

Bestimmung von FEM-Materialdaten für die Crashberechnung von Elastomeren unter Berücksichtigung großer Zug- und Druckverformungen

Dr. Marc Bosseler, Dr. Bernd Kleuter, (Parsolve GmbH, Düsseldorf, Deutschland)
Dr. Gerrit Risy (Volkswagen AG, Wolfsburg, Deutschland)

Bei sehr vielen Werkstoffen im Automobilbereich ist es für den FEM-Anwender nach wie vor eine große Herausforderung, zu prüfen, welches Werkstoffmodell am besten zum zu simulierenden Material und dem vorgegebenen Lastfall passt und dabei gleichzeitig zu entscheiden, inwiefern es möglich und vom Aufwand her zu rechtfertigen ist, die notwendigen Materialparameter hierfür zu bestimmen. In dieser Arbeit wird die Bestimmung einer Materialkarte zur Simulation des viskoelastischen Verhaltens eines kompakten Elastomers mittels Koppelung optischer Messtechnik und nichtlinearer Mehrparameteroptimierung präsentiert. Es wird dabei eine Versuchs- und Auswertemethodik genutzt, mit deren Hilfe es möglich ist, mehrachsige Spannungszustände bis zu großen Verformungen sowohl im Zug- als auch im Druckbereich sowie crashrelevante Dehnraten von bis zu 200/s innerhalb einer Optimierungsroutine zu berücksichtigen. Es werden zunächst die experimentellen Untersuchungen an ausgewählten Probekörpergeometrien dargestellt. Im weiteren Verlauf erfolgt die Erläuterung der wichtigsten Auswerteschritte innerhalb des Reverse Engineering. Abschließend wird anhand von Verifikationen und Validierungen gezeigt, dass mit dem vorgestellten Versuchs- und Auswertekonzept allen wichtigen Aspekten einer erfolgreichen Materialprüfung zur Bestimmung von FEM-Materialkarten Genüge geleistet werden kann.

1 Einleitung

Für Anwender von FE-Simulationstools ist es eine der wesentlichen Aufgaben bei der Modellerstellung, das Materialverhalten unter mechanischer Belastung realitätsnah abzubilden und zu prüfen, welches Werkstoffgesetz hierfür am besten geeignet ist. Zudem ist es erforderlich, die zugehörigen Materialparameter mit Hilfe geeigneter Prüf- und Auswertekonzepte zu ermitteln, so dass die später am Bauteil zu simulierenden Lastzustände bereits innerhalb des Materialprüfprogramms möglichst vollständig angesprochen werden. Da es das Ziel dieser Arbeit ist, einen einzigen Materialdatensatz zur gleichzeitigen Simulation des Verhaltens von Elastomerbauteilen bei hohen Dehnungen und Dehnraten zu bestimmen, wurden sowohl die an Bauteilen auftretenden mehrachsigen Spannungszustände bis in hohe Verformungsbereiche als auch eine große Bandbreite an Dehnraten innerhalb des Versuchsprogramms berücksichtigt.

Die Auswertung der experimentellen Daten wurde mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens aus dem Bereich des Reverse Engineerings vorgenommen, dessen Algorithmik auch für hochgradig nichtlineare Materialmodelle, die Verwendung von inhomogenen Verzerrungszuständen [1] sowie die Berücksichtigung von Streuungen des Materialverhaltens [2] anwendbar ist. Als Optimierungsalgorithmus wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate unter Hinzunahme der Levenberg-Marquardt-Methode angewendet, wobei es das Ziel ist, die Unterschiede zwischen auf der Probekörperoberfläche gemessenen und simulierten inhomogenen Verschiebungsfeldern zu minimieren. Die Simulation der Versuche ist dabei kraftgesteuert, wobei die während der entsprechenden Versuche gemessenen zeitlichen Kraftverläufe als Randbedingung einfließen. Aufgrund der gleichzeitigen Parameterbestimmung für mehrere Experimente sind eindeutige Parameterschätzungen deutlich besser gewährleistet als bei seriellen Auswerteverfahren, die darüber hinaus oftmals aus mehreren unterschiedlichen Methoden aufgebaut sind. Darüber hinaus gewährleistet das hier vorgestellte Verfahren der generalisierten Parameteridentifikation eine bessere Berücksichtigung der auftretenden Streuungen bei Wiederholversuchen.

2 Materialprüfung

2.1 Versuchsaufbauten und Probekörper

Alle Prüfungen wurden in einem klimatisierten Prüfraum bei $21,5 \pm 0,2$ °C durchgeführt. Es kamen eine Universalprüfmaschine der Firma Zwick (Modell 1474 für quasistatische Zug- und Druckversuche und eine hydraulische Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine der Firma Zwick/Roell (Modell HTM 5020) für Schnellzugversuche zum Einsatz (fig. 1). Als Messsystem zur optischen Messung von Verschiebungsfeldern auf der Probekörperoberfläche wurde das System ARAMIS 4M der Firma GOM und Kameras mit entsprechender Bildrate verwendet.



Figure 1: Quasistatischer Druckversuch (links) , Hochgeschwindigkeitszugversuch (rechts)

Als Probekörper wurden rechteckige Zugprobekörper und zylinderförmige Druckprobekörper verwendet. Während die Zugprobekörper in der Mitte mit einem kreisrunden Loch versehen waren, sind die Druckprobekörper als Vollzylinder mit oben und unten einvulkanisierten Aluplättchen ausgearbeitet worden (fig. 2). Beide Probekörpergeometrien führen bei Belastung zu einem inhomogenen Spannungszustand sowie einer inhomogenen Verteilung lokaler Dehnraten über den gesamten Verformungsbereich. Damit während des Versuchs Verschiebungsfelder gemessen werden konnten, wurden die Probekörper mit einem zufallsverteilten Muster aus Grauwerten kodiert.



Figure 2: Gelochte Rechteckprobekörper, massive Vollzylinder, kodiert und unkodiert

Um die im Falle einer herkömmlichen Einspannung der Zugprobekörper auftretenden Eigenspannungen zu minimieren, wurden überstehende, gelochte Laschen mittels vollflächiger Klebung appliziert. Die Kraftübertragung erfolgt somit zunächst über einen Bolzen in die Laschen und dann im Wesentlichen über die Klebung.

2.2 Zug- und Druckversuche

Das Versuchsprogramm bei beiden Materialien bestand aus Zugversuchen bei drei unterschiedlichen Abzugsgeschwindigkeiten sowie Druckversuchen bei quasistatischer Belastungsgeschwindigkeit. Die direkt mit der Prüfmaschine aufgenommenen Messwerte waren jeweils die Zeit, die Kraft in Lastichtung und der Traversenweg. Zusätzlich wurden mittels optischer, berührungsloser Messtechnik die Oberflächenverschiebungen ermittelt. Bei den Zugversuchen wurden Verzerrungszustände von über 100% lokaler technischer Dehnungen, bei den Druckversuchen von ca. 50% erreicht. Folgende Versuchs- und Kamerakonfigurationen kamen zum Einsatz:

- Zugbelastung mit 5 mm/min Traversengeschwindigkeit, 1 Bildaufnahme alle 6 Sekunden
- Zugbelastung mit 0,3 m/s Abzugsgeschwindigkeit, Bildaufnahme mit 800 Hz

- Zugbelastung mit 5 m/s Abzugsgeschwindigkeit, Bildaufnahme mit 9000 Hz
- Druckbelastung mit 3 mm/min Traversengeschwindigkeit, 1 Bildaufnahme alle 6 Sekunden

Für die folgende Parameteridentifikation wurden die Kraft-Zeit-Kurven bei 0,3 und 5 m/s geglättet. In den folgenden Abbildungen sind die Kraft-Zeit-Verläufe der vier Versuchstypen dargestellt, wobei die maximalen Traversenwege ca.35 mm im Zugversuch und ca. 15 mm im Druckversuch betragen.

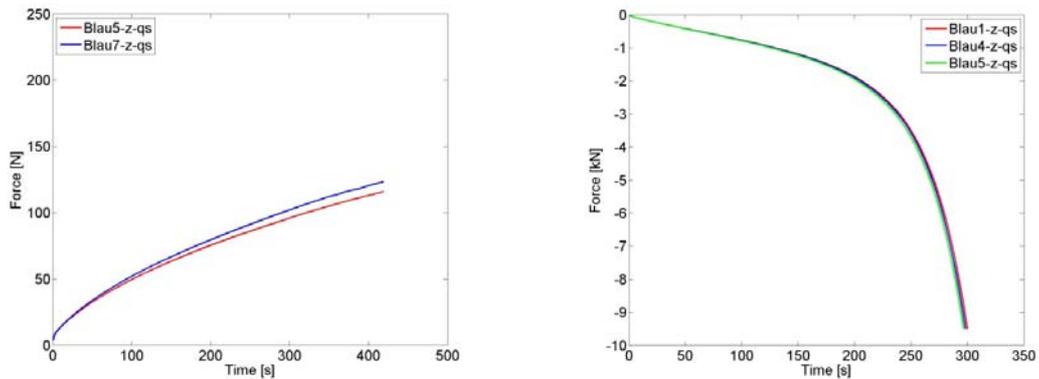


Figure 3: Quasistatische Zugversuche (links) und Druckversuche (rechts)

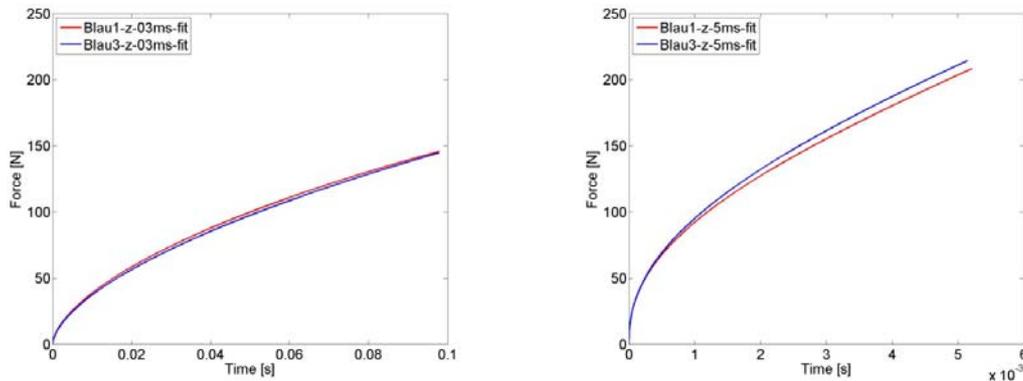


Figure 4: Zugversuche bei 0,3 m/s (links) und 5,0 m/s (rechts)

Zur Ermittlung inhomogener Verschiebungsfelder wurde ein auf der Probekörperoberfläche stochastisch verteiltes Muster aus Grauwerten mit CCD-Kameras aufgenommen. Im Anschluss daran wurde der Auswertebereich festgelegt (fig. 5) und mittels Grauwertkorrelationsanalyse analysiert. In den Abbildungen 6 und 7 sind beispielhaft die resultierenden Verschiebungs- und Dehnungsfelder eines Zug- und Druckversuchs dargestellt.

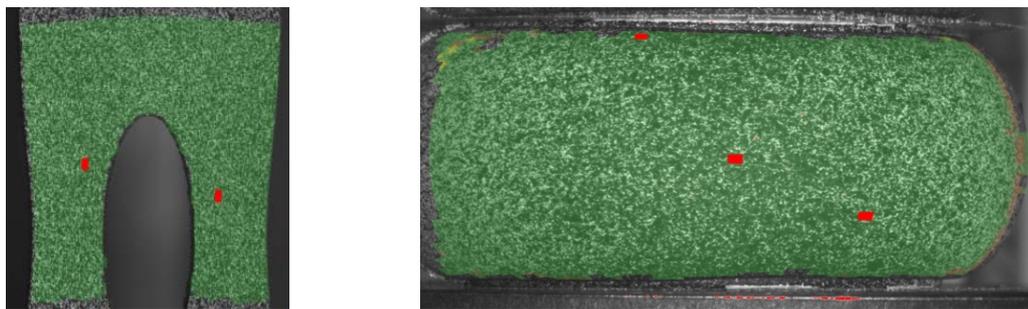


Figure 5: Originalkamerabilder mit überlagertem Auswertemaske

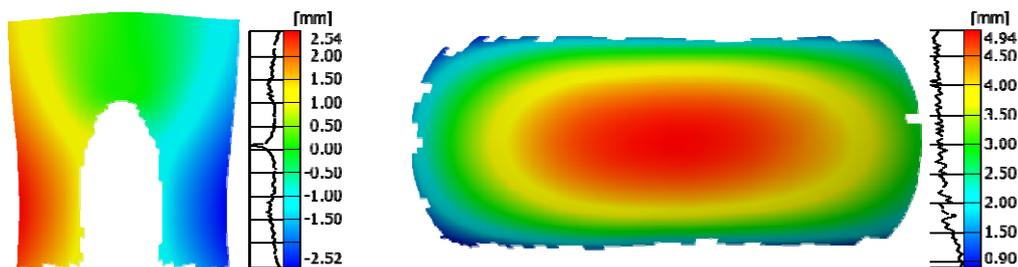


Figure 6: Verschiebungsfelder, Zug- und Druckversuch

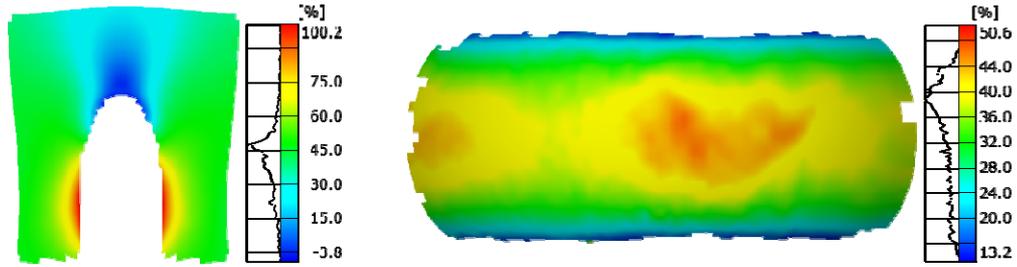


Figure 7: Verlauf der maximalen lokalen Vertikaldehnungen

3 Bestimmung der Materialkennwerte

Die simulierten und die experimentell ermittelten Verschiebungen $\bar{\mathbf{u}}_{ij}^{\text{exp}}$ und $\bar{\mathbf{u}}_{ik}^{\text{exp}}$ haben jeweils zwei bzw. drei unterschiedliche Verschiebungsrichtungen, je nachdem, ob es sich um Zug- oder Druckversuche handelt. Für die Bestimmung der Materialparameter müssen zunächst die experimentell gemessenen Verschiebungsfelder vergleichbar zu denjenigen am korrespondierenden FEM-Modell gemacht werden. Hierfür werden die gemessenen Verschiebungen der Probekörper mittels Triangulation auf die Identifikationsknoten des FE-Modells interpoliert. Zu diesem Zweck wird zudem das Koordinatensystem des Messfeldes genau in die Mitte des Loches transformiert (fig. 8)

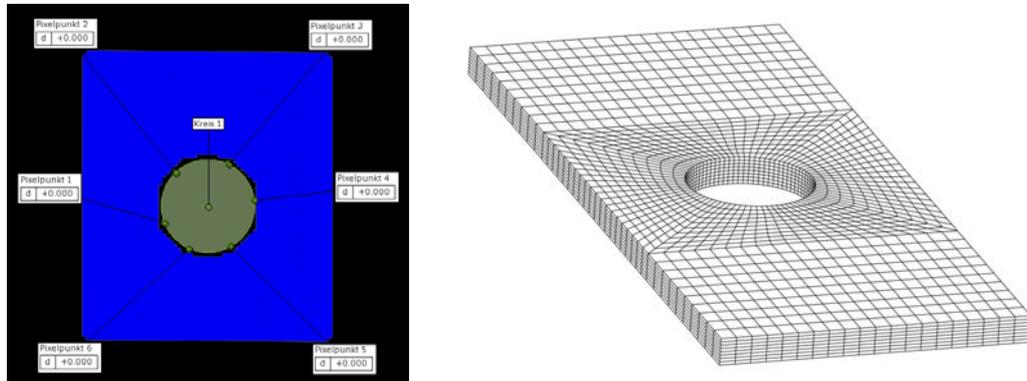


Figure 8: Transformiertes Koordinatensystem und FE-Modell (beispielhaft)

Um die Materialkennwerte anhand mehrerer Versuchstypen, in diesem Fall Zugversuchen an gelochten Probekörpern und Druckversuchen an Vollzylindern, gleichzeitig zu ermitteln, wird als Zielfunktion $f(\kappa)$ die folgende Formulierung der Fehlerquadratsumme verwendet:

$$f^{AB\dots Z}(\kappa) = \frac{1}{2} \left[\underbrace{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{T_A} \left[\mathbf{W}_{ij} \cdot \left[\bar{\mathbf{u}}_{ij}(\kappa) - \bar{\mathbf{u}}_{ij}^{\text{exp}} \right] \right]^2}_{\text{Test A}} + \dots + \underbrace{\sum_{m=1}^{N_Z} \sum_{n=1}^{T_Z} \left[\mathbf{W}_{mn} \cdot \left[\bar{\mathbf{u}}_{mn}(\kappa) - \bar{\mathbf{u}}_{mn}^{\text{exp}} \right] \right]^2}_{\text{Test Z}} \right] \quad (1)$$

Es sind T_A, T_B, \dots, T_Z die im jeweiligen Versuchstyp betrachteten Anzahlen an Lastschritten wie $\mathbf{W}_{ij}, \dots, \mathbf{W}_{mn}$ die Wichtungsmatrizen für die entsprechenden Verschiebungen in Längs- und Querrichtung. Die Anzahl an Identifikationsknoten bezeichnen N_A, \dots, N_Z . Da während der Versuchsdurchführung unerwünschte Effekte, wie z.B. Rutschen in der Einspannung oder der Einfluss der Maschinensteifigkeit, auftreten können, werden für die Identifikation in der Regel nicht die Absolutwerte der Verschiebungen, sondern auf einen Relativknoten bezogene Verschiebungen berücksichtigt. Dies hat den Effekt, dass vom Materialverhalten entkoppelte Translations- und Rotationsbewegungen im Vorfeld gefiltert werden können. Hierdurch verändert sich die allgemeine Darstellung der Fehlerquadratsumme folgendermaßen:

$$f(\kappa) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T \left[\left[\bar{\mathbf{u}}_{i,j}(\kappa) - \bar{\mathbf{u}}_{ij}(\kappa) \right] - \left[\bar{\mathbf{u}}_{i,j}^{\text{exp}} - \bar{\mathbf{u}}_{ij}^{\text{exp}} \right] \right]^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

$\bar{u}_{i,j}(\kappa)$ sind hierbei die Verschiebungen am Relativknoten, $\bar{u}_{i,j}^{exp}$ die gemessenen Verschiebungen nach Interpolation auf die Koordinaten des Relativknotens RN. Die Lage der jeweiligen Relativknoten und der fünf für die spätere Verifikation gewählten Verifikationsknoten des Zug- und Druckprobekörpers ist im Folgenden dargestellt.

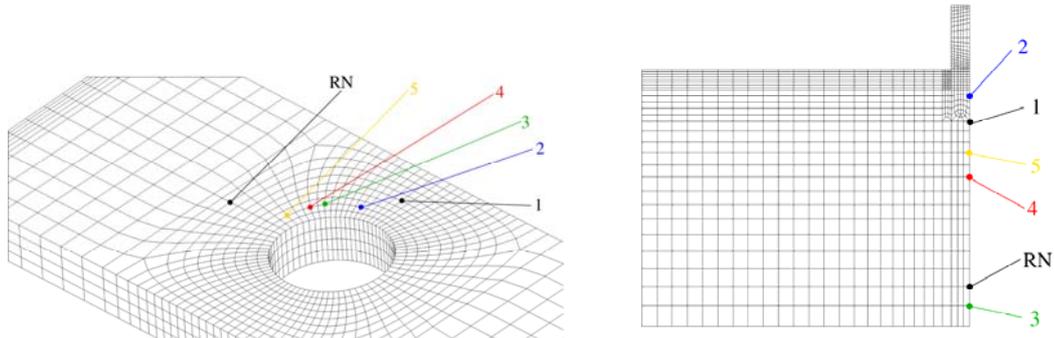


Figure 9: Lage des Relativknotens und der Verifikationsknoten auf dem FE-Modell des Zug- und Druckprobekörpers

Der endgültige Materialdatensatz wurde über eine iterative Strategie bestimmt, indem zunächst mit einem groben Netz, 'schnelleren' Elementen und entsprechenden numerischen Einstellungen eine Annäherung durchgeführt wurde. Die daraus resultierenden Parameter gingen dann als Startparameter in das nächstgenauere Modell ein, bis schließlich die unter jedem zuvor genannten Aspekt optimalen Einstellungen für die abschließende Identifikation verwendet worden sind. Es wurde ein hyperviskoelastisches Werkstoffmodell verwendet, wobei die Grundelastizität über ein Ogden-Modell abgebildet worden ist. Hinzu kommen drei bis vier Relaxationsterme zur Berücksichtigung des zeitabhängigen Verhaltens.

4 Verifikationen und Validierung

Die Ergebnisse der Parameteridentifikation werden über einen Vergleich der gemessenen und simulierten Kraft-Verschiebungsverläufe an ausgewählten Verifikationsknoten (fig. 9) verifiziert. Dabei werden je nach Versuch Vertikal-, Horizontal- und Radialverschiebungen betrachtet. Im Folgenden sind für alle vier Versuchsarten die Verifikationen für zwei unterschiedliche Verschiebungsrichtungen dargestellt. Dabei ist nochmals anzumerken, dass alle hierfür durchgeführten Simulationen mit einem einzigen Materialdatensatz durchgeführt wurden.

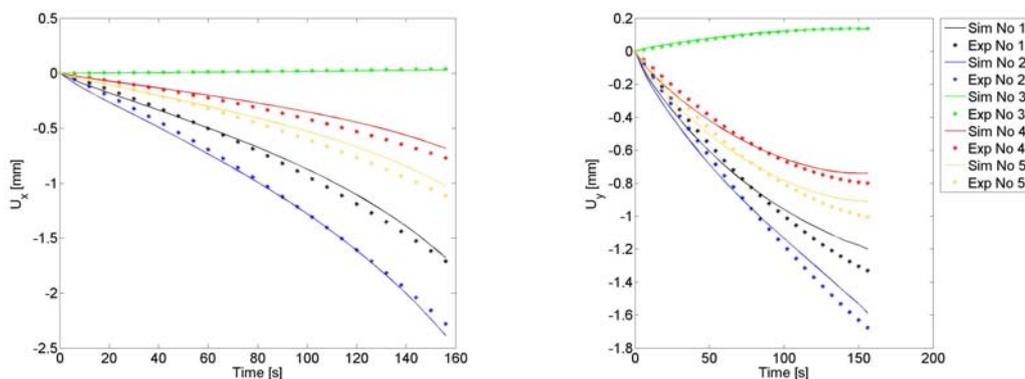


Figure 10: Relative gemessene und simulierte Längs- und Radialverschiebungen für ausgewählte Identifikationsknoten, quasistatischer Druckversuch

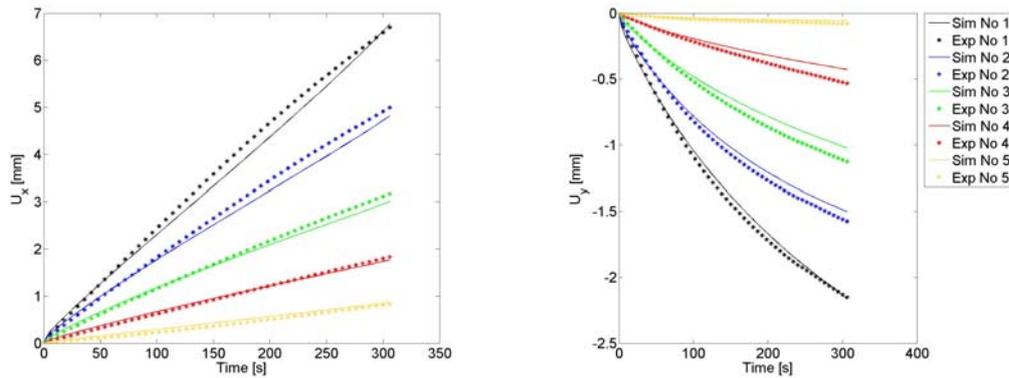


Figure 11: Relative gemessene und simulierte Längs- und Querverschiebungen für ausgewählte Identifikationsknoten, quasistatischer Zugversuch

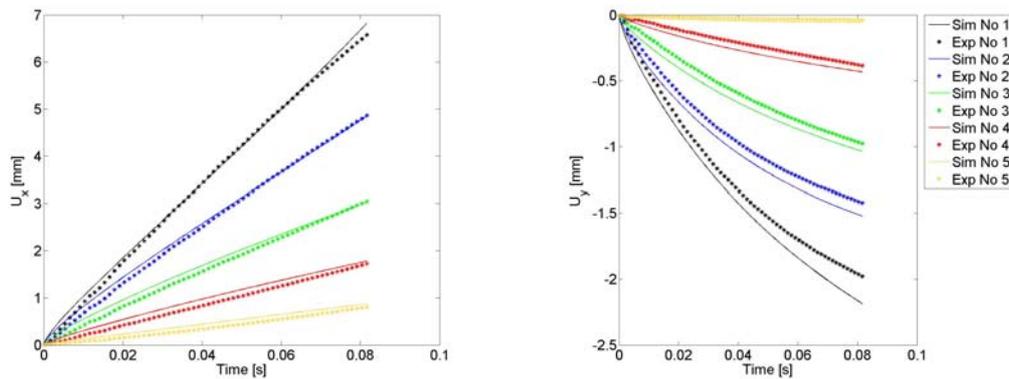


Figure 12: Relative gemessene und simulierte Längs- und Querverschiebungen für ausgewählte Identifikationsknoten, Zugversuch bei 0.3 m/s

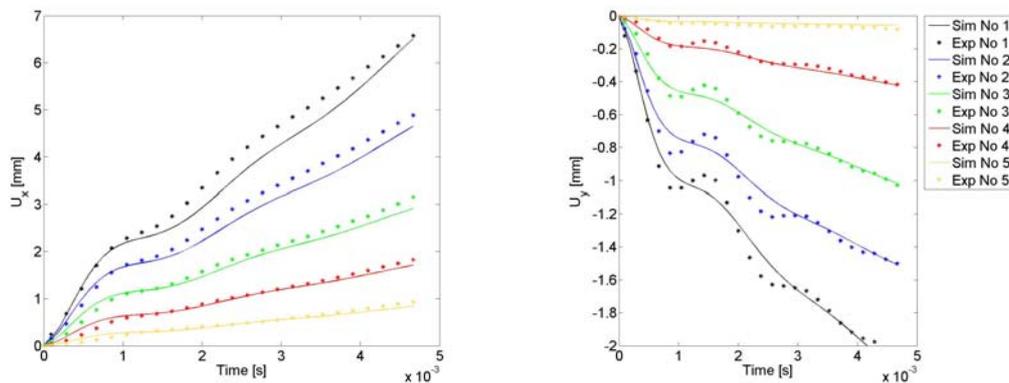


Figure 13: Relative gemessene und simulierte Längs- und Querverschiebungen für ausgewählte Identifikationsknoten, Zugversuch bei 5.0 m/s

Die Verifikationen zeigen, dass das verwendete hyperviskoelastische Stoffgesetz sehr gut geeignet ist, das mechanische Verhalten des betrachteten Elastomers qualitativ und quantitativ bis hin zu lokalen technischen Dehnungen von ca. 50% unter Druck- und ca. 100% unter Zugbelastung zu simulieren. Die simulierten inhomogenen Verschiebungen im Bereich des Loches des Zugprobekörpers sowie im Bereich der Ausbauchung des Druckprobekörpers, die aus dem mehrachsigen Spannungszustand resultieren, stimmen sehr gut mit den korrespondierenden experimentell gemessenen Verschiebungen überein. Dies gilt für das gesamte gemessene und simulierte Dehnratenspektrum. Um abschließend mit Sicherheit nachzuweisen, dass mit dem ermittelten Materialdatensatz realitätsnahe Simulationsrechnungen auch bei nicht für die Identifikation verwendeten Bauteilgeometrien und ggfs. höheren lokalen Dehnungen und/oder Dehnraten durchzuführen sind, ist es empfehlenswert, zusätzlich zu Verifikationen eine Validierung zu machen. Zur Veranschaulichung des qualitativen Einflusses der Dehnrates auf die Spannungsverteilung sind im Folgenden FEM-Plots der Zugproben bei gleicher Verformung aber drei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten dargestellt.

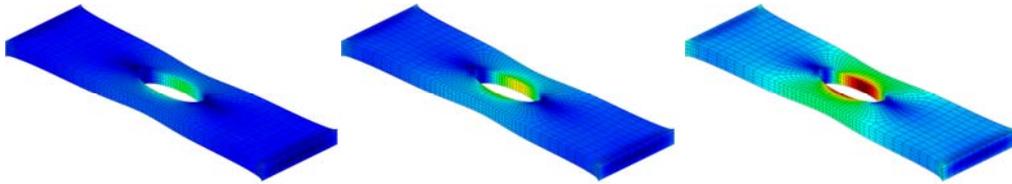


Figure 14: Spannungsverteilung bei quasistatischer Belastung (links), 0.3 m/s (Mitte) und 5.0 m/s (rechts), Einfluss der Dehnrage

Validierungen wurden anhand von Komponentenversuchen von Motorlagern am Fallturm durchgeführt. Durch die Variation von Fallhöhen und Fallgewichten kann damit ein breites Spektrum von dynamischen Lasten auf den Elastomeranteil der Lager aufgebracht werden. Die FEM-Simulation der entsprechenden Versuche zeigt bei Verwendung der identifizierten Materialparameter eine sehr gute Übereinstimmung von Simulations- und Versuchsergebnissen.

5 Fazit

Es stellt sich heraus, dass mit dem hier vorgestellten Verfahren alle wichtigen Aspekte der Materialmodellierung einer 3D-Bauteilsimulation von Elastomeren in geeigneter Weise berücksichtigt werden können. Die Verifikationen sowohl für drei unterschiedliche Abzugsgeschwindigkeiten im gelochten Zugversuch (quasistatisch bis 5 m/s) als auch für ausgeprägte Drucklasten bei langsamer Belastungsgeschwindigkeit liefern jeweils eine sehr gute Übereinstimmung gemessener und simulierter lokaler Verschiebungswerte. Im Vergleich zu den bisher verwendeten Materialparametern ergibt sich eine bessere Abbildung des Elastomerverhaltens. Dies gilt vor allem für die Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit des Elastomers. Da die Verifikationen und die Validierungen zu einem positiven Ergebnis führten, erfolgt nun der Einsatz der Materialparameter in der Crashberechnung bei Volkswagen.

6 References

- [1] R. Mahnen. Identification of Material Parameters for Constitutive Equations. Encyclopedia of Computational Mechanics, 2:637-655, Wiley, 2004.
- [2] B. Kleuter, A. Menzel, and P. Steinmann. Generalized Parameter Identification for Finite Viscoelasticity. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 196:3315-3334, 2007.
- [3] ABAQUS 6.9, Analysis User's Manual: 19.3.1
- [4] B. Kleuter, M. Bosseler. Materialprüfung und Kennwertermittlung für Drucker-Prager-Plastizität zur Simulation von PBT. „Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis“, Tagung Werkstoffprüfung, Bad Neuenahr, 2012
- [5] B. Kleuter, M. Bosseler. Parameteridentifikation für nichtlineare Materialmodelle in der FEM mittels optischer Verformungsanalyse. NAFEMS-Magazin 01/2009
- [6] M. Bosseler, B. Kleuter, R. Renz, P. Steinmann. Experiment and parameter identification for the simulation of compact and cellular PUR. Kautschuk Gummi, Kunststoffe, 11/2007: 597-607