

Parameterbestimmung eines hyperelastischen Materialgesetzes für einen Elastomer-Rollbalg

Ingo Grunow, Jean Lefèvre

IFA Composite GmbH

Abstract

The purpose of this investigation is to develop a stable and reliable hyperelastic material model for a rubber boot of a constant velocity (CV) joint. Uniaxial tensile test data and simple shear test data were approached to characterize the mechanical behavior. The measurement data were used to determine the parameters of the Ogden model by the reverse engineering method. Parameter variations have been analyzed in a sensitivity study. Furthermore a direct optimization with an adaptive response surface method was done to fit the stress strain curves to the experimental data using optiSLang version 5.0. The results of a fluid penetration analysis presented in this paper were obtained by using a two dimensional axis symmetric model. The results show an increased s-punch shaped deformation of the rubber boot caused by increasing a length change compensation of the CV joint and an additional fluid pressure load. Finally the deformation stops with self-contact at boot surface. This result correlates well with pneumatic experiments.

Keywords

Hyperelastic material, rubber boot, Ogden model, fluid pressure penetration, constant velocity joint

1 Einleitung

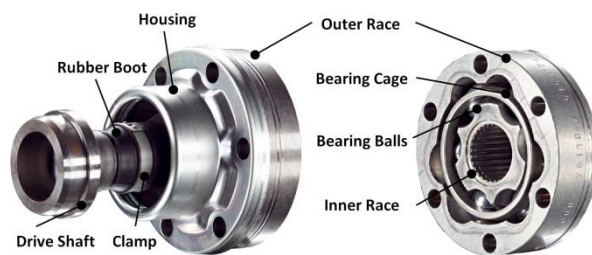


Abbildung 1: Gleichlaufgelenk der Fa. IFA

Die Firma IFA entwickelt und produziert Seiten- und Längsantriebswellen, sowie deren entsprechende Komponenten, wie Kreuz- und Gleichlaufgelenke. Je nach Einsatzgebiete gibt es verschiedene Gleichlaufgelenke.

Die Aufgabe dieser Gelenke besteht in der Übertragung von Drehmomenten, dem Beugen der Welle und in der Gewährleistung eines Längenausgleichs infolge der Kinematik des Antriebsstrangs. Sie haben den Vorteil, dass die Drehbewegung in allen Winkellagen gleichförmig übertragen wird. Gleichlaufgelenke bestehen im Wesentlichen aus den Stahlbauteilen: Nabe, Außenring, Kugelkäfig mit Kugeln, der abdeckenden Dichtkappe sowie dem Anschluss teil Zapfen und dem Dichtelement Elastomer-Rollbalg (Abb. 1). Der Rollbalg sitzt, mit einer Spannschelle befestigt, auf dem Zapfen sowie in der Krimpung der Dichtkappe und dichtet das Gleichlaufgelenk flexibel ab. Dadurch werden Verunreinigungen von außen auch bei Beugung und Längenausgleich verhindert und die Schmierung

des Gelenks gewährleistet. Bei positivem Längenausgleich wird der Rollbalg ausschließlich gestreckt, wohingegen bei negativem Längenausgleich des Gelenks der Rollbalg an der Innenseite der Dichtkappe sowie auf Zapfen und Nabe ohne Faltenbildung abrollt. Die Verringerung des Arbeitsraums führt gleichzeitig zu einer Druckerhöhung im Inneren des Gelenks. Diese kann unter Umständen zu einer „S-Schlag“-förmigen Verformung des Balgs führen (Abb. 2). Daraus ergeben sich unter Umständen Kontaktstellen mit den anderen Bauteilen, die die Rollbalgoberfläche schädigen können und letztendlich zum Versagen des Balgs und infolge dessen zu Schädigungen der weiteren Gelenkkomponenten führen. Ziel der Simulation ist eine zuverlässige Vorhersage der Rollbalg-Verformungen sowie eine Dichtheitsprüfung bei definierten Gelenkstellungen.



Abbildung 2: "S-Schlag"-förmige Verformung (links) und ideales Abrollverhalten (rechts) des Rollbalgs

2 Vorgehensweise

Für die Erarbeitung eines hyperelastischen Materialmodells wurden Messdaten aus zwei Materialversuchen verwendet und die dazu gehörigen Materialparameter durch *Curve Fitting* bestimmt.

2.1 Messdaten und Materialmodell

Für das *Curve Fitting* standen sowohl Zugversuchsdaten als auch Scherversuchsdaten (*Simple Shear Test*) in Form von Multihysterese-Plots zur Verfügung. Somit wird das Materialverhalten zum einen im eindimensionalen Spannungszustand und zum anderen im ebenen Verzerrungszustand beschrieben (Abb. 3). Geprüft wurden jeweils vier Amplituden mit je fünf Zyklen (Abb. 4). Der arithmetische Mittelwert aus Be- und Entlastungskurve des letzten Zyklus mit maximaler Amplitude bildet die jeweilige Referenzkurve. Es ist davon auszugehen, dass sich nicht elastische Effekte mit der Zykluszahl minimiert haben und sich ein quasistatischer Materialzustand eingestellt hat.

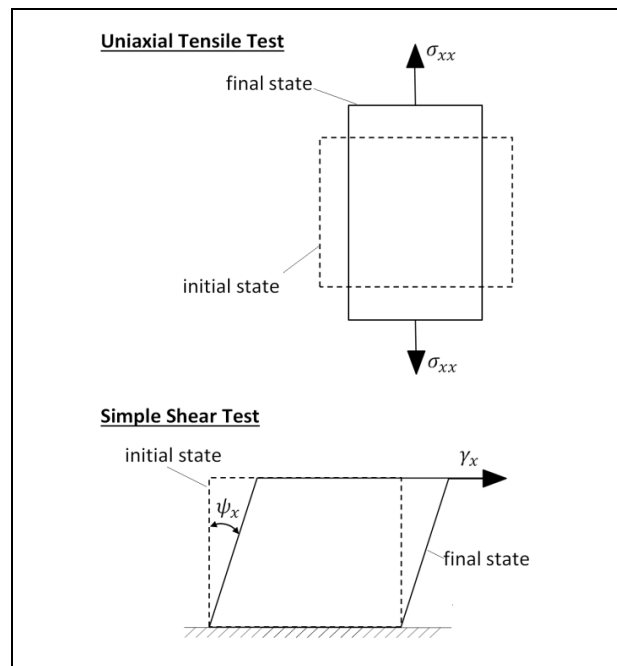


Abbildung 3: Schematische Darstellung einachsiger Zugversuch (oben) und einfacher Scherversuch (unten)

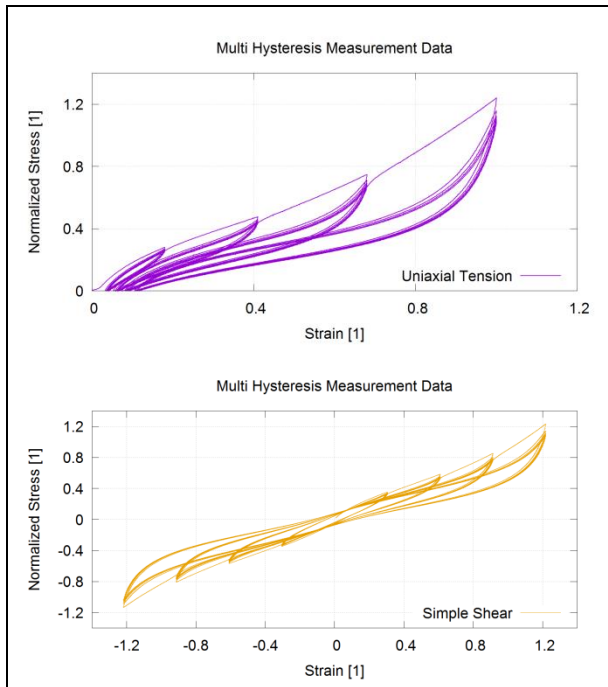


Abbildung 4: Messdaten von Zugversuch (oben) und einfachen Scherversuch (unten) [2]

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Bestimmung der Materialkonstanten μ_i und α_i für das Ogden-Modell dritter Ordnung. Dieses beschreibt die Verzerrungsenergie \widehat{W} in Abhängigkeit der räumlichen Dehnungen λ_i in Form von Gleichung (1).

$$\widehat{W} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (1)$$

Für die Volumendehnung J gilt die Annahme der Inkompressibilität nach Gleichung (2) siehe auch [1].

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (2)$$

Für Be- und Entlastung muss eine mittlere Kurve gefunden werden, die durch den Koordinaten-Ursprung geht. Im Bereich der plastischen Dehnung sollte diese eine möglichst geringe Steigung aufweisen. Die verschiedenen Materialeffekte können so mithilfe einer Kurve in entsprechender Weise abgebildet werden

(Abb. 5), da sich mit dem Ogden-Materialmodell dritter Ordnung in dieser Form nicht direkt unelastische Effekte, wie Hystereseschleifen und plastische Dehnungen, abbilden lassen.

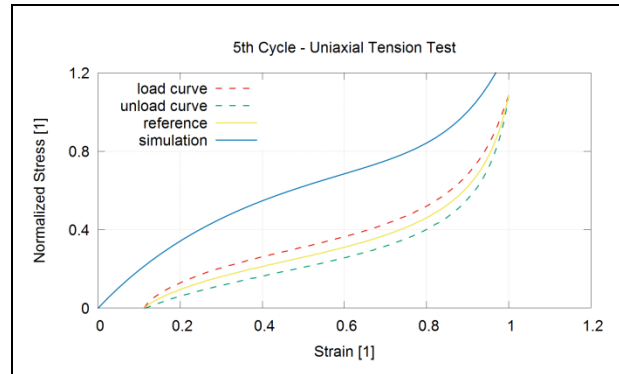


Abbildung 5: Hysterese der normalisierten Spannungsdehnungskurve für den Zugversuch

2.2 Parameteridentifikation

Die Beziehung zwischen Materialparametern und dem bei Belastung eintretenden Materialverhalten wurde invers mithilfe der Simulation der Materialtests (Abb. 6) ermittelt.

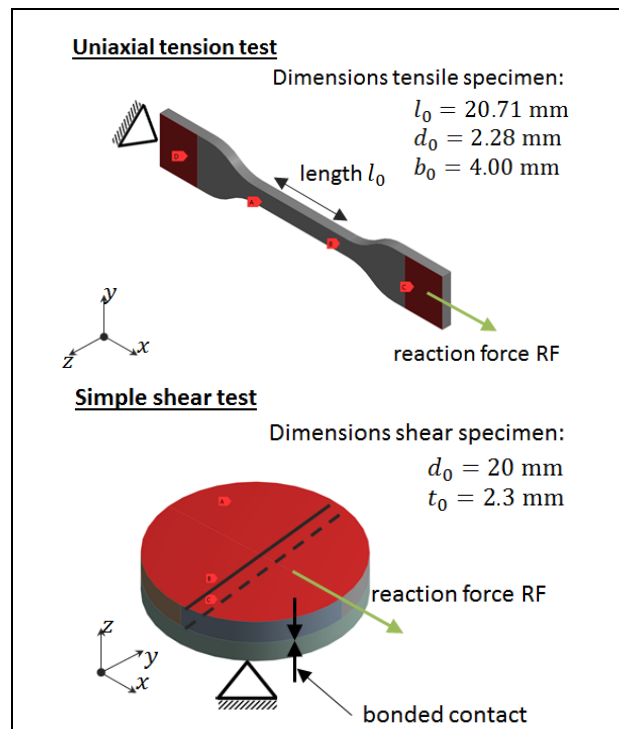


Abbildung 6: Simulationsmodelle Materialtests für Zugversuch (oben) und einfachen Schubversuch (unten)

In ANSYS Workbench Version 17.0 besteht keine Möglichkeit, experimentelle Testdaten aus einem Zugversuch und einem *Simple Shear Test* im *Curve Fitting* einzusetzen. Zur Parametervariation sowie zum Abgleich der Referenzkurven mit den Simulationsergebnissen wurden die Sensitivitätsstudie und die Optimierung (*Curve Fitting*) in optiSLang Full Version durchgeführt.

2.2.1 Sensitivitätsstudie

Die Sensitivitätsstudie dient dazu den Einfluss der einzelnen Parameter auf das Systemverhalten zu analysieren und deren Wertebereich für das anschließende *Curve Fitting* einzugrenzen (Tab. 1).

Tabelle 1: Parameterbereiche Sensitivitätsstudie

i	α_i	μ_i	a_i	b_i
1	2 ... 4.5	0 ... 0.3	1	1
2	1	50 ... 100	-2 ... -1.5	1
3	16.5 ... 20.5	1	1	-6 ... -4

In der Parameterdeklaration wurden die Parameter α_2 und μ_3 als abhängige Parameter nach (3.1) bzw. (3.2) definiert, um die Parametervariation mittels *Advanced Latin Hypercube Sampling* gleichmäßig über mehr als eine Größenordnung des Exponenten zu ermöglichen. Dadurch wurden nur noch die Wertebereiche der Exponenten variiert.

$$\alpha_i = 10^{a_i} \quad (3.1)$$

$$\mu_i = 10^{b_i} \quad (3.2)$$

Für ein stabiles physikalisches Materialverhalten sollten Parameter mit gleichen Indizes dasselbe Vorzeichen nach Bedingung (4) besitzen. [1]

$$\alpha_i \mu_i > 0 \quad (4)$$

Mithilfe der euklidischen Norm (*NRMS*) nach Gleichung (5) konnten die äquidistant diskretisierten Kurven verglichen werden.

$$NRMS = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (\sigma_{ref} - \sigma_{sim})^2}}{(\sigma_{max} - \sigma_{min})} \quad (5)$$

Dabei erwies sich die Prognosefähigkeit der Simulationsmodelle als sehr gut, was sich durch einen hohen, *Coefficient of Prognosis* (COP)-Wert für das Gesamtmodell ausdrückt (siehe Abb. 7, rote Markierung).

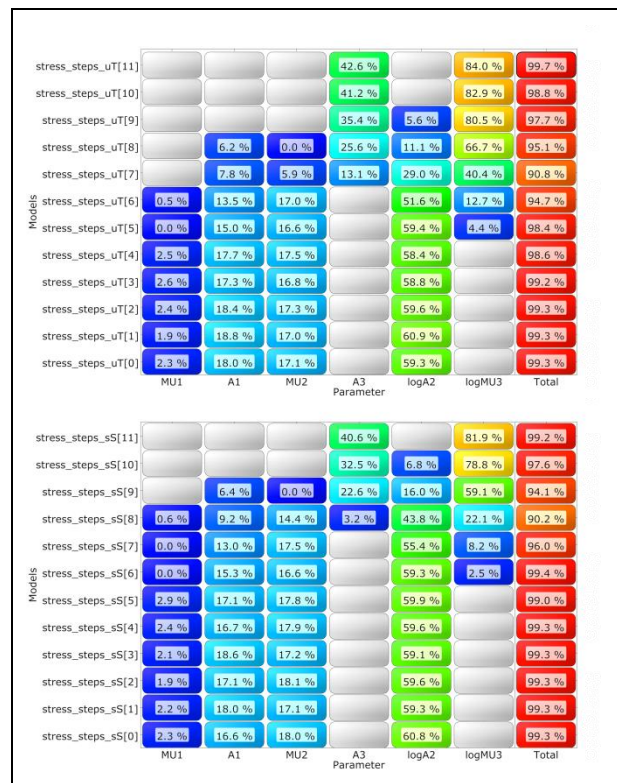


Abbildung 7: COP-Matrix der diskretisierten Signale für Zugversuch (oben) und Scherversuch (unten)

Eine Kopplung der signifikanten Parameter untereinander, zeigt sich durch die Summe der Einzel-COP, die den Einfluss der Input-Parameter aufzeigen. Einen maßgeblichen Einfluss, bis zu 60 % der Gesamtdehnung, haben

die Parameter α_2 in Form von $\log A_2$ und α_1 , wie auch μ_1 . Bei den letzten 40 % ist der Einfluss der Parameter μ_3 , hierbei in Form des Exponenten $\log MU_3$ und α_3 zunehmend. Für eine anschließende Optimierung werden die Parameterbereiche als ausreichend genau betrachtet, da Spannungs-Dehnungskurven der berechneten Parametervarianten die Referenzkurven umhüllen (Abb. 8).

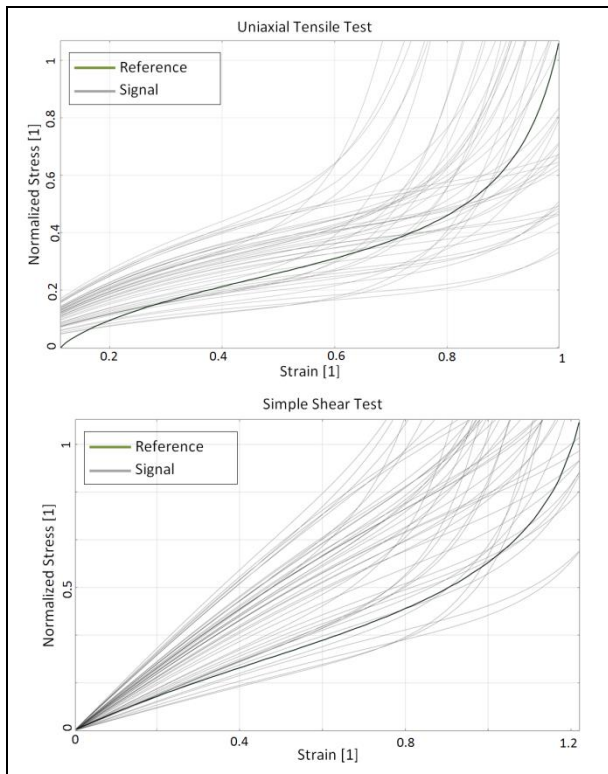


Abbildung 8: Spannung-Dehnungs-Kurven für Zugversuch (oben) und Scherversuch (unten)

2.2.2 Optimierung

Das *Fitten* der Spannungs-Dehnungs-Kurven aus den Materialtest-Simulationen auf die Referenzkurven wird als Optimierungsproblem definiert. Die Summe der einzelnen euklidischen Normen je Versuch bildet die Zielfunktion und soll nach Gleichung (7) minimiert werden. Die Messwerte des Zugversuchs lassen sich im Gegensatz zum einfachen Scherversuch relativ einfach und mit

hoher Genauigkeit ermitteln und wurden darum stärker gewichtet.

$$\sum_{i=1}^n NRMS = \alpha \cdot NRMS_1 + \beta \cdot NRMS_2 \quad (7.1)$$

$$\sum_{i=1}^n NRMS \rightarrow 0 \quad (7.2)$$

Das stark nicht-lineare Verhalten des Ogden-Materialmodells macht eine direkte Optimierung erforderlich. Eingesetzt wurde hierbei der ARSM-Algorithmus (*Adaptive Response Surface Method*). Ein Vergleich der Referenz-Kurven mit den Spannungs-Dehnungskurven des *Best Design*-Parametersatzes zeigt eine sehr gute Übereinstimmung für den Zugversuch über den gesamten Dehnungsbereich (Abb. 9). Für den einfachen Scherversuch wird eine gute Deckung der Kurven bis zu einer Dehnung von 1 erreicht.

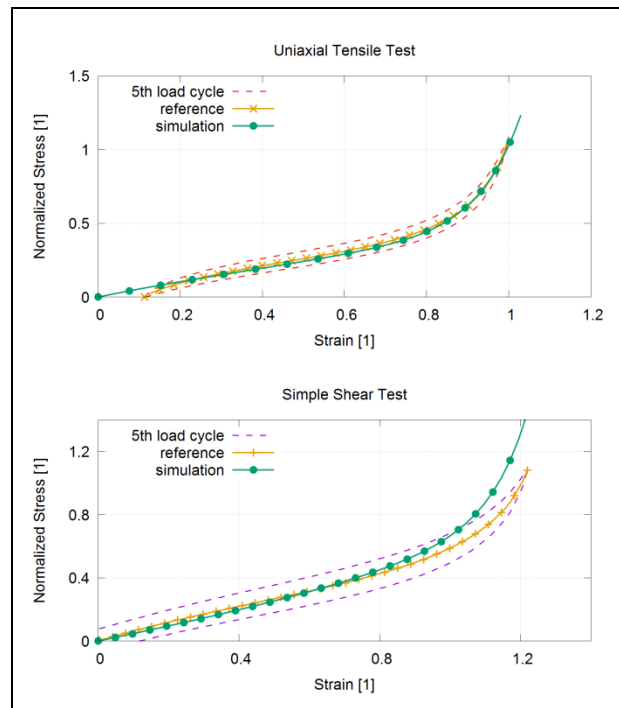


Abbildung 9: Vergleich der Materialtest-Simulation mit Messdaten für Zug- (oben) und Scherversuch (unten)

2.3 Axialsymmetrische 2D-Simulation eines Elastomer-Rollbalgs

Das Ogden-Materialmodell dritter Ordnung (Abb. 10) kann anschließend zur Analyse der Bauteilverformung verwendet werden. Ziel ist die zuverlässige Vorhersage von Kontaktstellen des Rollbalgs mit den übrigen Gelenkkomponenten, um Beschädigungen der Rollbalg-Oberfläche für im Betrieb auftretende Belastungen auszuschließen.

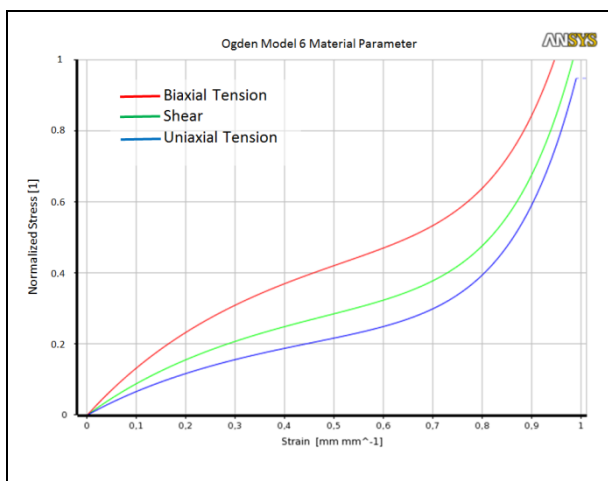


Abbildung 10: Normalisierte Spannungs-Dehnungskurven der Komponenten Zug (biaxial, uniaxial) und Scherung

Darüber hinaus wird mithilfe einer Fluidpenetration geprüft, ob der Kontaktdruck auf dem Wellen-Zapfen und in der Dichtkappe, die Dichtheit des Gelenks gewährleisten kann. Hierzu wird ein statisches, zweidimensionales, axialsymmetrisches Modell des Gleichlaufgelenks erstellt. Zur Vereinfachung wurde auf die Wälzkörper verzichtet und Kontaktsituationen der übrigen Gelenkkomponenten untereinander werden durch Randbedingungen ersetzt. Der nicht verformte Elastomer-Rollbalg (Abb. 11, oben) muss zunächst in die Einbaulage gebracht werden (Abb. 11, unten). Bei anschließendem negativen Längenausgleich und zusätzlich aufgebrachter Fluiddruck-Belastung konnte gezeigt werden, dass die Rollbalg-Verbindungen in der Dichtkappe und auf dem

Zapfen die Dichtheit des Gelenks gewährleisten (Abb. 12). Demzufolge sind die Dichtkappenkrümmung und die Spannschelle ausreichend dimensioniert, um den erforderlichen Kontaktdruck zu erzeugen. Allerdings zeigt sich an der Verformung des Rollbalgs mit zunehmenden Fluiddruck und Längenausgleich ein ausprägend werdender „S-Schlag“. Dieser wird letztlich durch den Selbstkontakt der Rollbalg-Oberfläche begrenzt (Abb. 13 unten).

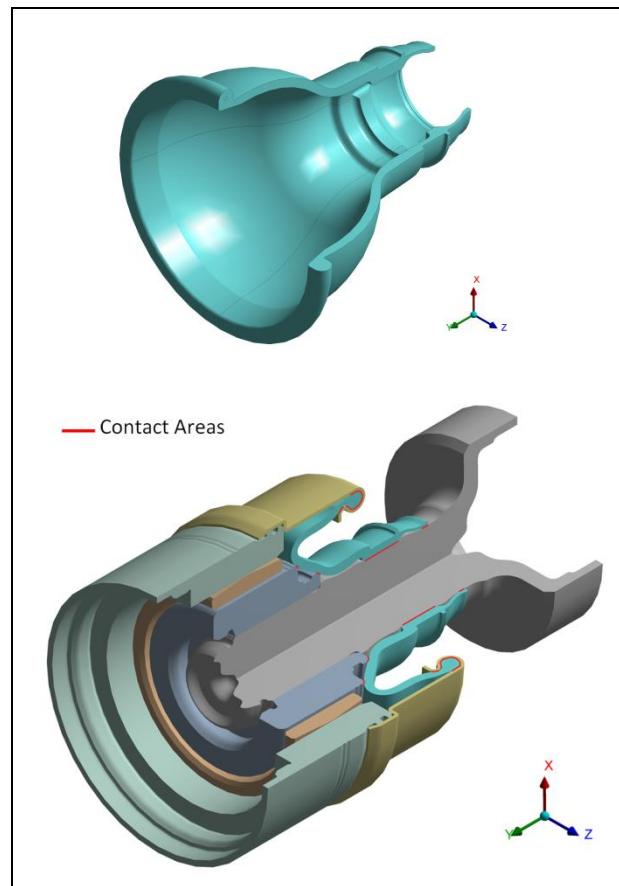


Abbildung 11: Rollbalg CAD-Teil (oben), 2D-axialsymmetrisches Modell mit eingebautem Rollbalg (unten)

Die maximalen Hauptdehnungen (Hencky-Dehnungen) erreichten einen Wert von $\varepsilon_{ux}^H = 0.52$. Für den Zusammenhang zwischen Ingenieurdehnungen und wahren Dehnungen gilt Gleichung (8) nach [3]. Mit einer Dehnung $\varepsilon = 0.68$ liegen die Verformungen im Bereich

der gefitteten Kurven, in denen diese eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten haben.

$$\varepsilon_{ux}^H = \ln(\varepsilon + 1) \quad (8)$$

Zur Verbesserung des Konvergenzverhaltens wurde ein nichtlineares Stabilisierungsverfahren zur Steuerung der Dissipation der Elementenergie eingesetzt. [4] Die Simulationsergebnisse der Rollbalg-Verformungen ließen sich gut mit Bauteilverformungen in pneumatischen Experimenten vergleichen, welche zu Validierungszwecken herangezogen wurden. [2]

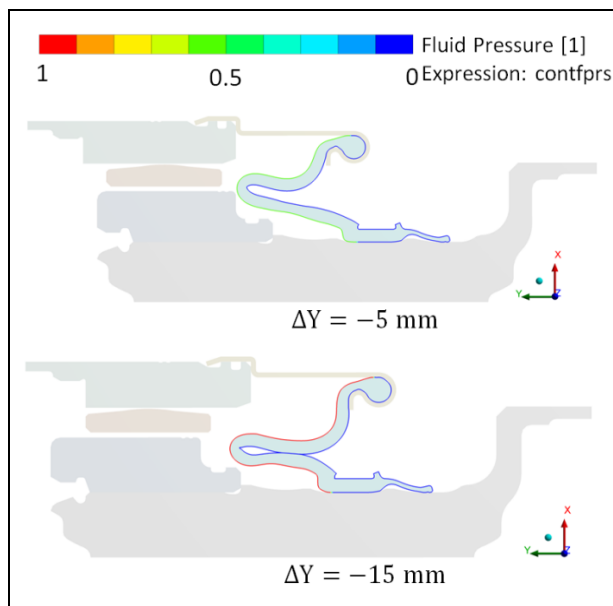


Abbildung 12: Fluiddruck in Abhängigkeit des axialen Längenausgleichs mit ausgeprägtem S-Schlag (unten)

3 Fazit

Mithilfe von optiSlang konnten sowohl Zugversuchsdaten als auch *Simple Shear*-Testdaten für das Ogden-Materialmodell dritter Ordnung berücksichtigt werden. Der gefundene Parametersatz zeigte für Zug- und einfachen Scherversuch eine sehr gute Übereinstimmung bis zu einer Dehnung von 1. Auch bei der Analyse der Rollbalg-Verformung in einem zweidimensionalen, axialsymmetrischen Modell

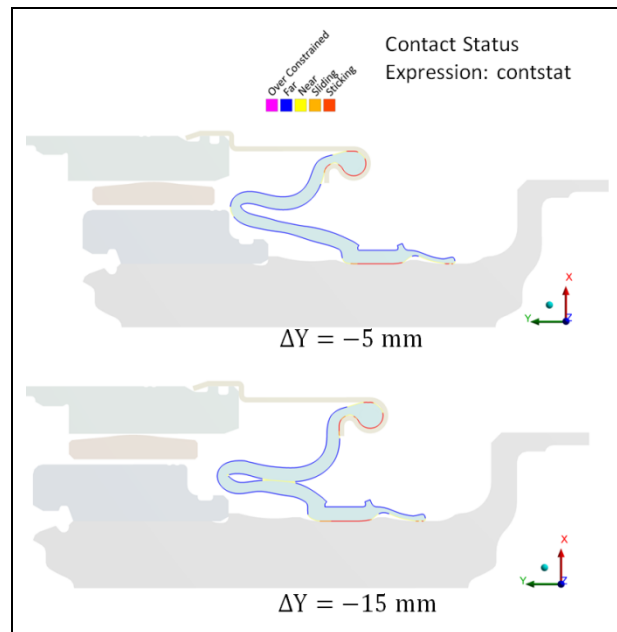


Abbildung 13: Kontaktsituation in Abhängigkeit des axialen Längenausgleichs und Fluiddrucks

entsprachen die maximalen Hauptdehnungen dieser Größenordnung. Die Funktion und die Verformungen des Rollbalgs konnten mithilfe einer Fluidpenetrations-Analyse nachgewiesen bzw. zuverlässig vorhergesagt werden. Die Vorgehensweise soll im Anschluss auf die Simulation der realen dreidimensionalen Gelenkgeometrie übertragen werden, um das Verformungsverhalten des Rollbalgs bei kardanischen Gelenkbewegungen untersuchen zu können.

4 Quellen

- [1] R. W. Ogden, G. Saccomandi, I. Sagura: Fitting hyperelastische models to experimental data, Computational Mechanics, Springer-Verlag, 2004
- [2] IFA: Interner Prüfbericht, 2015
- [3] H. Mang, G. Hofstetter: Festigkeitslehre, Springer Verlag, 2000 ISBN: 978-3-7091,3762-8
- [4] R. Cisloiu, J. Wang: Understanding Nonlinear Stabilization Features, ANSYS Solutions Magazine Volume 7, Issue , 2006