA3D ist vergleichbar mit Materialtyp 53. Die Verfestigung ist bei diesem Modell allgemeiner definiert, so daß auch ein progressives Verhalten der zellularen Struktur abgebildet werden kann. Der elastische Anteil der in den Schaumstoffzellen eingeschlossenen Luft wird hier nicht berücksichtigt.

In einigen Finite Elemente Programmen wird ein elastisch-plastisches Materialmodell für die Berechnung von polymeren Hartschaumstoffen angeboten, das ursprünglich für die Berechnung von Sand entwickelt wurde. Das Materialmodell berücksichtigt zur Beschreibung der Plastizität volumetrische und deviatorische Anteile getrennt voneinander. Die volumetrische Fließspannung wird auf der Basis eines entsprechenden Verfestigungsverlaufs berechnet. Die Kopplung zwischen der volumetrischen und der deviatorischen Fließspannung erfolgt durch die Fließbedingung:

$$F = q - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2) = 0, \quad (4.15)$$

wobei p die erste und q die zweite Spannungsinvariante sind. Das Materialmodell ist als Materialtyp 2 in PAM-CRASH und als Materialtyp 5 in LS-DYNA3D implementiert.

Neben diesen Materialmodellen gibt es einige Ansätze, die das Verhalten von polymeren Hartschaumstoffen durch einen elliptischen Zusammenhang zwischen der ersten und der zweiten Spannungsinvariante beschreiben. Mit *FOAM in ABAQUS/Explicit und Materialtyp 75 in LS-DYNA3D sind zwei vergleichbare Modelle implementiert. Als Beispiel für diese Formulierung des elastisch-plastischen Materialverhaltens wird das Materialmodell *FOAM näher erläutert. Die Fließfläche des Modells ist definiert durch:

$$F = \sqrt{\left(\frac{p_t - p_c}{2} + p\right)^2 + \left(\frac{q}{M}\right)^2} - \frac{p_t - p_c}{2} = 0. \quad (4.16)$$

Dabei bedeuten:

$p = -\frac{1}{3}\sigma_{kk}$	hydrostatischer Druck,
$q = \sqrt{\frac{2}{3}\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}$	Vergleichsspannung nach von Mises,
p_t	Festigkeit unter dreiachsiger Zugbelastung,
$p_c(\epsilon_{Vol}^p)$	Fließspannung unter hydrostatischer Druckbelastung in Abhängigkeit der plastischen Volumenstauchung,
M	Einhüllende des relativen Maximums der elliptischen Fließfläche.

Die Einhüllende M ergibt sich aus dem einachsigen Druckversuch:

$$M = \sigma_0 / \sqrt{p_t p_c |_0 - \frac{1}{3}\sigma_0(p_t - p_c |_0) - \frac{1}{9}(\sigma_0)^2}.$$

Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Größen ist in Bild 4.33 dargestellt.

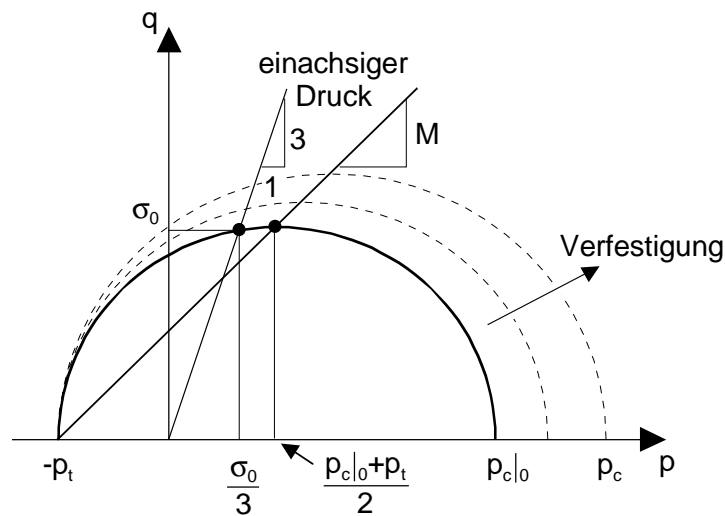


Bild 4.33: Gestalt und Evolution der Fließfläche bei *FOAM [HKS98]

Der wesentliche Unterschied zwischen Materialtyp *FOAM und Materialtyp 75 ist die Evolution der Fließfläche. Während bei *FOAM die Gestalt der Fließfläche erhalten bleibt und nur durch die hydrostatische Verfestigung definiert wird, kann bei Materialtyp 75 durch die Definition der Verfestigung auf der Basis eines einachsigen und eines hydrostatischen Druckversuches eine Gestaltänderung der Fließfläche mit zunehmender Kompression realisiert werden. Beiden Ansätzen ist gemeinsam, daß das Fließgesetz der Fließfläche nicht zugeordnet ist. Das plastische Potential, aus dem sich das Fließgesetz ableitet, ist jeweils beschrieben durch:

$$G = \sqrt{q^2 + \alpha p^2}, \quad (4.17)$$

wobei $\alpha = 9/2$ einer plastischen Querszahl $\nu^p = 0$ entspricht. Neben diesen in kommerziellen Programmen umgesetzten elastisch-plastischen Materialmodellen mit elliptischer Fließfläche sind zwei ähnliche, verfügbare Stoffgesetze zu erwähnen. Die nach [ZKLYN98] von N. Kikuchi entwickelten Materialgleichungen basieren auf der folgenden Fließbedingung:

$$F = \sqrt{\frac{q^2}{b(\epsilon_{Vol}^p)} + \frac{(p - x_0(\epsilon_{Vol}^p))^2}{a(\epsilon_{Vol}^p)}} - 1 = 0. \quad (4.18)$$

Dabei beschreiben die Größen x_0 , a und b die Lage und die Gestalt der Fließfläche in Abhängigkeit der sich ändernden plastischen Volumenstauchung. Zur Ermittlung des Fließgesetzes wird ein nicht zugeordnetes plastisches Potential entsprechend dem in

Gleichung 4.17 beschriebenen Ansatz vorgeschlagen. Die Verfestigung ist auf der Basis eines hydrostatischen Druckversuchs formuliert, wobei das Verfestigungsverhalten durch die Materialparameter x_0 , a und b beeinflusst werden kann. Ein ähnliches, vergleichsweise einfach aufgebautes Materialmodell wurde von N. Fleck entwickelt [DF98]. Die Fließfläche ist durch:

$$F = \sqrt{\frac{1}{1 + (\alpha/3)^2} (q^2 + \alpha^2 p^2)} - Y = 0 \quad (4.19)$$

beschrieben und das Fließgesetz ist dieser Fließfläche zugeordnet. Die Verfestigung ist isotrop und kann in einer vereinfachten Version des Modells auf der Basis eines einfachen Druckversuchs bestimmt werden. Das Stoffgesetz geht im Gegensatz zu allen anderen bisher beschriebenen Ansätzen von einem symmetrischen Verhalten unter Zug- und Druckbelastung aus. Das Materialmodell von Fleck ist als User-Material für das Finite Elemente Programm ABAQUS/Explicit verfügbar.

Der einzige **viskoelastisch-plastische** Ansatz, der in den kommerziellen Finite Elemente Programmen zur Berechnung von halbhartem Polymerschaumstoffen verfügbar ist, entspricht einer Kombination zweier Ansätze. Dabei wird ein viskoelastisches Stoffgesetz entsprechend Materialtyp 35 von RADIOSS mit einer Plastizität und einem nichtviskosen, elastischen Anteil der in den Schaumstoffzellen eingeschlossenen Luft entsprechend der Formulierung nach Materialtyp 20 von PAM-CRASH kombiniert. Das Materialmodell ist in RADIOSS als Materialtyp 33 verfügbar.

4.2.1.2 Eignung der Materialmodelle

Aufgrund der Analyse der Materialcharakterisierung sind für die Modellierung des Materialverhaltens nur elastisch-plastische oder viskoelastisch-plastische Ansätze sinnvoll. Mit dem Materialtyp 21 von PAM-CRASH erfolgt trotzdem die ausführlichere Untersuchung eines nichtlinear elastischen Ansatzes, da das Modell nach Aussage des Softwarelieferanten aufgrund der Formulierung der Hysterese von einigen Automobilherstellern produktiv zur Simulation des Materialverhaltens von polymeren Hartschaumstoffen eingesetzt wird.

In einem ersten Schritt der Untersuchungen werden nur quasistatische Randbedingungen berücksichtigt, weshalb die Materialtypen 57 und 73 von LS-DYNA3D und Materialtyp 33 von RADIOSS vorerst nicht weiter berücksichtigt werden. Das Stoffgesetz, auf dessen Basis die Materialtypen 2 von PAM-CRASH und 5 von LS-DYNA3D entwickelt wurden, bildet nach [NMK87] mit der parabolischen Kopplung zwischen den hydrostatischen und den deviatorischen Spannungsanteilen die Fließfläche von Schaumstoffen mit ungenügender Übereinstimmung ab. Die Materialcharakterisierung hat gezeigt, daß eine elliptische Kopplung

das Fließverhalten der polymeren Hartschaumstoffe in einer ersten Näherung beschreiben kann ([ZKLYN98], [DF98]). Diese Gruppe von Materialmodellen wird im folgenden am Beispiel von *FOAM und dem Materialmodell nach N. Fleck untersucht. Darüber hinaus wird mit dem Materialtyp 20 von PAM-CRASH stellvertretend ein elastisch-plastischer Ansatz unter Berücksichtigung der in den Schaumstoffzellen eingeschlossenen Luft berücksichtigt. Eine Übersicht der in den kommerziellen Finite-Elemente-Programmen implementierten Materialmodelle ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Die ausführlich untersuchten Materialmodelle sind gekennzeichnet.

Materialtyp				Merkmal
ABAQUS	LS-DYNA3D	PAM-CRASH	RADIOSS	nichtlinear-elastisch
HYPERFOAM				basierend auf Energiepotential
		21	38	Berechnung der Hauptspannungen
				nichtlinear-viskoelastisch
VISCOEL. + HYPERFOAM				Zener-Modell, Energiepotential
	57			Zener-Modell, Hauptspannungen
	62	22	35	Zener-Modell, Potenzfunktion
	73			par. Maxwell-Modell, Hauptspannungen
	83			ganzheitliche Formulierung
				elastisch-plastisch
	53	20		Hauptspannungen, Luftanteil
	63			Hauptspannungen, progr. Zellstruktur
	5	2		deviatorisch-volumetrische Kopplung
FOAM	75			elliptische Fließfläche in der p-q-Ebene
nach Fleck				
				viskoelastisch-plastisch
			33	Zener-Modell, Hauptsp., Luftanteil

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der existierenden Materialmodelle

Zur Beurteilung der Eignung der Materialmodelle werden die in Tabelle 4.2 dargestellten Beurteilungskriterien, Wertungen und Wichtungen verwendet. Entsprechend den Vorgaben des Integrationsprozesses werden zwei Hauptkriterien unterschieden, die **theoretische Modellbasis** und die **Tauglichkeit des Modells** für den produktiven Einsatz. Mit der **theoretischen Modellbasis** sind eine Beurteilung der Formulierung der Materialgleichungen, d.h. der physikalischen Grundlagen des Modells und damit verbunden eine Beurteilung des Potentials zur Weiterentwicklung zusammengefaßt. Mit dem Kriterium der **Modelltauglichkeit** gehen die

Kalibrierung und die Ergebnisse der Validierung des Materialmodells in die Beurteilung ein. Beide Hauptkriterien sind hinsichtlich der Gesamtwichtung gleichwertig. Dabei werden das Entwicklungspotential und die Validierung jeweils hervorgehoben. Eine Wertung von Null in einem der Hauptkriterien führt zu einer Ablehnung des Materialmodells. Zusätzlich war die Berücksichtigung der numerischen Stabilität als weiteres Kriterium vorgesehen. Da eine sinnvolle vergleichende Bewertung dieses Kriteriums nicht möglich war, wird darauf verzichtet. Auftretende Stabilitätsprobleme werden zusätzlich zur Beurteilung festgehalten.

Kriterium	Wertung (WE)			Wichtung (WI)
	gut (2)	mittel (1)	schlecht (0)	
• Physikalische Grundlagen	gut (2)	mittel (1)	schlecht (0)	20 %
• Entwicklungspotential				30 %
• Kalibrierung				15 %
• Validierung				35 %
Gesamt:				100 %

Tabelle 4.2: Bewertungskriterien der verfügbaren Materialmodelle

In Bild 4.34 ist der experimentell ermittelte Spannungs-Stauchungsverlauf bei monotoner einachsiger Druckbelastung des Polyurethansystems mit der Dichte von 60 g/l im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen aller untersuchten Materialmodelle dargestellt. Das Bild 4.35 zeigt die vergleichbaren Ergebnisse des hydrostatischen Druckversuchs.

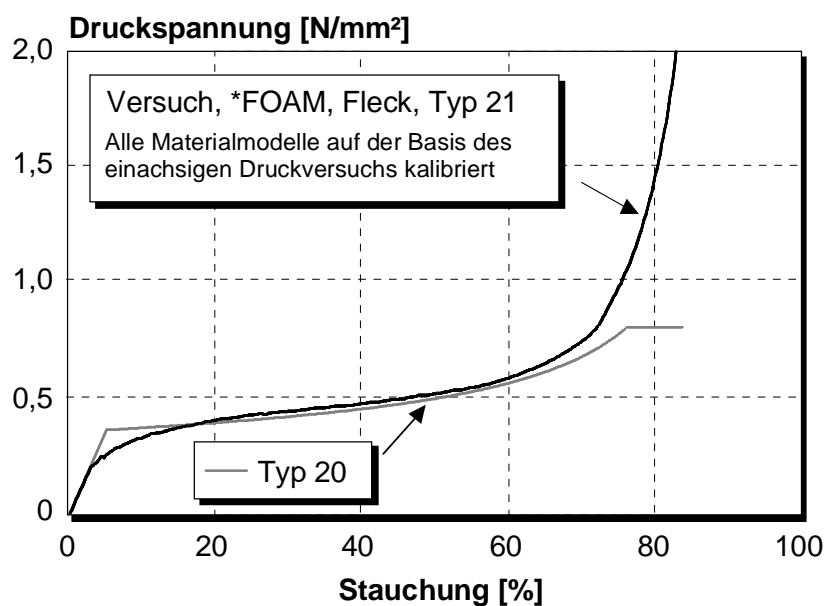


Bild 4.34: Ergebnisvergleich bei einachsiger Druckbelastung (PUR, 60 g/l)

Die Kalibrierung von Materialmodellen entsprechend dem Typ 21 von PAM-CRASH ist unkompliziert. Die Parameter basieren im wesentlichen auf dem einachsigen Druckversuch. Geringfügig aufwendiger ist die Kalibrierung der Hysterese zur Simulation des Entlastungsverhaltens. Die Abbildung des Materialverhaltens unter einachsiger Druckbelastung durch Materialtyp 21 ist gut. Obwohl bei dem Modell die Hauptspannungen entkoppelt betrachtet werden ist die Übereinstimmung bei hydrostatischer Belastung zuriedienstellend. Die physikalischen Grundlagen des Materialmodells sind durch das nichtlinear elastische Materialverhalten nicht ausreichend dargestellt. Aufgrund der vollständigen Rückverformung kann es bei einer zyklischen Belastung zu einer falschen Prognose des Materialverhaltens kommen.

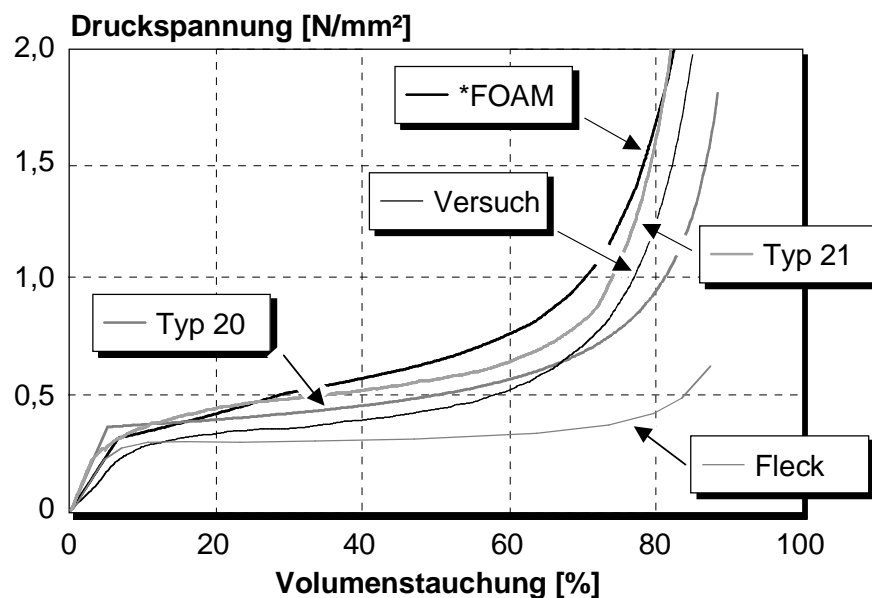


Bild 4.35: Ergebnisvergleich bei hydrostatischer Druckbelastung (PUR, 60 g/l)

Das elastisch-plastische Materialmodell entsprechend Materialtyp 20 von PAM-CRASH führt zusammenfassend zu einer guten Übereinstimmung zwischen dem untersuchten und dem simulierten Materialverhalten. Sowohl der einachsige, als auch der hydrostatische Druckversuch werden bis zu einer Stauchung von ca. 75% gut abgebildet. Dabei wird im Rahmen der Kalibrierung entgegen der Empfehlung nach [PSI98] ein Druckwert von $p_0^{Luft} > 0,1 N/mm^2$ verwendet. Mit dem Erreichen eines kritischen Grenzluftdrucks kommt es bei einachsiger Druckbelastung zu einem ‘‘Aufplatzen‘‘ der zellularen Struktur, d.h. die Zellstruktur erreicht lateral zur Belastungsrichtung einen kritischen Wert, ab dem das Materialverhalten quasi inkompressibel wird. Das ist durch die eingeschränkte Modellierung des plastischen Verhaltens der zellularen Struktur innerhalb des Verdichtungsbereichs begründet, das nur durch einen Tangentenmodul beschrieben werden kann. Unter hydrostatischer Belastung entfallen die

lateralen Effekte, wodurch das Verdichtungsverhalten besser dargestellt wird. Unter Berücksichtigung des für das betrachtete Polyurethansystem charakteristischen, quasi offenzelligen Verhaltens wird der Verdichtungsbereich nur unzureichend dargestellt, was allerdings durch eine geringfügige Änderung des simulierten Verhaltens der Zellstruktur verbessert werden kann. Aufgrund der Annahme von linearer Elastizität ist das modellierte Materialverhalten in weiten Bereichen plastisch, was dem experimentell ermittelten Verhalten der energieabsorbierenden Polymerschaumstoffe entspricht. Im Vergleich zu einer Formulierung entsprechend Materialtyp 21 erweist sich bei einer Berechnung der Vergleichsspannungen in den Hauptachsen die Volumenstauchung als bessere Bezugsgröße für die Kalibrierung, wobei die Kalibrierung des Verhaltens der Zellstruktur bei Materialtyp 20 durch die Berücksichtigung des überlagerten Luftanteils vergleichsweise aufwendig ist.

Die Kalibrierung des ABAQUS/Explicit Materialmodells *FOAM hat sich im Vergleich mit den Materialtypen 20 und 21 als schwierig erwiesen. Da der einachsige Druckversuch als Referenz für die Kalibrierung gewählt wird, muß der unter einachsiger Druckbelastung ermittelte, plastische Verfestigungsverlauf in eine hydrostatische Verfestigungskurve umgerechnet werden, die als Eingabe gefordert ist. Zusätzlich werden der Fließbeginn unter einachsiger Druckbelastung und die maximale Festigkeit unter dreiachsiger Zugbelastung benötigt. Eine Parametervariation hat gezeigt, daß der Einfluß dieser dreiachsigen Zugfestigkeit innerhalb des Einsatzbereichs der betrachteten Schaumstoffe gering ist [Sch99a]. In Bild 4.34 ist das Ergebnis des berechneten einachsigen Druckversuchs dargestellt. Die Übereinstimmung ist gut. Aufgrund der festgelegten Evolution der Fließfläche kann das Verhalten bei einer Berechnung des hydrostatischen Druckversuchs erheblich von dem experimentell ermittelten Verhalten abweichen (Bild 4.35). Im Gegensatz zu den bisher behandelten elastisch-plastischen Materialmodellen werden bei *FOAM die Elastizität und die Plastizität deutlich getrennt, wodurch die Transparenz vergrößert und das Verständnis für das modellierte Materialverhalten erheblich erleichtert wird. Der hohe Anteil plastischer Deformation, der mit *FOAM berücksichtigt wird, stimmt gut mit dem in der Materialcharakterisierung festgestellten Verhalten der polymeren Hartschaumstoffe überein. Eine Möglichkeit zur Verringerung des Aufwands der Kalibrierung des Materialmodells ist die direkte Eingabe des Verlaufs der plastischen Verfestigung auf der Basis des einachsigen Druckversuchs.

Als letzter Ansatz wird das Materialmodell nach N. Fleck ausführlich betrachtet. Im Gegensatz zu den bisher untersuchten Ansätzen wird bei dem Modell ein symmetrisches Materialverhalten unter Zug- und Druckbelastung angenommen. Dieses Verhalten deckt sich bis zu dem Erreichen der maximalen Zugspannung bei Bruch mit dem experimentell festgestellten, einachsigen Verhalten für das Polyurethansystem. Die unterschiedliche Steifigkeit von EPS/PPE unter Zug- und Druckbelastung kann nicht modelliert werden, was allerdings ebenso für alle betrachteten Materialmodelle außer dem Materialtyp 21 von PAM-CRASH zutrifft, der die Eingabe einer

unterschiedlichen Zug- und Drucksteifigkeit erlaubt. Entsprechend dem bisherigen Vorgehen wird der einachsige Druckversuch als Referenz für die Kalibrierung des Materialmodells gewählt, wobei die vereinfachte Formulierung des Modells entsprechend [DF98] eine direkte Eingabe der plastischen Verfestigung auf der Basis des einachsigen Druckversuchs ermöglicht. Der Eingabeparameter α wird in einem ersten Schritt derart gewählt, daß sich entsprechend der Analyse der Materialcharakterisierung eine sehr geringe plastische Querszahl ergibt. Daraus folgt aufgrund der zugeordneten Formulierung des Fließgesetzes eine Gestalt der Fließfläche, die zu einer deutlichen Abweichung unter hydrostatischer Druckbelastung führt (Bild 4.35). Durch entsprechende Wahl von α kann diese Abweichung erheblich verringert werden, so daß sich unter Zulassung einer gewissen plastischen Querdehnung unter einachsiger Druckbelastung die Übereinstimmung für den hydrostatischen Druckversuch erheblich verbessert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist diese Variation in Bild 4.35 nicht dargestellt. Entsprechend dem Materialtyp *FOAM erfolgt bei dem Materialmodell nach Fleck eine klare Trennung der Formulierung von elastischen und plastischen Verformungsanteilen.

Das für polymere Hartschaumstoffe charakteristische, durch das Bruchversagen unter Zug- und Schubbelastung dominierte, unsymmetrische Materialverhalten wird durch keines der betrachteten Materialmodelle ausreichend beschrieben, weshalb auf eine Darstellung verzichtet wird. Der Ansatz nach N. Fleck bildet das experimentell für das Polyurethansystem festgestellte Materialverhalten bis zu dem Erreichen der maximalen Zugspannung gut ab. Die größere Steifigkeit von EPS/PPE unter Zugbelastung kann durch den linearen, isotropen Ansatz zur Beschreibung der Elastizität nicht berücksichtigt werden. Aufgrund des gutmütigen Versagensverhaltens der untersuchten komplexeren Strukturen aus EPS/PPE ist allerdings fraglich, inwieweit dieser Steifigkeitsunterschied unter Druck- und Zugbelastung abgebildet werden muß. Die Berücksichtigung des Versagensverhaltens ist für eine ausreichende Beschreibung des spröderen Polyurethansystems aufgrund der experimentellen Untersuchung der verschiedenen anwendungsnahen Lastfälle mit komplexeren Spannungszuständen, wie insbesondere einer Druckbelastung der u-förmigen Proben notwendig.

Zusammenfassend kann das Verhalten von polymeren Hartschaumstoffen bei Belastungen, die durch einachsigen Druck dominiert sind, mit Hilfe der verschiedenen untersuchten Materialmodelle unter erheblichen Einschränkungen der Einsatzrandbedingungen beschrieben werden. Für mehrachsige Druckbelastung und Zug- bzw. Schubbelastung beschreibt keines der betrachteten Modelle das Verhalten ausreichend, weshalb hier auf die Diskussion weiterer Validierungstests, wie die Simulation von dehnratenabhängigem Materialverhalten und von anwendungsnahen Beispielen, wie einer Kugeleindringung, verzichtet wird. Ausführlichere Untersuchungen von Materialtyp 20 von PAM-CRASH, von *FOAM von ABAQUS/Explicit und des Materialmodells nach N. Fleck sind in [SPM97], [SPSHM98] und [SPCM99] zusammengefaßt. Das Potential zur Weiterentwicklung wird bei allen Materialmodellen außer

dem Modell von Fleck mittelmäßig bewertet. Der Grund hierfür ist bei den Materialtypen 20 und 21 der konstruierte Aufbau der Materialgleichungen. Auch der Typ *FOAM besitzt im Gegensatz zu der sehr einfachen Formulierung des Modells von Fleck ein geringes Entwicklungspotential. Unter Berücksichtigung der in Tabelle 4.3 dargestellten Gesamtauswertung der untersuchten Materialmodelle wird für Weiterentwicklungen deshalb das Materialmodell von N. Fleck verwendet.

Kriterium	Typ 20		Typ 21		*FOAM		Fleck	
	WE	WI(WE)	WE	WI(WE)	WE	WI(WE)	WE	WI(WE)
• Physikalische Grundlagen	1	20	0	0	1	20	1	20
• Entwicklungspotential	1	30	0	0	1	30	2	60
• Kalibrierung	1	15	2	30	1	15	2	30
• Validierung	2	70	2	70	1	35	1	35
Gesamtbewertung:	135		100		100		145	

Tabelle 4.3: Bewertung der existierenden Materialmodelle

4.2.2 Weiterentwicklung des Materialmodells nach N. Fleck

Das zugeordnete plastische Potential zur Formulierung des Fließgesetzes für das Materialmodell nach N. Fleck, das ursprünglich zur Berechnung des Verhaltens von Aluminiumschaumstoffen entwickelt wurde, führt für die betrachteten polymeren Hartschaumstoffe zu einer falschen Abbildung des Materialverhaltens. Aus der Analyse der Materialcharakterisierung folgt, daß aufgrund der vergleichsweise geringen Zellgröße der betrachteten polymeren Schaumstoffe ein Teil der plastischen Energie durch innere Reibung zwischen den Zellkanten und Zellwänden und Bruchstücken der Zellstruktur verursacht ist. Deshalb wird ein entkoppeltes plastisches Potential zur Formulierung des Fließgesetzes vorgeschlagen.

In einem zweiten Entwicklungsschritt wird die Dehnratenabhängigkeit des Materialverhaltens berücksichtigt. Untersuchungen, die in [SPSHM98] zusammengefaßt sind, haben gezeigt, daß

bei dynamischer Belastung bereits mit Hilfe von vergleichsweise einfachen, dem quasistatischen Verhalten überlagerten Ansätzen eine gute Übereinstimmung zwischen dem experimentell und dem numerisch festgestellten Materialverhalten erzielt werden kann. Dementsprechend wird die Dehnratenabhängigkeit der Schaumstoffe in einem ersten Ansatz durch eine einfache, der plastischen Verfestigung überlagerte Potenzfunktion modelliert.

Die für eine Abbildung der Polyurethanschaumstoffe erforderliche Formulierung eines spröden Bruchverhaltens unter Zug- und Schubbelastung wird innerhalb des dritten Schritts der Weiterentwicklung durch ein auf dem Versagen unter Mode I basierendes, isotropes Versagensmodell umgesetzt. Die unsymmetrische Steifigkeit unter Zug- und Druckbelastung, die für EPS/PPE festgestellt wurde, wird bei der Weiterentwicklung des Materialmodells aufgrund des erheblichen Mehraufwands nicht berücksichtigt. Im Vorfeld von weiteren Änderungen des Modells, die über diese festgelegten Maßnahmen hinausgehen, muß der Bedarf nach einer verbesserten Abbildung des Zug- und Schubverhaltens durch eine Validierung nachgewiesen werden. Die Festlegung und Umsetzung der beschriebenen Maßnahmen erfolgt im Rahmen des Integrationsprozesses in enger Zusammenarbeit mit Hibbitt, Karlsson und Sorensen Inc., Pawtucket.

4.2.2.1 Beschreibung des modifizierten Materialmodells

Das modifizierte Materialmodell beinhaltet die Formulierung des durch die **Fließfläche** definierten Fließbeginns, die Änderungen des **plastischen Potentials** und der **plastischen Verfestigung**. Das durch diese Maßnahmen modifizierte elastisch-plastische Materialmodell wird anschließend mit einem **Dehnratesgesetz** und mit einem **Schädigungsmodell** überlagert.

4.2.2.1.1 Fließfläche

Das modifizierte Materialmodell basiert wie der ursprüngliche Ansatz auf einem elliptischen Zusammenhang zwischen den deviatorischen und den hydrostatischen Spannungsanteilen zur Beschreibung der Fließfläche. Die Definition der Evolution der Fließfläche erfolgt in Abhängigkeit einer äquivalenten, plastischen Stauchung, die im folgenden ausführlicher beschrieben wird. Mit σ_v , der äquivalenten Fließspannung, ergibt sich die Fließfläche für das modifizierte Modell von N. Fleck zu:

$$F = \sigma_v - Y = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2} (q^2 + \alpha^2 p^2)} - Y = 0. \quad (4.20)$$

4.2.2.1.2 Plastisches Potential

Zur Beschreibung des plastischen Potentials wird ebenfalls ein elliptischer Zusammenhang zwischen den deviatorischen und den hydrostatischen Spannungsanteilen angenommen. Entsprechend der Fließfläche folgt somit für das Potential:

$$G = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{\beta}{3}\right)^2} (q^2 + \beta^2 p^2)}, \quad (4.21)$$

wobei der Parameter β die Gestalt des plastischen Potentials innerhalb des p-q-Spannungsraums beschreibt. Der Tensor der plastischen Dehnrate ergibt sich hieraus zu

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (4.22)$$

wobei λ der positive plastische Multiplikator ist [Ba90]. Das auf dem beschriebenen plastischen Potential basierende Fließgesetz legt die Fließrichtung und die plastische Querzahl, v^p , fest. Unter einachsiger Druckbelastung in einer Belastungsrichtung 2 kann die plastische Querzahl somit als Funktion des Parameters β formuliert werden:

$$v^p \equiv -\frac{\dot{\epsilon}_{11}^p}{\dot{\epsilon}_{22}^p} = \frac{\frac{1}{2} - \left(\frac{\beta}{3}\right)^2}{1 + \left(\frac{\beta}{3}\right)^2} \Rightarrow \beta = 3 \sqrt{\frac{\frac{1}{2} - v^p}{1 + v^p}}. \quad (4.23)$$

Die plastische Querzahl muß dabei innerhalb eines Bereichs von $-1 \leq v^p \leq 0,5$ liegen, wobei $v^p = 0,5$ einer inkompressiblen Plastizität entspricht.

Wird $\beta = \alpha$ gewählt, so reduziert sich das Fließgesetz auf eine zugeordnete Formulierung. Im allgemeinen weicht der Parameter β von α ab. In diesem Fall folgt α direkt aus der experimentell bestimmten Fließfläche und β entsprechend Gleichung 4.23 aus der plastischen Querzahl. Für den Fall einer plastischen Querzahl von $v^p = 0$, die dem Verhalten der untersuchten Polymerschaumstoffe bei großen Deformationen entspricht, nimmt der Parameter β den Wert 2,12 an. Die untersuchten Schaumstoffe haben mit der Ausnahme von EPS/PPE der Dichte von 30 g/l unter einachsiger und hydrostatischer Druckbelastung ein vergleichbares Verhalten, was bei der Formulierung der Materialgleichungen einem Wert von $\alpha = 1,0606$ entspricht. In Bild 4.36 sind das plastische Potential und die Fließfläche für diesen Fall dargestellt.

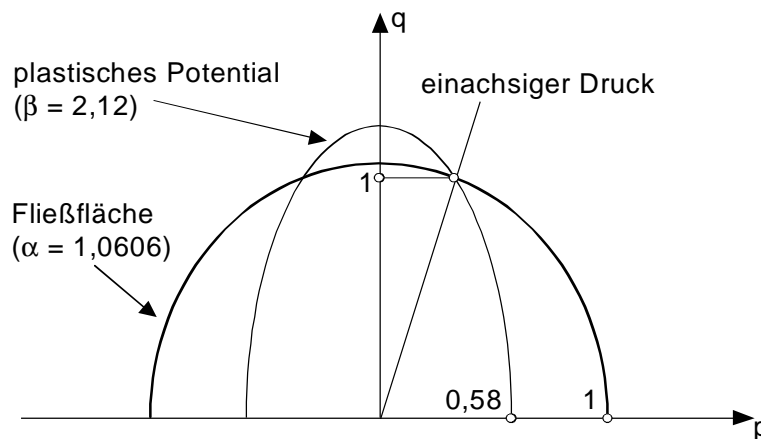


Bild 4.36: Fließfläche und plastisches Potential bei entkoppeltem Fließgesetz

4.2.2.1.3 Plastische Verfestigung

Die plastische Verfestigung ist durch eine beliebige Anzahl von Stützstellen der äquivalenten Fließspannung, σ_v , über der äquivalenten plastischen Stauchung, ε_v , definiert. Die äquivalente plastische Stauchung ist durch

$$\varepsilon_v \equiv \int_0^t \dot{\varepsilon}_v dt \quad (4.24)$$

definiert, wobei $\dot{\varepsilon}_v$ die äquivalente plastische Dehnrates ist, welche aus der Formulierung der plastischen Arbeit folgt:

$$\sigma_v \dot{\varepsilon}_v \equiv \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p. \quad (4.25)$$

Unter einachsiger Druckbelastung reagiert der Werkstoff bei einer plastischen Stauchung ε_{22}^p mit einer Spannung σ_{22} . In diesem Fall reduziert sich die plastische Verfestigung auf den Verlauf der Cauchy Spannung, σ_{22} , über der logarithmischen plastischen Stauchung, ε_{22}^p .

4.2.2.1.4 Dehnratesgesetz

Die Dehnratesabhängigkeit der polymeren Schaumstoffe wird durch eine Erhöhung der Fließspannung mit zunehmender Dehnrates modelliert. Die Erhöhung der Fließspannung wird durch eine Potenzfunktion mit der folgenden Form beschrieben:

$$\dot{\varepsilon}_v = P \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v^0} - 1 \right)^n \quad \text{für } \sigma_v \geq \sigma_v^0. \quad (4.26)$$

Bei der Potenzfunktion handelt es sich um eine gängige Formulierung zur Berücksichtigung einer Dehnratenabhängigkeit des Materialverhaltens [HKS98a], [HKS98b]. Dabei ist σ_v^0 die quasistatische Referenz der Fließspannung und σ_v die äquivalente Fließspannung bei einer Dehnraten von $\dot{\varepsilon}_v > 0$. Die beiden Parameter P und n sind Materialkonstanten, die mit Hilfe von quasistatischen und dynamischen Druckversuchen zu bestimmen sind.

4.2.2.1.5 Schädigungsmodell

Das für Polyurethan festgestellte, nahezu spröde Bruchverhalten unter Zug- und Druckbelastung wird durch ein isotropes, skalares Schädigungsmodell beschrieben. Aufgrund der Analyse der Materialcharakterisierung wird das Verhalten durch ein Versagen nach Mode I dominiert. Das Modell basiert auf der Annahme, daß die Schädigung mit dem Erreichen einer definierten, maximalen elastischen Hauptdehnung unter Zug- oder Schubbelastung initiiert wird. Aufgrund der experimentellen Untersuchungen ist das Auftreten einer Schädigung bei druckdominierten Belastungen zu vermeiden. Der Schädigungsverlauf wird durch einen skalaren Schädigungsparameter beschrieben, wobei die elastische Steifigkeit mit zunehmenden Werten des Parameters isotrop reduziert wird. Die Plastizität ist dabei durch die Schädigung nicht direkt beeinflusst, es muß allerdings die reduzierte Steifigkeit berücksichtigt werden. Um einen möglichen Einfluß der Elementkantenlänge zu vermeiden, wird das durch die Einführung der Schädigung modellierte Nachversagensverhalten in Abhängigkeit der Mode I-Bruchenergie, G_f^I , formuliert [LOOO89].

Unter einachsiger Zugbelastung kommt es zum Beginn der Schädigung, sobald die elastische Dehnung in Lastrichtung einen maximalen Wert ε_{\max}^e erreicht (Bild 4.37).

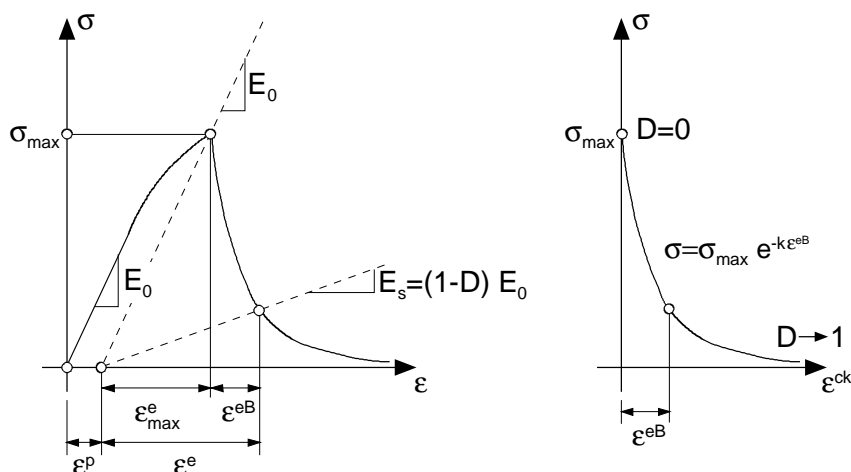


Bild 4.37: Beschreibung des Schädigungsmodells für einachsige Zugbelastung

Der weitere Verlauf der Schädigung wird in Abhängigkeit der sogenannten elastischen Bruchdehnung, ε^{eB} , definiert:

$$\varepsilon^{\text{eB}} = \underbrace{\varepsilon - \varepsilon^{\text{p}}}_{\varepsilon^{\text{e}}} - \varepsilon_{\text{max}}^{\text{e}} = \varepsilon^{\text{e}} - \varepsilon_{\text{max}}^{\text{e}} = \varepsilon^{\text{e}} - \frac{\sigma_{\text{max}}}{E_0}. \quad (4.27)$$

Hierbei sind ε^{e} die totale elastische Dehnung und ε^{p} die plastische Dehnung in Belastungsrichtung bei Maximalspannung. Für die Formulierung des Schädigungsverlaufs wird angenommen, daß die plastische Dehnung durch die Schädigung nicht beeinflusst wird.

Ausgehend von einer üblichen Formulierung des Nachversagensverhaltens (vgl. [LOOO89], [CRW94] und [LF97]) wird die Schädigung durch eine Reduktion der elastischen Steifigkeit beschrieben:

$$E_s = (1 - D)E_0. \quad (4.28)$$

Entsprechend [LOOO97] wird weiterhin angenommen, daß die maximale Spannung nach Schädigungsbeginn durch eine exponentielle Abhängigkeit von der elastischen Bruchdehnung charakterisiert ist:

$$\sigma = \sigma_{\text{max}} e^{-k\varepsilon^{\text{eB}}}. \quad (4.29)$$

Aus den Gleichungen 4.27, 4.28 und 4.29 ergibt sich der Schädigungsparameter wie folgt:

$$\sigma = E_s \varepsilon^{\text{e}} = (1 - D)E_0 (\varepsilon_{\text{max}}^{\text{e}} + \varepsilon^{\text{eB}}) \equiv \sigma_{\text{max}} e^{-k\varepsilon^{\text{eB}}}, \quad (4.30a)$$

$$D = 1 - \frac{\sigma_{\text{max}} e^{-k\varepsilon^{\text{eB}}}}{\sigma_{\text{max}} + E_0 \varepsilon^{\text{eB}}}. \quad (4.30b)$$

Der Parameter k legt den exponentiellen Verlauf der Spannung mit zunehmender Schädigung fest (vgl. Gleichung 4.29 und Bild 4.37) und kann mit Hilfe der Mode I-Bruchenergie, G_{f}^{I} , berechnet werden. Die Mode I-Bruchenergie wird auf der Basis des einachsigen Zugversuchs als Fläche unter dem Verlauf der Spannung über der elastischen Verschiebung definiert, der Anteil plastischer Verschiebung wird nicht berücksichtigt (Bild 4.38).

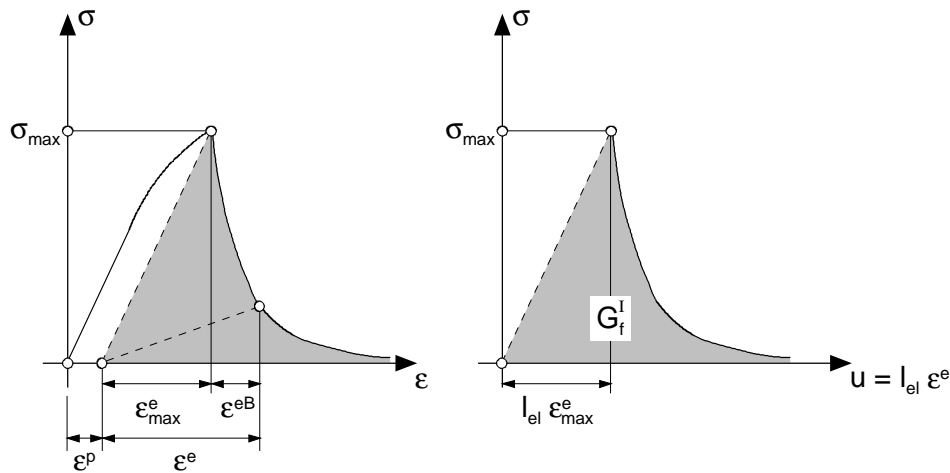


Bild 4.38: Mode I-Bruchenergie

Ausgehend davon ergibt sich die Mode I-Bruchenergie bei einachsiger Zugbelastung zu:

$$G_f^I = \frac{(\sigma_{\max})^2 l_{el}}{2E_0} + \frac{\sigma_{\max} l_{el}}{k}. \quad (4.31)$$

Dabei ist l_{el} die charakteristische Länge des jeweiligen Elements, in dem eine Schädigung auftritt. Als minimaler Wert für G_f^I ist

$$(G_f^I)_{\min} = \frac{(\sigma_{\max})^2 l_{el}}{2E_0}; \quad G_f^I > (G_f^I)_{\min} \quad (4.32)$$

zulässig, was einem vertikalen Abfall der Spannung über der elastischen Verschiebung entspricht. Der Parameter k kann mit Hilfe der Gleichung 4.31 wie folgt berechnet werden:

$$k = \frac{\sigma_{\max} l_{el}}{G_f^I - \frac{(\sigma_{\max})^2 l_{el}}{2E_0}}. \quad (4.33)$$

Auch unter mehrdimensionaler Belastung erfolgt die Bestimmung des Schädigungsparameters entsprechend Gleichung 4.30b. Dabei wird im Gegensatz zu der Dehnung in Richtung der Zugbelastung eine maximale elastische Hauptdehnung berücksichtigt und die Dehnung bei Schädigungsbeginn auf der Basis von $\epsilon_{\max}^e = \sigma_{\max} / E_0$ definiert. Daraus resultiert ein skalares Schädigungsmodell für mehrachsige Belastungszustände unter der Annahme einer isotropen

Schädigung. Bei einachsiger Zugbelastung reduziert sich das skalare Modell auf den oben für den eindimensionalen Belastungszustand erläuterten Zusammenhang. Die Bestimmung des Schädigungsparameters auf der Basis einer maximalen elastischen Hauptdehnung bedingt, daß der Einsatz des Schädigungsmodells für monotone Belastungszustände sinnvoll ist, bei denen die Spannungen nur geringfügig rotieren. Diese Einschränkung ist für die Abbildung der polymeren Hartschaumstoffe innerhalb des Einsatzbereichs ohne weitere Bedeutung.

Um die Schädigung bei druckdominierten Belastungen zu unterdrücken, wird basierend auf einem für polymere Schaumstoffe modifizierten Ansatz nach [LOOO89] ein effektiver Schädigungsparameter, D_{eff} , formuliert, der den aktuellen Spannungszustand berücksichtigt:

$$D_{\text{eff}} = r D ; \quad r \in [0,1]. \quad (4.34)$$

Der Skalierungsfaktor r , der basierend auf dem Quotienten des hydrostatischen Drucks und der Vergleichsspannung nach von Mises berechnet wird, nimmt unter Druckbelastung einen Wert von $r = 0$ an und unter Schub- und Zugbelastung einen Wert von $r = 1$. Für den Wertebereich von $p/q \in [0,1/3]$ wird r auf der Basis eines Polynoms 3. Ordnung bestimmt (Bild 4.39).

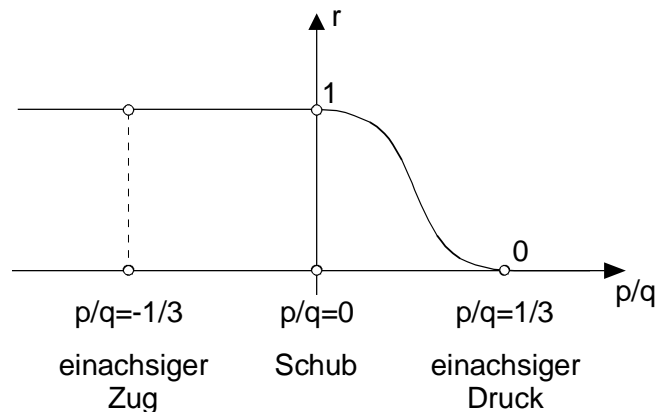


Bild 4.39: Definition des Skalierungsfaktors r als Funktion von p/q

Unter Berücksichtigung des Skalierungsfaktors kann der durch die Schädigung reduzierte, elastische Steifigkeitstensor des Materialmodells wie folgt geschrieben werden:

$$\left(C_{ijkl} \right)_s = (1 - D_{\text{eff}}) \left(C_{ijkl} \right)_0 = (1 - rD) \left(C_{ijkl} \right)_0 ; \quad \sigma_{ij} = \left(C_{ijkl} \right)_s \varepsilon_{kl}. \quad (4.35a)$$

Die Gleichung 4.35a berücksichtigt damit gleichermaßen die Veränderung des Elastizitätsmoduls mit zunehmender Schädigung:

$$E_s = (1 - D_{\text{eff}}) E_0 = (1 - rD) E_0. \quad (4.35b)$$

Das beschriebene isotrope Schädigungsmodell kann auf der Basis von zwei Parametern, der Mode I-Bruchenergie, G_f^I , und der maximalen Zugspannung, σ_{\max} , kalibriert werden. Die Bruchenergie ist mit Hilfe von Zugversuchen unter Bestimmung des Nachversagensverhaltens zu ermitteln oder ist so zu wählen, daß sich das gewünschte Verhalten einstellt.

Da die betrachteten Schaumstoffe üblicherweise auf Druck und Schub belastet werden, wird die maximale Schubspannung zur Kalibrierung der Maximalspannung bei Bruch vorgeschlagen (Bild 4.40).

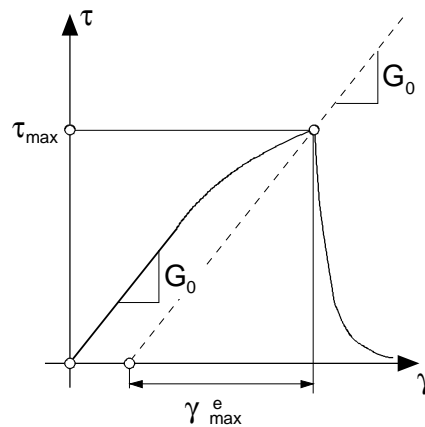


Bild 4.40: Definition der maximalen Schubspannung

Für ein zugdominiertes Versagen entsprechend Mode I muß der folgende Zusammenhang zwischen den elastischen Dehnungen und den entsprechenden Maximalspannungen unter Zug- und Schubbelastung berücksichtigt werden:

$$\gamma_{\max}^e = 2\varepsilon_{\max}^e = \frac{2\sigma_{\max}}{E_0}; \quad \tau_{\max} = G_0 \gamma_{\max}^e = \frac{2G_0}{E_0} \sigma_{\max} = \frac{1}{1+\nu^e} \sigma_{\max}. \quad (4.36)$$

Damit ergibt sich der Zusammenhang zwischen der maximalen Schubspannung und der maximalen Zugspannung wie folgt:

$$\sigma_{\max} = (1 + \nu^e) \tau_{\max}, \quad (4.37)$$

womit die für eine Kalibrierung des Modells benötigten Formulierungen hergeleitet sind.

4.2.2.2 Implementierung und Kalibrierung

Mit der Implementierung des innerhalb des vorangegangenen Abschnitts entwickelten Materialgesetzes erfolgt die Umsetzung der Materialgleichungen in ein numerisches Modell. Die aus der Implementierung folgenden Berechnungsschritte innerhalb der endgültigen Materialroutine werden in Anhang A2.2 kurz erläutert.

Für eine vollständige Kalibrierung des modifizierten Materialmodells werden die folgenden Eingabeparameter und Versuche benötigt:

- Elastizitätsmodul, E (einachsiger Druckversuch),
- elastische Querdehnung, ν^e (einachsiger Druckversuch),
- plastische Querdehnung, ν^p (einachsiger Druckversuch),
- Gestalt der Fließfläche, α (einachsiger und hydrostatischer Druckversuch),
- maximale Schubspannung, τ_{\max} (Schubversuch),
- Mode I Bruchenergie, G_f^I (bei Bedarf einachsiger Zugversuch),
- 1. Parameter für das Dehnratesgesetz, n (einachsige Druckversuche, dynamisch),
- 2. Parameter für das Dehnratesgesetz, P (einachsige Druckversuche, dynamisch),
- Verfestigungsverlauf $(\sigma_v, \epsilon_v)_i$ (einachsiger Druckversuch).

Eine ausführlichere Beschreibung des Materialmodells, der Implementierung und der folgenden Verifikation ist [SCPM99] und [SCI99] zu entnehmen.

4.2.2.3 Verifikation

Die Verifikation des implementierten Materialmodells erfolgt auf der Basis von Tests mit einer homogenen Deformation der beteiligten Elemente und von Tests mit komplexeren Randbedingungen zur Untersuchung des Einflusses der Netzgeometrie. Der einfachste Test unter homogener Elementdeformation ist eine Berechnung mit jeweils nur einem Element. Der Test wird im Rahmen der Verifikation unter Variation des Belastungszustands durchgeführt, wobei die vorgegebene Belastung jeweils durch eine Verschiebung von definierten Elementknoten eingeleitet wird. Berücksichtigt werden die einachsige und die hydrostatische Druckbelastung, die einachsige Zugbelastung und die Schubbelastung.

Über diese 1-Elementtests hinaus werden die verschiedenen Belastungen unter komplexeren Randbedingungen simuliert. Dies beinhaltet eine Berücksichtigung von komplexeren,

variierenden Netzgeometrien und komplexeren Randbedingungen, wie beispielsweise der Einleitung einer Druckbelastung durch zwei starre Platten unter Formulierung einer Kontaktbedingung. Die Funktionalität des Dehnratengesetzes wird ausschließlich innerhalb dieses Testabschnitts verifiziert.

Aus der Vielzahl der untersuchten Beispiele zur Verifikation des Materialmodells werden im folgenden die 1-Elementtests, ein simulierter Zugversuch unter Variation der Netzgeometrie und der Druckversuch mit u-förmiger Probe unter Variation der Netzgeometrie betrachtet. Die vollständige Verifikation erfolgt in [SCI99]. Den Untersuchungen liegt der Polyurethanschaumstoff Bayfill[®] EA mit einer Dichte von 60 g/l zugrunde.

Die Ergebnisse der 1-Elementtests sind in Bild 4.41 und in den Bildern A2.8 bis A2.10 des Anhangs A2.2 zusammengefaßt. Bei den simulierten Be- und Entlastungsversuchen unter einachsiger und hydrostatischer Druckbelastung erfolgt zur Verifikation über die Entlastung hinaus eine Belastung in den Zugbereich. Das qualitative Druckverhalten wird in beiden Fällen gut wiedergegeben. Mit dem Erreichen der maximalen elastischen Hauptdehnung, ϵ_{\max}^e , die bei hydrostatischer Belastung einer höheren Zugspannung entspricht, stellt sich entsprechend den Anforderungen das Bruchversagen ein. Auch unter einachsiger Zugbelastung und unter Schubbelastung entspricht das modellierte Materialverhalten den Anforderungen.

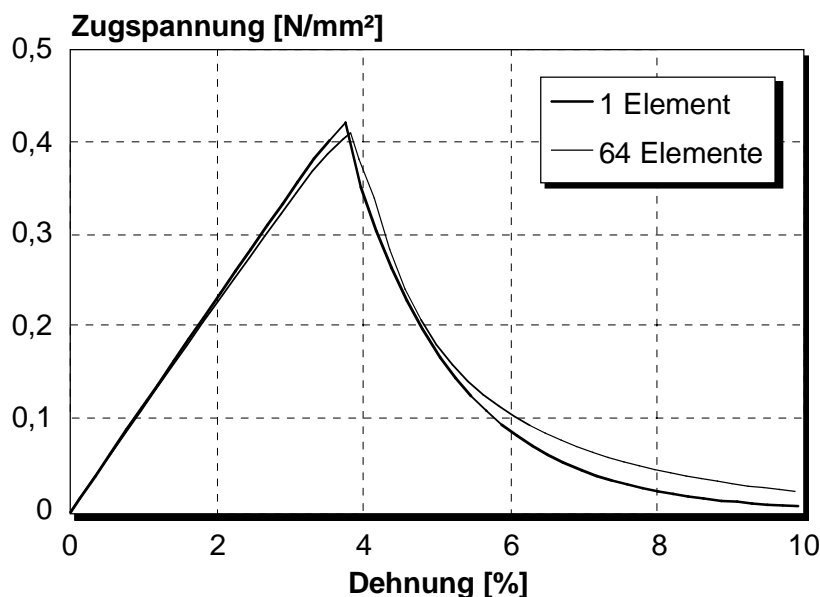


Bild 4.41: Verifikation der Netzunabhängigkeit des Schädigungsmodells unter Zugbelastung

Zum Nachweis der Netzunabhängigkeit des durch die Mode I-Bruchenergie regularisierten Nachversagensverhaltens wird ein Quader mit einer Kantenlänge von 100 mm auf der Basis

eines 1-Elementtests und eines Tests mit $4 \times 4 \times 4$ Elementen der Kantenlänge von 25 mm berechnet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Bild 4.41 dargestellt und weisen nach, daß aufgrund der Regularisierung nahezu keine Netzabhängigkeit vorliegt. Ergänzend hierzu wird der bereits erläuterte Druckversuch mit u-förmiger Schaumstoffprobe berechnet. Dabei werden die verschiedenen, in Bild 4.42 dargestellten zweidimensionalen und dreidimensionalen Netzgeometrien verwendet.

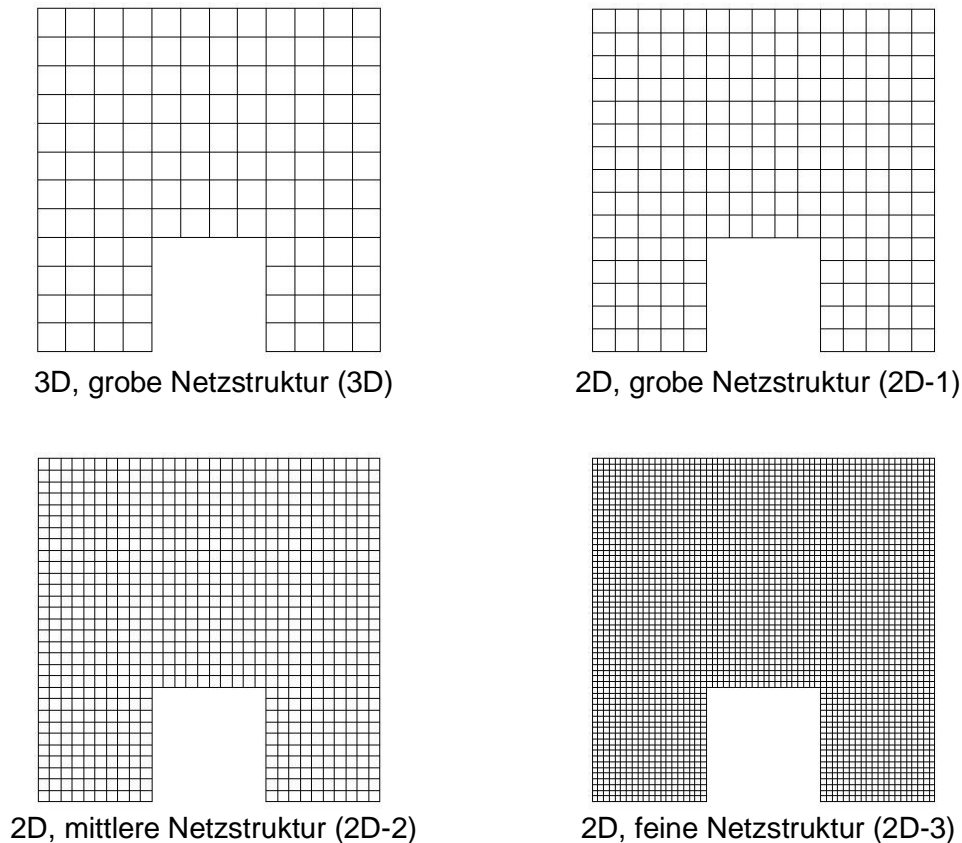


Bild 4.42: Variation der Netzgeometrie am Beispiel des u-förmigen Quaders

Bei den zweidimensionalen Netzgeometrien wird ein ebener Dehnungszustand simuliert. Aufgrund des komplexen, mehrachsigen Spannungszustands im Bereich der Aussparung kommt es zu der Bildung einer ausgeprägten Schädigung (vgl. Bild 4.49, Darstellung für die zweidimensionale Netzgeometrie 2D-3). Die Schädigung führt zu der in Bild 4.43 dargestellten Stufe innerhalb des Kraft-Wegverlaufs bei einer Verschiebung von ca. 20 mm. Der Vergleich der verschiedenen Verläufe zeigt, daß aufgrund der Regularisierung des Nachversagensverhaltens trotz der erheblichen Variation der Netzgeometrie nur geringe Abweichungen zwischen den Kraft-Wegverläufen festzustellen sind.

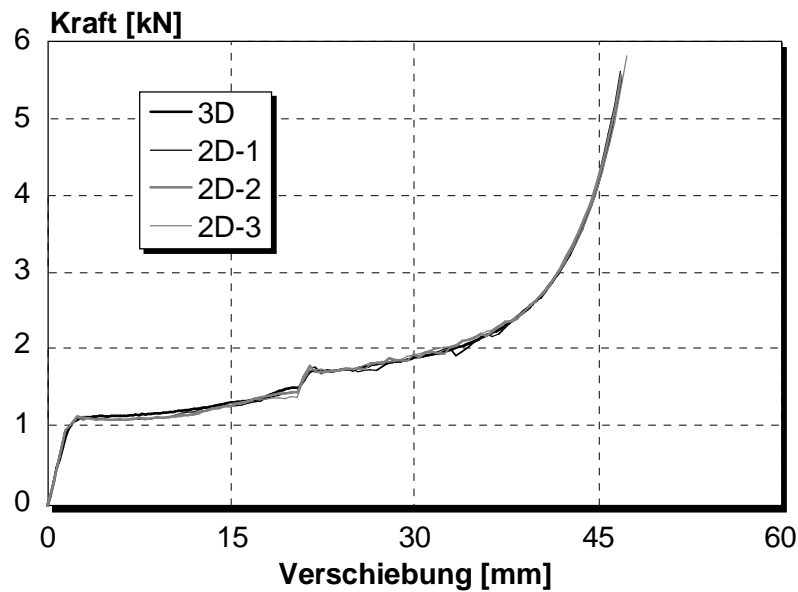


Bild 4.43: Verifikation der Netzunabhängigkeit am Beispiel der Schädigung des u-förmigen Quaders

4.3 Validierung des Materialmodells

Mit der Verifikation der Implementierung ist die vollständige Umsetzung aller geplanten Maßnahmen zur Weiterentwicklung des Materialmodells nach N. Fleck bestätigt. Im Anschluß an diese Verifikation erfolgt die Validierung des modifizierten Modells, um dessen Eignung zur Simulation des Materialverhaltens von polymeren Hartschaumstoffen innerhalb des definierten Einsatzbereichs sicherzustellen. Die Validierung erfolgt unter Berücksichtigung beider Schaumsysteme auf der Basis einer Simulation der Materialtests und der anwendungsnahen Grundagentests. Sie dient darüber hinaus einer Bestätigung der in Kapitel 3 festgelegten Anforderungen an das Materialmodell, die in Kapitel 5 ausführlich behandelt werden.

4.3.1 Erläuterung der Validierungsbeispiele

Die Validierung des Materialmodells erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit beispielhaft für das Polyurethansystem Bayfill[®] EA mit einer Dichte von $\rho = 60 \text{ g/l}$ und dem Compound aus Polystyrol und Polyphenylenether Noryl[®] EF mit einer Dichte von $\rho = 30 \text{ g/l}$. Ausgehend von den Materialtests werden für die Beispiele die in Tabelle A2.1 dargestellten Materialparameter verwendet.

Die berechneten Beispiele sind in Tabelle 4.4 zusammengefaßt. Zur Verringerung der Rechenzeit werden die komplexeren Beispiele als zweidimensional diskretisierte Modelle berechnet. Bei allen Modellen wird entsprechend den Erläuterungen für die u-förmige Probe in Kapitel 4.2.2.3 ein ebener Dehnungszustand senkrecht zur Lastebene induziert. Einzige Ausnahme ist die Berechnung der zweidimensionalen Halbkugeleindringung, bei der achsensymmetrische Randbedingungen berücksichtigt werden. Die Richtigkeit der zweidimensionalen Lösungen mußte hierzu im Vorfeld der Validierung nachgewiesen werden. Für die Simulation der dynamischen Druckversuche werden entsprechend den Randbedingungen der experimentellen Untersuchungen die in Tabelle A2.2 zusammengefaßten Impaktormassen und -geschwindigkeiten berücksichtigt.

Berechnungsbeispiel	Geometrie	Bemerkung
einachsiger Druckversuch	Probe: 180x180x30 mm ³ Impaktor: starre Platte	quasistatisch, dynamisch
hydrostatischer Druckversuch	Probe: 100x100x60 mm ³	quasistatisch
einachsiger Zugversuch	Probe: nach DIN53430	quasistatisch
Schubversuch	Probe: 180x180x30 mm ³	quasistatisch
Druckversuch mit halbzylindrischem Impaktor	Probe: 180x180x30 mm ³ Impaktor: Ø 165 mm	quasistatisch, dynamisch
Druckversuch mit halbkugelförmigem Impaktor	Probe: 180x180x30 mm ³ Impaktor: Ø 165 mm	quasistatisch, dynamisch
Druckversuch mit keilförmiger Probe	Probe: keilförmig*) Impaktor: starre Platte	quasistatisch
Druckversuch mit u-förmiger Probe	Probe: u-förmig*) Impaktor: starre Platte	quasistatisch

*) vgl. Probenabmessungen entsprechend der Versuchsbeschreibung in Kapitel 4.1

Tabelle 4.4: Übersicht der Validierungsbeispiele

Für den Vergleich der quasistatischen Ergebnisse wird jeweils der Mittelwertverlauf aus drei experimentellen Einzelversuchen verwendet, weshalb auf die Darstellung des Entlastungsverhaltens verzichtet werden muß. Um eine Beurteilung des modellierten Entlastungsverhaltens zu ermöglichen, werden die Ergebnisse der dynamischen Tests auf der Basis von Einzelversuchen verglichen.

4.3.2 Auswertung

Bei der Auswertung werden die Materialtests und die anwendungsnahen Grundlagentests unabhängig voneinander betrachtet. Die Materialtests ermöglichen im direkten Vergleich eine gute Beurteilung der Übereinstimmung der mechanischen Eigenschaften des jeweiligen polymeren Schaumstoffes und des für diesen Schaumstoff kalibrierten Materialmodells. Mit Hilfe der Grundlagentests reduziert sich diese Beurteilung auf den wesentlichen Einsatzbereich.

4.3.2.1 Simulation von Materialtests

In Bild 4.44 sind die Berechnungs- und Versuchsergebnisse für die quasistatisch-einachsige Druckbelastung des Polyurethansystems dargestellt. Die Übereinstimmung ist gut und dient zur Bestätigung der kalibrierten Materialparameter.

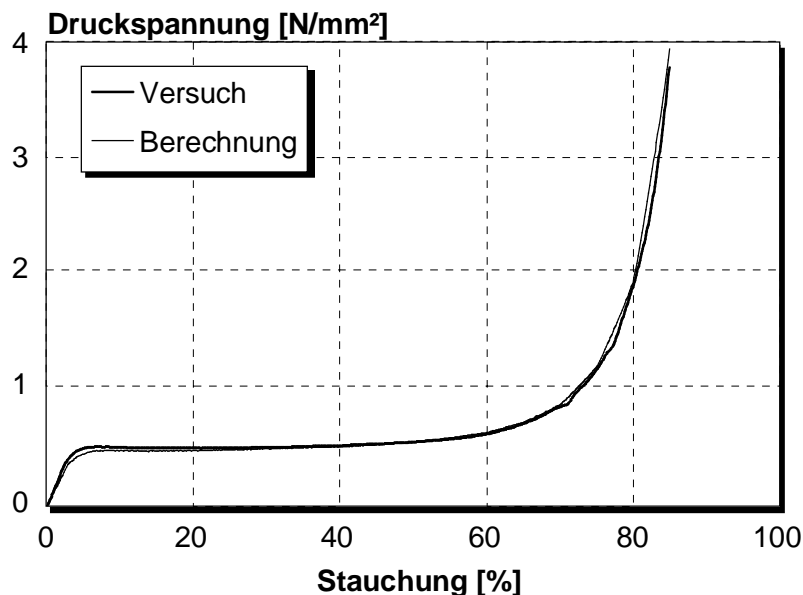


Bild 4.44: Vergleich des experimentellen und berechneten quasistatisch einachsigen Drucktests (PUR, 60 g/l)

Die Ergebnisse des hydrostatischen Druckversuchs sind in Bild 4.45 dargestellt. Auch für diesen Lastfall zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen dem experimentell ermittelten und dem berechneten Materialverhalten. Die Abweichungen im Plateau- und im Progressionsbereich des Druckspannungs-Volumenstauchungsverlaufs sind auf die einfache Formulierung des Materialmodells mit isotroper Verfestigung zurückzuführen.

Die entsprechenden Ergebnisse für den einachsigen und den hydrostatischen Druckversuch mit EPS/PPE der Dichte 30 g/l sind in Bild A2.11 und Bild A2.12 im Anhang der vorliegenden Arbeit dargestellt. Auch hier wird eine sehr gute Übereinstimmung für beide Lastfälle

festgestellt. Für beide Werkstoffe erweist sich die in Kapitel 4.1 angenommene, nahezu kreisförmige Gestalt der Fließfläche innerhalb des Druckbereichs als zufriedenstellend.

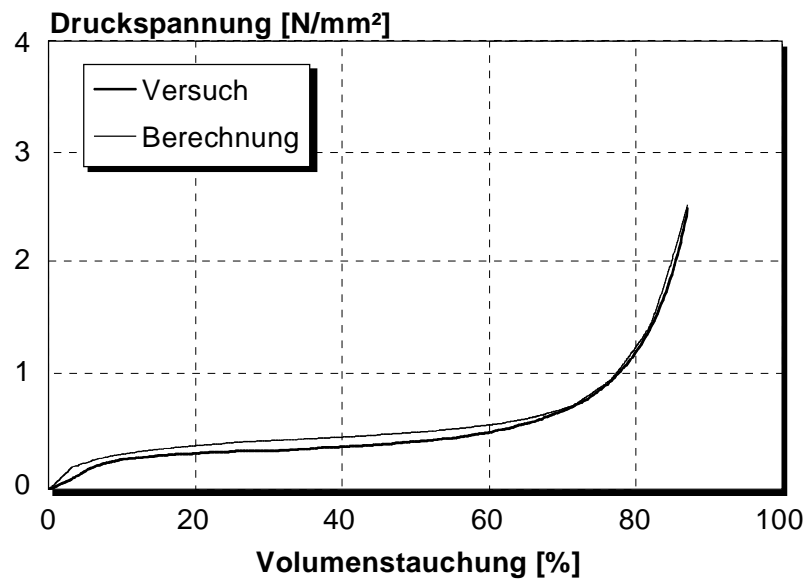


Bild 4.45: Vergleich des experimentellen und berechneten hydrostatischen Drucktests (PUR, 60 g/l)

Bei Belastungen, die von der hinsichtlich der Energieabsorption wesentlichen Druckbelastung abweichen, ist die Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch erwartungsgemäß weniger gut. Das Bild 4.46 zeigt beispielhaft den Vergleich für das untersuchte Polyurethansystem anhand des Schubversuchs, bei dem das simulierte Nachversagensverhalten zu einer Abweichung zwischen Versuch und Berechnung führt.

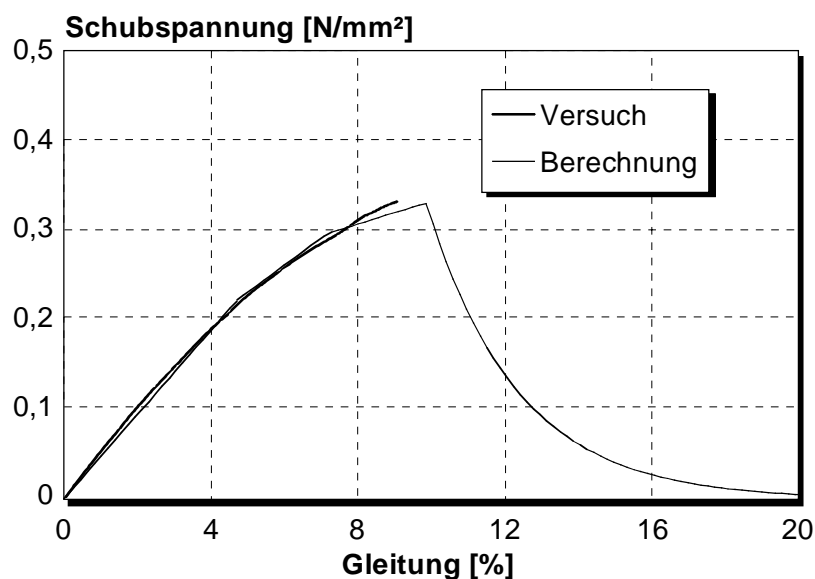


Bild 4.46: Vergleich des experimentellen und berechneten Schubtests (PUR, 60 g/l)

Das innerhalb der Materialcharakterisierung ermittelte und unter Zug- und Druckbelastung bereits innerhalb des elastischen Deformationsbereichs unsymmetrische Verhalten des EPS/PPE kann mit Hilfe des Materialmodells nicht reproduziert werden. Die experimentell ermittelte maximale Schubspannung wird in der Berechnung erst bei vergleichsweise hohen Gleitungen erreicht, so daß das Bruchversagen nur unzureichend simuliert wird (Bild 4.47). Die Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung unter Zugbelastung sind mit den Ergebnissen der Schubbelastung vergleichbar (vgl. Anhang, Bild A2.13 und A2.14).

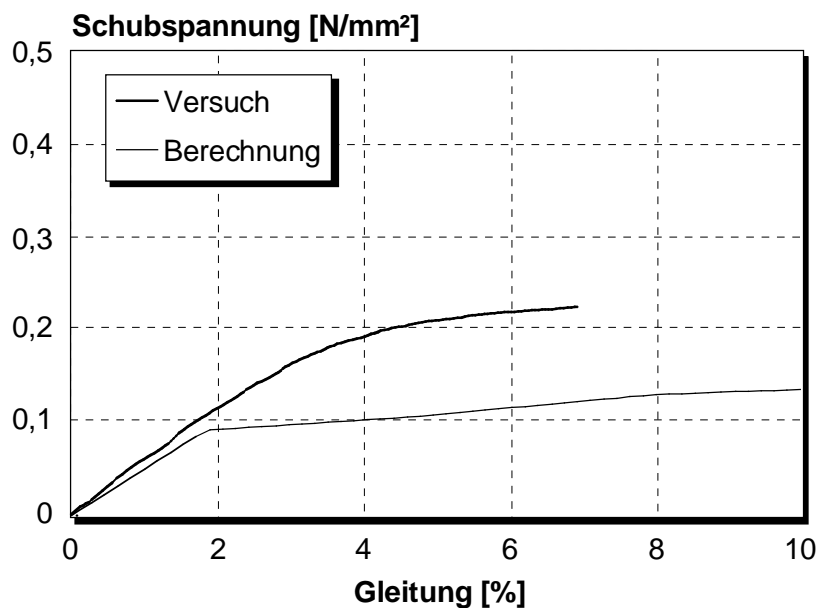


Bild 4.47: Vergleich des experimentellen und berechneten Schubtests (EPS/PPE, 30 g/l)

Auf einen Ergebnisvergleich der dynamisch einachsigen Druckversuche wird an dieser Stelle verzichtet. Die Dehnratenabhängigkeit kann mit Hilfe der einfachen Potenzfunktion bei einachsiger Belastung gut wiedergegeben werden (Bild A2.22 und Bild A2.23). Hier sei auf die Analyse der Validierung in Kapitel 5 hingewiesen. Ebenso wird eine vergleichbar gute Übereinstimmung für die variierten Dichten der beiden Schaumsysteme und für die Versuche unter Variation der Betriebstemperatur erreicht. Auch hier sei auf Kapitel 5 verwiesen.

Die Validierung des Materialmodells auf der Basis der Materialtests zusammenfassend wird für das Polyurethansystem eine gute Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen und der Berechnung festgestellt. Der Einfluß der für EPS/PPE festgestellten Abweichungen für zug- und schubdominierte Belastungen wird anhand der anwendungsnahen Grundlagentests untersucht.

4.3.2.2 Simulation von anwendungsnahen Grundlagentests

Die Ergebnisse der quasistatischen und im wesentlichen druckdominierten Versuche mit halbzyklindrischem und halbkugelförmigem Impaktor sind im Anhang dieser Arbeit in den Bildern A2.15-A2.18 dargestellt. Für beide Werkstoffe ist die Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den berechneten Kraft-Verschiebungsverläufen gut. Auch die Ergebnisse der quasistatischen Druckversuche mit keilförmiger Probengeometrie, die in den Bild A2.19 und A2.20 des Anhangs verglichen sind, zeigen eine gute Übereinstimmung.

Die quasistatischen Druckversuche mit u-förmiger Probengestalt werden ausführlicher behandelt, da untersucht werden soll, ob der komplexe Spannungszustand, der für das Polyurethansystem zu der in Bild 4.21 dargestellten Rißbildung führt, mit Hilfe des Materialmodells abgebildet werden kann. Der Kraft-Verschiebungsverlauf der Proben zeigt bei einer Verschiebung von ca. 5 mm einen leichten Einbruch und bei ca. 20 mm einen starken Anstieg, was jeweils auf die Bildung von Rissen zurückzuführen ist. Begründet durch diesen Einfluß auf das Energieabsorptionsvermögen des Bauteils muß das beschriebene Verhalten rechnerisch für eine Validierung des Materialmodells reproduziert werden. Der Vergleich der experimentell ermittelten und des berechneten Kraft-Verschiebungsverlaufs für das Polyurethansystem ist in Bild 4.48 dargestellt.

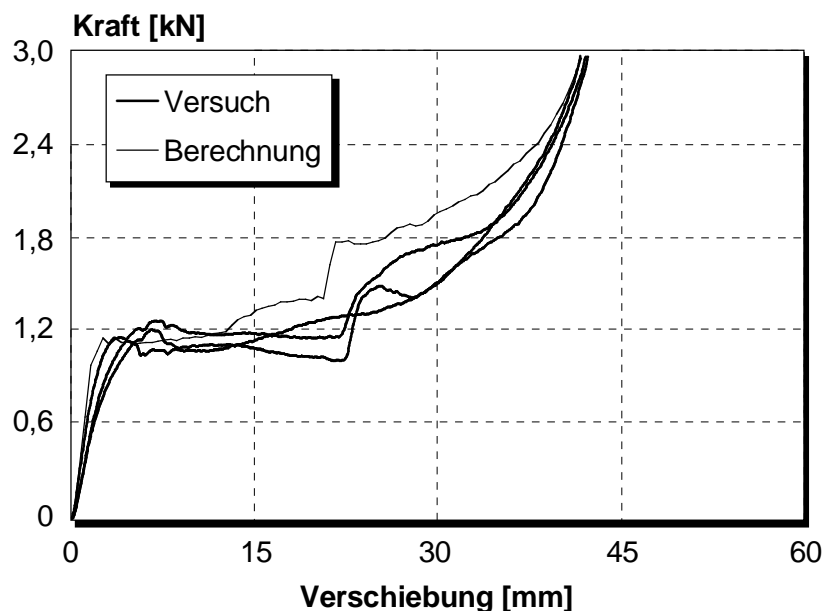


Bild 4.48: Quasistatischer Drucktest mit u-förmiger Probe (PUR mit 60 g/l)

Der berechnete Verlauf zeigt vergleichbar den experimentellen Ergebnissen den Einbruch der Kraft bei ca. 5 mm und den sprunghaften Anstieg der Kraft bei ca. 20 mm. Der Verlauf befindet sich allerdings außerhalb des Streubereichs der drei Einzelversuche. Dies führt zu einer um

durchschnittlich 10% größeren Energieaufnahme für den berechneten Test. Qualitativ ist die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Experiment gut, was zusätzlich durch den Vergleich der in Bild 4.49 dargestellten Schädigung mit dem tatsächlichen Riß der u-förmigen Probe aus PUR der Dichte 60 g/l bestätigt wird.

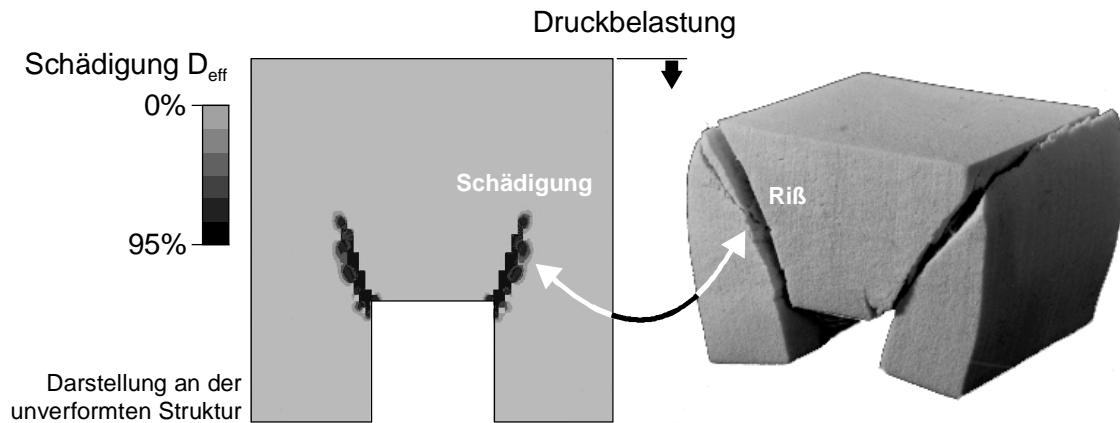


Bild 4.49: Vergleich der berechneten Schädigung der u-förmigen Probe mit dem tatsächlichen Verlauf des Risses (PUR mit 60 g/l, Netzgeometrie 2D-3)

Die Ergebnisse für EPS/PPE der Dichte 30 g/l sind in Bild A2.21 dargestellt. Der Kraft-Verschiebungsverlauf verdeutlicht die gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Berechnung. Im Gegensatz zu dem Polyurethansystem hat die geringfügige Bildung von Rissen bei den realen Probekörpern nahezu keinen Einfluß auf das Verhalten der Struktur. Darüber hinaus kann bei dieser durch Schub überlagerten Belastung kein Einfluß der durch das Materialmodell bedingten Abweichung der abgebildeten Zug-, bzw. Schubsteifigkeit nachgewiesen werden.

In den folgenden Validierungsbeispielen wird das experimentell festgestellte und das berechnete Crashverhalten unter dynamischer Druckbelastung verglichen (Bildern 4.50 und 4.51). Ausgehend von den Ergebnissen der einachsigen Druckversuche erfolgt die Validierung durch die Betrachtung der Druckversuche mit halbzyklindrischem und halbkugelförmigem Impaktor. Die wesentlichen Erkenntnisse aus den dynamischen Versuchen werden am Beispiel der Halbkugeleindringung zusammengefaßt. In den Bildern 4.50 und 4.51 ist hierzu ein Vergleich der Kraft-Verschiebungsverläufe der dynamischen Tests mit halbkugelförmigem Impaktor für PUR und EPS/PPE dargestellt. Für beide Schaumstoffsysteme ist die Übereinstimmung für das Belastungsverhalten sehr gut.

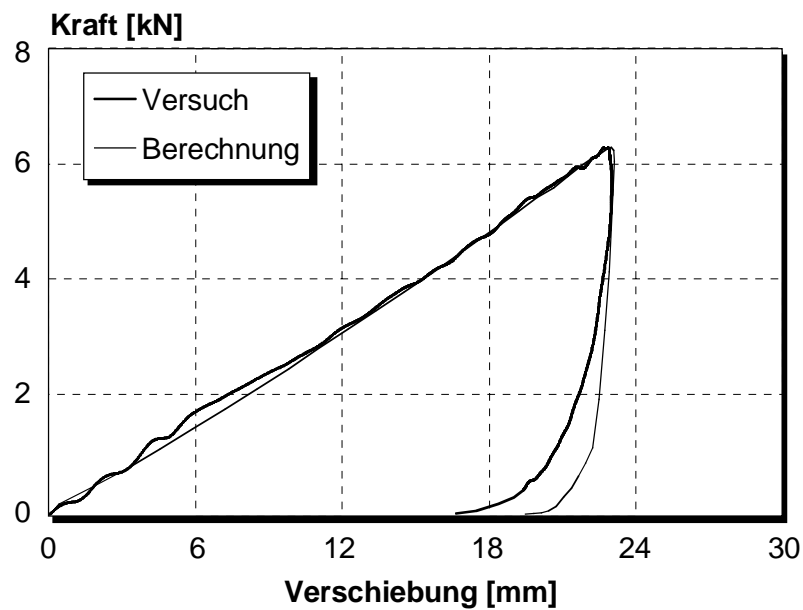


Bild 4.50: Vergleich des experimentellen und berechneten Drucktests mit halbkugelförmigem Impaktor (PUR, 60 g/l)

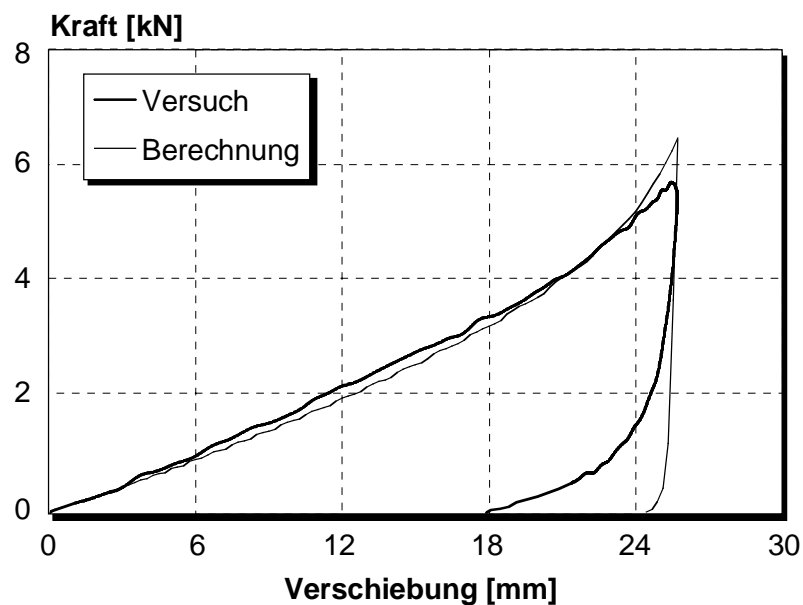


Bild 4.51: Vergleich des experimentellen und berechneten Drucktests mit halbkugelförmigem Impaktor (EPS/PPE, 30 g/l)

Zum Abschluß der Validierung wird noch kurz auf der Basis der dynamischen Versuche das simulierte Entlastungsverhalten betrachtet. Das Polyurethansystem absorbiert einen Großteil der kinetischen Energie des Impaktors durch plastische Deformation bzw. durch Zerstörung der zellularen Struktur, wodurch bei Entlastung nur ein geringer Rückverformungsanteil festgestellt wird. Dieses Verhalten wird durch das elastisch-plastische Materialmodell gut wiedergegeben

(vgl. Bild 4.50). Im Gegensatz dazu wird für das System auf Polystyrolbasis ein größerer Anteil einer elastischen Rückverformung festgestellt, der durch das Materialmodell nur mit Einschränkungen wiedergegeben werden kann. Der Einfluß ist für den dynamisch-einachsigen Druckversuch besonders groß (Bild A2.23), während er bei den komplexeren Lastfällen mit sehr ausgeprägten lokalen Deformationen etwas geringer ist (vgl. Bild 4.51). Betrachtet man, unter Berücksichtigung der bei Rückverformung freigesetzten Energie, die insgesamt von den Schaumstoffproben absorbierte Energie, so führen die Abweichungen durch das unzureichend modellierte Rückverformungsverhalten bei dem betrachteten Polyurethansystem zu einer Energiedifferenz von $< 5\%$ und bei dem System auf Polystyrolbasis zu einer Energiedifferenz von 10-15%. Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 definierten Einsatzbereiche von polymeren Hartschaumstoffen mit hohem Energieabsorptionsvermögen im Automobilbau muß der Einfluß dieser Energiedifferenz aufgrund der abweichenden Abbildung des Entlastungsverhaltens durch das Materialmodell innerhalb der Bewertung ausführlich untersucht werden.

5 Die Integration von polymeren Hartschaumstoffen: Bewertung und Knowhow-Gewinn

5.1 Bewertung

In der Bewertung des Integrationsprozesses werden die Ergebnisse der vorangegangenen Teilphasen aufbereitet und interpretiert. Auf der Basis der Ergebnisinterpretation erfolgt eine Entscheidung über Annahme oder Ablehnung des Materialmodells. Bei einer Annahme des Modells werden anschließend die Qualitätsvorschriften für das Materialmodell und für Bauteile aus polymeren Hartschaumstoffen festgelegt.

5.1.1 Ergebnisaufbereitung

Eine umfangreiche Dokumentation der Ergebnisse aus den einzelnen Teilphasen des Prozesses ist bereits in den vorangegangenen Kapiteln umgesetzt. Über diese Dokumentation hinausgehend bietet sich nach [LM94] als Unterstützung für die Ergebnisinterpretation der Einsatz von verschiedenen statistischen Verfahren zur Ergebnisaufbereitung an:

- Hypothesentests,
- Korrelationsanalysen,
- Regressionsanalysen.

Mit Hilfe der **Hypothesentests** können die Annahmen und Ergebnisse des Integrationsprozesses ausgewertet und beurteilt werden. Auf der Basis dieser Beurteilung wird darüber entschieden, ob die gesammelten Daten zur Bestätigung der Annahmen ausreichen. Mit einer **Korrelationsanalyse** wird die Ausprägung eines statistischen Zusammenhangs zwischen den variierten Parametern untersucht. Dieses Verfahren wurde in [Ma98] für die Materialcharakterisierung am Beispiel von polymeren Hartschaumstoffen eingesetzt. Darüber hinausgehend wird mit einer **Regressionsanalyse** ein Modell erstellt, das den Zusammenhang zwischen den variierten Parametern und einer definierten Zielgröße beschreibt.

In Anhang A3 wird die Regressionsanalyse als Hilfsmittel zur Beurteilung des Materialmodells eingeführt. Sie ermöglicht eine fundierte Bewertung des Modells, wobei die Herleitung eines geeigneten Regressionsansatzes sehr aufwendig ist. Die Bewertung des Integrationsprozesses und des Materialmodells wird sich aus diesem Grund hauptsächlich auf einen Vergleich der Validierungskriterien stützen.

5.1.2 Ergebnisinterpretation

Die Ergebnisinterpretation gliedert sich in zwei wesentliche Teilabschnitte. Mit dem Ziel einer Qualitätssicherung wird der Integrationsprozeß innerhalb des ersten Teilabschnitts beurteilt. Dies beinhaltet eine **Beurteilung der einzelnen Prozeßschritte** hinsichtlich ihrer Transparenz und ihrer Reproduzierbarkeit, wodurch ein Arbeiten nach dem Stand der Technik gewährleistet werden soll. Darüber hinaus erfolgt die **Validierung der Annahmen**, die in der Planungsphase definiert wurden. Innerhalb des zweiten Teilabschnitts wird die ausführliche Bewertung des Materialmodells umgesetzt. Die Bewertung des Modells umfaßt die **Analyse der Modellvalidierung** und eine **Begründung und Bewertung von Abweichungen** zwischen dem experimentell festgestellten und dem simulierten Materialverhalten.

5.1.2.1 Beurteilung der Prozeßschritte

Aufgrund des Pilotcharakters des Integrationsprozesses von polymeren Hartschaumstoffen müssen bei einer Beurteilung der einzelnen Prozeßschritte erhebliche Einschränkungen akzeptiert werden. So werden aufgrund des geringen verfügbaren Knowhows zur Modellierung des Materialverhaltens der Schaumstoffe die in Kapitel 2 für die Planungsphase definierten Zielsetzungen innerhalb des Projekts nur teilweise umgesetzt.

In der Durchführung des Integrationsprozesses wurden die für eine Modellierung des Materialverhaltens der polymeren Hartschaumstoffe erforderlichen Kenntnisse durch eine experimentelle Materialcharakterisierung erarbeitet und ermöglichen eine qualitativ abgesicherte Beurteilung des Modells. Die Durchführung und die Auswertung der Materialcharakterisierung ist entsprechend den Anforderungen ausführlich dokumentiert, die Experimentaldaten sind aufbereitet und stehen zur Verfügung [KDZ96], [SH99]. Ebenso wurde die Untersuchung der existierenden Materialmodelle, die Weiterentwicklung des Materialmodells von N. Fleck und die Validierung des Modells ausführlich dokumentiert und ermöglichen bei Bedarf eine reproduzierbare Durchführung der einzelnen Teilschritte [Sch97], [SPM97], [Sch99a], [Sch99b], [SCPM99], [SCI99].

5.1.2.2 Validierung der Annahmen über das Materialverhalten

Die Validierung der Annahmen ist zur Vollständigkeit nochmals an dieser Stelle erwähnt. Im Mittelpunkt der Validierung stehen innerhalb des Integrationsprozesses von polymeren Hartschaumstoffen die Annahmen über das Materialverhalten, die bereits innerhalb von Kapitel 4.1 behandelt sind. Die Annahmen konnten weitestgehend bestätigt werden.

5.1.2.3 Analyse der Modellvalidierung

Die vollständige Analyse der Modellvalidierung umfaßt die Validierung der verfügbaren Materialmodelle sowie des modifizierten Materialmodells nach N. Fleck. Hinsichtlich der Validierung der verfügbaren Modelle wird auf die Analyse in Kapitel 4.2.1.2 hingewiesen. Die Analyse der Validierung des modifizierten Modells nach N. Fleck zeigt für das untersuchte Polyurethansystem eine gute Übereinstimmung zwischen dem simulierten und dem experimentellen Materialverhalten. Für das Schaumsystem auf Polystyrolbasis ist die Übereinstimmung bei den hinsichtlich des Einsatzgebiets relevanten druckdominierten Belastungen ebenfalls gut. Bei zug- und schubdominierten Belastungen werden Abweichungen festgestellt, die durch eine größere Steifigkeit und ein höheres Niveau des Fließbeginns unter Zug- und Schubbelastung im Vergleich zu dem Verhalten unter Druckbelastung charakterisiert sind. Der Einfluß dieser Abweichungen des Zug- und Schubverhaltens auf die druckdominierten Material- und Grundagentests wird ausführlich untersucht. Die einachsigen Druckversuche werden hierfür auf der Basis der mittleren Plateauspannung analysiert (Bild 5.1).

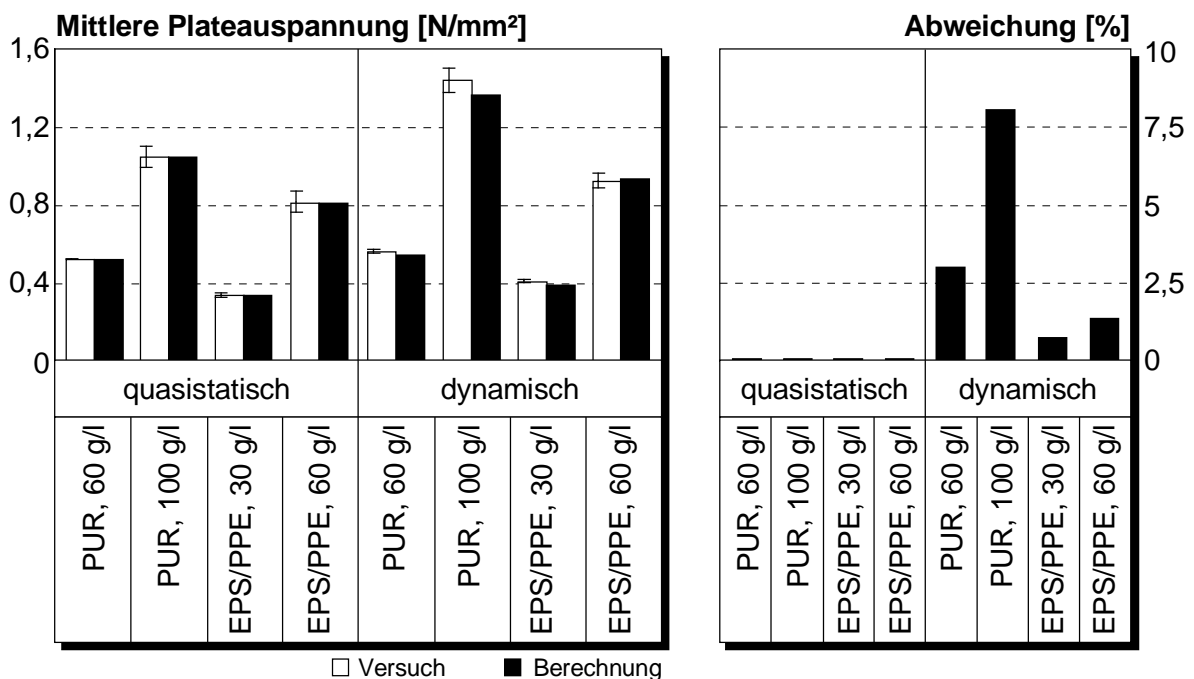


Bild 5.1: Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung am Beispiel der mittleren Plateauspannung bei einachsiger Druckbelastung

Da die Materialparameter auf der Basis der quasistatischen Druckversuche kalibriert wurden, kann für diese Versuche keine Abweichung des Validierungskriteriums festgestellt werden. Die Parameter für das Dehnratengesetz des Materialmodells sind hinsichtlich einer bestmöglichen Übereinstimmung für die mittlere Plateauspannung optimiert. Die Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung ist dementsprechend innerhalb dieses, für das Energieabsorptions-

vermögen wichtigen, Deformationsbereichs gut. Die Abweichungen liegen innerhalb des dargestellten Streubereichs der Einzelversuche. Die maximale Abweichung zwischen dem experimentellen Mittelwert und einem Berechnungsergebnis wird für das Polyurethansystem der Dichte 100 g/l festgestellt und liegt bei 8%. Die durchschnittliche Abweichung der mittleren Plateauspannung beträgt bei den dynamisch einachsigen Druckversuchen 3,6%.

Der Einfluß der Betriebstemperatur wird beispielhaft für PUR der Dichte 60 g/l und EPS/PPE der Dichte 30 g/l durch eine Regressionsanalyse verdeutlicht, die in Anhang A3 beschrieben ist. Ein hieraus abgeleiteter Vergleich der realen Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit des Materialverhaltens mit dem modellierten Verhalten führt zu den folgenden Ergebnissen:

- Bei beiden Werkstoffen wird eine Wechselwirkung zwischen Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit des Materialverhaltens nachgewiesen.
- Eine simulierte Variation der Einsatztemperatur muß unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Materialmodell durch eine unabhängige Kalibrierung aller Parameter des Materialmodells für die jeweilige Temperatur erfolgen.

Die dynamischen Druckversuche mit halbzyklindrischem und halbkugelförmigem Impaktor werden anhand der maximalen Kraft, der maximalen Verschiebung und des Entlastungsquotienten verglichen. Ein Vergleich der maximalen Druckkraft ist in Bild 5.2 zusammengefaßt.

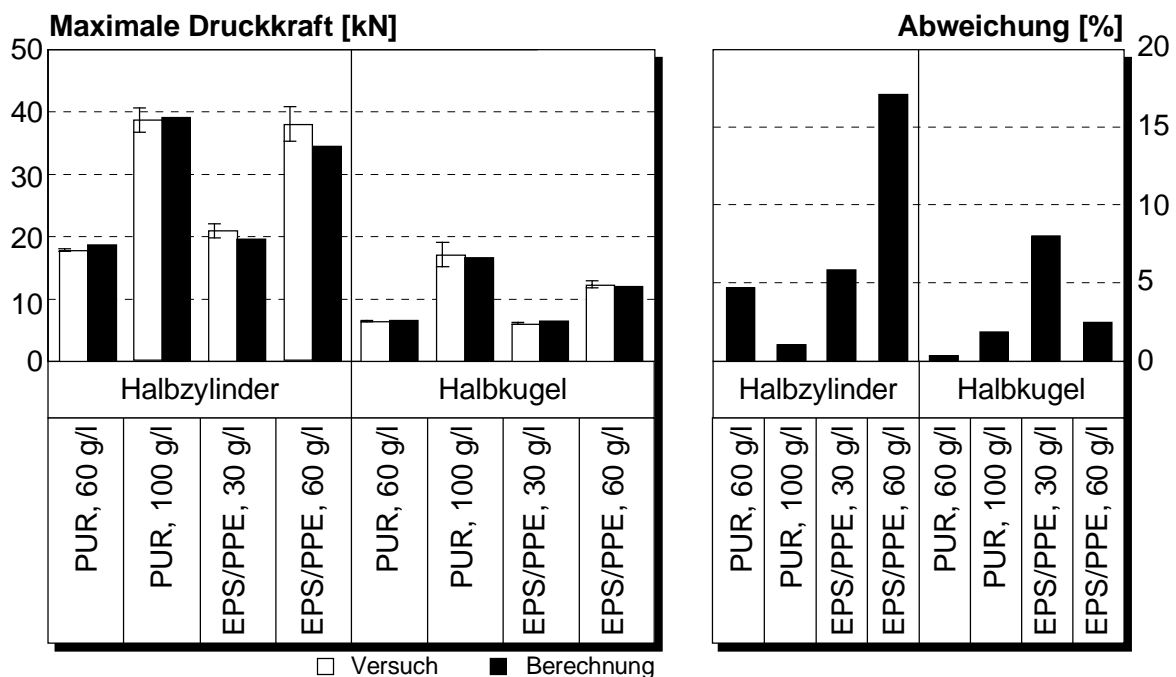


Bild 5.2: Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung am Beispiel der maximalen Druckkraft aus den anwendungsnahen, dynamischen Drucktests

Bis auf das Ergebnis der Probe aus EPS/PPE mit einer Dichte von 60 g/l, die mit halbzyklindrischem Impaktor getestet wurde, liegen die Ergebnisse der Berechnung innerhalb des Streubereichs, wobei der Streubereich größer ist, als bei den oben betrachteten, einachsigen Druckversuchen. Die durchschnittliche Abweichung liegt bei 5,3%, die der oben genannten EPS/PPE-Probe bei 17%, wobei hier der vergleichsweise große Streubereich der experimentellen Ergebnisse auffällig ist. Die festgestellten Abweichungen für das Schaumsystem auf Polystyrolbasis sind mit 8,4% größer, als bei dem Polyurethansystem, bei dem eine durchschnittliche Abweichung von 2,1% festgestellt wird. Für die in Bild 5.3 dargestellte, maximale Verschiebung wird in den experimentellen Untersuchungen nur eine sehr geringe, durchschnittliche Streuung von ca. 3% festgestellt. Dementsprechend liegt die auf die Berechnung zurückzuführende, durchschnittliche Abweichung von 4,2% außerhalb des Streubereichs, ist allerdings als geringfügig einzustufen. Die Abweichungen für PUR und EPS/PPE sind von gleicher Größenordnung.

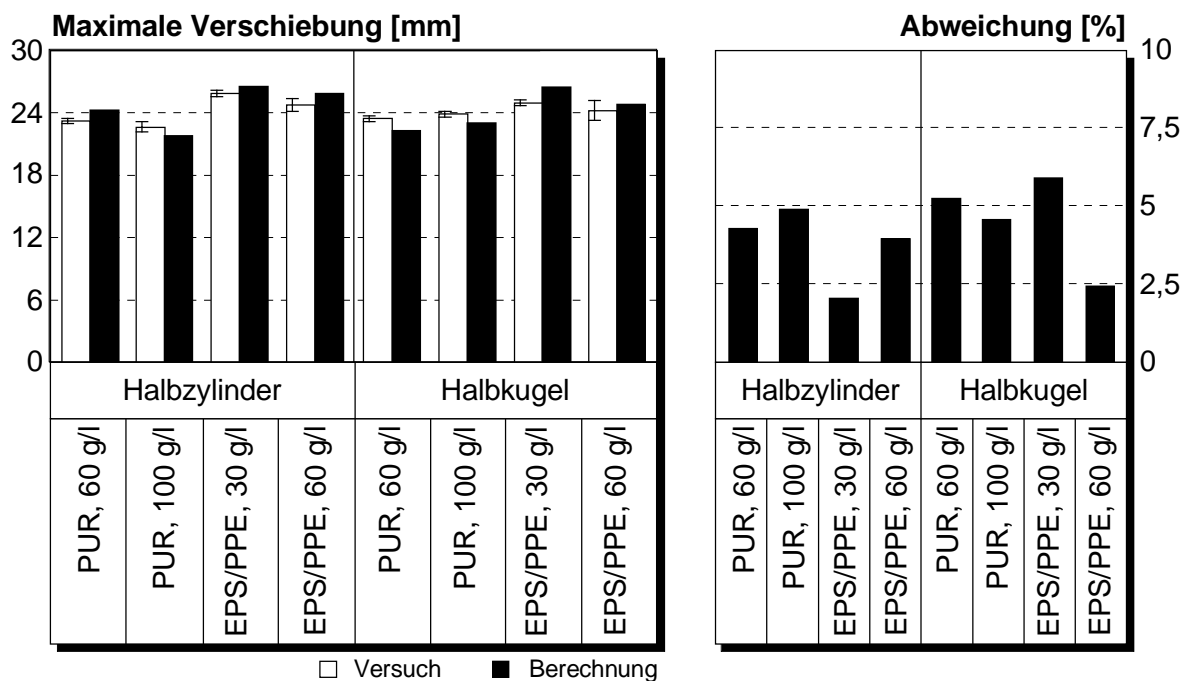


Bild 5.3: Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung am Beispiel der maximalen Verschiebung aus den anwendungsnahen, dynamischen Drucktests

Unter der Berücksichtigung der gleichen kinetischen Anfangsenergie der Impaktoren in Versuch und Berechnung dient die Analyse der maximalen Kraft und der maximalen Verschiebung dem Vergleich des Materialverhaltens bei Belastung. Zur Analyse des Entlastungsverhaltens bietet sich, wie bereits erwähnt, die Betrachtung des Entlastungsquotienten an, der für die anwendungsnahen, dynamischen Druckversuche in Bild 5.4 dargestellt ist. Die Abweichungen zwischen Versuch und Simulation sind teilweise erheblich. Für das sprödharte Polyurethan-

system wird eine durchschnittliche Abweichung von 50% festgestellt, bei dem zäharten Schaumsystem auf Polystyrolbasis liegt diese Abweichung bei 72%.

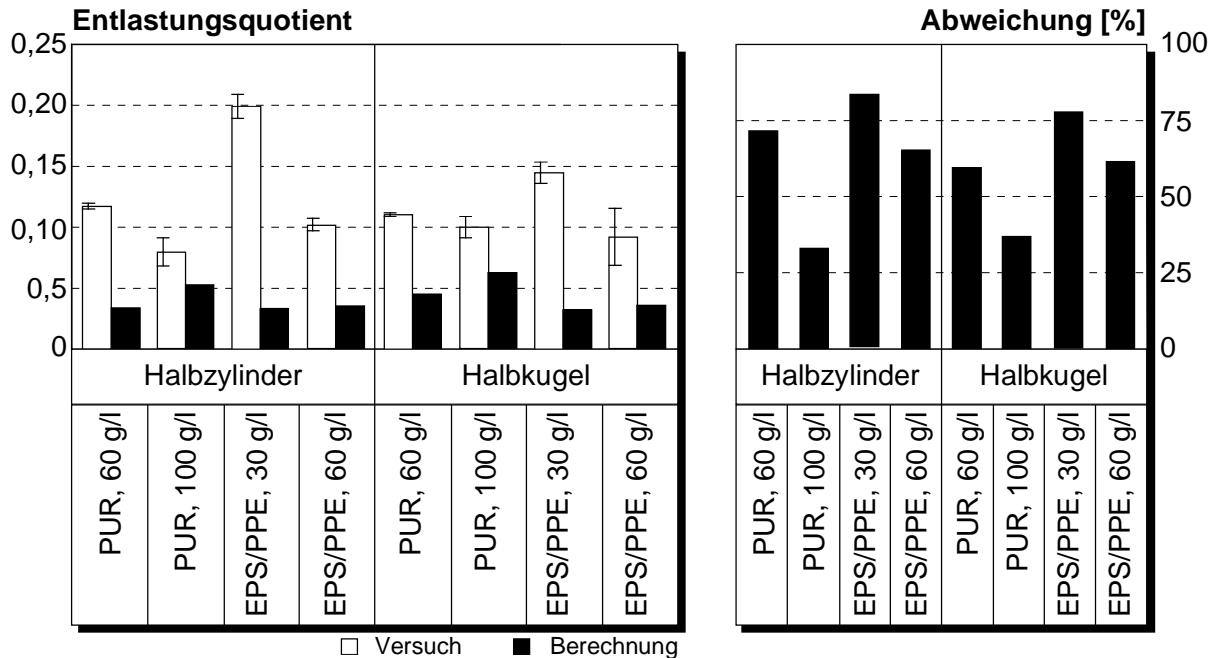


Bild 5.4: Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung am Beispiel des Entlastungsquotienten aus den anwendungsnahen, dynamischen Drucktests

Der Vergleich der experimentellen und simulierten quasistatischen Druckversuche mit der keilförmigen und der u-förmigen Probengeometrie führt zusammenfassend zu einer guten Übereinstimmung. Mit Hilfe des implementierten Schädigungsmodells zur Berechnung des Bruchversagens werden die Risse, die sich bei den Polyurethanproben bilden, qualitativ gut abgebildet. Der durch die Ribbildung erheblich beeinflusste Kraft-Verschiebungsverlauf wird richtig wiedergegeben. Die Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung sind geringfügig außerhalb des Streubereichs der Einzelversuche. Für die Druckversuche mit u-förmiger Probengeometrie kann für EPS/PPE weder experimentell noch numerisch der Einfluß einer Schädigung festgestellt werden. Ein Vergleich der jeweiligen Kraft-Verschiebungsverläufe zeigt keine großen Abweichung zwischen dem experimentellen und dem simulierten Materialverhalten.

Ergänzend zu der bisher zusammengefaßten Analyse wurde in [Mu99] und [Da00] mit der numerischen Untersuchung eines Einflusses von Schäumhaut und Dichteinhomogenitäten am Beispiel des Polyurethansystems die Abhängigkeit des Energieabsorptionsvermögens von dem Fertigungsprozeß untersucht. Die Untersuchungen belegen entsprechend den Ergebnissen in Kapitel 4.1, daß der Einfluß der Schäumhaut nahezu vollständig auf eine Berücksichtigung der mit einer Hautbildung verbundenen Dichteerhöhung zurückgeführt werden kann. Der Einfluß nimmt mit zunehmender Schaumstoffdichte und Bauteildicke ab. Hinsichtlich fertigungs-

bedingter Dichteinhomogenitäten wurde im Rahmen der Untersuchungen gezeigt, daß sich bei einer Streuung der Dichte im Kernbereich der Bauteile von mehr als 10% die Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung erheblich verschlechtert.

5.1.2.4 Begründung und Bewertung von Abweichungen

Mit dem modifizierten Materialmodell nach N. Fleck werden die folgenden, charakteristischen Eigenschaften der untersuchten Schaumstoffe, bzw. Bauteile nicht vollständig abgebildet:

- Steifigkeits- und Festigkeitsunterschiede bei Druck und Zug von EPS/PPE,
- Wechselwirkung zwischen Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit,
- Rückverformungsverhalten von PUR und EPS/PPE,
- Dichteinhomogenitäten von aufgeschäumten Bauteilen.

Die genannten Eigenschaften führen im Rahmen der betrachteten Beispiele zu Abweichungen zwischen Versuch und Berechnung. Die Eigenschaften gliedern sich in zwei Gruppen:

- Materialeigenschaften, die aufgrund unvollständiger Formulierung nicht durch das Materialmodell abgebildet werden,
- Bauteileigenschaften, deren Abbildung nicht durch das Materialmodell erfolgt.

Zu der ersten Eigenschaftsgruppe zählen die Steifigkeitsunterschiede von EPS/PPE, die Wechselwirkungen zwischen der Belastungsgeschwindigkeit und der Betriebstemperatur und das modellierte Rückverformungsverhalten. Ein Einfluß der Abweichung zwischen dem realen und dem simulierten Materialverhalten von EPS/PPE unter Zug- und Schubbelastung auf die anwendungsnahen Grundlagentests konnte im Rahmen der Analyse der Modellvalidierung nicht nachgewiesen werden. Bei einem Einsatz von EPS/PPE unter druckdominierten Belastungen und einer Ausnutzung des hohen Energieabsorptionsvermögens ist mit der unzureichenden Modellierung des Zug- und Schubverhaltens keine Einschränkung für den Einsatz des Materialmodells verbunden.

Die Wechselwirkung zwischen der Temperatur- und der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Materialverhaltens der untersuchten Schaumstoffe muß für die Crashberechnung berücksichtigt werden. Der Vergleich der Regressionsansätze in Anhang A3 hat gezeigt, daß die unter Raumtemperatur ermittelten Parameter für das Dehnratesgesetz bei Einsatztemperaturen, die von der Raumtemperatur abweichen, nicht verwendet werden können. Die Parameter müssen

deshalb jeweils experimentell für die entsprechende Betriebstemperatur kalibriert werden. Eine aufwendige Modifizierung des Materialmodells zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit ist aus Gründen der Effizienz nicht sinnvoll.

Der Energieanteil durch das Rückverformungsverhalten entspricht bei PUR ca. 5% und bei EPS/PPE 15% der insgesamt absorbierten Energie. Bei Schaumsystemen mit größerem Rückverformungsvermögen, wie beispielsweise Schaumstoffen auf Polypropylenbasis, ist ein größerer Anteil zu erwarten. Für die Auslegung des Insassenschutzes wird üblicherweise nur die Belastung, also ein monotoner Belastungszustand betrachtet. Einzige Ausnahme sind momentan die Auslegung des Kopfaufpralls nach der FMVSS 201 und nach der ECE R 21, bei denen auch das Entlastungsverhalten berücksichtigt werden muß. Die Erfahrung zeigt allerdings, daß das Entlastungsverhalten bei diesen Tests im wesentlichen durch andere Ausstattungskomponenten dominiert wird und für den Kopfaufprall üblicherweise sprödharte Schaumstoffe, wie das untersuchte Polyurethansystem, eingesetzt werden. Unter Berücksichtigung des geringen Energieanteils der Rückfederung und einer durchschnittlichen Abweichung des Entlastungsquotienten von 50% für das sprödharte Polyurethansystem, beträgt der mit einer ungenügenden Abbildung des Rückverformungsverhaltens verbundene Fehler $< 5\%$ und ist zusammenfassend vernachlässigbar. Eine Überarbeitung des Materialmodells ist erforderlich, wenn das Entlastungsverhalten von zäharten Schaumstoffen, wie dem erwähnten Polypropylensystem, simuliert werden muß.

Zu der zweiten Eigenschaftsgruppe gehören nur die festgestellten Dichteinhomogenitäten, die unter Berücksichtigung eines Mehraufwands bei dem Aufbau eines numerischen Modells für das Bauteil eingehen können. Das Materialmodell ist hiervon nicht betroffen, weshalb diese Eigenschaft bei einer Beurteilung des Modells ausgeschlossen wird.

5.1.2.5 Validierung der Anforderungen an das Materialmodell

Die Validierung der Anforderungen an das Materialmodell ist bereits weitgehend über die bisherigen Prozeßschritte erfolgt. Ergänzend wird im Rahmen dieses Unterkapitels die in den Schaumstoffzellen eingeschlossene Luft behandelt. Die Anforderung sah hier aufgrund der innerhalb der Literatur verfügbaren Informationen eine Vernachlässigung des Luftanteils vor. Für die Beschreibung des Energieabsorptionsvermögens von offenzelligen und quasioffenzelligen Schaumstoffen, wie dem betrachteten Polyurethansystem konnte die Richtigkeit dieser Annahme bestätigt werden. Bei dem geschlossenzelligen EPS/PPE wurde ein Einfluß der eingeschlossenen Luft auf das Rückverformungsverhalten festgestellt. Eine Vernachlässigung des Luftanteils und die Validierung dieser Anforderung an das Materialmodell ist deshalb nur zulässig, wenn das Rückverformungsverhalten geschlossenzelliger Schaumstoffe im Rahmen der Simulation nicht berücksichtigt werden muß.

5.1.3 Entscheidung

Aufgrund der durchgeführten Modifikation an dem Materialmodell von N. Fleck kann die Übereinstimmung zwischen realem und berechnetem Materialverhalten erheblich verbessert werden. Die Kalibrierung des Modells ist mit einem etwas größeren Aufwand verbunden. Es ergibt sich somit die in Tabelle 5.1 dargestellte Bewertung des Modells.

	Physikalische Grundlagen	Entwicklungspotential	Kalibrierung	Validierung	Gesamtbewertung
WE	2	2	1	2	185
WI(WE)	40	60	15	70	

Tabelle 5.1: Bewertung des modifizierten Materialmodells

Unter Berücksichtigung der durchgeführten Änderungen des Materialmodells ergibt sich eine deutliche Verbesserung der Gesamtbewertung. Das Modell ist aufgrund der Analyse der Validierung bis auf wenige Einschränkungen für die Crashsimulation von polymeren Hartschaumstoffen geeignet.

5.1.4 Festlegung von Qualitätsvorschriften

Im Rahmen dieses Unterkapitels werden die Einschränkungen für den Einsatz des Materialmodells in Form von Qualitätsvorschriften für den Werkstoff, bzw. die Bauteile und für das Materialmodell festgelegt.

5.1.4.1 Anforderungen an das Bauteil

Die Anforderungen an das Bauteil sind im wesentlichen mit dem Fertigungsprozeß verknüpft. Um das Crashverhalten eines Bauteils aus polymerem Hartschaumstoff prognosefähig auslegen zu können, sind ausgehend von den bisherigen Ergebnissen folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Das Bauteil muß eine homogene Dichte aufweisen, d.h. mittlere Dichtegradienten mit Abweichungen von mehr als $\pm 10\%$ sind zu vermeiden,
- die Chargenstreuung der Dichte darf $\pm 10\%$ nicht überschreiten,
- die Streuung der Prozeßparameter muß dieses gleichbleibende Eigenschaftsprofil des Bauteils gewährleisten.

Die Bauteileigenschaften sind im wesentlichen von den Eigenschaften der Ausgangswerkstoffe und von der Prozeßführung des Fertigungsprozesses abhängig. Erster Schritt zur Umsetzung der obigen Anforderungen an das Bauteil ist somit eine Kontrolle der Grundwerkstoffe. Dies beinhaltet die Grundpolymere sowie alle zugesetzten Additive. Bei den Polyurethanschaumstoffen muß der Rohstoffhersteller eine gleichbleibende Qualität der Grundwerkstoffe garantieren, bei den Partikelschaumstoffen ist darüber hinaus eine Überwachung der Qualität der Halbzeuge erforderlich. Der Hersteller des Bauteils muß eine Wareingangskontrolle der Grundwerkstoffe bzw. der Halbzeuge durchführen. Darüber hinaus muß durch den Hersteller eine gleichbleibende Prozeßführung gewährleistet werden. Bei dem Polyurethansystem entspricht dies einem konstanten Mischungsverhältnis der Grundwerkstoffe und konstanten Prozeßparametern, wie der Temperatur im Mischkopf. Unter der Voraussetzung einer gleichbleibenden Prozeßführung ist bei den Partikelschaumstoffen der Einfluß des Fertigungsprozesses auf die Bauteileigenschaften geringer. Hinsichtlich der Prozeßführung müssen verschiedene Parameter, wie das Gesamtgewicht der Polymerisatperlen, die bei dem Verschweißen der Partikel zugesetzte Menge an Wasserdampf über der Zeit, der Betriebsdruck und die Betriebstemperatur berücksichtigt werden. Die Chargenstreuung muß dabei durch eine kontinuierliche Kontrolle der Fertigungsparameter und durch die produktionsbegleitende Entnahme und Prüfung von Bauteilproben erfolgen.

Auf der Basis der bisherigen Erfahrungen ist für die Untersuchung von Proben, die dem Bauteil entnommen werden, die Ermittlung des Gewichts ausreichend. Das Gewicht darf sich innerhalb eines Grenzbereichs von ca. $\pm 10\%$ bewegen. Ergänzend ist die regelmäßige Durchführung eines einachsigen Druckversuchs an Bauteilen erforderlich, die innerhalb eines prozeßspezifischen Zeitintervalls stichprobenartig der Produktion zu entnehmen sind. Ziel des Versuchs ist die Ermittlung und die Dokumentation von Streuungen der mechanischen Eigenschaften.

5.1.4.2 Vorschriften für den Einsatz des Materialmodells

Die wesentliche Voraussetzung für die qualitativ abgesicherte Crashberechnung von Bauteilen aus polymeren Hartschaumstoffen ist eine vollständige Kalibrierung der einzelnen Materialparameter. Hierzu müssen verschiedene, grundlegende Randbedingungen eingehalten werden:

- Für die Kalibrierung des Materialmodells müssen die erforderlichen Versuche mit dem für das Bauteil verwendeten Schaumsystem durchgeführt werden.
- Die Materialparameter werden auf der Basis von anwendungsnahen Tests validiert.
- Die erforderlichen Tests werden durch den Bauteilhersteller betreut und von einem Prüfinstitut mit entsprechender Ausstattung und Erfahrung durchgeführt.

Mit Hilfe dieser Randbedingungen wird gewährleistet, daß das Materialmodell für den tatsächlich eingesetzten Schaumstoff kalibriert und im Rahmen des Einsatzbereichs validiert wird. Aufgrund der großen Bandbreite des Eigenschaftsprofils der polymeren Hartschaumstoffe ist dieser Aufwand nach den momentanen Erkenntnissen nicht zu vermeiden. Für eine vollständige Kalibrierung des Materialmodells werden die in Tabelle 5.2 zusammengefaßten Materialtests benötigt.

Materialtest	Materialparameter
quasistatischer, einachsiger Druckversuch	Elastizitätsmodul, elastische und plastische Querszahl, Verfestigungsverlauf
dynamische, einachsige Druckversuche bei $v_0 = 3 \text{ m/s}$, $v_0 = 6 \text{ m/s}$ und $v_0 = 12 \text{ m/s}$	Dehnratenparameter N und p
quasistatischer, hydrostatischer Druckversuch	Gestaltsfaktor der Fließfläche α
quasistatischer, einachsiger Zugversuch	Bruchenergie G_f^I
Schubversuch zwischen starren Platten	maximale Schubspannung τ_{\max}

Tabelle 5.2: Materialtests zur Kalibrierung des Materialmodells

Die Parameter für das Dehnratengesetz, N und p , sind auf der Basis der mittleren Plateauspannung aus dem quasistatischen und den dynamischen, einachsigen Druckversuchen zu bestimmen. Die Schäumhaut ist bei der Kalibrierung nicht zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind zur Validierung des Materialmodells die folgenden Grundlagentests notwendig:

- Dynamischer Druckversuch mit halbzylindrischem Impaktor.
- Dynamischer Druckversuch mit halbkugelförmigem Impaktor.

Die Festlegung der Probengeometrie ist nicht zwingend erforderlich, da im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung keine Geometrieabhängigkeit des Materialverhaltens festgestellt werden konnte. Zur Vereinfachung der Vorgehensweise werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Proben- und Impaktorgeometrien vorgeschlagen. Bei der Validierung der Materialparameter sind Proben mit einer Schäumhaut zu berücksichtigen. Hierbei ist zu beachten, daß die Bauteildichte mit der Dichte der Probekörper für die vorangegangenen Materialtests zur Kalibrierung übereinstimmt.

Neben den Anforderungen an die Kalibrierung und die Validierung der Materialparameter sind die folgenden Randbedingungen für den Einsatz des Materialmodells einzuhalten. Das Modell ist aufgrund der Analyse der Modellvalidierung für die Crashberechnung von druckdominierten

Belastungen polymerer Hartschaumstoffe einsetzbar, bei denen im wesentlichen das Energieabsorptionsvermögen der Schaumstoffe simuliert wird. Zug- und schubdominierte Belastungen eines Schaumstoffbauteils, die das Crashverhalten erheblich beeinflussen, können nur eingeschränkt abgebildet werden. Weiterhin ist das Materialmodell nicht geeignet zur Simulation des Materialverhaltens von weichelastischen Polymerschaumstoffen. Das Energieabsorptionsvermögen von zäharten Schaumsystemen, wie beispielsweise von verschiedenen Polypropylenschaumstoffen für den Einsatz in Fahrzeugstoßfängern, kann mit Hilfe des Materialmodells simuliert werden, wenn das Rückfederungsverhalten zu vernachlässigen ist.

5.2 Knowhow-Gewinn

Zum Abschluß des Integrationsprozesses werden die Erfahrungen und Ergebnisse zusammengefaßt und dokumentiert. Die gesammelten Erkenntnisse im Rahmen der Integration von polymeren Hartschaumstoffen stehen damit bei einer Änderung des betrachteten Einsatzbereichs für eine Weiterentwicklung des Materialmodells und die Integration anderer Materialien zur Verfügung.

5.2.1 Sicherung von Erfahrungen

Mit der Integration der polymeren Hartschaumstoffe in die Fahrzeugcrashberechnung wurde der Prozeß erstmalig eingesetzt. Die Erfahrungen sind im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausführlich dokumentiert. Aufgrund des geringen verfügbaren Knowhows war der mit der Planung und der Durchführung verbundene Aufwand vergleichsweise groß. Langfristig wird dieser Aufwand reduziert, da bei der Integration von ähnlichen Materialien, wie beispielsweise weichelastischen Sitzschaumstoffen, auf das gesammelte Knowhow bei der Werkstoffcharakterisierung und der Materialmodellierung zurückgegriffen werden kann.

Als wesentliche Erfahrung hat der bisherige Prozeßablauf gezeigt, daß eine enge Kooperation zwischen der Automobilindustrie, den Werkstoff- und Komponentenlieferanten, den Softwareherstellern und Hochschulinstituten sinnvoll und notwendig ist, um die steigenden Anforderungen an die Qualität der Berechnung mit der erforderlichen Effizienz umsetzen zu können. Der beschriebene Integrationsprozeß unterstützte die zielorientierte Aufgabenteilung und die Festlegung der jeweiligen Abläufe zwischen den einzelnen Projektpartnern erheblich. Eine Gestaltung der Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Partnern ist in Bild 5.5 dargestellt. Ausgehend von einem festgestellten Bedarf zur Integration eines neuen Werkstoffes in die Fahrzeugcrashberechnung beginnen Fahrzeug- und Komponentenhersteller mit der Planungsphase des Prozesses. Die beiden Projektpartner legen die Einsatzrandbedingungen für den Werkstoff fest. Der Werkstofflieferant wird hinzugezogen, um den Aufbau der erforderlichen

Grundlagendaten über den Werkstoff zu unterstützen. Für die weitere Planung wird das Knowhow des Softwareherstellers benötigt, um die verfügbaren Materialmodelle zur Beschreibung des angenommenen Materialverhaltens innerhalb des Einsatzbereiches beurteilen und fehlende Informationen über das Materialverhalten abschätzen zu können. Darüber hinaus muß durch den Softwarehersteller von Beginn an gewährleistet werden, daß alle weiteren Maßnahmen umsetzbar und zielführend sind. Für die Durchführung des Integrationsprozesses ist eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Softwarehersteller und Hochschulinstituten sinnvoll, um das Materialverhalten zu charakterisieren und bei Bedarf die Materialgleichungen für das benötigte Modell zu entwickeln.

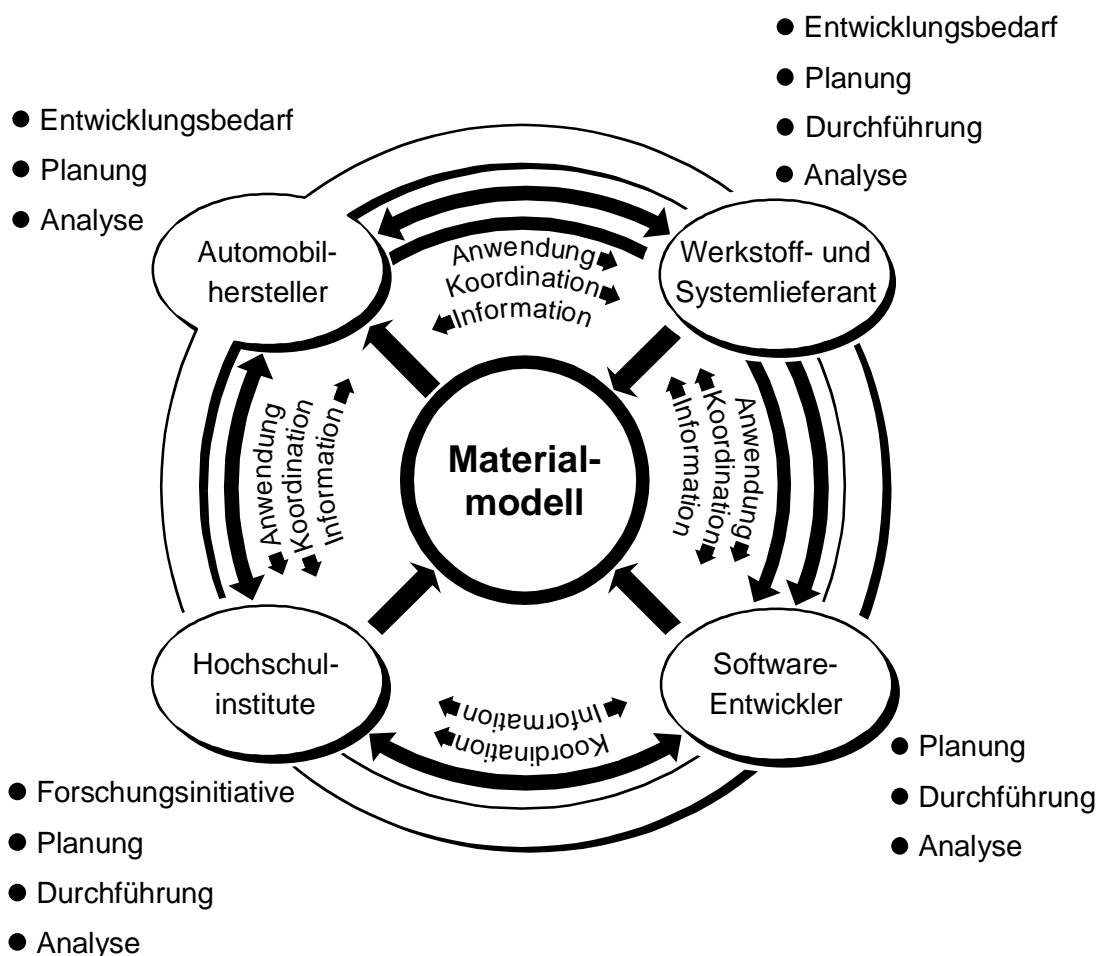


Bild 5.5: Langfristige Kooperation - Aufteilung der Teilphasen im Rahmen des Integrationsprozesses [SSPM99]

Langfristig ist es durchaus denkbar, daß der Automobilhersteller nur noch an der Initiierung des Projekts und im Rahmen der Bewertungsphase in den gesamten Prozeß eingebunden ist. Aufgrund der steigenden Komplexität von Komponenten, die durch Systemlieferanten entwickelt und geliefert werden, wird auch die Auslegung der Komponenten zunehmend durch

den Lieferanten erfolgen. Entsprechend des in Kapitel 1 beschriebenen Reengineeringprozesses erfolgt dies zunehmend auf der Basis von virtuellen Prototypen. Als Folge werden die Lieferanten damit als Spezialisten in ihrem jeweiligen Bereich in Zusammenarbeit mit den einzelnen Projektpartnern das Knowhow für eine qualitativ abgesicherte Berechnung der Komponenten und somit für eine entsprechende Modellierung der eingesetzten Materialien aufbauen.

Die vorgestellte Zusammenarbeit ist nur effizient, wenn von Beginn an alle Teilschritte und -ergebnisse ausreichend dokumentiert und zur Verfügung gestellt werden. Die Dokumentation der Vorgehensweise und die Beurteilung der einzelnen Teilphasen ist am Beispiel von polymeren Hartschaumstoffen im Rahmen dieser Arbeit ausführlich geschehen. Darüber hinaus ist es sinnvoll, die innerhalb jedes Projekts gewonnen Erfahrungen in einer Datenbank zu sammeln. Der mögliche Aufbau einer solchen Erfahrungsdatenbank wird in [FMV97] erläutert.

5.2.2 Sicherung von Ergebnissen

Die Sicherung von Ergebnissen erfolgte im Rahmen der Integration von polymeren Hartschaumstoffen über die vorliegende Arbeit hinausgehend innerhalb von verschiedenen Prüf- und Berechnungsberichten [Sch97], [Sch99a], [Sch99b], [SCI99], [SCPM99], [SH99]. Für die Sicherung von Versuchs- und Berechnungsergebnissen, aber auch für eine Sicherung von Eingabedatensätzen der verwendeten Beispiele wurden eine Beispiel- und eine Materialdatenbank aufgebaut.

In der Beispieldatenbank sind die Datensätze von verschiedenen Validierungsbeispielen, aber auch von charakteristischen Beispielen aus dem produktiven Einsatz inklusive den zugehörigen Ergebnissen aus dem Versuch und der Berechnung archiviert. Durch die produktionsbegleitende Pflege der Beispieldatenbank und den damit verbundenen kontinuierlichen Abgleich zwischen Versuch und Berechnung unter Berücksichtigung von aktuellen Erkenntnissen wird der Nachweis für ein Arbeiten entsprechend dem Stand der Technik erbracht. Darüber hinaus stehen mit der Beispieldatenbank für erforderliche Weiterentwicklungen von einzelnen Materialmodellen auf effiziente Weise eine Vielzahl von Validierungsbeispielen zur Verfügung.

Die Materialdatenbank beinhaltet neben den Versuchsergebnissen die der Kalibrierung zugrunde liegenden Ergebnisse der Simulation für ein jeweiliges Schaumsystem. Zusätzlich sind in der Materialdatenbank die entsprechenden Materialparameter in Form eines Eingabedatensatzes für das eingesetzte Finite-Elemente-Programm abgelegt und dem produktiven Einsatz zur Verfügung gestellt.

6 Beispiele aus dem produktiven Einsatz

6.1 Allgemeines

Im Anschluß an die Integration der polymeren Hartschaumstoffe in die Fahrzeugcrashberechnung werden anhand von zwei repräsentativen Beispielen aus dem produktiven Einsatz die mit einer rechnerischen Auslegung von Sicherheitsbauteilen umsetzbaren Möglichkeiten gezeigt. Bei den Beispielen handelt es sich um die Berechnung eines Stoßfängertests entsprechend US-Standard Teil 581 der NHTSA-Regelungen und um die Berechnung eines Kopfaufpralls entsprechend dem Standard FMVSS 201 der NHTSA. Hierbei steht jeweils die Komponentenauslegung im Vordergrund, die sehr hohe Ansprüche an die rechnerische Simulation stellt.

Das Beispiel des Stoßfängertests ist charakteristisch für die Einsatzbereiche, in denen der energieabsorbierende Schaumstoff erheblich komprimiert wird und die Eigenschaft der Lastübergabe an tragende Strukturbauteile von großer Bedeutung ist. Mit Hilfe des Tests können die plastischen Deformationen der Fahrzeugkarosserie bei einem sogenannten Bagatellunfall beurteilt werden. Im Rahmen des beschriebenen Berechnungsbeispiels wird der Einfluß der mechanischen Eigenschaften des Schaumstoffes auf diese plastischen Deformationen simuliert.

Anhand des Kopfaufpralls wird verdeutlicht, daß die rechnerische Optimierung von Sicherheitsbauteilen bei einmaligem Aufbau eines Crashmodells mit einem geringen Aufwand verbunden ist und dabei zusätzlich das Verständnis der komplexen Zusammenhänge unterstützt wird. Mit Hilfe der Berechnung wird eine optimierte Lösung zur Verringerung der Verletzungsschwere gefunden und durch den Vergleich mit experimentellen Daten bestätigt. Die Optimierung erfolgt durch eine Variation der Anordnung verschiedener Schaumstoffabsorber mit ausschließlich energieabsorbierender Funktion. Aufgrund der komplexen Kinematik des Kopfmodells beim Aufprall ist bei dieser Problemstellung die Abbildung des eingesetzten Werkstoffes von sehr großer Bedeutung.

6.2 Berechnung eines Stoßfängertests nach NHTSA, Teil 581

Der Stoßfängertest geht auf eine Initiative in den USA Anfang der 70er Jahre zurück, deren Ziel die Verringerung der Kosten für die Unfallinstandsetzung war [An97]. Um einen Vergleich der Reparaturkosten von Fahrzeugmodellen verschiedener Hersteller zu ermöglichen, war es erforderlich, die Reparaturstudien an Beschädigungen durchzuführen, die durch gleiche Umstände hervorgerufen wurden. Aus diesem Grund wurden auf der Basis des realen Unfallgeschehens Testverfahren entwickelt, die eine vergleichende Beurteilung des Kostenaufwands zulassen.

6.2.1 Beschreibung des Testverfahrens

In Ergänzung zu den im Rahmen der passiven Sicherheit betrachteten Testverfahren, die dem Insassenschutz dienen, wird in den verschiedenen Verfahren zur Beurteilung von Fahrzeugbeschädigungen und deren Folgen der sogenannte Fahrzeugschutz betrachtet. Die erste gesetzliche Begrenzung von Beschädigungen an Kraftfahrzeugen erfolgte Ende der 70er Jahre in den USA durch die Einführung des Federal Motor Vehicle Safety Standards 215 (FMVSS 215) [An97]. Der Standard fordert, daß bis zu einer Geschwindigkeit von 8 km/h bei einem Frontalcrash und einer Geschwindigkeit von 5 km/h bei einem Heckcrash keine wesentlichen Beschädigungen an der Karosserie festgestellt werden dürfen. Im Rahmen von Teil 581 der durch die NHTSA erlassenen Regelungen wurde das Testverfahren überarbeitet und die geforderte Aufprallgeschwindigkeit auf jeweils 4 km/h reduziert. Die Regelung sieht in der heutigen Form im Front- und Heckbereich des Fahrzeugs folgende Tests vor:

- Mittiger Längsaufschlag eines Prüfpendels mit einer Geschwindigkeit von 4 km/h,
- Eckaufschlag eines Prüfpendels mit einer Geschwindigkeit von 2,5 km/h,
- Barrierenaufprall (100% Überdeckung) in Längsrichtung mit 4 km/h.

Für eine positive Beurteilung der Testergebnisse sind nur Beschädigungen am Stoßfänger sowie an dessen Befestigungselementen zulässig.

6.2.2 Beispiel: 4 km/h Barrierenaufprall mit 100% Überdeckung

Im Rahmen des betrachteten Beispiels wird der frontale Barrierenaufprall mit 100% Überdeckung bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 4 km/h betrachtet. Bei dem betrachteten Fahrzeug handelt es sich um ein Sports Activity Vehicle mit einer Fahrzeugmasse von ca. 2200 kg. Die verschiedenen Tests im Rahmen von Teil 581 der NHTSA-Regelungen erfüllt das Fahrzeug durch einen vergleichsweise massiven Stoßfängerträger und einen energieabsorbierenden Schaumstoffabsorber zwischen Stoßfängerträger und -verkleidung. Die Dicke des Schaumstoffabsorbers beträgt maximal ca. 70 mm. Der Aufbau des Stoßfängers ist in Bild 6.1, Ausschnitt A, dargestellt, wobei auf die Darstellung der Stoßfängerverkleidung verzichtet wird.

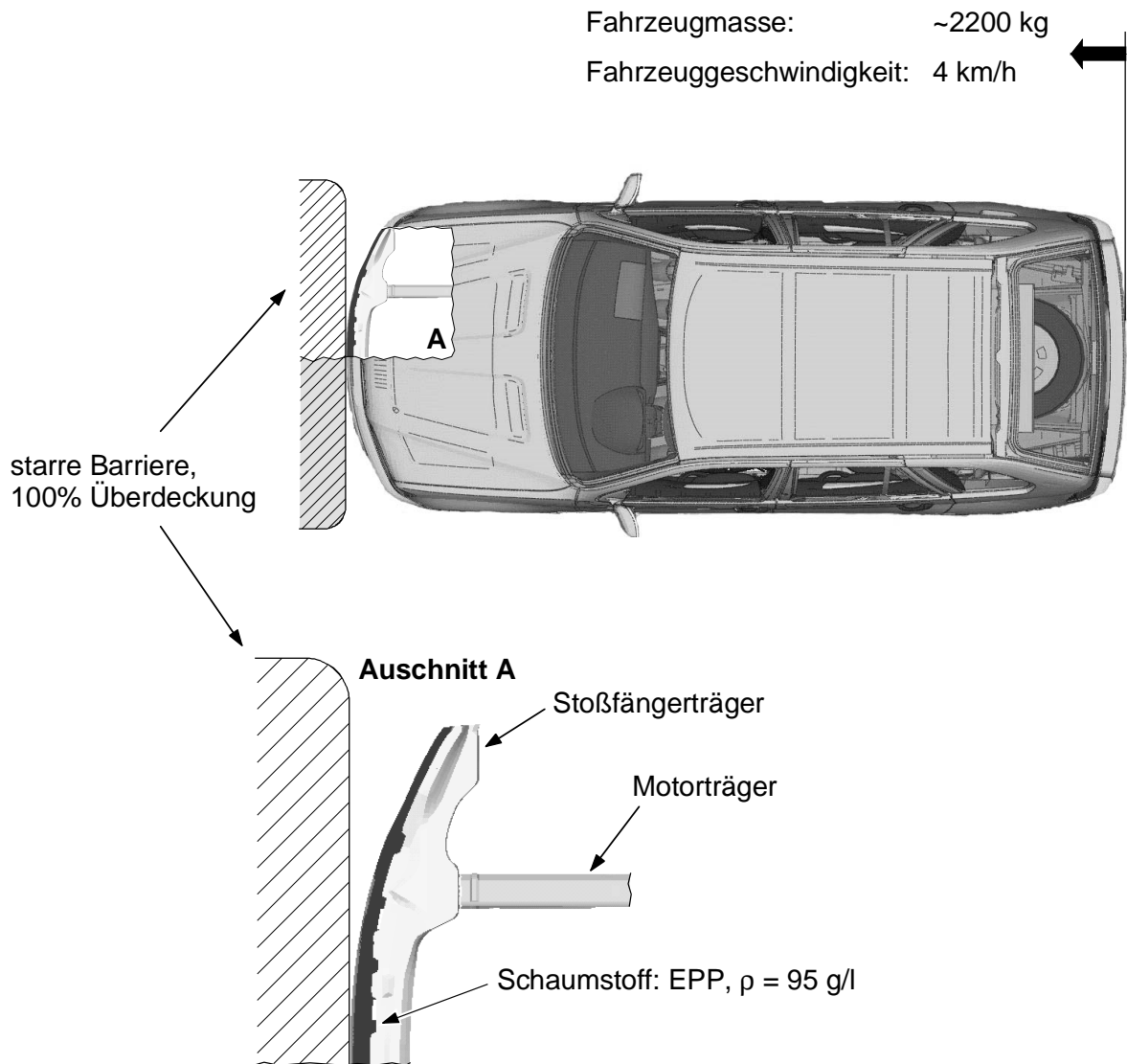


Bild 6.1: Darstellung des Kollisionsszenarios bei einem 4 km/h Barrierenaufprall mit 100% Überdeckung

Innerhalb dieses Einsatzbereichs werden aufgrund ihres großen Rückverformungsvermögens üblicherweise Schaumstoffe auf EPP-Basis eingesetzt. Der Einfluß des Schaumstoffes auf die plastischen Deformationen der Fahrzeugkarosserie bei dem Barrierenaufprall wird durch eine Variation der Dichte simuliert. Neben einem EPP-Schaumstoff mit einer Dichte von 95 g/l und einer mittleren Plateauspannung von ca. 0,9 N/mm² wird ein EPP-Schaumstoff mit einer Dichte von 65 g/l und einer mittleren Plateauspannung von ca. 0,6 N/mm² betrachtet. Die Spannungs-Stauchungsverläufe der beiden Schaumsysteme sind in Bild 6.2 dargestellt. Zur Bestätigung der Berechnungsergebnisse stehen Versuchsdaten auf der Basis eines Stoßfängertests mit dem Polypropylensystem der Dichte von 95 g/l zur Verfügung.

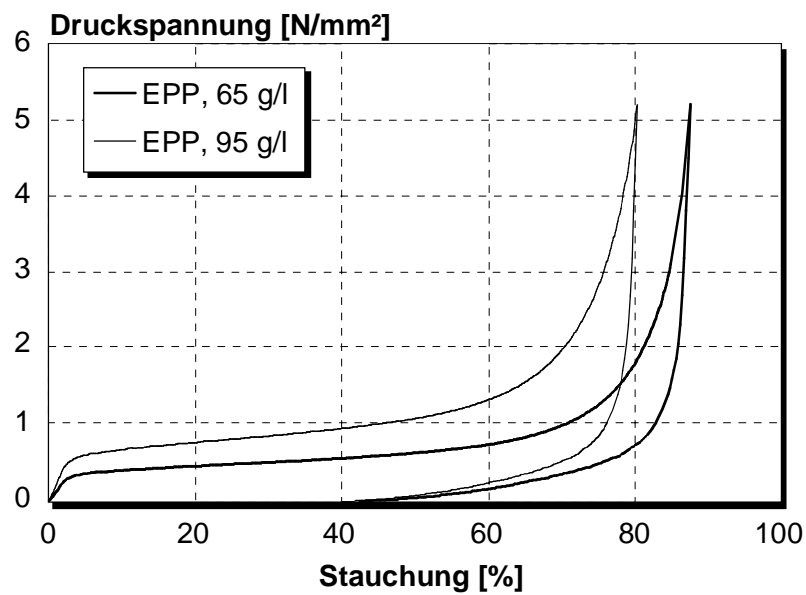


Bild 6.2: Einachsige Druckbelastung der betrachteten EPP-Schaumstoffe

6.2.3 Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse

Die Kraft-Verschiebungsverläufe aus dem Versuch und den Berechnungen sind in Bild 6.3 dargestellt. Betrachtet werden die Barrierenkraft und die Fahrzeugverschiebung bezogen auf die maximal im Versuch gemessene Kraft und Verschiebung.

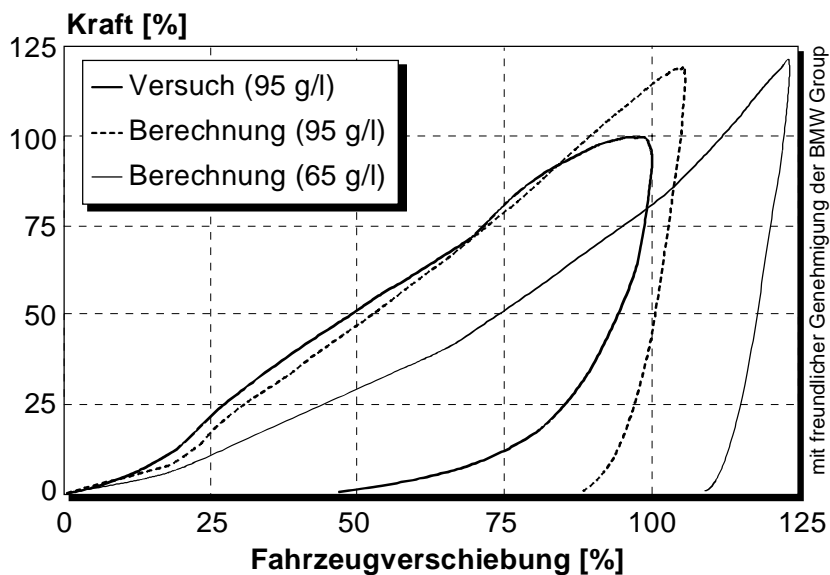


Bild 6.3: Vergleich der Kraft-Verschiebungsverläufe bei einem 4 km/h Barrierenaufprall

Die experimentell ermittelten Versuchsdaten und die entsprechenden Berechnungsergebnisse für das Schaumsystem mit einer Dichte von 95 g/l zeigen eine gute Übereinstimmung bezüglich des

Belastungsverhalten. Bei dem Versuch wird ein etwas größerer Anteil der Energie durch Effekte, wie beispielsweise die Reibung zwischen Fahrzeug und Barriere absorbiert. Aus diesem Grund kommt es zwischen Berechnung und Versuch zu einer Abweichung der durch die Deformation der einzelnen Fahrzeugkomponenten absorbierten Energie von ca. 10%. Die Differenz in der Energiebilanz führt zu einer etwas höheren Maximalkraft in der Berechnung.

Der unverformte und der deformierte Stoßfänger sind in Bild 6.4 dargestellt. Die Schnittdarstellung des Stoßfängers verdeutlicht, daß der energieabsorbierende Schaumstoff lokal sehr stark, um bis zu 80% seiner ursprünglichen Abmessung, komprimiert wird.

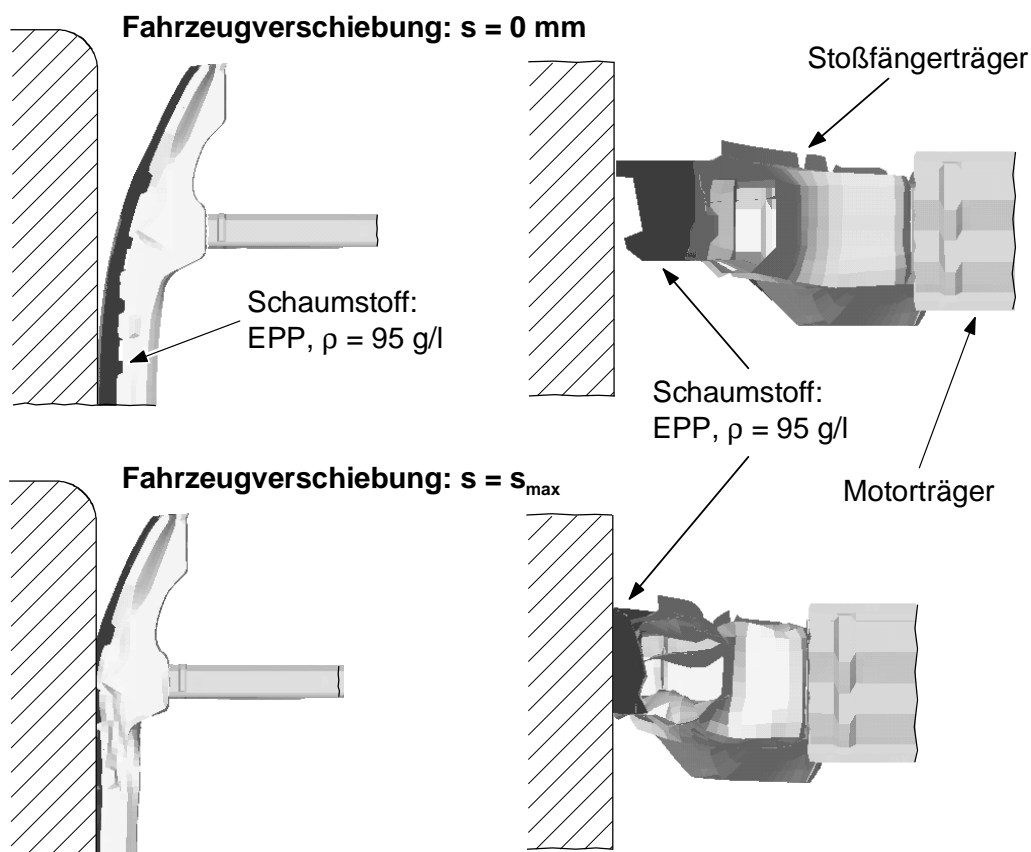


Bild 6.4: Deformation des Schaumstoffkerns bei einem 4 km/h Barrieraufprall mit 100% Überdeckung

Der Vergleich der beiden Berechnungen unter Variation der Schaumstoffdichte in Bild 6.3 zeigt den Einfluß, den das eingesetzte Schaumstoffsystem auf den Kraft-Wegverlauf hat. Das Polypropylensystem mit einer Dichte von 95 g/l absorbiert ca. 70% der ursprünglichen kinetischen Energie des Fahrzeugs. Das gleiche Schaumstoffsystem bei einer Dichte von 65 g/l absorbiert ebenfalls ca. 70% der gesamten kinetischen Energie. Demgegenüber nimmt aufgrund der unterschiedlichen Lastverteilung die Energieaufnahme innerhalb des Stoßfängerträgers um 15% zu, was zu einer größeren plastischen Deformationen des Trägerprofils führt (Bild 6.5).

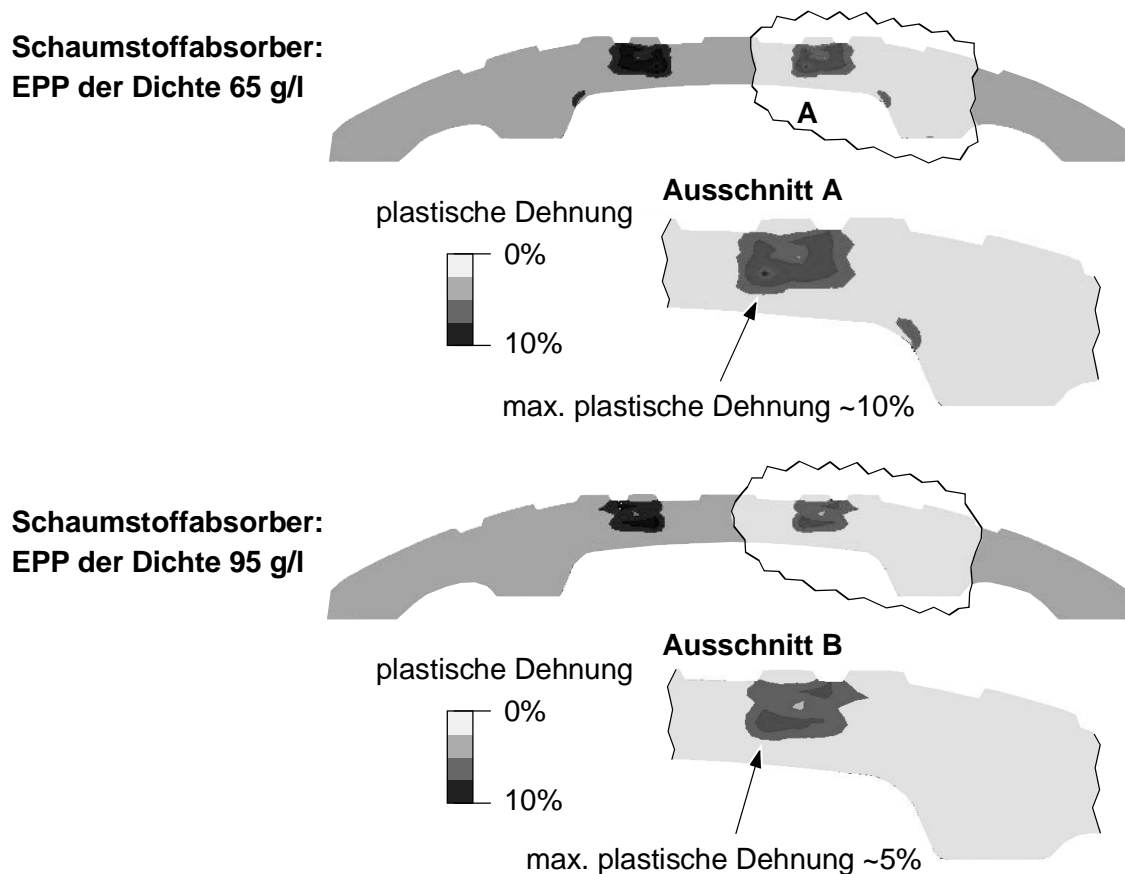


Bild 6.5: Vergleich der plastischen Deformation des Stoßfängerträgers bei Variation der Schaumstoffdichte

Das Entlastungsverhalten des zähelastischen Polypropylenschaumstoffes wird nicht richtig wiedergegeben (Bild 6.3). Der Anteil der experimentell ermittelten, elastischen Rückverformung ist wesentlich größer, als der simulierte Anteil. Für den vorliegenden Lastfall ist dieses Rückverformungsverhalten des Polypropylenschaumstoffes erwünscht, da ein solcher Aufprall bei niedriger Belastungsgeschwindigkeit möglichst ohne bleibende Beschädigung erfolgen muß. Hinsichtlich der rechnerischen Auslegung des Stoßfängers ist das Entlastungsverhalten unbedeutend, da nur die Belastung und die damit verbundenen Kräfte auf tragende Strukturbauteile von Interesse sind. Im Gegensatz dazu ist in anderen Einsatzbereichen das Entlastungsverhalten einer Fahrzeugkomponente von großer Bedeutung. Ein Beispiel hierfür ist der Kopfaufprall nach FMVSS 201 auf Komponenten des Fahrzeuginnenraums oberhalb der Brüstung.

6.3 Berechnung eines Kopfaufpralls nach FMVSS 201

Bei einer Vielzahl von Unfällen mit hohem Verletzungsgrad sind Kopf- und Nackenverletzungen Ursache für die Verletzungsschwere. Aus diesem Grund hat die National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) im Rahmen des Federal Motor Vehicle Safety

Standards 201 (FMVSS 201) ein Testverfahren festgelegt, welches mit dem Ziel einer Verringerung der Kopfverletzungen die Kopfbelastungen bei unterschiedlichen Kollisionsarten erfassen soll [NHTSA95]. Die Verletzungsschwere beim Kopfaufprall wird durch das Zusammenspiel der beteiligten Komponenten bestimmt. Da das Energieabsorptionsvermögen von Verkleidungsteilen und Fahrzeugkarosserie oft nicht zur Erfüllung der Regelung ausreicht, werden zusätzliche energieabsorbierende Bauteile integriert. Die numerische Simulation erleichtert bei der Auslegung dieser Bauteile erheblich das Verständnis der komplexen Wirkmechanismen und ermöglicht so eine effizientere Optimierung der Fahrzeugkomponenten.

6.3.1 Zusammenfassung der gesetzlichen Regelung

Der Test wird üblicherweise an einem vollständig ausgerüsteten Fahrzeug durchgeführt [PHSGB98]. Ein Kopfmodell, die sogenannte Free Motion Head Form (FMH), das einem modifizierten Hybrid-III-Dummy Kopf entspricht, trifft die Innenraumkomponenten oberhalb der Brüstung. Die verschiedenen Aufprallpunkte und -zonen, sowie die zugeordneten Vertikal- und Horizontalwinkelbereiche, die zu betrachten sind, werden durch den Standard vorgeschrieben und mit Hilfe eines definierten Verfahrens individuell für jedes Fahrzeug bestimmt. So werden alle wesentlichen Innenraumbereiche erfaßt (Bild 6.6).

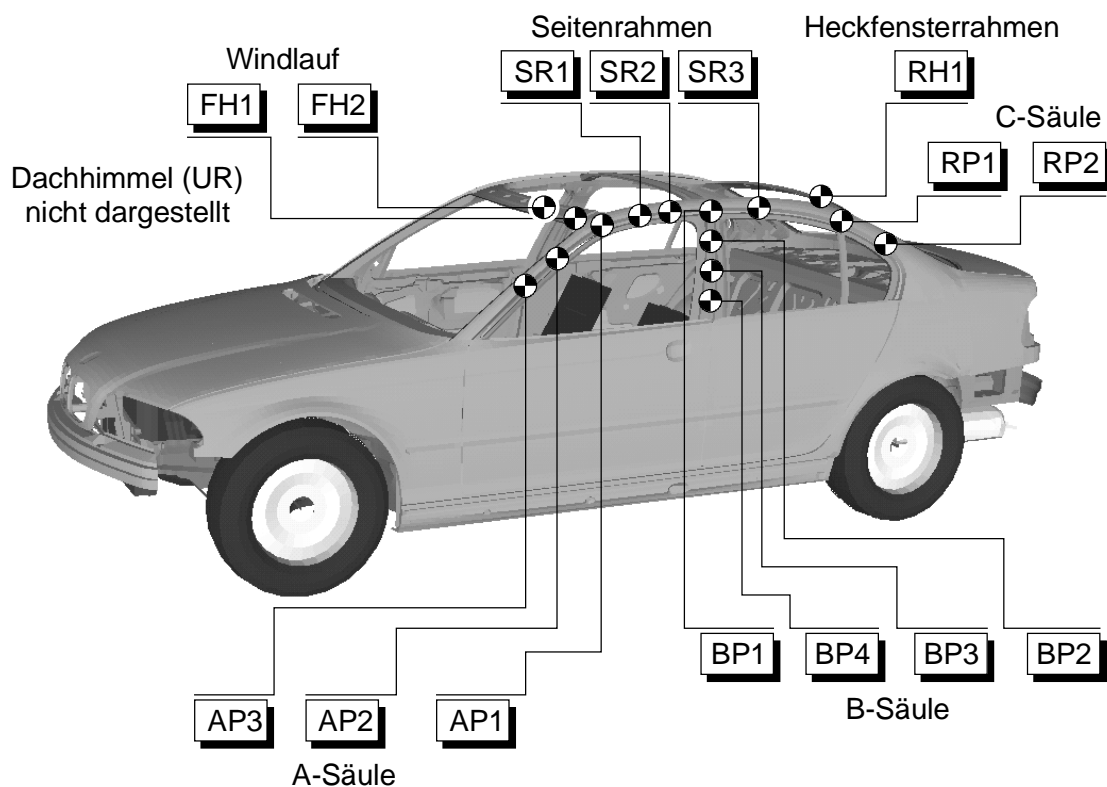


Bild 6.6: Darstellung der Aufprallpunkte nach FMVSS 201

Die geforderte Aufprallgeschwindigkeit der freifliegenden Kopfform liegt bei 15 mph (ca. 24 km/h) unter Berücksichtigung eines Toleranzfeldes. Eine Ausnahme sind festgelegte Bereiche in der Umgebung eines zusätzlichen Kopfairbags, in denen durch den Standard eine reduzierte Aufprallgeschwindigkeit von 12 mph gefordert wird.

Gemessen werden die translatorischen Beschleunigungen im Schwerpunkt des Kopfes. Ausgehend von den berechneten, resultierenden Beschleunigung wird das Head Injury Criterion (HIC) zur Beurteilung der Verletzungsschwere ermittelt:

$$\text{HIC} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1). \quad (6.1)$$

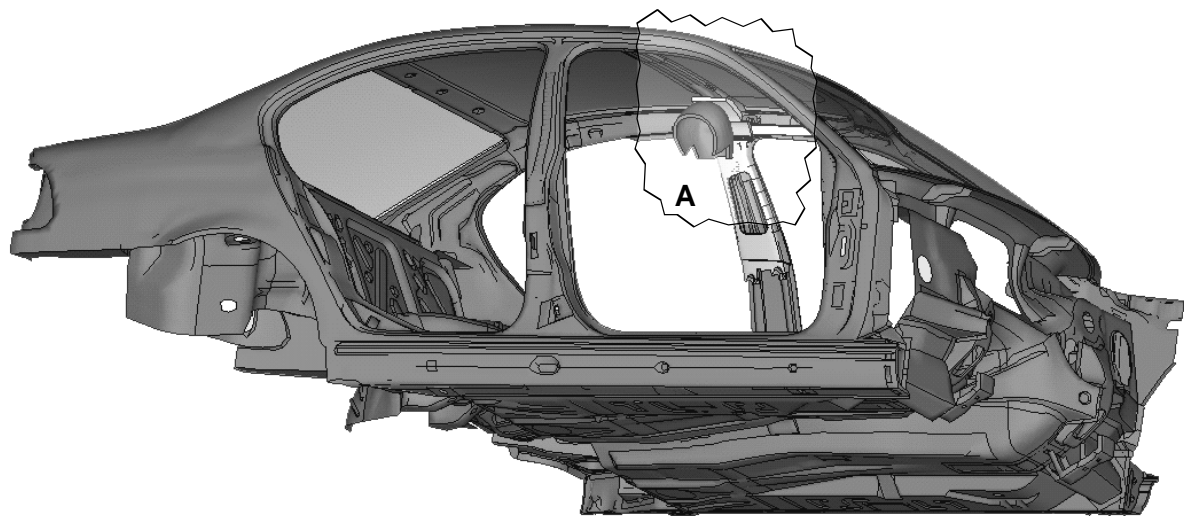
Dabei werden die Beschleunigungen innerhalb eines beliebigen Zeitintervalls von $t_2 - t_1 \leq 36$ ms betrachtet, welches auch die Rückfederung nach vollständiger Verzögerung des Kopfes mit einschließt. Wegen der gegebenen Versuchsprozedur wird der HIC-Wert soweit korrigiert, daß er dem vergleichbaren HIC-Wert eines vollständigen Dummy, HIC(d), entspricht:

$$\text{HIC}(d) = (0,75446 \cdot \text{HIC}) + 166,4. \quad (6.2)$$

Das Kriterium wird mit einem HIC(d)-Wert kleiner 1000, gemessen an allen definierten Punkten, erfüllt.

6.3.2 Beispiel: Aufprallbereich Dachhimmel im Übergang zur B-Säule

Der betrachtete Aufprallpunkt (URBP) befindet im Bereich des Dachhimmels in der Nähe des Strukturknotens der B-Säule mit dem Seitenrahmen. Zur Berechnung des Lastfalls müssen alle beteiligten Komponenten mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente abgebildet werden können. Dies beinhaltet neben der Fahrzeugkarosserie die Innenraumverkleidung, energieabsorbierende Komponenten und in dem betrachteten Beispiel einen hinter der Seitenrahmenverkleidung integrierten, Kopfairbag (ITS) im gefalteten Zustand. Die Berechnung des Lastfalls muß bei deaktiviertem Airbag durchgeführt werden, weshalb die Integration von zusätzlichen, energieabsorbierenden Komponenten unvermeidlich ist. Der Aufbau des für den betrachteten Aufprallpunkt verwendeten, reduzierten Modells ist in Bild 6.7 dargestellt. Die ausführliche Vorgehensweise zum Aufbau des Modells erfolgt in [PHSGB98] und [SSPM99].



Ausschnitt A

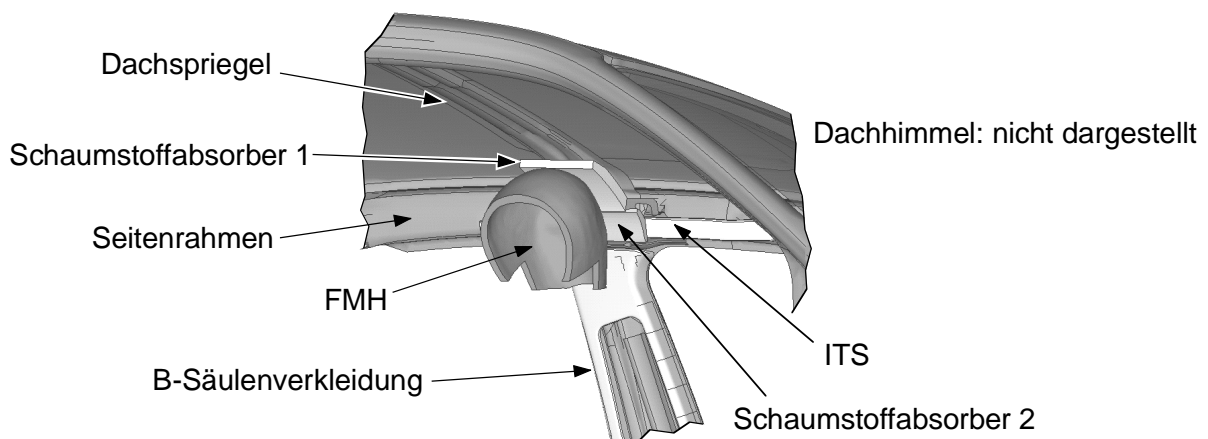


Bild 6.7: Reduziertes Modell für den Kopfaufprall am Dachhimmel-B-Säulenübergang

Die Verletzungsschwere bei dem Kopfaufprall wird mit Hilfe von zwei Schaumstoffabsorbern mit hohem Energieabsorptionsvermögen reduziert. Aufgrund der Berechnung des HIC(d), bei der auch die Rückfederung des Kopfes berücksichtigt werden muß, wird ein Schaumsystem mit einem sehr geringen Rückstellvermögen eingesetzt. Bei den im Rahmen dieses Beispiels untersuchten Absorbern handelt es sich um das in Kapitel 4.1 betrachtete Polyurethansystem. Der Schaumstoffabsorber 1 befindet sich zwischen dem Dachspriegel und dem Dachhimmel und ist an dem Dachspriegel nur mit teilweiser Überdeckung abgestützt. Der Schaumstoffabsorber 2 ist zwischen dem Dachhimmel und dem im Vergleich zu dem eingesetzten Schaumsystem steifen Airbag angebracht.

Im Rahmen der folgenden Berechnung werden zwei Varianten untersucht. In Variante 1 wird nur der Schaumstoffabsorber 1 berücksichtigt. In Variante 2 wird zusätzlich der Schaumstoffabsorber 2 in das Modell integriert. Da der untere Bereich der FMH in die Blende der B-Säule rotiert, trägt diese zur Energieabsorption bei und muß ebenfalls modelliert werden. Ziel der Untersuchung ist die rechnerische Festlegung der optimalen Absorberkonfiguration.

6.3.3 Ergebnis der Untersuchung

Die Ergebnisse eines Versuchs und der beiden berechneten Varianten sind anhand des jeweiligen Beschleunigungs-Zeitverlaufs in Bild 6.8 dargestellt. In der Darstellung sind die Beschleunigungen auf die maximale, im Versuch gemessene Beschleunigung bezogen.

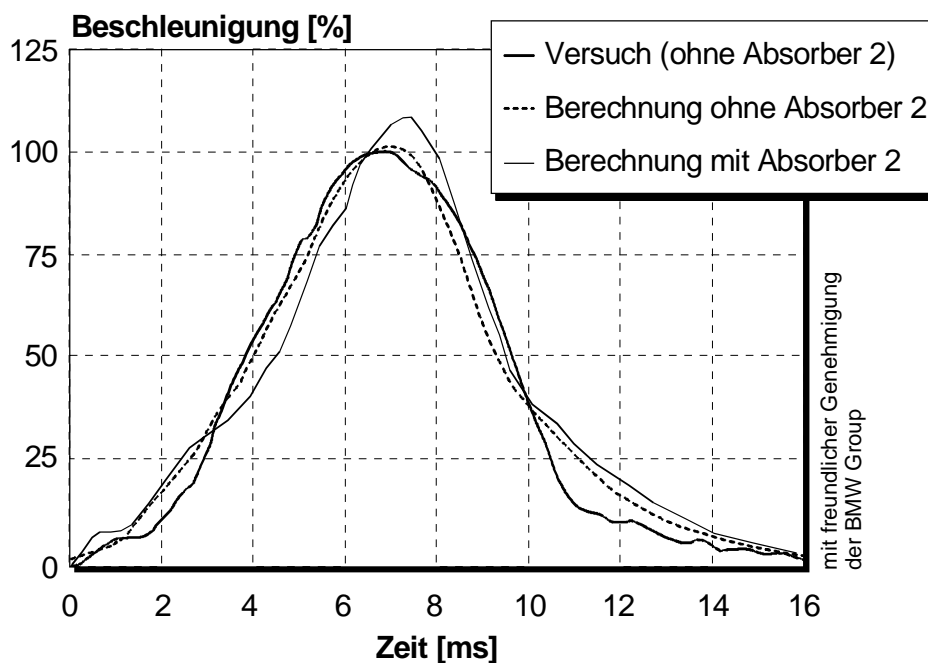


Bild 6.8: Vergleich der Beschleunigungs-Zeit-Verläufe der FMH am Aufprallpunkt URBP unter Variation der Absorberanordnung [SSPM99]

Die maximale Beschleunigung bei Variante 1 ist geringer, als bei Variante 2. Daraus resultiert bei Variante 2 ein um ca. 5% größerer HIC(d)-Wert. Die kinematischen Vorgänge während des Kopfaufpralls sind am Beispiel der Variante 2 in Bild 6.9 dargestellt. Das Kopfmodell trifft gesetzeskonform mit dem Stirnbereich den Schaumstoffabsorber 1 und wird verzögert ($t \sim 0$ ms). Durch die Verzögerung wird eine Rotation des Modells eingeleitet (3,6 ms). Die FMH rotiert in die B-Säulenverkleidung und wird zusätzlich durch den Schaumstoffabsorber 2 verzögert (7,4 ms). Bei Variante 1 ist das Kopfmodell in der Rotation weniger eingeschränkt und dreht weiter in die B-Säulenverkleidung hinein, ohne daß es zu einem Durchschlagen auf die

Rohbaustruktur kommt. Dies wird durch eine optimierte Abstimmung der Absorberkennlinie für den verfügbaren Bauraum in dem Bereich von Schaumstoffabsorber 1 erreicht.

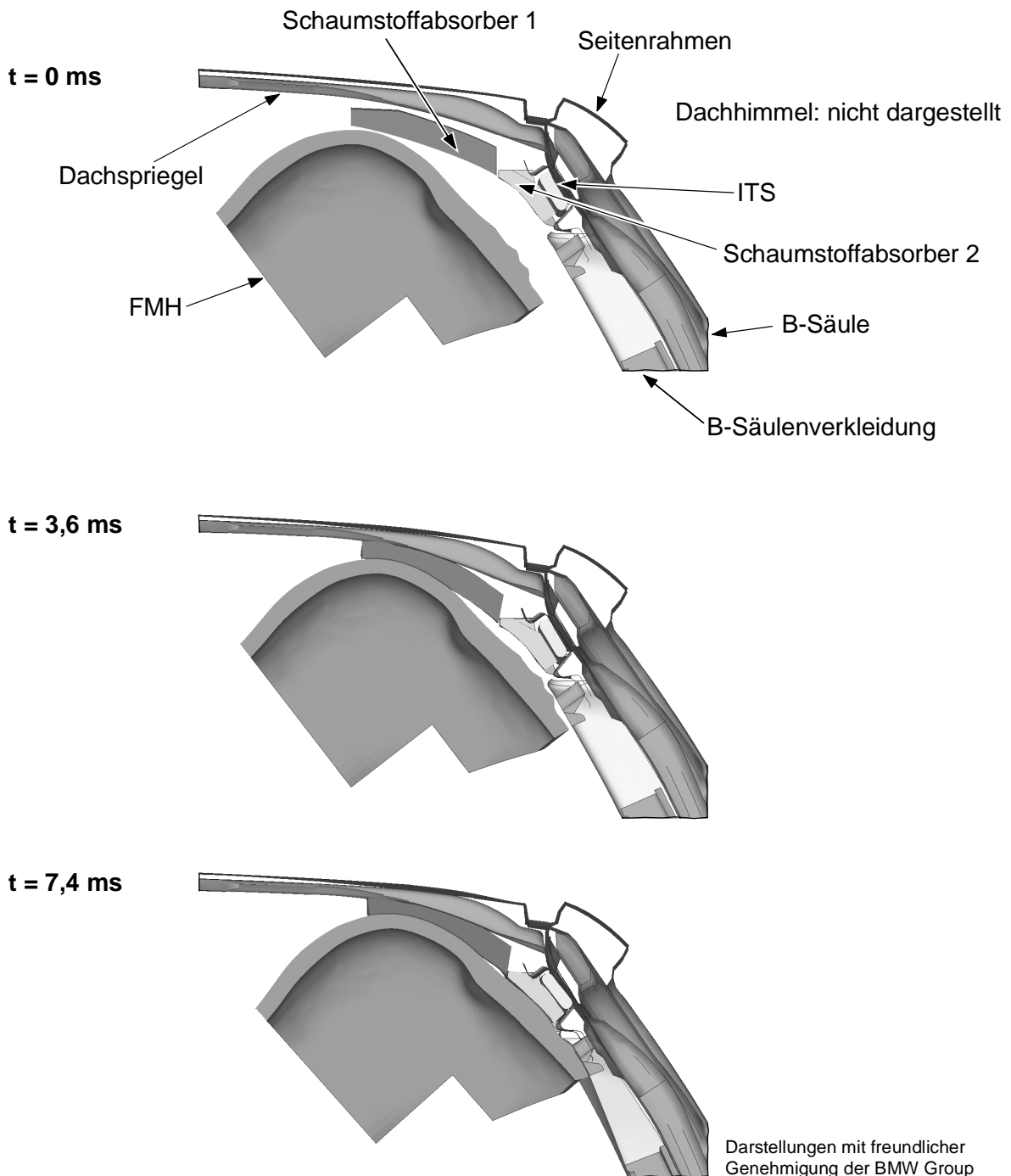


Bild 6.9: Deformation der Innenraumkomponenten am Aufprallpunkt URBP unter Berücksichtigung von Schaumstoffabsorber 1 und 2

Aufgrund der Ergebnisse wird ein Versuchsträger entsprechend der Variante 1 aufgebaut und getestet. Der gemessene Beschleunigungs-Zeitverlauf ist ebenfalls in Bild 6.8 dargestellt und

stimmt gut mit den berechneten Ergebnissen überein. Besonders auffällig ist die zufriedenstellende Übereinstimmung des Entlastungsverhaltens, obwohl basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 5.1 größere Abweichungen aufgrund der unzureichenden Modellierung des Entlastungsverhaltens der polymeren Hartschaumstoffe zu erwarten gewesen wären. Die gute Übereinstimmung ist im wesentlichen auf den großen Einfluß des Fahrzeugrohbaus und der B-Säulenverkleidung zurückzuführen, die in dem betrachteten Beispiel weitestgehend elastisch deformieren und deren Verhalten durch das eingesetzte Materialmodell gut abgebildet werden. Auch auf der Basis der Ergebnisse an anderen Aufprallpunkten hat der produktive Einsatz gezeigt, daß die unzureichende Modellierung des Entlastungsverhaltens der polymeren Hartschaumstoffe für den Kopfaufprall nach FMVSS 201 zu vernachlässigen ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Automobilindustrie ist in den letzten Jahren eine deutliche Zunahme der Marktanteile von innovativen und individuellen Produktvarianten festzustellen. Dabei steigen fahrzeugunabhängig die Anforderungen an die Qualität und die Ausstattung. Insgesamt führt dies zu einem wachsenden Entwicklungsaufwand bei der Produktentstehung und zwingt die Fahrzeughersteller zu einer Reduzierung der Entwicklungszeiten und -kosten. Das erforderliche Reengineering des Produktentstehungsprozesses wird durch eine zunehmend virtuelle Produktentwicklung erreicht. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Verringerung von zeit- und kostenintensiven Prototypentests durch eine rechnerische Vorauslegung von Fahrzeugkomponenten. Voraussetzung hierfür sind rechnerische Methoden mit einem hohen Qualitätsstandard, um langfristig ganzheitliche, prognosefähige Aussagen zu ermöglichen und Konzeptentscheidungen auf der Basis von Berechnungsergebnissen verantworten zu können. Hierbei sind zunehmend Fragen der Produkthaftung von Bedeutung, die in der Zukunft auch Testergebnisse auf der Basis von rechnerischen Untersuchungen betreffen können.

Ein Beispiel für diese Berechnungsmethoden ist die Fahrzeugcrashberechnung mit Hilfe der Finite Elemente Methode, die vermehrt zur Verbesserung der Passiven Sicherheit eingesetzt wird. Die Methode, die heute sehr effizient eine Auslegung der Fahrzeugkarosserie ermöglicht, muß unter Berücksichtigung der zunehmenden Anforderungen an die Insassensicherheit für eine zukünftige Sicherheitsauslegung von Innenraumkomponenten weiterentwickelt werden. Dies beinhaltet insbesondere die Simulation des komplexen Materialverhaltens einer Vielzahl der im Innenraum eingesetzten Werkstoffe. Die Beschreibung der Werkstoffe mit Hilfe von geeigneten Materialmodellen erfordert eine hohe Qualität der Abbildung, die oft nur mit einem sehr großen Aufwand erreicht wird. Die vorliegende Arbeit führt hierzu einen allgemeinen Prozeß zur mittelfristigen Integration dieser Vielzahl von neuen Werkstoffen in die Fahrzeugcrashberechnung ein. Ziel des methodischen Integrationsprozesses ist eine Steigerung und Sicherung der Qualität der Abbildung und eine effizientere Vorgehensweise unter der Ausnutzung von standardisierbaren Abläufen bei der Materialmodellierung.

Der Integrationsprozeß wird in Anlehnung an das sogenannte Quality Improvement Paradigm entwickelt und gliedert sich in vier Teilphasen, die **Planung**, die **Durchführung**, die **Bewertung** und den **Knowhow-Gewinn**. In der **Planung** werden die erforderlichen Grundlagen über den Werkstoff, dessen Einsatzbereiche innerhalb des Fahrzeugs und die damit verbundenen Einsatzrandbedingungen erarbeitet. Ausgehend von diesen Grundlagen werden die Ziele für den Integrationsprozeß festgelegt. Dies beinhaltet die eindeutige Definition von Annahmen über das Materialverhalten und Anforderungen an das zu entwickelnde Materialmodell. Unter Berücksichtigung der Validität dieser Annahmen und Anforderungen wird die weitere Vorgehensweise durch einen Projektplan beschrieben und auf der Basis einer Risikoabschätzung

beurteilt. Innerhalb der **Durchführung** des Integrationsprozesses erfolgt die Materialcharakterisierung, die eigentliche Materialmodellierung und dessen Validierung. Mit der Materialcharakterisierung werden alle für die Entwicklung des Modells benötigten Grundlagen zur Beschreibung des Materialverhaltens erarbeitet. Innerhalb des ersten Teilschritts der Materialmodellierung werden die in kommerziellen Berechnungsprogrammen und der Literatur existierenden Modelle untersucht und durch eine Validierung auf ihre Eignung zur Abbildung des Materialverhaltens beurteilt. Ziel ist die Auswahl eines Modells für den produktiven Einsatz in der Fahrzeugcrashberechnung oder für die erforderlichen Weiterentwicklungen. Die Weiterentwicklung des Modells gliedert sich in die Formulierung der Materialgleichung, deren Implementierung in das Berechnungsprogramm und die Verifikation der Entwicklungsmaßnahmen. Das implementierte Materialmodell muß anschließend validiert werden. In der **Bewertung** des Prozesses erfolgt eine umfassende Analyse und Absicherung der Prozeßabläufe und die Beurteilung der Qualität des entwickelten Materialmodells. Dies beinhaltet eine Festlegung von Qualitätsvorschriften für das Modell und für Bauteile, die mit Hilfe einer rechnerischen Simulation ausgelegt werden. Der letzte Teilschritt des Integrationsprozesses ist der **Knowhow-Gewinn**, der neben einer Qualitätssteigerung und -sicherung des Modells der Effizienzsteigerung der Prozeßabläufe dient. Dies beinhaltet neben der Sicherung von Erfahrungen aus dem Prozeß die Sicherung aller experimentellen und numerischen Daten. Ergänzend wird kontinuierlich Knowhow aus dem produktiven Einsatz des Modells aufgebaut.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Integrationsprozeß erstmalig am Beispiel von polymeren Hartschaumstoffen mit hohem Energieabsorptionsvermögen eingesetzt. Die hierfür erforderlichen Grundlagen werden im Vorfeld der Durchführung in der **Planung** des Prozesses erarbeitet. So handelt es sich bei den Schaumstoffen um künstlich hergestellte, spezifisch leichte Werkstoffe mit einer zellularen Struktur, in der Luft eingelagert ist. Das Materialverhalten der Schaumstoffe ist durch die Eigenschaften der Grundwerkstoffe und den Aufbau der zellularen Struktur beeinflusst. Das mechanische Verhalten zeichnet sich durch eine nahezu konstante Druckspannung über einem großen Stauchungsbereich bei einachsiger Druckbelastung und durch das geringe Rückverformungsverhalten nach Entlastung aus. Übliche Einsatzbereiche für den Insassenschutz sind die Dachhimmelverkleidung, die Instrumententafel und die Seitentürverkleidung. Darüber hinaus werden sie in Stoßfängern für den Fahrzeugschutz bei Bagatellunfällen und zunehmend für den Fußgängerschutz eingesetzt. Unabhängig von dem Einsatzbereich werden die polymeren Hartschaumstoffe im wesentlichen auf Druck belastet. Als Ergebnis der erarbeiteten Grundlagen müssen für eine Materialcharakterisierung die Veränderungen der mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von variierenden Randbedingungen, wie der Belastungsgeschwindigkeit, der Betriebstemperatur und der durch eine variierende Proben- und Impaktorgeometrie gekennzeichneten Krafteinleitung berücksichtigt werden.

Eine Klassifizierung der polymeren Hartschaumstoffe resultiert in zwei repräsentativen Materialien, die für die im Rahmen der **Durchführung** des Integrationsprozesses vorgesehene, experimentelle Materialcharakterisierung mit jeweils zwei unterschiedlichen Dichten verwendet werden. Neben dem sprödharten, duroplasten und nahezu offenzelligen Schaumsystem Bayfill® EA auf Polyurethanbasis wird das zähnharte, thermoplaste und geschlossenzellige Partikelschaumsystem Noryl® EF betrachtet. Entsprechend der durch den Integrationsprozeß festgelegten Vorgehensweise erfolgt die Materialcharakterisierung auf der Basis von Materialtests, wie beispielsweise dem einachsigen Druckversuch und dem Schubversuch, sowie anwendungsnahen Grundlagentests gemäß dem eigentlichen Einsatzbereich der Schaumstoffe. Diese Tests werden unter Variation der Einsatzrandbedingungen durchgeführt. Die Auswertung und Analyse der Tests zeigt, daß das Materialverhalten der beiden Schaumsysteme durch einen elastisch-plastischen Ansatz beschrieben werden kann. Wesentliches Merkmal des Ansatzes ist eine Abhängigkeit der Plastizität von der ersten und der zweiten Spannungsinvariante, was zu einer geschlossenen Fließfläche innerhalb des dreidimensionalen Spannungsraums führt. Das beobachtete Materialverhalten hängt erheblich von den Einsatzrandbedingungen Belastungsgeschwindigkeit und Betriebstemperatur und von der Dichte des jeweiligen Schaumsystems ab. Die Versuche von Bayfill® EA haben zusätzlich ein Versagen unter Zug- und Schubbelastung gezeigt, das einen erheblichen Einfluß auf das Verhalten von Bauteilen unter anwendungsnaher Belastung hat.

Die Untersuchung von existierenden Materialmodellen, die ein Potential zur Abbildung der polymeren Hartschaumstoffe aufweisen, hat zu der Auswahl eines Modells geführt, das von Professor N. Fleck an der Cambridge University für Aluminiumschaumstoffe entwickelt wurde. Das Materialmodell wird unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der Materialcharakterisierung weiterentwickelt. Diese Weiterentwicklungen erfordert eine Anpassung des Fließgesetzes, die Einführung eines Dehnratengesetzes und die Formulierung eines Schädigungsmodells zur Modellierung eines Versagens- und Nachversagensverhaltens der sprödharten Polymerschaumstoffe. Das modifizierte Materialmodell wird als User-Material in das Finite Elemente Programm ABAQUS/Explicit implementiert und auf der Basis der Materialtests und der anwendungsnahen Grundlagentests validiert.

Innerhalb der **Bewertung** zeigt sich das Potential des Integrationsprozesses, der trotz des Pilotcharakters erheblich die qualitativ abgesicherte Modellierung von polymeren Hartschaumstoffen unterstützt hat. Dies wird durch die umfangreiche Festlegung von Abläufen deutlich, die eine zielorientierte Aufteilung der Arbeitsumfänge auf die beteiligten Entwicklungspartner ermöglicht. So erfolgt die Materialcharakterisierung in enger Zusammenarbeit mit der IVW GmbH und die Materialmodellierung in Zusammenarbeit mit HKS Inc. Darüber hinaus ist durch die Transparenz und die Reproduzierbarkeit des Prozesses eine wesentliche Voraussetzung für eine langfristige Qualitätssteigerung und –sicherung gegeben.

Die Analyse der Modellvalidierung im Rahmen der Bewertung führt zu einer Annahme des entwickelten Materialmodells für die Simulation des Materialverhaltens von polymeren Hartschaumstoffen. Voraussetzung für den Einsatz ist die Einhaltung der innerhalb des Prozesses festgelegten Qualitätsvorschriften für das Materialmodell und für Bauteile, die auf der Basis der rechnerischen Simulation auszulegen sind. Die Bauteile müssen in definierten Grenzen eine homogene Dichteverteilung und eine geringe Chargenstreuung aufweisen. Dies ist durch die kontinuierliche Messung von Produktionsparametern und durch produktionsbegleitende Stichprobentests zu gewährleisten. Die wesentliche Voraussetzung für den Einsatz des Materialmodells ist die qualitativ abgesicherte Kalibrierung der Materialparameter für das jeweilige Schaumsystem. Die erforderlichen Materialtests sind vorgeschrieben und müssen mit dem für das Bauteil verwendeten Schaumsystem durchgeführt werden. Darüber hinaus müssen die Parameter durch ebenfalls vorgeschriebene, anwendungsnahe Grundlagentests validiert werden. Die Kalibrierung und die Validierung sollte durch den Bauteilhersteller betreut und von einem Prüfinstitut mit entsprechender Ausstattung und Erfahrung durchgeführt werden. Der Einsatzbereich des Materialmodells ist entsprechend dem Einsatzbereich der untersuchten Hartschaumstoffe auf druckdominierte Belastungen mit geringen Anforderungen an die Abbildung eines Rückverformungsverhaltens eingeschränkt. Im Anschluß an die Erläuterung und die Umsetzung des Integrationsprozesses wird anhand von zwei unterschiedlichen, für den Einsatzbereich der polymeren Hartschaumstoffe repräsentativen Anwendungen, einem Stoßfängertest nach NHTSA, Teil 581 und einem Kopfaufprall nach FMVSS 201, der produktive Einsatz demonstriert.

Ein wesentlicher Vorteil des Integrationsprozesses, die Berücksichtigung des vorhandenen Knowhows zur Steigerung der Effizienz bei der methodischen Integration von neuen Werkstoffen, konnte für das zusammengefaßte Projekt noch nicht genutzt werden. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit dokumentierten Erfahrungen und Ergebnisse werden aber bei der zukünftigen Integration von anderen Materialien, wie beispielsweise den polymeren Weichschaumstoffen, als **Knowhow-Gewinn** aus dem Projekt zur Verfügung stehen und genutzt. Langfristig ist die Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Entwicklungspartnern zu intensivieren und die Effizienz des Prozesses weiter zu steigern. Dies beinhaltet insbesondere die engere Einbindung von Hochschulinstituten und anderen Forschungseinrichtungen, sowie eine zunehmende Verlagerung der Initiative zu Werkstoff- und Bauteillieferanten.

Anhang

A1 Ergänzungen zur Planung

	PUR	EPS/PPE	EPP
Schaumstoffhärte	zähhart/sprödhart	zähhart	zähhart
Mikrostruktur	Strukturschaum, mischzellig, Zellmembran mikro- / feinzellig	Partikelschaum, geschlossenzellig, Zellwände mikrozellig	Partikelschaum, geschlossenzellig, Zellwände mikro- / feinzellig
Grundwerkstoffe	Polyurethan	Compound aus expandiertem Polystyrol und Polyphenylenether	expandiertes Polypropylen
Werkstoffgruppe	Duroplast	Thermoplast	Thermoplast
Aufschäumvorgang	chemisch/physikalisch	physikalisch	physikalisch
Rückstellvermögen	Variabel	gering	hoch
Einsatzbereich im PKW	Innenraum, Stoßfänger	Innenraum	Innenraum, Stoßfänger
Recyclierbarkeit	befriedigend	gut	gut
Thermische Stabilität *	160 °C	110 °C	120 °C
Eigenschaften -30°C bis 100°C *	gut	gut	befriedigend
Preis *	~ 7,- DM/kg	~ 5,- DM/kg	~ 4,- DM/kg
Werkzeugkosten	sehr gering	gering	gering
Einschäumbarkeit von Befestigungselementen	möglich	möglich	möglich
Rohdichte	50-150 g/l	30-120 g/l	60-150 g/l
Druckmodul	8-25 N/mm ²	5-27 N/mm ²	8-20 N/mm ²
mittlere Plateauspannung	0,1-2,0 N/mm ²	0,3-2,5 N/mm ²	0,3-2,5 N/mm ²

* Herstellerangaben

Tabelle A1.1: Charakteristische Daten von energieabsorbierenden polymeren Hartschaumstoffen für den Einsatz im PKW

Einsatzbereich	Regelungen	Spezifisches Anforderungsprofil	σ_{mittel}
Stoßfänger:			
• Fußgänger-schutz	Frontalaufprall, Vorschlag der EEVC WG-17	<ul style="list-style-type: none"> Verringerung der Knie- und Unterschenkelbelastungen durch Energieabsorption auf sehr geringem Druckspannungsniveau Bauweise erfordert großen Bauraum 	~ 0,1 [N/mm ²]
• Eigenschutz	Frontalaufprall, bsp. ECE-R 42 und NHTSA, Teil 581	<ul style="list-style-type: none"> Vermeidung plastischer Deformationen der Fahrzeugstruktur durch Energieabsorption auf hohem Druckspannungsniveau erhöhte Anforderungen an das Rückstellvermögen des Schaumstoffes 	0,3-1,0 [N/mm ²]
Instrumententafel, Kniebereich:			
• Beifahrerschutz	Frontalaufprall, bsp. ECE-R 94, FMVSS 208	<ul style="list-style-type: none"> Verringerung der Knie- und Oberschenkelbelastungen wegen der Nachgiebigkeit von Verkleidungselementen Energieabsorption auf mittlerem Druckspannungsniveau geringes Rückstellvermögen 	0,3-0,6 [N/mm ²]
• Fahrerschutz		<ul style="list-style-type: none"> Verringerung der Knie- und Oberschenkelbelastungen wegen der geringen Nachgiebigkeit der Lenksäule Energieabsorption auf mittlerem bis hohem Druckspannungsniveau geringes Rückstellvermögen 	0,4-1,3 [N/mm ²]
Innenraumverkleidung oberhalb der Brüstung:			
• Kopfschutz, Verkleidung der Rahmenstruktur	Frontal- und Seitenaufprall, ECE-R 94, ECE-R 95, FMVSS 201, FMVSS 208, FMVSS 214	<ul style="list-style-type: none"> Verringerung der Kopfbeschleunigungen wegen der Nachgiebigkeit von Verkleidungselementen Energieabsorption auf geringem bis mittlerem Druckspannungsniveau geringes Rückstellvermögen 	0,2-0,5 [N/mm ²]
• Kopfschutz, Verkleidung von Strukturknoten		<ul style="list-style-type: none"> Verringerung der Kopfbeschleunigungen wegen der geringen Nachgiebigkeit der Karosserie Energieabsorption auf mittlerem bis hohem Druckspannungsniveau geringes Rückstellvermögen 	0,5-1,3 [N/mm ²]
Seitentür:			
• Beckenschutz	Seitenaufprall, ECE-R 95, FMVSS 214	<ul style="list-style-type: none"> Verringerung der Becken und Abdomenbelastungen durch Energieabsorption auf geringem Druckspannungsniveau oder Lastweiterleitung geringes Rückstellvermögen Bauweise erfordert großen Bauraum 	0,3-2,0 [N/mm ²]
• Rippenschutz		<ul style="list-style-type: none"> Verringerung der Brustbelastungen durch Energieabsorption auf sehr geringem Druckspannungsniveau geringes Rückstellvermögen Bauweise erfordert großen Bauraum 	0,08-0,15 [N/mm ²]

Tabelle A1.2: Einsatzbereiche und Eigenschaften von energieabsorbierenden polymeren Hart-schaumstoffen im PKW

A2 Ergänzungen zur Durchführung

A2.1 Materialcharakterisierung

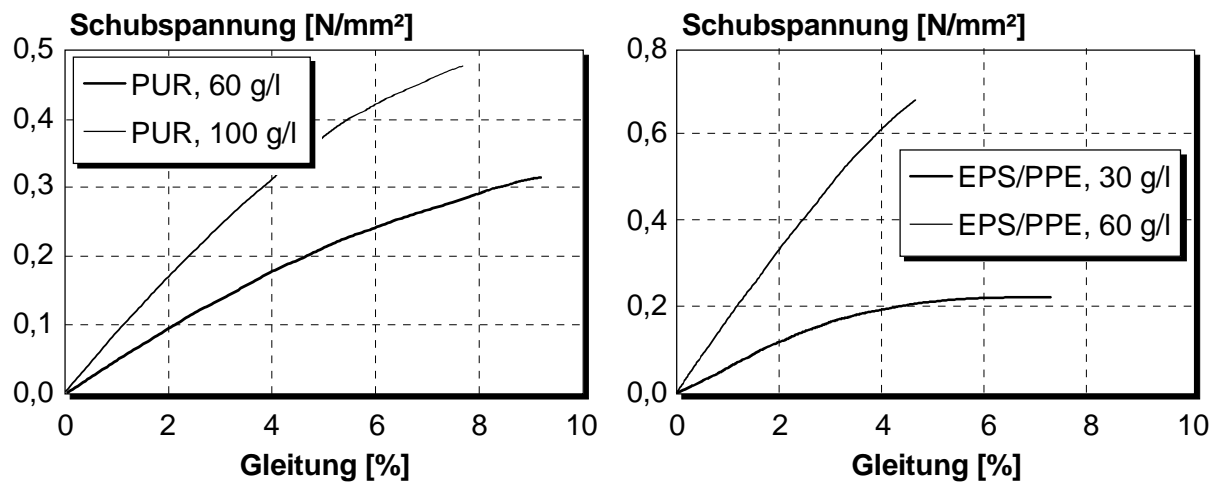


Bild A2.1: Verhalten von PUR und EPS/PPE unter Schubbelastung

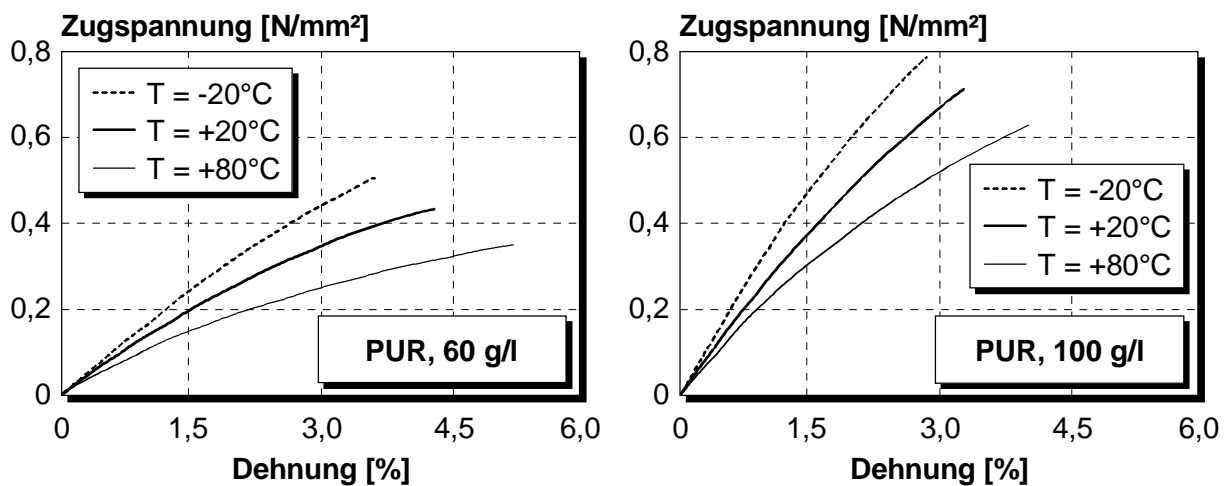


Bild A2.2: Temperaturabhängigkeit des Zugverhaltens (PUR, 60 g/l und 100 g/l)

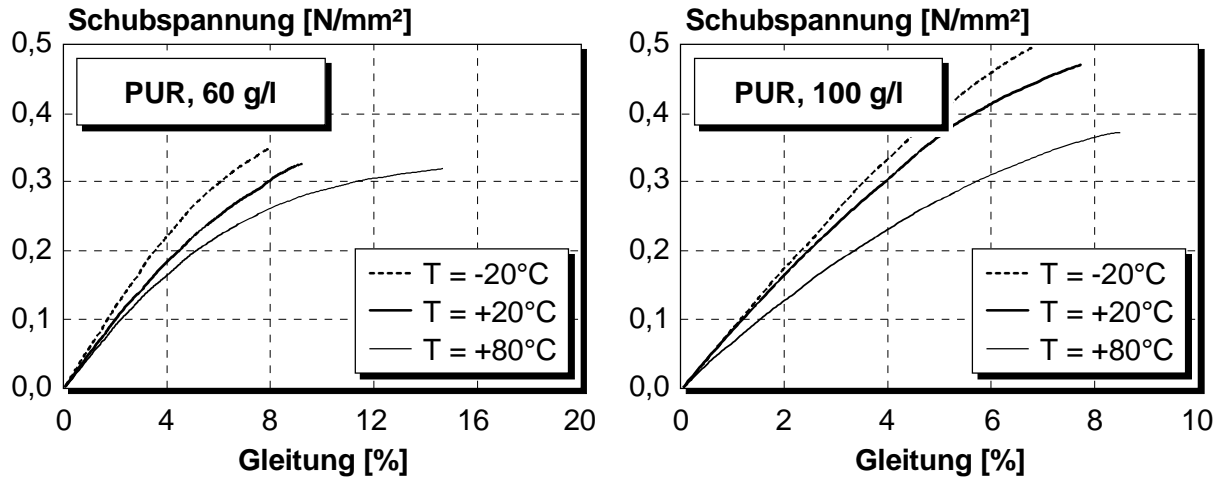


Bild A2.3: Temperaturabhängigkeit des Schubverhaltens (PUR, 60 g/l und 100 g/l)

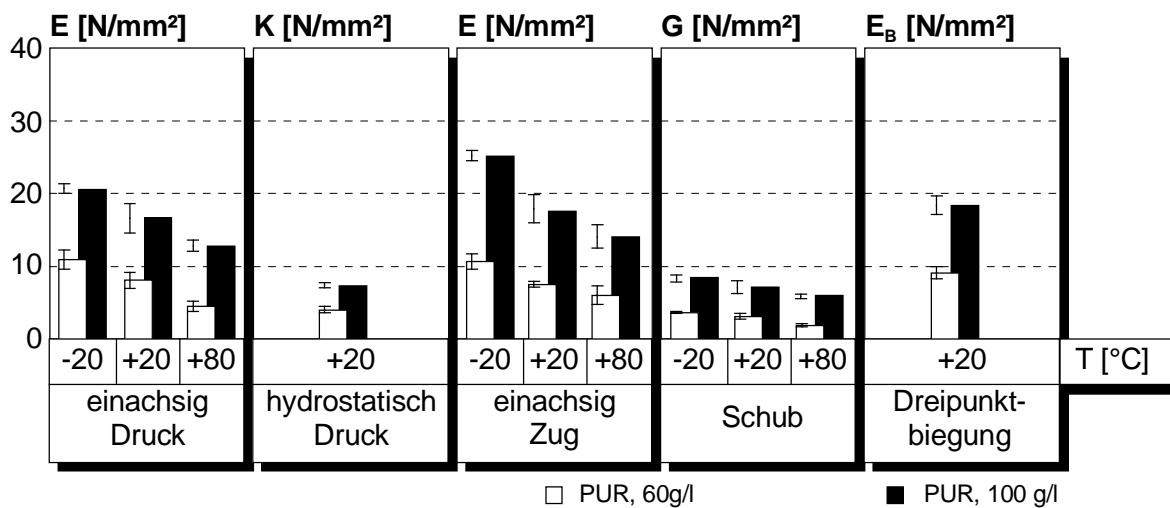


Bild A2.4: Vergleich der gemessenen Steifigkeit von PUR unter Variation der Belastungsart und -temperatur

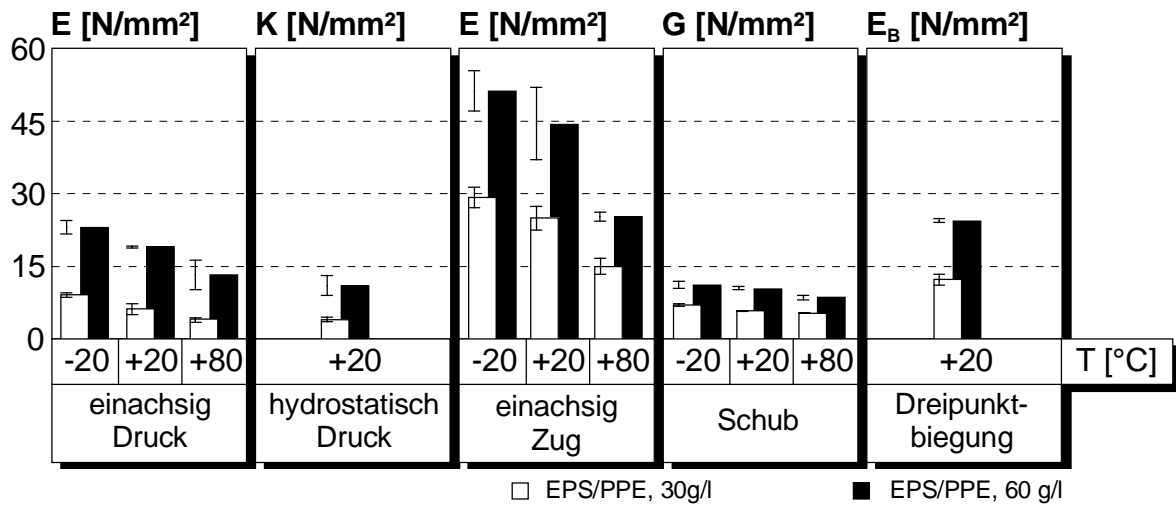


Bild A2.5: Vergleich der gemessenen Steifigkeit von EPS/PPE unter Variation der Belastungsart und -temperatur

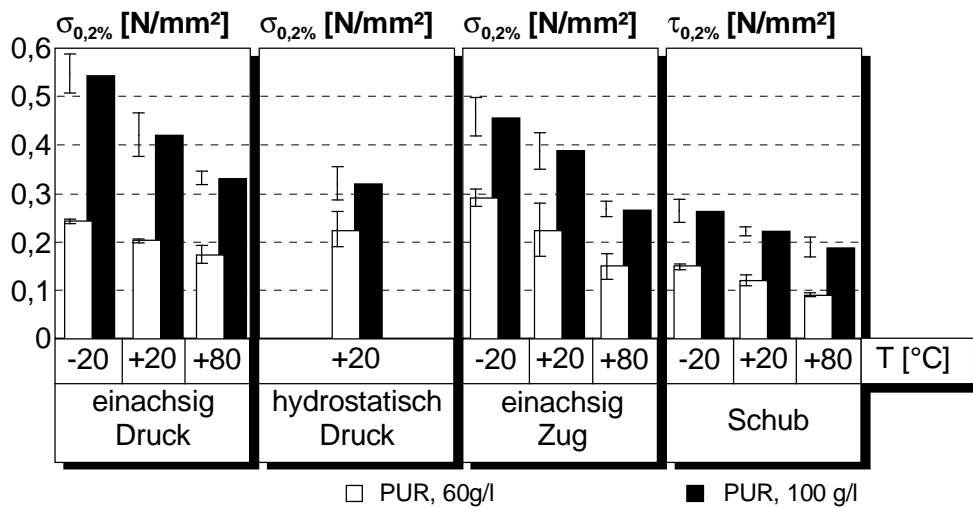


Bild A2.6: Vergleich des gemessenen Fließbeginns von PUR unter Variation der Belastungsart und -temperatur

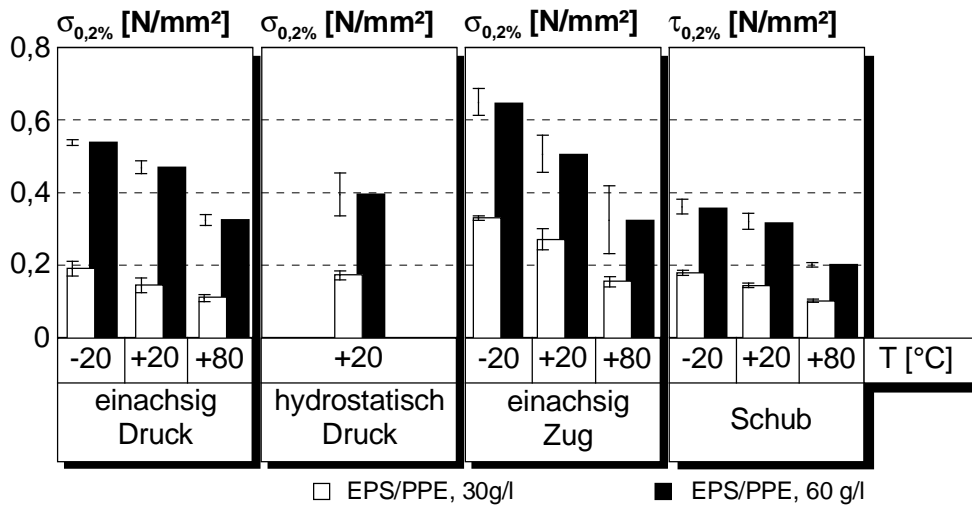


Bild A2.7: Vergleich des gemessenen Fließbeginns von EPS/PPE unter Variation der Belastungsart und -temperatur

A2.2 Materialmodellierung

A2.2.1 Implementierung

i) Berechnung der maximalen elastischen Hauptdehnung:

Die maximale Hauptdehnung wird unter Berücksichtigung eines für die explizite Zeitintegration charakteristischen kleinen Zeitschritts Δt auf der Basis des Spannungstensors des vorangegangenen Zeitinkrements zum Zeitpunkt t berechnet:

$$\varepsilon_{\max}^e \Big|_{\text{total}} = f\left({}^t\sigma_{ij}, {}^tC_{ijkl}\right). \quad (\text{A2.1})$$

Dabei ist ${}^tC_{ijkl}$ die Steifigkeitsmatrix unter Berücksichtigung der Schädigung zum Zeitpunkt t .

ii) Berechnung der Schädigung zum Zeitpunkt $t+\Delta t$:

Die Schädigung ergibt sich direkt aus der berechneten maximalen elastischen Hauptdehnung:

$${}^{t+\Delta t}D = 1 - \frac{\sigma_{\max} e^{-k^{t+\Delta t}\varepsilon^e B}}{\sigma_{\max} + E_0 e^{t+\Delta t}\varepsilon^e B}. \quad (\text{A2.2})$$

Unter Berücksichtigung des mit Hilfe des Spannungstensors zum Zeitpunkt t ermittelten Skalierungsfaktors, ${}^t r$, wird die effektive Schädigung bestimmt:

$${}^{t+\Delta t} D_{\text{eff}} = {}^t r \quad {}^{t+\Delta t} D. \quad (\text{A2.3})$$

iii) Berechnung des Tensors der elastischen Prädiktorspannung zum Zeitpunkt $t+\Delta t$:

Der Tensor der elastischen Prädiktorspannung wird ausgehend von dem Spannungstensor zum Zeitpunkt t und dem aktuellen Dehnungsincrement ${}^{t+\Delta t} \Delta \epsilon_{ij}$ berechnet:

$${}^{t+\Delta t} \sigma_{ij} = {}^t \sigma_{ij} + {}^{t+\Delta t} C_{ijkl} \quad {}^{t+\Delta t} \Delta \epsilon_{ij}. \quad (\text{A2.4})$$

Hierzu werden die Steifigkeitsmatrix, ${}^{t+\Delta t} C_{ijkl}$, und der Spannungstensor, ${}^t \sigma_{ij}$, unter Berücksichtigung der berechneten effektiven Schädigung ${}^{t+\Delta t} D_{\text{eff}}$ skaliert.

iv) Behandlung der Plastizität:

Zur Berechnung des plastischen Verformungsanteils muß der Tensor des plastischen Dehnungsincrements bestimmt werden. Aufgrund der Komplexität des Problems erfolgt die Lösung über die Definition von drei Unbekannten. Aus Gleichung 4.25 folgt:

$${}^{t+\Delta t} \Delta \epsilon_v = \frac{{}^{t+\Delta t} \sigma_{ij} \quad {}^{t+\Delta t} \Delta \epsilon_{ij}^p}{{}^{t+\Delta t} \sigma_v} \quad \text{mit} \quad {}^{t+\Delta t} \Delta \epsilon_v \equiv \int {}^{t+\Delta t} \dot{\epsilon}_v dt, \quad (\text{A2.5})$$

wobei ${}^{t+\Delta t} \Delta \epsilon_v$ die Änderung der äquivalenten plastischen Stauchung ist. Außerdem werden für die weitere Lösung die Änderung der effektiven volumetrischen Stauchung, ${}^{t+\Delta t} \Delta \epsilon_{\text{Vol}}^p$, und die Änderung der effektiven deviatorischen Stauchung, ${}^{t+\Delta t} \Delta e^p$, definiert:

$${}^{t+\Delta t} \Delta \epsilon_{\text{Vol}}^p = -{}^{t+\Delta t} \Delta \lambda \quad \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right), \quad (\text{A2.6})$$

$${}^{t+\Delta t} \Delta e^p = {}^{t+\Delta t} \Delta \lambda \quad \left(\frac{\partial G}{\partial q} \right), \quad (\text{A2.7})$$

die sich aus dem in Gleichung 4.21 definierten plastischen Potential ableiten. Ausgehend von den Gleichungen A2.6 und A2.7 folgt:

$$H\left({}^{t+\Delta t}\Delta\varepsilon_{\text{Vol}}^p, {}^{t+\Delta t}\Delta e^p\right)_{t+\Delta t} \equiv {}^{t+\Delta t}\Delta\varepsilon_{\text{Vol}}^p \left(\frac{\partial G}{\partial q}\right) + {}^{t+\Delta t}\Delta e^p \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right) = 0. \quad (\text{A2.8})$$

Mit

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}}\right) = \left(\frac{\partial G}{\partial q}\right) n_{ij} - \frac{1}{3} \left(\frac{\partial G}{\partial p}\right) \delta_{ij} \quad \text{mit} \quad n_{ij} = \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma'_{ij}}{q}\right) \quad (\text{A2.9})$$

kann Gleichung 4.22 nach Einführung von Gleichung A2.6 und A2.7 wie folgt geschrieben werden:

$$Q\left({}^{t+\Delta t}\Delta\varepsilon_v, {}^{t+\Delta t}\Delta\varepsilon_{\text{Vol}}^p, {}^{t+\Delta t}\Delta e^p\right) \equiv {}^{t+\Delta t}(\sigma_v(\varepsilon_v)\Delta\varepsilon_v) - {}^{t+\Delta t}(q\Delta e^p) + {}^{t+\Delta t}(p\Delta\varepsilon_{\text{Vol}}^p) = 0. \quad (\text{A2.10})$$

Unter Berücksichtigung der Fließfunktion entsprechend Gleichung 4.20 wird das Gleichungssystem, bestehend aus den Gleichungen 4.20, A2.9 und A2.10 mit Hilfe eines Newtonschen Iterationsverfahrens für die Größen ${}^{t+\Delta t}\Delta\varepsilon_v$, ${}^{t+\Delta t}\Delta\varepsilon_{\text{Vol}}^p$ und ${}^{t+\Delta t}\Delta e^p$ gelöst.

A2.2.2 Verifikation

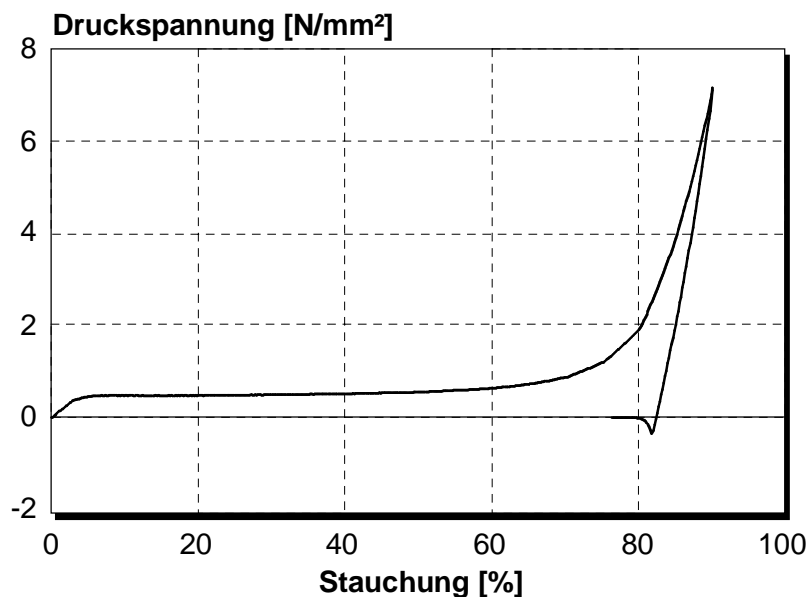


Bild A2.8: Verifikation von Fleck's modifiziertem Materialmodell – einachsiger Druck

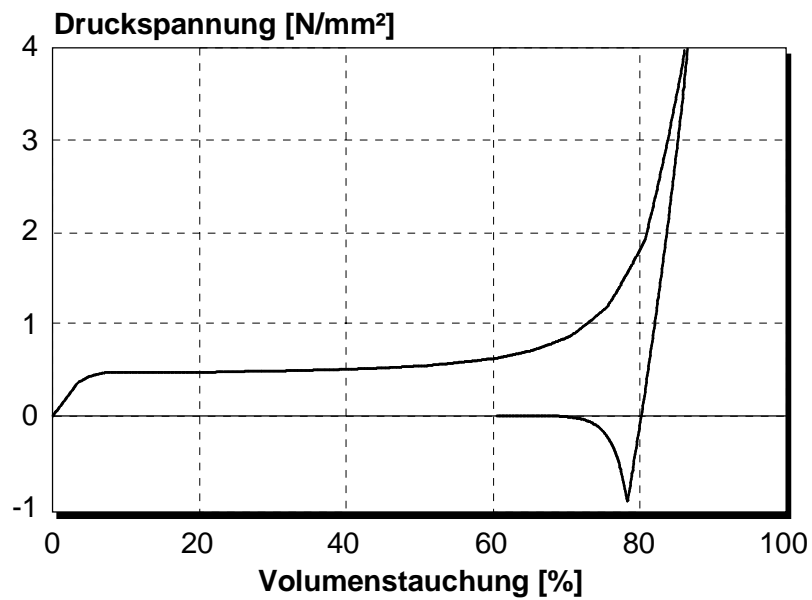


Bild A2.9: Verifikation von Fleck's modifiziertem Materialmodell – hydrostatischer Druck

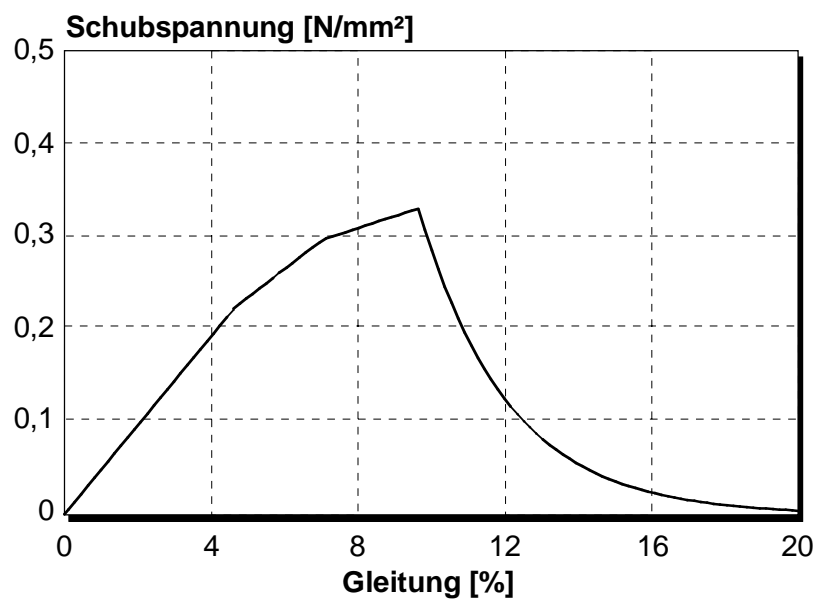


Bild A2.10: Verifikation von Fleck's modifiziertem Materialmodell – Schub

A2.3 Validierung

Materialparameter	PUR, 60 g/l	EPS/PPE, 30 g/l
Elastizitätsmodul, E	12,5 N/mm ²	12,0 N/mm ²
elastische Querdehnung, v^e	0,3	0,15
plastische Querdehnung, v^p	0,0	0,0
Gestalt der Fließfläche, α	1,0606	1,0606
maximale Schubspannung, τ_{\max}	0,33 N/mm ²	0,22 N/mm ²
Mode I-Bruchenergie, G_f^I	1,0 N/mm	1,0 N/mm
Parameter P des Dehnratengesetzes	4638,0 1/s	6520,0 1/s
Parameter n des Dehnratengesetzes	2,285	1,943
Spannungs-Stauchungsverlauf	$(\sigma_v, \varepsilon_v)_i$	$(\sigma_v, \varepsilon_v)_i$

Tabelle A2.1: Materialparameter für das modifizierte Materialmodell

Berechnungsbeispiel	Werkstoff	Impaktormasse m in [kg]	Geschwindigkeit v_0 in [m/s]
einachsiger Drucktest	PUR, 60 g/l	44,532	6,114
	EPS/PPE, 30 g/l	44,532	5,129
Drucktest mit halb- zylindrischem Impaktor	PUR, 60 g/l	13,005	5,693
	EPS/PPE, 30 g/l	13,005	5,371
Drucktest mit halb- kugelförmigem Impaktor	PUR, 60 g/l	18,675	2,669
	EPS/PPE, 30 g/l	15,65	2,8

Tabelle A2.2: Impaktormassen und -geschwindigkeiten für die dynamischen Drucktests

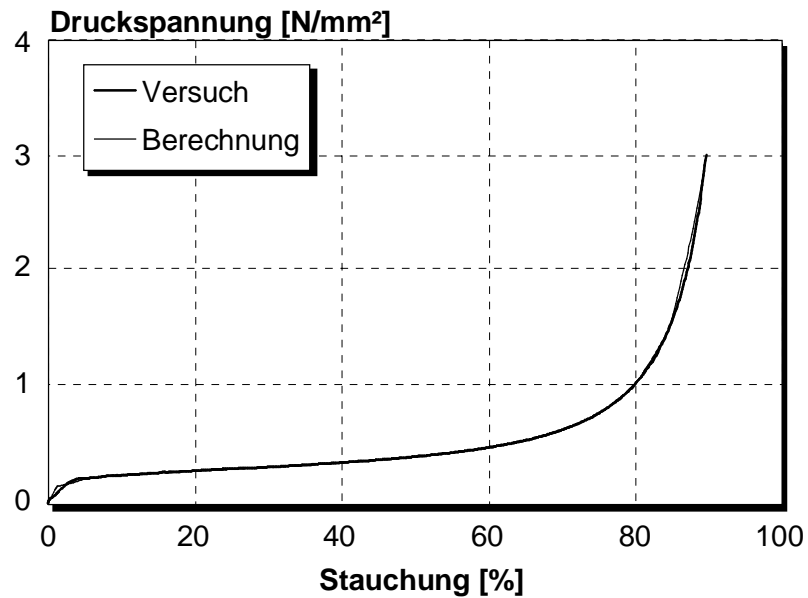


Bild A2.11: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatisch-einachsiger Druck, EPS/PPE der Dichte 30 g/l

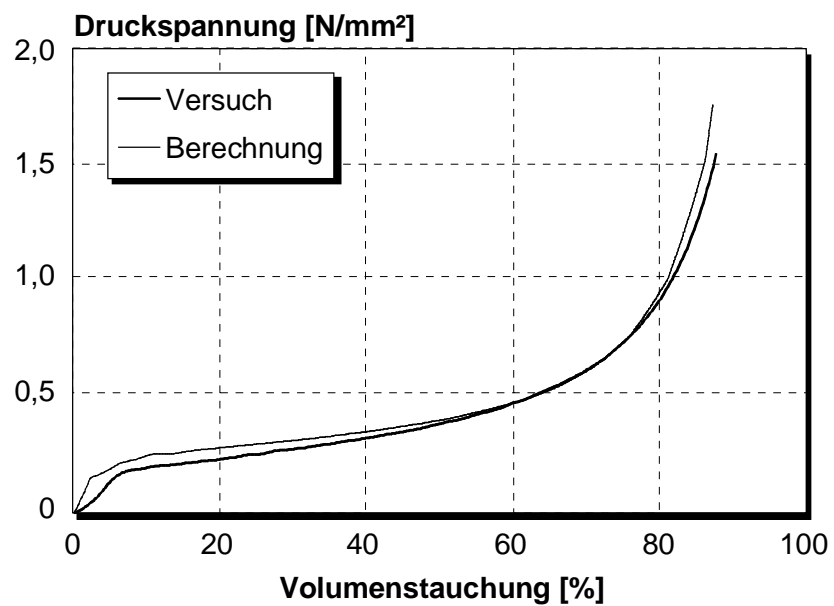


Bild A2.12: Validierung des modifizierten Materialmodells, hydrostatischer Druck, EPS/PPE der Dichte 30 g/l

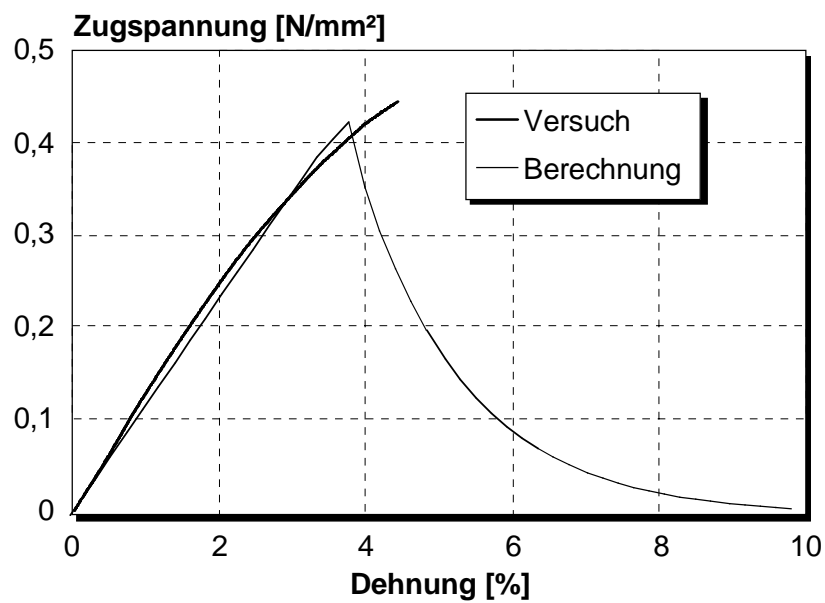


Bild A2.13: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatisch-einachsiger Zug, PUR der Dichte 60 g/l

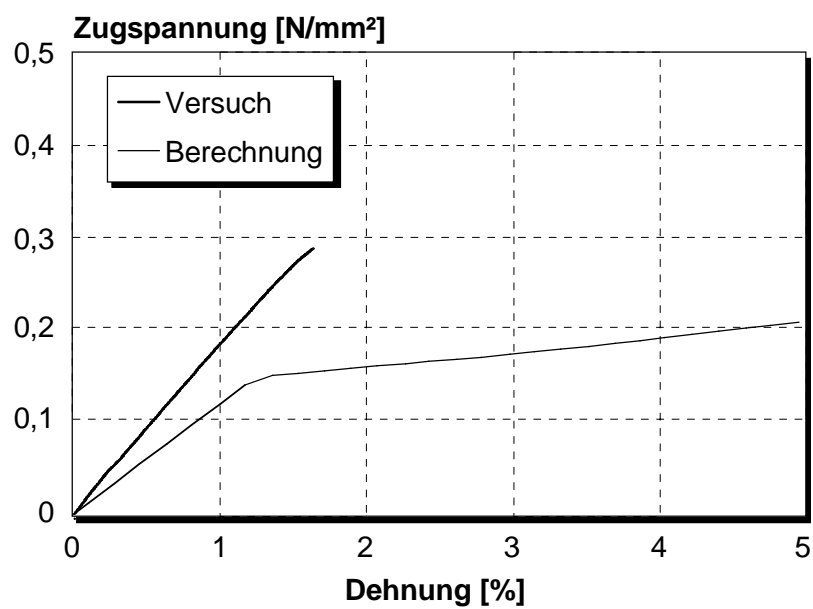


Bild A2.14: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatisch-einachsiger Zug, EPS/PPE der Dichte 30 g/l

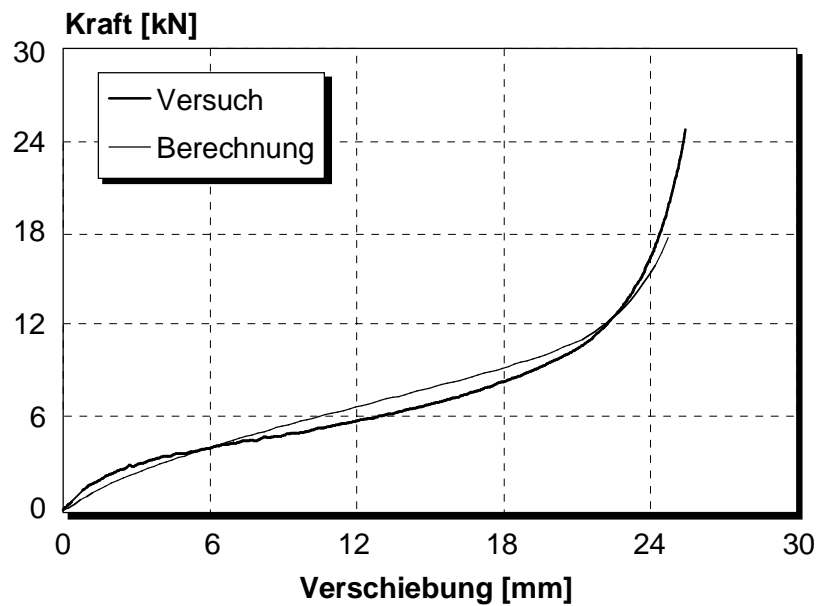


Bild A2.15: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatischer Drucktest mit halbzylindrischem Impaktor, PUR der Dichte 60 g/l

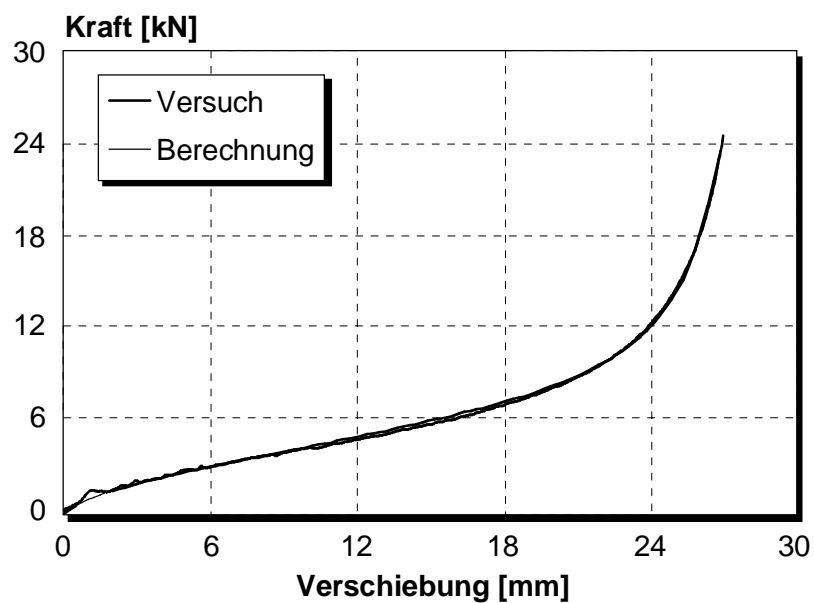


Bild A2.16: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatischer Drucktest mit halbzylindrischem Impaktor, EPS/PPE der Dichte 30 g/l

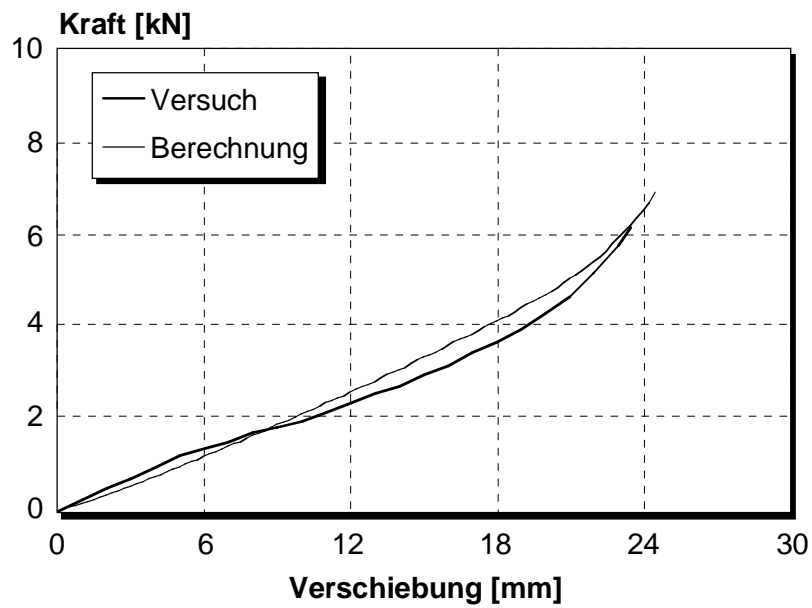


Bild A2.17: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatischer Drucktest mit halbkugelförmigem Impaktor, PUR der Dichte 60 g/l

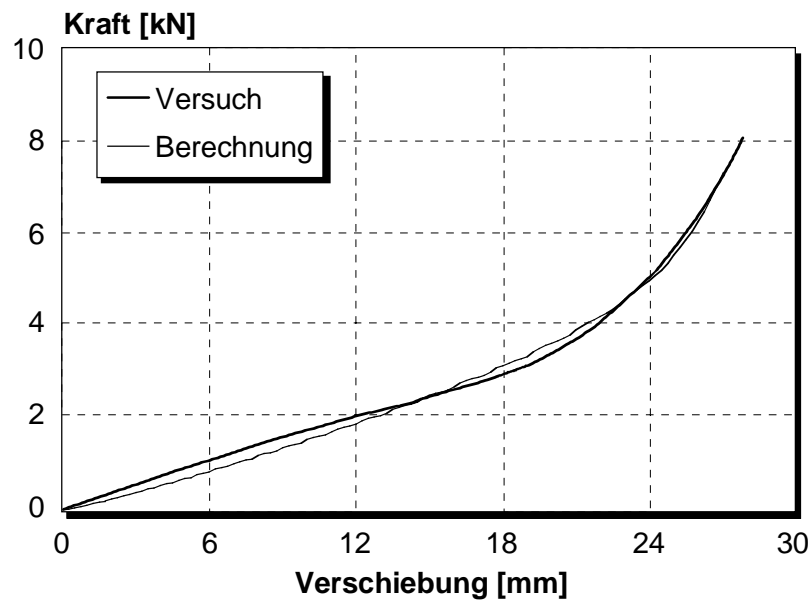


Bild A2.18: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatischer Drucktest mit halbkugelförmigem Impaktor, EPS/PPE der Dichte 30 g/l

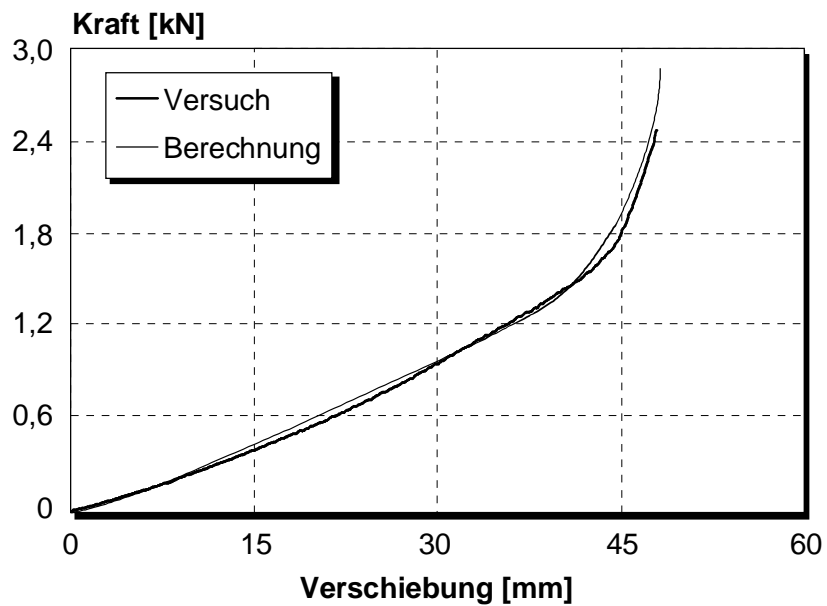


Bild A2.19: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatischer Drucktest mit keilförmiger Probe, PUR der Dichte 60 g/l

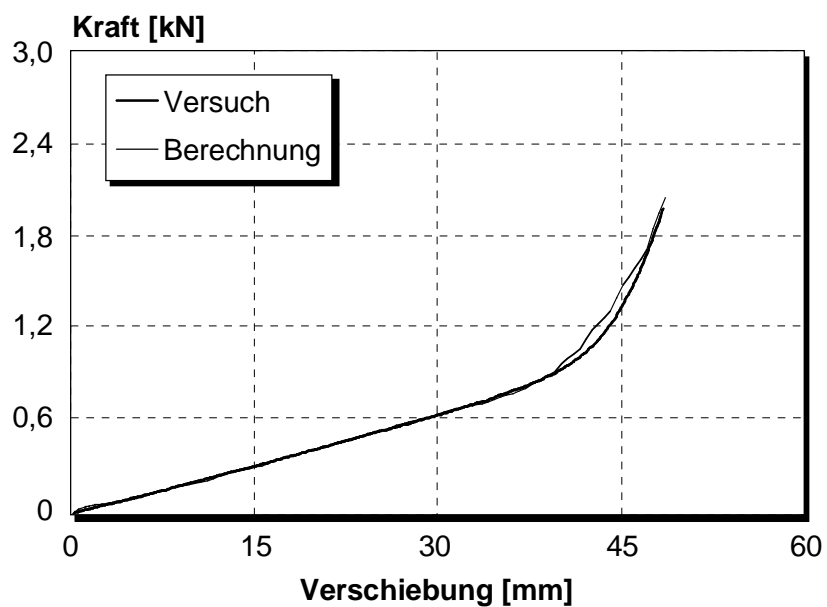


Bild A2.20: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatischer Drucktest mit keilförmiger Probe, EPS/PPE der Dichte 30 g/l

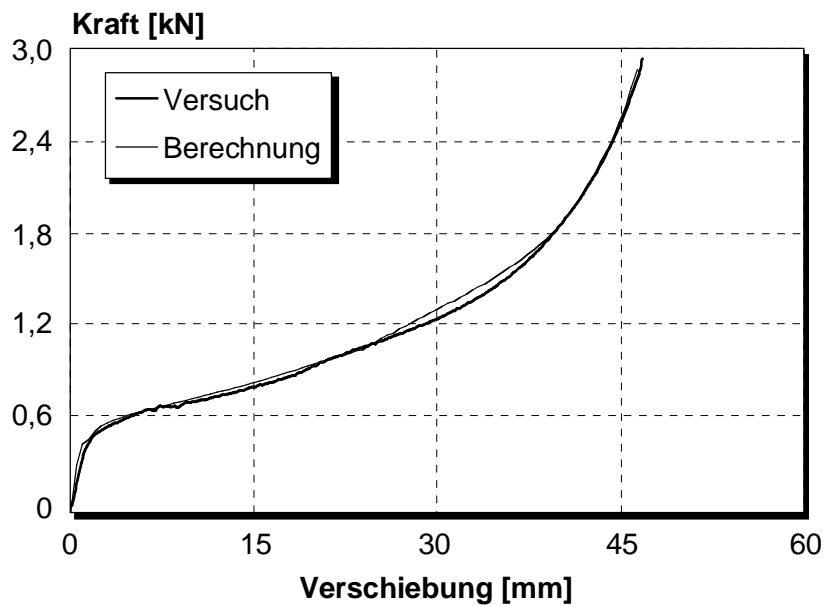


Bild A2.21: Validierung des modifizierten Materialmodells, quasistatischer Drucktest mit u-förmiger Probe, EPS/PPE der Dichte 30 g/l

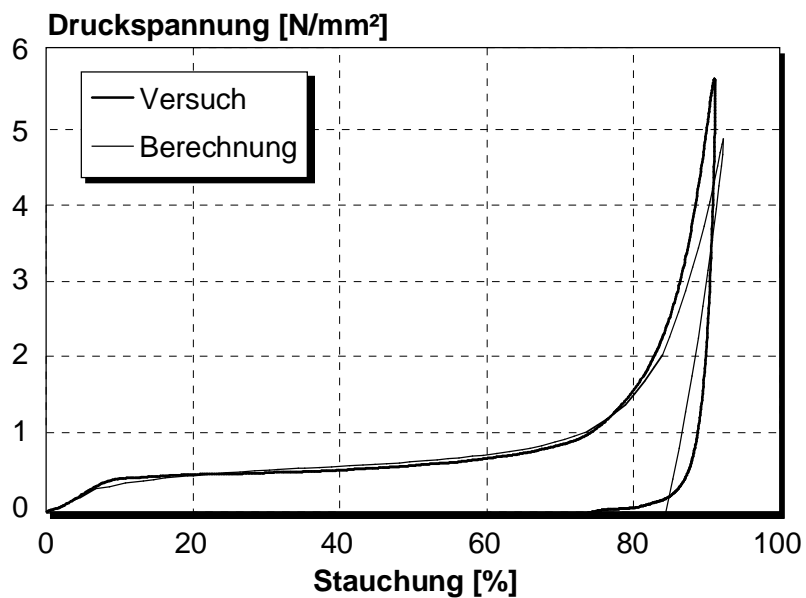


Bild A2.22: Validierung des modifizierten Materialmodells, dynamisch-einachsiger Druck, PUR der Dichte 60 g/l

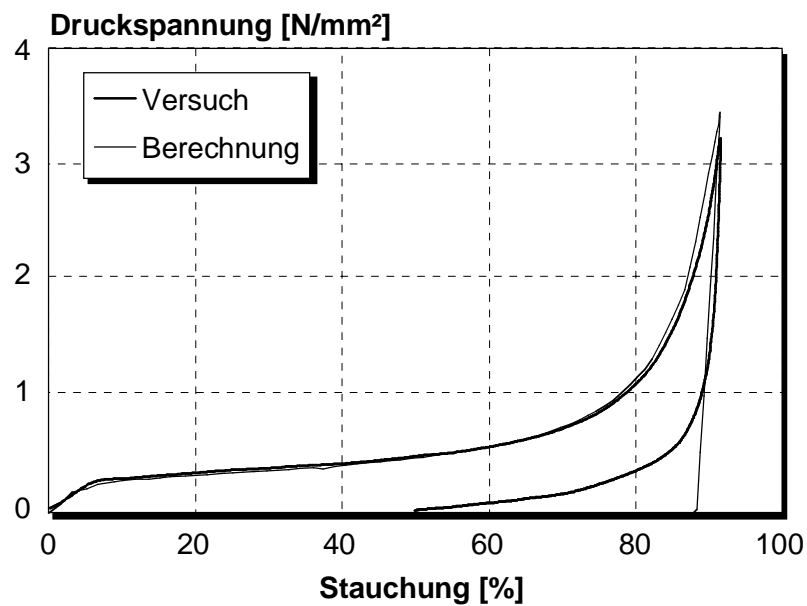


Bild A2.23: Validierung des modifizierten Materialmodells, dynamisch-einachsiger Druck, EPS/PPE der Dichte 30 g/l

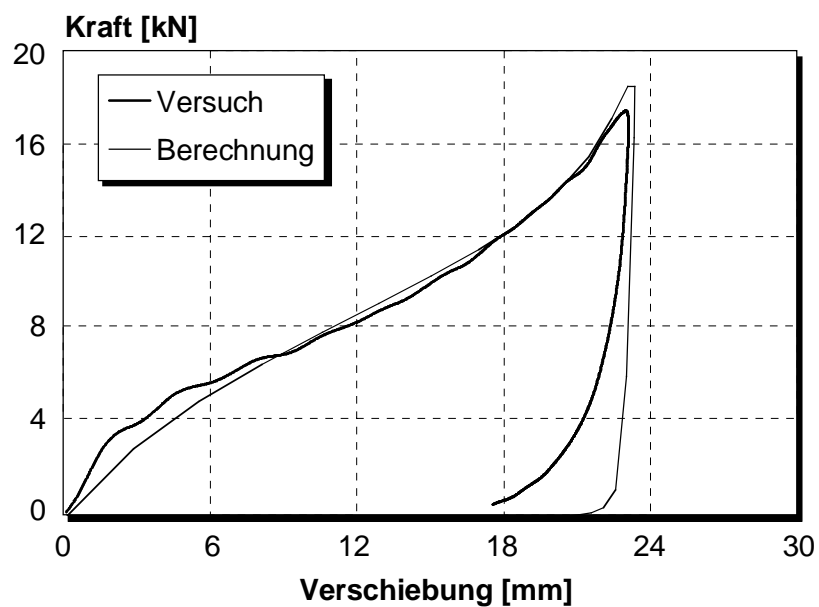


Bild A2.24: Validierung des modifizierten Materialmodells, dynamischer Drucktest mit halbzyklrischem Impaktor, PUR der Dichte 60 g/l

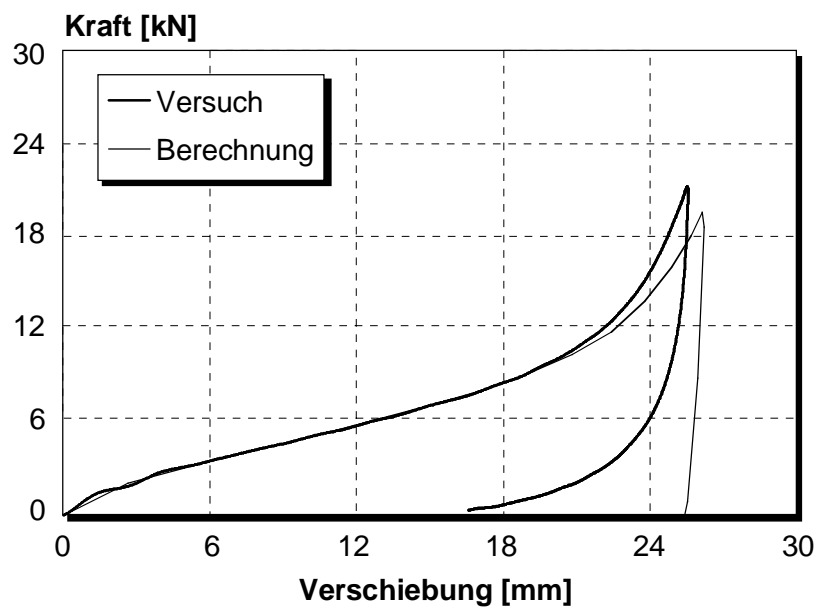


Bild A2.25: Validierung des modifizierten Materialmodells, dynamischer Drucktest mit halbzylindrischem Impaktor, EPS/PPE der Dichte 30 g/l

A3 Ergänzungen zur Bewertung

In in Bild A3.1 ist anhand der mittleren Plateauspannung ein Vergleich der experimentellen und der numerischen Ergebnisse des einachsigen Druckversuchs für Bayfill[®] EA der Dichte 60 g/l und Noryl[®] EF der Dichte 30 g/l dargestellt. Hierbei ist eine Variation der Belastungsgeschwindigkeit und -temperatur berücksichtigt. Die numerischen Parameter für das Dehnratengesetz werden für Raumtemperatur ermittelt. Zur Analyse der Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den numerischen Ergebnissen erfolgt eine Beurteilung anhand der mittleren Plateauspannung σ_{mittel} . Um dabei das experimentell ermittelte und das simulierte Materialverhalten besser vergleichen zu können, soll das jeweilige Verhalten mit Hilfe einer Regressionsanalyse modelliert werden. Die Regressionsanalyse ermöglicht eine vereinfachte, mathematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen den variierten Parametern (Geschwindigkeit, Temperatur) und der betrachteten Zielgröße (σ_{mittel}). Der verwendete Regressionsansatz hat die folgende allgemeine Form:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + \beta_4 x_1 x_1 + \dots + \beta_n x_i \dots x_j, \quad (\text{A3.1})$$

mit y : Zielgröße,

x_i : linearer Anteil einer Einflußgröße,

$x_i x_j$: Wechselwirkung zweier Einflußgrößen,

$x_i x_i$: quadratischer Anteil einer Einflußgröße,

β_i : Regressionskoeffizienten.

In dem betrachteten Beispiel wird nur die Wechselwirkung zwischen Temperatur und Geschwindigkeit berücksichtigt. Zusätzlich wird aufgrund der experimentellen Ergebnisse der Einfluß eines quadratischen Anteils für die Geschwindigkeit untersucht. Die Güte des Modelles wird entsprechend [Ma98] mit Hilfe des adjustierten Bestimmtheitsmaßes beurteilt. Die Berechnung der Regressionskoeffizienten beruht auf dem Modell der Kleinst-Quadrate-Regression [Ri97]. Für die beiden Schaumsysteme werden zur Auswertung der Ergebnisse aus Versuch und Simulation unabhängige Regressionsansätze bestimmt und untersucht. Bei dem PUR führt das Regressionsmodell der Versuche mit Berücksichtigung eines quadratischen Anteils für die Geschwindigkeit zu dem maximalen Bestimmtheitsmaß, während bei dem EPS/PPE mit ausschließlicher Berücksichtigung von linearen Effekten die beste Modellgüte erreicht wird (Tabelle A3.1). Im Gegensatz hierzu hat der quadratische Term der Geschwin-

digkeit bei dem Regressionsmodell für die Simulationsergebnisse von PUR nur einen geringen Einfluß, während sich bei dem EPS/PPE die Modellgüte erheblich verbessert. Dies ermöglicht bereits eine Beurteilung von tendenziellen Abweichungen.

PU (Versuch)		PU (Berechnung)		EPS (Versuch)		EPS (Berechnung)	
V_{linear}	$V_{\text{quadratisch}}$	V_{linear}	$V_{\text{quadratisch}}$	V_{linear}	$V_{\text{quadratisch}}$	V_{linear}	$V_{\text{quadratisch}}$
85,65	99,10	93,39	93,71	96,17	95,29	91,45	94,54

Tabelle A3.1: Vergleich der adjustierten Bestimmtheitsmaße in [%]

In der weiteren Betrachtung wird aus Gründen der Vergleichbarkeit für jeden Werkstoff ein Regressionsansatz gewählt, der jeweils optimale Übereinstimmung für die experimentellen Ergebnisse realisiert. Es ergeben sich somit folgende Ansätze:

$$\text{PUR: } \sigma_{\text{mittel}} = \beta_0 + \beta_1 x_v + \beta_2 x_T + \beta_3 x_v x_T + \beta_4 x_v x_v, \quad (\text{A3.2})$$

$$\text{EPS/PPE: } \sigma_{\text{mittel}} = \beta_0 + \beta_1 x_v + \beta_2 x_T + \beta_3 x_v x_T, \quad (\text{A3.3})$$

mit $x_v = \text{relative Geschwindigkeitsänderung } (v - v_{\text{mittel}})/v_{\text{mittel}},$

$x_T = \text{relative Temperaturänderung } (T - T_{\text{mittel}})/T_{\text{mittel}}.$

Eine Möglichkeit zur Beurteilung des Materialmodells ist ein Vergleich der Regressionskoeffizienten an (Bild A3.1).

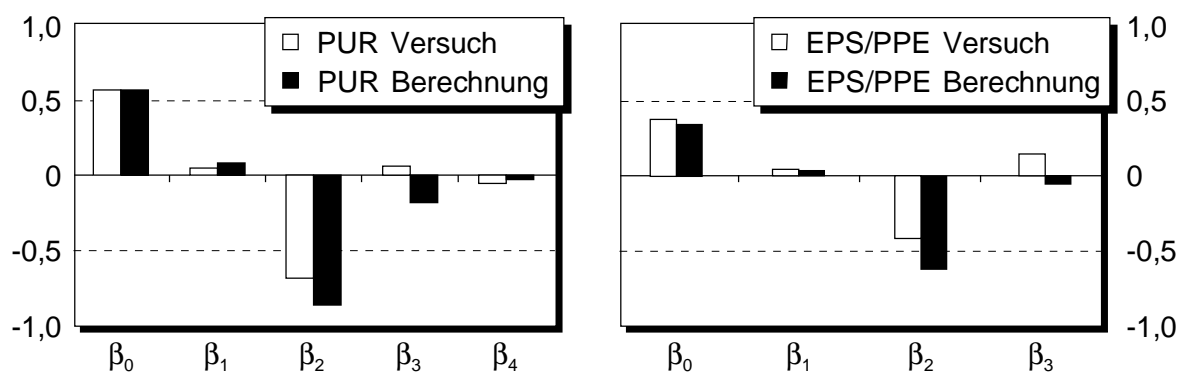


Bild A3.1: Vergleich der Regressionskoeffizienten

In Bild A3.2 sind die Regressionsmodelle mit den ermittelten Ergebnissen verglichen.

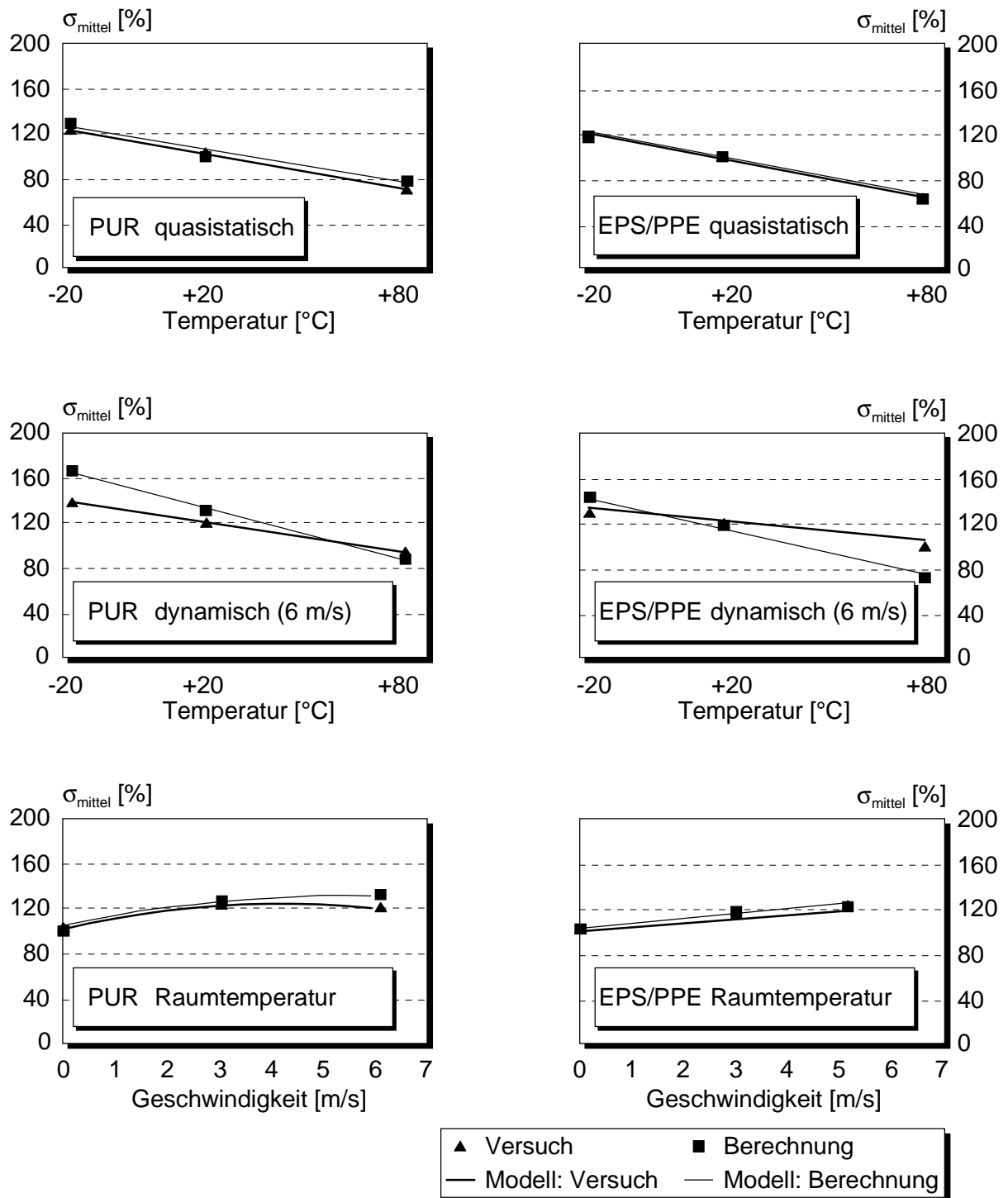


Bild A3.2: Regressionsanalyse am Beispiel der mittleren Plateauspannung

Die Spannung wird wiederum auf den experimentell ermittelten Wert bei +20°C und quasistatischer Belastung normiert. Entsprechend den generell hohen Bestimmtheitsmaßen ist

die Übereinstimmung zwischen den jeweiligen Regressionsmodellen und den Stützstellen aus Versuch und Simulation gut. Geringe Abweichungen zwischen der Simulation und dem Modell für EPS/PPE unter Variation der Geschwindigkeit sind auf den ausschließlich linearen Ansatz zur Berücksichtigung der Geschwindigkeitsabhängigkeit zurückzuführen. Bei beiden Werkstoffen zeigt sich eine Wechselwirkung zwischen Temperatur und Geschwindigkeit, die in der Simulation nicht berücksichtigt wird. Bei dem thermoplastischen EPS/PPE ist diese Wechselwirkung deutlicher ausgeprägt.

Literatur

- [AB93a] Arruda, E. M., Boyce, M. C.: Effects of Initial Anisotropy on the Finite Strain Deformation of Glassy Polymers. *International Journal of Plasticity* Vol. 9 (1993), Seite 783-811
- [AB93b] Arruda, E. M., Boyce, M. C.: Evolution of Plastic Anisotropy in Amorphous Polymers During Finite Straining. *International Journal of Plasticity* Vol. 6 (1993), Seite 697-720
- [AB95] Arruda, E. M., Boyce, M. C.: Effects of Strain Rate, Temperature and Thermomechanical Coupling on the Finite Strain Deformation of Glassy Polymers. *Mechanics of Materials* 19 (1995), Seite 193-212
- [AH85] Ahmadi, A. A., Hornsby, P. R.: Moulding and Characterisation Studies with Polypropylene Structural Foam, Part 1: Structure-Property Irrelationships. *Plastic and Rubber Processing and Applications* Vol. 5, No. 1 (1985), Seite 35-49
- [AK87] Appel, H., Kramer, F.: Biomechanik und Kraftfahrzeugsicherheit. Manuskript zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für Fahrzeugtechnik, TU Berlin (1987)
- [An97] Anselm, D.: Die Pkw-Karosserie - Konstruktion, Deformationsverhalten, Unfallinstandsetzung. Vogel Verlag, Würzburg (1997)
- [ASG98] Andrews, E., Sanders, W., Gibson, L. J.: Compressive and Tensile Behaviour of Aluminium Foams. Paper for submission to *Materials Science and Engineering* (1998)
- [Ba90] Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1990)
- [BCR94] Basili, V., Caldiera, G., Rombach, H. D.: The Experience Factory. *Encyclopedia of Software Engineering*, Vol. 1, John Wiley & Sons (1994), Seite 469-476
- [Be93] Betten, J.: *Kontinuumsmechanik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1993)
- [BFN93] Bilkhu, S. S., Founas, M., Nusholtz, G. S.: Material Modeling of Structural Foams in Finite Element Analysis Using Compressive Uniaxial and Triaxial Data. *SAE Technical Papers*, No. 930434 (1993), Seite 1-19

- [BLNW98] Beutner, E., Liebermann, H., Neukirchner, H., Waubke, S.: Modellierung und Simulation - Ihre Rolle im Prozeß der virtuellen Produktentwicklung. VDI Berichte 1411 'Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau', VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1998), Seite 405-435
- [Bu91] Burgess, E. L.: Finite Element Microstructural Models of Cellular Solids. Unveröffentlichte Arbeit am Department of Mechanical Engineering, MIT, Boston (1991)
- [Ch95] Chang, F. S.: Constitutive Equation Development of Foam Materials. Wayne State University, Detroit (1995)
- [CRW94] Carol, I., Rizzi, E., Willam, K.: A Unified Theory of Elastic Degradation and Damage Based on a Loading Surface. International Journal of Solids Structures Vol. 31, Nr. 20 (1994), Seite 2835-2865
- [CSLHFDT95] Chang, F. S., Song, Y., Lu, D. X., Hallquist, J. O., Feng, W. W., DeSilva, C. N., Tang, A.: Development of LS-DYNA3D Foam Material Type 83. Proceedings of the 3rd International LS-DYNA3D Conference, Kyoto (1995)
- [CLF98] Chen, C., Lu, T. J., Fleck, N. A.: Effect of Imperfections on the Yielding of Two-Dimensional Foams. Technical Report des Cambridge University Engineering Department, Cambridge (1998)
- [CZCCL96] Chou, C. C., Zhao, Y., Chai, L, Co, J., Lim, G. G.: Development of Foam Models as Applications to Vehicle Interior. Proceedings of the 39th Stapp Car Crash Conference, SAE Paper No. 952733, San Diego (1996)
- [CZLS98] Chou, C. C., Zhao, Y., Lim, G. G., Song, G. S.: A Constitutive Model for Polyurethane Foams with Strain-Rate and Temperature Effects. Proceedings 'SAE International Congress and Exposition', Detroit (1998), Seite 65-78
- [DF98] Deshpande, V. S., Fleck, N. A.: Isotropic Constitutive Models for Metallic Foams. Technical Report, Department of Engineering, University of Cambridge, submitted to Journal of Mechanics and Physics of Solids (1998)
- [DH69] DeRuntz, J. A., Hoffman, O.: The Static Strength of Syntactic Foams. Journal of Applied Mechanics (1969), Seite 551-557
- [DM98] Denzer, R., Maier, M.: Simulation des mikromechanischen Deformationsverhaltens von Aluminiumschaum. Proceedings 'CAD-FEM Users' Meeting', Bad Neuenahr-Ahrweiler (1998), Seite 1-4

-
- [FFSR89] Fortes, M. A., Fernandes, J. J., Serralheiro, I., Rosa, M. E.: Experimental Determination of Hydrostatic Compression Versus Volume Change Curves for Cellular Solids. *Journal of Testing and Evaluation* Vol. 17, No. 1 (1989), Seite 67-71
- [FMV97] Feldmann, R. L., Münch, J., Vorwieger, S.: Goal-oriented Organizational Learning with the SFB 501 Experience Base. Bericht 08/1997 des Sonderforschungsbereichs 501, Universität Kaiserslautern (1997)
- [FMVSS95] NHTSA National Highway Traffic Safety Administration, Department of Transportation, Federal Motor Vehicle Safety Standards: Head Impact Protection Standard No. 201, Occupant Protection, 49 CFR Parts 571, 572 and 589 (1995)
- [FNC97] Faruque, O., Nenguan, L., Chou, C. C.: Strain Rate Dependent Foam - Constitutive Modelling and Applications. SAE Technical Papers, No. 971076 (1997), Seite 221-229
- [GA97] Gibson, L. J., Ashby, M. F.: Cellular Structures - Structure and Properties. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge (1997)
- [GMG98] Gioux, G., McCormack, T. M., Gibson, L. J.: Failure of Aluminium Foams under Multiaxial Loads. Paper for submission to the *International Journal of Mechanical Science* (1998)
- [Har94] Hardmeier, B.: Passive Sicherheit von Leichtmobilen. Inaugural-Dissertation, Universität Zürich (1994)
- [Haß88] Haß, S.: Zur Untersuchungsmethodik axial belasteter Pkw-Längsträger mit nichtlinearen Finite-Element-Methoden. RWTH Aachen (1988)
- [HGM97] Holzner, M., Gholami, T., Mader, H.U.: Virtuelles Crashlabor: Zielsetzungen, Anforderungen und Entwicklungsstand. Proceedings PAM Users' Meeting, Prag (1997)
- [HGM98] Holzner, M., Gholami, T., Mader, H.U.: Virtuelles Crashlabor: Zielsetzungen und Entwicklungsstand. VDI Berichte 1411 'Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau', VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1998), Seite 27 - 52
- [Hi71] Hilyard, N. C.: Observations on the Impact Behaviour of Polyurethane Foams, II. The Effect of Fluid Flow. *Journal of Cellular Plastics* Vol. 7, No. 2 (1971), Seite 84-90
- [HKS98a] Hibbitt, Karlsson & Sorensen: ABAQUS Theory Manual (1998)

- [HKS98b] Hibbitt, Karlsson & Sorensen: ABAQUS/Explicit User's Manual (1998)
- [HLHBKK98] Hong, J. H., Lee, S., Hong, J.-M., Bae, Y.-K., Kim, S.-K., Kim, J.: Porous Elastic Behaviour of Open-Cell Foam. SAE Technical Papers, No. 980965 (1998), Seite 47-55
- [HLRS95] Haldenwanger, H.-G., Liman, U., Reim, H., Schöneburg, R.: Die Notwendigkeit der Computersimulation bei der Entwicklung von Kunststoffbauteilen. VDI-Tagung 'Kunststoffe im Automobilbau', Mannheim (1995)
- [HM96] Holzner, M., Mader, H.U.: From the Early Days of Crash Simulation to the Virtual Crash Lab. Proceedings Pam Users' Conference, Straßburg (1996)
- [Hü96] Hütter, R.: Temperaturbeständiger Partikelschaum auf EPS/PPE-Compound-Basis. 'Thermoplastische Partikelschaumstoffe: Aktueller Stand und Perspektiven', VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1996), Seite 53-73
- [KDZ96] Kern, A., Denzer, R., Zwing, G.: Experimentelle Untersuchung des mechanischen Verhaltens von Schaumwerkstoffen unter quasistatischer und dynamischer Druckbelastung. Interner Bericht der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern (1996)
- [KF91] Klempner, D., Frisch, K.: Handbook of Polymeric Foams and Foam Technology. Carl Hanser Verlag, München (1991)
- [Kn75] Knipschild, F.: Ein Beitrag zur Abschätzung und Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Kunststoffschäumen. RWTH Aachen (1975)
- [KNRW97] Kraynik, A. M., Neilsen, M. K., Reinelt, D. A., Warren, W. E.: Foam Micromechanics. Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on 'Foams, Emulsions, and Cellular Materials', Cargese (1997), Seite 1-28
- [Kr98] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden (1998)
- [LE97] Lee, J., Fenves, G. L.: Theory and Implementation of Plastic-Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Dams. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, Berichtnr. UCB/SEMM-97/03 (1997)
- [Le95] Leppkes, R.: Polyurethanes. Verlag Moderne Industrie AG, Landsberg (1995)
- [LKA91] Luther, G., Kramer, F., Appel, H.: Evaluation of Child Restraint Systems on the Basis of Suitable Assessment Criteria. International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts, Berlin (1991)

-
- [LM96] Laitenberger, O., Münch, J.: Ein Prozeßmodell zur experimentellen Erprobung von Software-Entwicklungsprozessen. Bericht 04/1996 des Sonderforschungsbereichs 501, Fachbereich Informatik der Universität Kaiserslautern (1996)
- [Lo73] Lohmeyer, S.: Schaumkunststoffe zur thermischen Isolation. GAK 2 (1973), Seite 104-113
- [LSTC99] Livermore Software Technology Corporation: LS-DYNA Keyword User's Manual (1999)
- [LOOO89] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Onate, E.: A Plastic-Damage Model for Concrete. International Journal of Solids Structures Vol. 25, Nr. 3 (1989), Seite 299-326
- [Me96] Meier, E.: EPE und EPP: Eigenschaftsprofile und aktuelle Anwendungen in Europa. 'Thermoplastische Partikelschaumstoffe: Aktueller Stand und Perspektiven', VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1996), Seite 27-52
- [MS97] Mecalog Sarl: RADIOSS Crash User's Documentation (1997)
- [MSD97] Maier, M., Schluppkotten, S., Denzer, R.: Energieabsorbierende Schaumstoffe müssen prognosefähig werden. Proceedings DGM-Tagung 'Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde', Kaiserslautern (1997), Seite 97 - 108
- [NHTSA95] National Highway Traffic Safety Administration, Department of Transportation, Federal Motor Vehicle Safety Standards: Head Impact Protection Standard No. 201, Occupant Protection. 49 CFR, Teil 571, 572 und 589 (1995)
- [NHTSA97] National Highway Traffic Safety Administration: NHTSA Plan for Achieving Harmonisation of the U.S. and European Side Impact Standards. Congressional Conference Report 104-785 (1997)
- [NMK87] Neilsen, M. K., Morgan, H. S., Krieg, R. D.: A Phenomenological Constitutive Model for Low Density Polyurethane Foams. Sandia Report SAND86-2927-UC-71, Sandia National Laboratories, Albuquerque und Livermore (1987)
- [Öc99] Öchsner, A.: Experimentelle Charakterisierung von Schaumstoffen unter Einsatz des Rasterverfahrens. Interner Bericht des Lehrstuhls für Technische Mechanik, Universität Erlangen-Nürnberg (1999)

- [PHSGB98] Paßmann, R., Holzner, M., Streit, M., Gütlein, U., Blauburger, P.: Contribution of Finite Element Analysis to the Design Process of Upper Interior Trims Meeting Head Impact Regulations According to FMVSS 201. Proceedings 'FISITA World Automotive Congress', Paris, SIA, Paris (1998)
- [PSI98] Pam System International SA: PAM-Crash Solver Reference Manual and Solver Notes Manual (1998)
- [Re77] Renz, R.: Zum zügigen und zyklischen Verformungsverhalten polymerer Hartschaumstoffe. Universität Karlsruhe (1977)
- [Ri97] Rinne, H.: Taschenbuch der Statistik, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Thun, Frankfurt a. Main (1997)
- [RM90] Ramon, O., Miltz, J.: Prediction of Dynamic Properties of Plastic Foams from Constant-Strain Rate Measurements. Journal of Applied Polymer Science Vol. 40 (1990), Seite 1683-1692
- [RMB94] Rehkopf, J. D., McNeice, G. M., Brodland, G. W.: Fluid and Matrix Components of Polyurethane Foam Behaviour under Cyclic Compression. ASME Journal of Engineering Materials and Technology (1994)
- [RMBKK94] Rehkopf, J. D., McNeice, G. M., Brodland, G. W., Kuczynski, E. T., Kerman, M.: Dynamic Behaviour of an Automotive Polyurethane Foam Under Multiple Compression Cycles. SAE Technical Papers, No. 940876 (1994)
- [Sa86] Saechtling, H.: Kunststoff Taschenbuch. Hanser Verlag, München (1986)
- [SAN93] Sander, R.: Passive Sicherheit. MOT Auto Technik Zukunft, Vereinigte Motor-Verlage GmbH&Co. KG, Stuttgart (1993), Seite 16-25
- [Sch97] Schluppkotten, J.: Auswertung von Druckversuchen mit Schaumstoffen und Materialmodelle zur numerischen Simulation von Schaumstoffen mit PAMCRASH. Technischer Bericht der BMW AG, München (1997)
- [Sch99a] Schluppkotten, J.: Investigation of the ABAQUS-Crushable Foam Plasticity Model. Technischer Bericht der BMW AG, München (1999)
- [Sch99b] Schluppkotten, J.: Crash Calculation of Polyurethane and Polystyrene Foams using the ABAQUS/Explicit Crushable Foam Plasticity Model. Technischer Bericht der BMW AG, München (1999)
- [SCI99] Schluppkotten, J., Cheng, C., Iordache, M.-M.: A Constitutive Model for Crushable Foams - Development, Implementation and Validation. Technischer Bericht der BMW AG, München (1999)

- [SCPM99] Schluppkotten, J., Cheng, C., Paßmann, R., Maier, M.: Erfahrungen mit ABAQUS/Explicit bei der Modellierung des crashrelevanten Verhaltens von Polymerschaumstoffen. Proceedings des ABAQUS-Anwendertreffens, Essen (1999), Seite 1-18
- [SD92] Stupak, P. R., Donovan, J. A.: Geometry, Load Spreading, and Polymeric Foam Energy Absorber Design. SAE Technical Papers, No. 920333 (1992), Seite 1-7
- [Sei92] Seiffert, U.: Fahrzeugsicherheit: Personenwagen. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1992)
- [Sei97] Seiffert, U.: Möglichkeiten und Grenzen der neuen Frontal- und Seitenaufprall-Gesetzgebung. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 99 (1997), Seite 494-504
- [SF92] Sherwood, J. A., Frost, C. C.: Constitutive Modelling and Simulation of Energy Absorbing Polyurethane Foam under Impact Loading. Polymer Engineering and Science Vol. 32, No. 16 (1992) Seite 1138-1146
- [SG98a] Simone, A. E., Gibson, L. J.: Aluminium Foam Produced by Liquid-State Process. Acta Materialica Vol.46, No. 9 (1998), Seite 3109-3123
- [SG98b] Simone, A. E., Gibson, L. J.: The Effect of Cell face Curvature and Corrugations on the Stiffness and Strength of Metallic Foams. Acta Materialica Vol. 46, No. 11 (1998), Seite 3929-3935
- [SG98b] Simone, A. E., Gibson, L. J.: Effects of Solid Distribution on the Stiffness and Strength of Metallic Foams. Acta Materialica Vol.46, No. 6 (1998), Seite 2139-2150
- [SH99] Schluppkotten, J., Huisman, M.: Experimentelle Untersuchungen zur Charakterisierung des mechanischen Verhaltens von polymeren Schaumstoffen. Interner Bericht der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern (1999)
- [SHG95] Silva, M. J., Hayes, W. C., Gibson, L. J.: The Effect of Non-Periodic Microstructure of the Elastic Properties of Two-Dimensional Cellular Solids. International Journal of Mechanical Science Vol. 37 (1995), Seite 1161 ff.
- [SMCL94] Sounik, D. F., McCullough, D. W., Clemons, J. L., Liddle, J. L.: Dynamic Impact Testing of Polyurethane Energy Absorbing (EA) Foams, SAE Technical Papers, No. 940879 (1994), Seite 1-11

- [SPH97] Schrem, E., Parisch, H., Herrmann, M.: Nichtlineare Berechnungen mit Finiten Elementen. Proceedings 'Nichtlineare Berechnungen mit Finiten Elementen', Seminar des VDI, Stuttgart (1997)
- [SPM97] Schluppkotten, J., Paßmann, R., Maier, M.: Polymeric Foams in Crash Simulation. Proceedings Pam Users' Conference, Prag (1997)
- [SPSHM98] Schluppkotten, J., Paßmann, R., Streit, M., Holzner, M., Maier, M.: Integration innovativer Werkstoffe in die Fahrzeugberechnung – Numerische Simulation polymerer Schaumstoffe. VDI Berichte 1411 'Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau', VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1998), Seite 173-191
- [SSPM99] Schluppkotten, J., Streit, M., Paßmann, R., Maier, M.: Application, Benefits and Problems of Finite Element Analysis in the Automotive Industry Represented by Head Impact Simulation. Proceedings zur 'European Conference on Computational Mechanics', München (1999)
- [Ta93] Tatzel, H.: Grundlagen der Verarbeitungstechnik von EPP - Bewährte und neue Verfahren. Thermoplastische Partikelschaumstoffe, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1993)
- [Th96] Thorns, J.: EPP – Anwendungen im Automobilbau - Bewährtes und Entwicklungstrends. 'Thermoplastische Partikelschaumstoffe: Aktueller Stand und Perspektiven', VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1996), Seite 99-110
- [TPK85] Throne, J. L., Progelhof, R. C., Kumar, S.: Closed-Cell Foam Behaviour Under Dynamic Loading - III. Impact Loading of High-Density Foams. Journal of Cellular Plastics Vol. 21, No. 2 (1985), Seite 123-140
- [TZSGA89] Traintafillou, T. C., Zhang, J., Gibson, L. J., Ashby, M. F.: Failure Surfaces for Cellular Materials Under Multiaxial Loads. International Journal of Mechanical Sciences Vol. 31, No. 9 (1989), Seite 665-678
- [VDA98] Verband der Automobilindustrie E. V.: Deutsche Automobilindustrie vereinheitlicht Kriterien für die Prüfung der aktiven und passiven Fahrzeugsicherheit. Pressemitteilung vom 2.4.1998
- [Wa95] Wallentowitz, H.: Aufbau von Kraftfahrzeugen. Vorlesungsmanuskript, Aachen (1995)
- [Wa98] Wallentowitz, H.: Kunststoffe im Kraftfahrwesen. Vorlesungsmanuskript, Aachen (1998)

- [YS87] Yossifon, S., Szanto, M.: Dynamic Compression Characteristics of Flexible Foams. I. Model, Analysis, and Experiments. *Journal of Applied Polymer Science* Vol. 34 (1987), Seite 2025-2036
- [Za73] Zaslavsky, M.: Multiaxial-Stress Studies in Rigid Polyurethane Foam. *Experimental Mechanics* Vol. 13 (1973), Seite 70-76
- [ZBRH95] Ziv, M., Boyce, M. C., Ravichandran, G., Hodowany, J.: High rate Deformation of Polymers and their Blends. *ASME Proceedings, Mechanics of Polymers and Polymer Composites* (1995)
- [ZKLYN98] Zhang, J., Kikuchi, N., Li, V., Yee, A., Nusholtz, G.: Constitutive Modelling of Polymeric Foam Material Subjected to Dynamic Crash Loading. *International Journal of Impact Engineering* Vol. 21, No. 5 (1998), Seite 369-386

Liste der Studien- und Diplomarbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die folgenden Studien- und Diplomarbeiten vergeben und durch den Verfasser betreut. Die Arbeiten wurden in den Jahren 1998 bis 2000 an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH in Kaiserslautern durchgeführt.

- [Da00] Daniel, P.: Crashsimulation von polymeren Hartschaumstoffen. Unveröffentlichte Studienarbeit, Universität Kaiserslautern (2000)
- [Ma98] Martignoni, R.: Charakterisierung des Materialverhaltens von Polymerschaumstoffen unter Berücksichtigung der Statistischen Versuchsmethodik. Unveröffentlichte Studienarbeit, Universität Kaiserslautern (1998)
- [Mu99] Musian, J.: Simulation des Crash-Verhaltens einer Schaumstoffstruktur für den Seitenaufprall. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Fachhochschule Kaiserslautern (1999)
- [We99] Wernicke, P.: Optimierung des Crashverhaltens von PKW-Innenraumkomponenten mit Hilfe der Finite-Elemente Methode. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Kaiserslautern (1999)

