

Komplexe Kontakt- und Materialmodellierung am Beispiel einer Dichtungssimulation

Nico Nagl
CADFEM GmbH

Thema

Kontaktmodellierung und nichtlineares Materialverhalten

Zusammenfassung

In vielen industriellen Anwendungen sind Dichtungen im Einsatz. Vergleicht man den Preis mit dem eines Gesamtsystems, in denen Dichtungen verwendet werden, so sind Dichtungen verhältnismäßig günstig. Jedoch führt ein Versagen von Dichtungen meist zu schwerwiegenden Konsequenzen. Dichtungen sind komplexe Subsysteme und ihre Auslegung erfordert umfangreiche Kenntnisse im Bereich Materialmodellierung, Belastung und Versagenskriterien. Die heutige Simulationstechnologie ermöglicht einen parametrischen Workflow für die Berechnung des Verhaltens von Dichtungen mit den auftretenden Effekten wie nichtlinearem Materialverhalten, wechselnden Kontaktbedingungen und Flüssigkeitsunterwanderung bei Druck. Als ein führendes Simulationswerkzeug für diese physikalische Fragestellung wird ANSYS Mechanical für die Auslegung herangezogen. Desweiteren kann das Verständnis für das Produkt erhöht werden, was zu einer Verbesserung der Funktionalität und der Zuverlässigkeit führt. Versuchsdaten können als Spannungs-Dehnungskurven in ANSYS importiert werden, welche das Materialverhalten des hyperelastischen Werkstoffs mit traditionellen Materialmodellen wie Mooney Rivlin, Ogden and Yeoh oder einer neueren Formulierung, der Antwortfunktionsmethode, widerspiegeln. Robuste Kontakttechnologien beschleunigen die Simulation und Entwicklungszeit Berechnungszeiten und gewährleisten ein genaues Verhalten des Simulationsmodells. Insbesondere bei Dichtungen ist die druckbeaufschlagte Fläche in 2D und 3D Anwendungen von Bedeutung. ANSYS berechnet diese automatisch in Abhängigkeit des aktuellen Kontaktzustandes. Diese benutzerfreundliche Unterstützung führt zu einer höheren Genauigkeit des Simulationsergebnisses, da ein manuelles Schätzen der Druckflächen entfällt. Mit einem parametrischen und durchgängigen Ansatz innerhalb von ANSYS Workbench, beginnend bei der CAD-Geometrie, über die Vernetzung, Material- und Randbedingungen-definition und Lösung, können eine Reihe von Varianten in kurzer Zeit berechnet werden. Neben einem besseren Verständnis für das Produkt hilft dies dem Ingenieur Änderungen vorzunehmen, was zu exakten und aussagekräftigen Ergebnissen führt. Desweiteren kann der Einfluss von Unsicherheiten berücksichtigt werden, sodass der Berechnungsingenieur fernab von idealen Bedingungen robuste und Zuverlässige Dichtungen entwickeln kann.

Stichwörter

Hyperelastisches Material, Dichtung, Fluid Pressure Penetration, ANSYS, Nichtlinearität, Neo-Hooke, Mooney Rivlin, Ogden, Response Function, Materialmodelle;

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Aufgabenstellung.....	1
3	Modellierung.....	1
4	Modellierung hyperelastischer Materialien.....	4
4.1	Hyperelastizität.....	4
4.2	Materialmodelle mit isotrop hyperelastischem Verhalten.....	4
5	Simulationstechnologie Fluid Pressure Penetration.....	10
6	Ergebnisse.....	11
6.1	Lastschritt 1 – Zusammenbau	11
6.2	Lastschritt 2 – Fluiddruckbelastung	12
6.3	Lastschritt 3 – Radiale Verschiebung.....	12
7	Zusammenfassung.....	14
	Referenzen.....	15

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 3D-Ansicht des hydraulischen Dichtungssystems	2
Abbildung 2: Symmetrie und Einspannung am Dichtungssystem	2
Abbildung 3: Geometrische Penetration	3
Abbildung 4: Gelbe Fläche: Verschiebungsrandbedingung auf äußerer Zylinderfläche	3
Abbildung 5: Lineares und hyperelastisches Materialverhalten	4
Abbildung 6: Neo-Hooke Fitting	7
Abbildung 7: Mooney-Rivlin Fitting 2ter Ordnung	7
Abbildung 8: Mooney-Rivlin Fitting 3ter Ordnung	8
Abbildung 9: Mooney-Rivlin Fitting 5ter Ordnung	8
Abbildung 10: Ogden Fitting 3ter Ordnung	9
Abbildung 11: Fluid Pressure Last.....	10
Abbildung 12: Globale Ansicht des Verzerrungszustands der Dichtung nach Lastschritt 1.....	11
Abbildung 13: Detailansicht des Verzerrungszustands nach Lastschritt 1	12
Abbildung 14: Dehnungszustand der Dichtung nach Aufbringen des Fluiddrucks	12
Abbildung 15: Kontaktdruck zwischen Dichtring und Kolben nach radialer Verschiebung	13
Abbildung 16: Ansicht der höher belasteten Seite nach Lastschritt 3.....	13
Abbildung 17: Ansicht der entlasteten Seite nach Lastschritt 3.....	13
Abbildung 18: Fluiddruck der Kontaktelemente nach Lastschritt 3	14

1 Einleitung

Das Zusammenspiel von Gleitkomponenten und Dichtringen, welche zumeist aus hyperelastischen Materialien bestehen, ist bei der Auslegung von Bauteilen ein entscheidendes Kriterium für die Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit. Versagt die Dichtungskombination, so kann ein Versagen des gesamten Systems auftreten. Ein Beispiel hierfür ist die Challenger-Mission im Jahre 1986, bei der ein fehlerhafter O-Ring die Ursache für das Unglück war. Eine Voraussage der Dichtigkeit und somit einer Funktionssicherheit steht bei der Auslegung von Dichtkomponenten an oberster Stelle. Mithilfe von Simulationswerkzeugen, wie beispielsweise ANSYS Mechanical, können schon vor Herstellung von Prototypen Kenntnisse gewonnen werden, die eine Auslegung von Dichtungen und Systemen erleichtert und die Funktionalität garantiert.

In ANSYS Mechanical können Modelle mit hyperelastischen Materialverhalten berechnet werden. Hierfür stehen innerhalb der Simulationsumgebung State-of-the-Art-Materialmodell zur Verfügung, welche das Verhalten der Hyperelastizität abbilden.

2 Aufgabenstellung

Dichtungen werden in vielen Anwendungen eingesetzt. In diesem Dokument wird die Simulation, welche ein hydraulisches Kolbensystem auf Dichtigkeit untersucht, beschrieben. Ein Kolben wird gegenüber einem Zylinder mit einem Paket aus hyperelastischen Dichtring und Kunststoffring abgedichtet. Auf den Kolben wirkt Fluiddruck, der sich entlang des Spaltes zwischen Kolben und Zylinder ausbreitet, bis er auf das Dichtungspaket trifft und dieses verformt. Im Anschluss an die Druckausbreitung wird der Kolben mit einer seitlichen Last belastet. Dieser Lastschritt stellt beispielsweise ein Kippen eines ausgefahren Kolbens dar. Ziel ist es, eine Aussage über die Dichtigkeit nach Kippen des Kolbens treffen und somit Rückschlüsse auf die Funktionsfähigkeit ziehen zu können.

3 Modellierung

Die 3D FEM Berechnung des hydraulischen Systems wird mit einer statisch mechanischen Analyse durchgeführt. Das hydraulische System besteht aus

- einem Kolben (Stahl),
- einem Zylinder (Stahl),
- Gleitringen (PTFE),

- Dichtungsring (PTFE) und
- einem O-Ring (hyperelastisches Elastomer).

Die einzelnen Komponenten sind in Abbildung 1 dargestellt. Sie zeigt ein 3D-Halbmodell welches zur Berechnung des Lastszenarios verwendet wurde, mit Ausnutzung der Symmetrie.

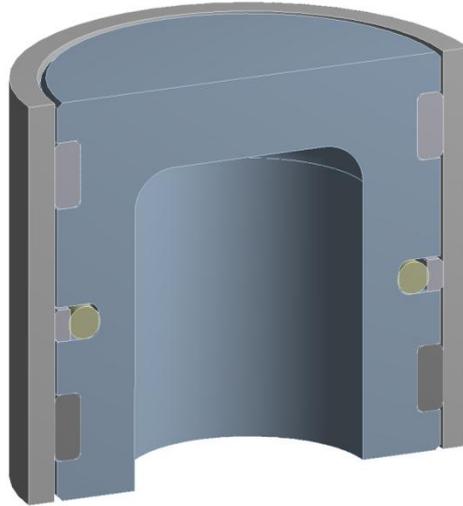


Abbildung 1: 3D-Ansicht des hydraulischen Dichtungssystems bestehend aus Kolben, Zylinder, O-Ring, Gleitringen und Dichtungsring

Um das symmetrische Verhalten des Modells abzubilden werden die Symmetriefflächen mit einer reibungsfreien Lagerung abgebildet. Außerdem wird der Kolben auf der Innenseite festgehalten, d. h. u_x , u_y und u_z sind null. Die Randbedingungen sind in Abbildung 2 zu sehen.

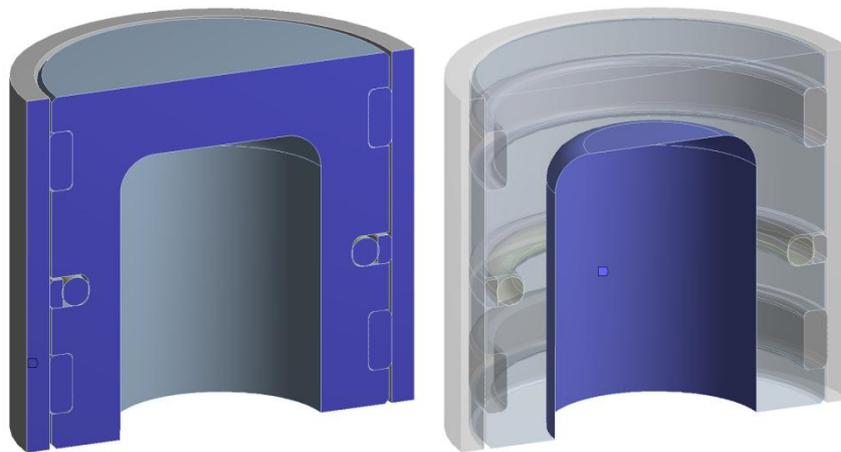


Abbildung 2: Links: Blaue Flächen sind als Symmetriefflächen definiert; rechts: blaue Fläche zeigt die Einspannung des Kolbens

Die Simulation besteht aus drei Lastschritten:

- Lastschritt 1: Zusammenbau
- Lastschritt 2: Fluiddruck von 100 bar
- Lastschritt 3: Radiale Verschiebung um 0,3 mm

Im ersten Lastschritt werden die einzelnen Komponenten zusammengebaut, sodass sich für den elastischen O-Ring bereits eine Deformation ergibt. Der Grund hierfür liegt in der geometrischen Penetration zwischen dem O-Ring und dem Dichtring bzw. Kolben, was in Abbildung 3 dargestellt ist.

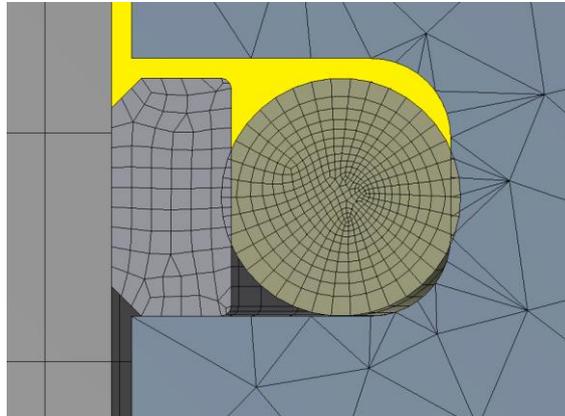


Abbildung 3: Detailansicht des Netzes; Geometrische Penetration zwischen dem O-Ring und dem Dichtring bzw. Kolben; gelb: Fluid

Im zweiten Lastschritt wird ein Fluiddruck von 100 bar auf die Oberseite des Kolbens gegeben, welcher sich entlang des freien Spaltes bis zum Dichtungspaket fortpflanzt und dieses verformt. In Abbildung 3 ist das Fluid schematisch gelb dargestellt. Der letzte Lastschritt stellt das Verkippen des Kolbens dar. Zu Beginn beträgt der Fluidspalt zwischen Kolben und Zylinder 0,5 mm. In diesem Lastschritt wird der Zylinder in radialer Richtung um 0,3 mm verschoben, sodass der Spalt auf der einen Seite kleiner und auf der gegenüberliegenden Seite größer wird. Außerdem werden das Dichtungspaket und die Gleitringe belastet bzw. entlastet, abhängig von der Belastungsseite. Die Verschiebung des Zylinders wird auf die äußere Fläche aufgebracht, was in Abbildung 4 zu sehen ist.

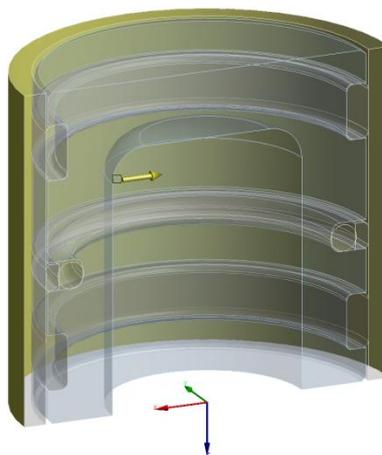


Abbildung 4: Gelbe Fläche: Verschiebungsrandbedingung auf äußerer Zylinderfläche

4 Modellierung hyperelastischer Materialien

4.1 Hyperelastizität

Hyperelastizität ist eine Materialnichtlinearität der Strukturmechanik, die das Verhalten von hochelastischem Material wie Gummi oder manchen Kunststoffen beschreibt. Hyperelastische Materialien verformen sich meist so sehr, dass Dehnungen von 100 % und mehr auftreten. Somit treten im Bauteil große Verformungen auf. Der Zusammenhang zwischen der Spannung und der auftretenden Dehnung ist dabei schon von Beginn an nichtlinear. Einen linear-elastischen Anteil wie beispielsweise bei Stählen, welcher durch das Hookesche Gesetz definiert werden kann, findet man bei hyperelastischen Materialien nur sehr selten. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve für ein lineares Material (beispielsweise Stahl im elastischen Bereich) und einen hyperelastischen Werkstoff ist in Abbildung 5 dargestellt.

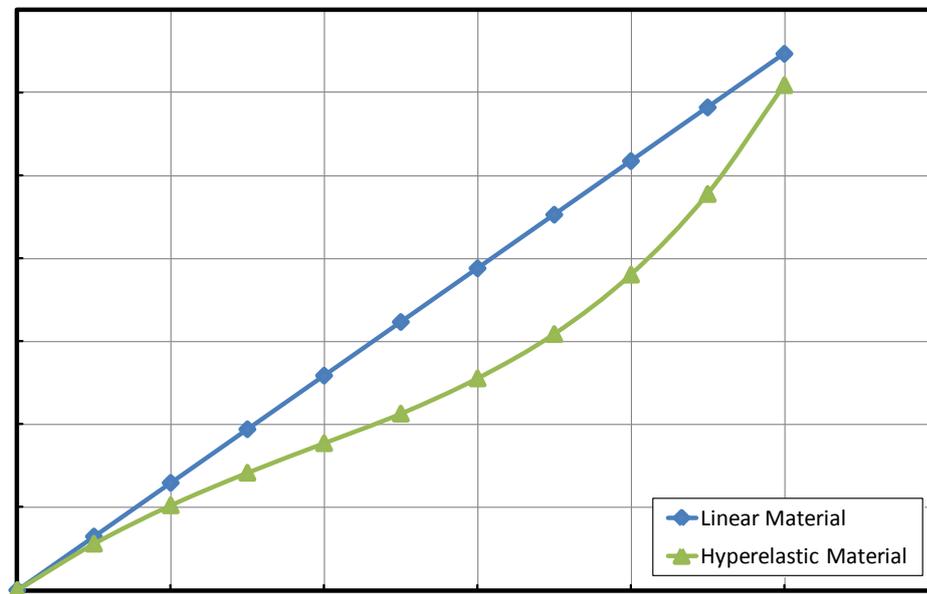


Abbildung 5: Lineares und hyperelastisches Materialverhalten

Hyperelastische Werkstoffe weisen ein inkompressibles, elastisches Materialverhalten auf, d. h., nach Entlastung können sie ihre ursprüngliche Form wieder annehmen. Bei derart großen Dehnungen reicht zur Bestimmung der Materialparameter die Betrachtung nur einer Belastungsart nicht mehr aus. Daher werden neben einachsigen Zug- und Druckversuchen auch biaxiale Zug- und Schubversuche durchgeführt. Das komplexe Werkstoffverhalten wird über die Formänderungsenergie-Dichte abgeleitet, die oft als Polynomansatz ausgedrückt wird.

4.2 Materialmodelle mit isotrop hyperelastischem Verhalten

Das hyperelastische Materialverhalten kann in der 3D FEM Simulation mithilfe von Materialmodellen abgebildet werden. Zur Beschreibung dieser Materialien wird ein Ansatz für die Formänderungsenergie oder Verzerrungsenergie W gemacht, die von den Invarianten I_1 , I_2 und I_3 abhängt [2]:

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

Die drei Invarianten werden durch die Streckungen λ , die als

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta u}{L_0} = 1 + \varepsilon_E \quad (2)$$

definiert und ε_E die sogenannten Ingenieurdehnungen sind, gebildet.

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Die Spannungen ergeben sich aus der Ableitung der Verzerrungsenergiefunktion nach der Verzerrungsmatrix [1]:

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \equiv 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}} \quad (4)$$

mit

S_{ij} = Komponenten des zweiten Piola-Kirchhoff Spannungstensors

W = Verzerrungsenergiefunktion

E_{ij} = Komponenten des Lagrange Dehnungstensors

C_{ij} = Komponenten des rechten Cauchy-Green Deformationstensors.

Die Verzerrungsenergiefunktion W wird mit einem mathematischen Materialmodell approximiert. Heutzutage steht dem Anwender eine Reihe von Modellen zur Verfügung, welche größtenteils auf dem Polynomansatz

$$W = \sum_{i+j=1}^n c_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^n \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k} \quad (5)$$

basieren. Hierzu zählen Neo-Hooke, Mooney Rivlin, Ogden oder Yeoh. Sind Messdaten eines hyperelastischen Materials, so können die Materialmodelle auf die Daten gefittet werden. Mit den resultierenden Koeffizienten und dem zugehörigem Materialmodell wird schließlich das hyperelastische Materialverhalten approximiert. Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung einer Antwortfunktion, mit der die Spannungs-Dehnungskurven einer Probe direkt verwendet werden, ohne einen Approximationsansatz durch eine Polynomfunktion zu wählen.

Das einfachste hyperelastische Materialmodell ist Neo-Hooke, das nur aus zwei Parametern besteht und sich aus der Polynomform ableitet, in dem die Parameter $n=1$, $c_{01}=0$ und $c_{10}=\mu/2$ sind.

$$W = \frac{\mu}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{d} (J - 1)^2 \quad (6)$$

Die Verzerrungen sollten im uniaxialen Fall 30 % nicht überschreiten. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über den Anwendungsbereich der einzelnen hyperelastischen Materialmodelle.

Model	Applied Strain Range [2]
Neo-Hookean	Up to 30 %
Mooney-Rivlin	< 100 % (2nd + 3rd order) < 200 % (5th + 9th order)
Ogden	Up to 700 %
Yeoh	< 300 %
Polynomial	< 300 %

Ein weiteres Materialmodell stellt die Mooney-Rivlin-Familie dar. Es gibt zwei-, drei-, fünf- und neun-Terme Mooney-Rivlin Materialmodelle. Je mehr Terme das Materialverhalten beschreiben, desto besser können hohe Dehnungen beschrieben werden. Das zwei-Term Mooney-Rivlin Modell erhält man aus der Polynomform für $n=1$, was wie folgt lautet:

$$W = c_{10}(\bar{I}_1 - 3) + c_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2. \quad (7)$$

Ein Materialmodell, welches Dehnungen bis ca. 700 % sehr gut abbilden kann ist Ogden. Die Verzerrungsenergiefunktion für das Ogden Modell lautet

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{\alpha_i} \left(\bar{\lambda}_1^{-\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{-\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{-\alpha_i} - 3 \right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} (J - 1)^{2i} \quad (8)$$

mit den Parametern α_i .

Zur Bestimmung der Parameter für die jeweiligen hyperelastischen Materialmodelle bietet ANSYS die Möglichkeit eines Curve Fittings. Hyperelastisches Curve Fitting ist ein Werkzeug, mit dem die Materialkonstanten auf Grundlage von experimentellen Daten für das Modell bestimmt werden. Bei den Materialmodellen Neo-Hooke und Mooney Rivlin wird ein lineares und bei Ogden ein nichtlineares Fitting durchgeführt. Im nichtlinearen Fall sind Anfangsparameter notwendig.

Für die Berechnung des hydraulischen Systems mit dem hyperelastischen O-Ring stehen Messdaten zur Verfügung, welche in ANSYS eingelesen werden. Anschließend wird ein Materialmodell ausgewählt und ein Fitting durchgeführt. Die Abbildungen 6 bis 10 zeigen die Datenpunkte und die mit dem jeweiligen Materialmodell erstellten Kurven, um ein uniaxiales, biaxiales und Schubspannungsmaterialverhalten abzubilden. Die Abbildung 6 zeigt ein Fitting mit dem einfachsten Materialmodell Neo-Hooke. Hier ist zu erkennen, dass im Bereich bis zu einer Dehnung von 0,3 das Materialverhalten akzeptabel abgebildet werden kann. Für größere Dehnungen ist dieses Modell nicht geeignet.

Vergleicht man Kurven mit dem Mooney-Rivlin-Ansatz miteinander, (Abbildungen 7 bis 9), so erkennt man, dass sich die Kurven mit steigender Anzahl an Termen immer näher an die Messdaten annähern. Eine hohe Genauigkeit kann mit dem 5-Term-Mooney-Rivlin-Modell erzielt werden. In Abbildung 7 ist das nichtlineare Fitting mit dem Ogden-Modell dargestellt. Vergleicht man das 5-Term-Mooney-Rivlin-Fitting mit dem Ogden-Fitting, so können nur geringfügige Unterschiede festgestellt werden.

Für die Simulation des hydraulischen Systems wird das hyperelastische Verhalten des O-Rings mit dem 5-Term-Mooney-Rivlin-Materialmodell abgebildet, da die gefitteten Kurven eine ausgezeichnete Deckung mit den experimentellen Daten aufweisen.

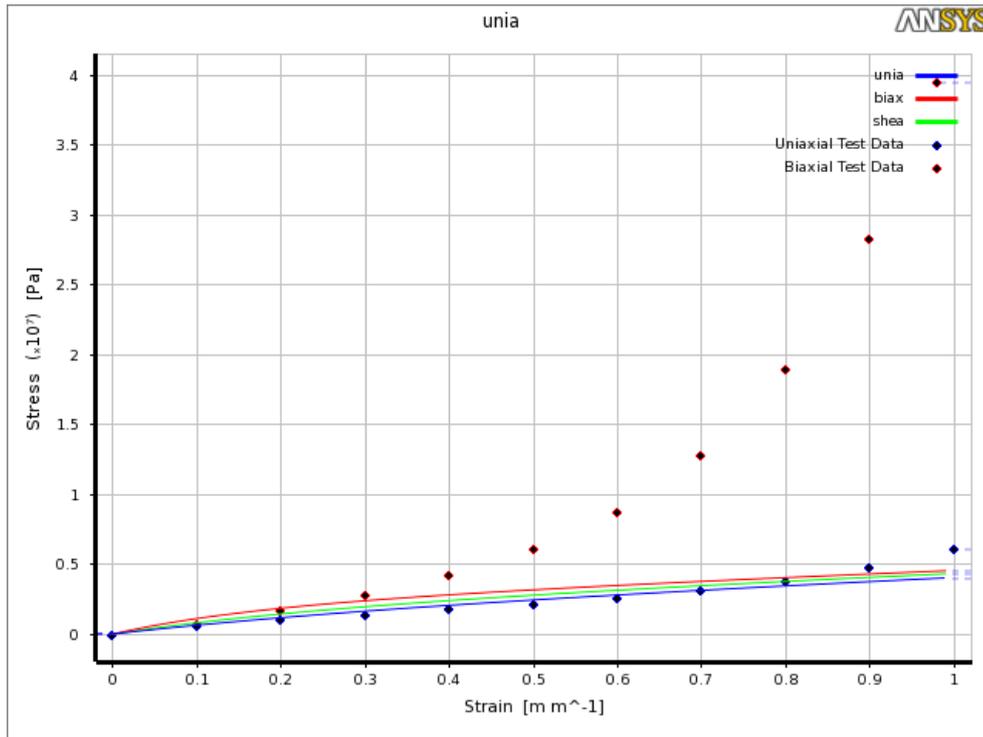


Abbildung 6: Neo-Hooke Fitting

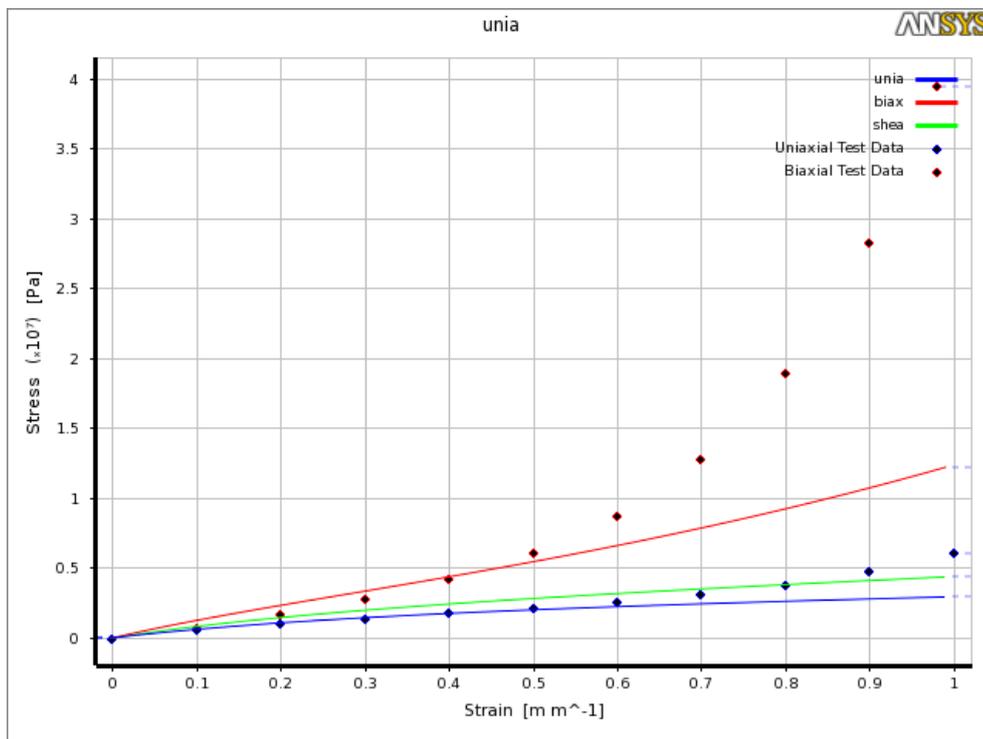


Abbildung 7: Mooney-Rivlin Fitting 2ter Ordnung

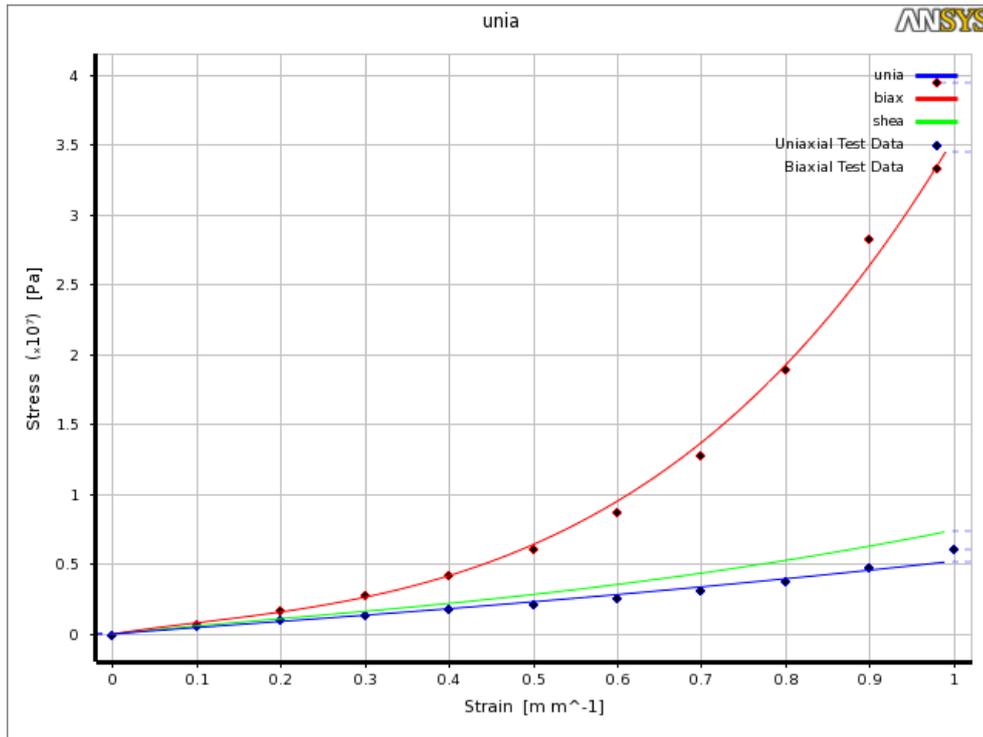


Abbildung 8: Mooney-Rivlin Fitting 3ter Ordnung

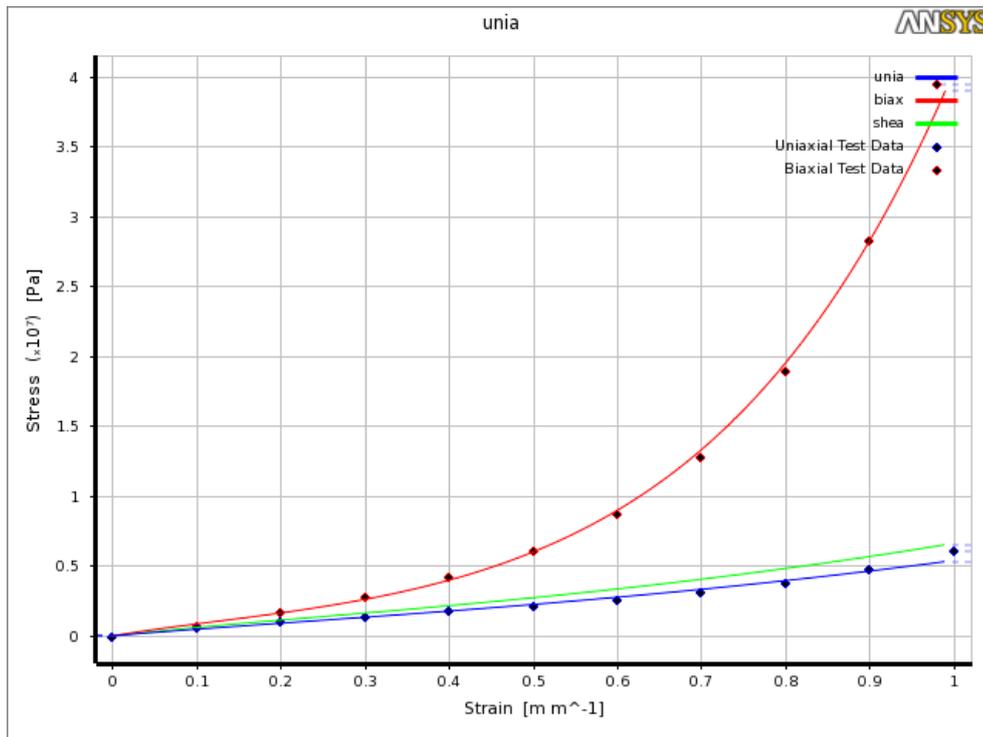


Abbildung 9: Mooney-Rivlin Fitting 5ter Ordnung

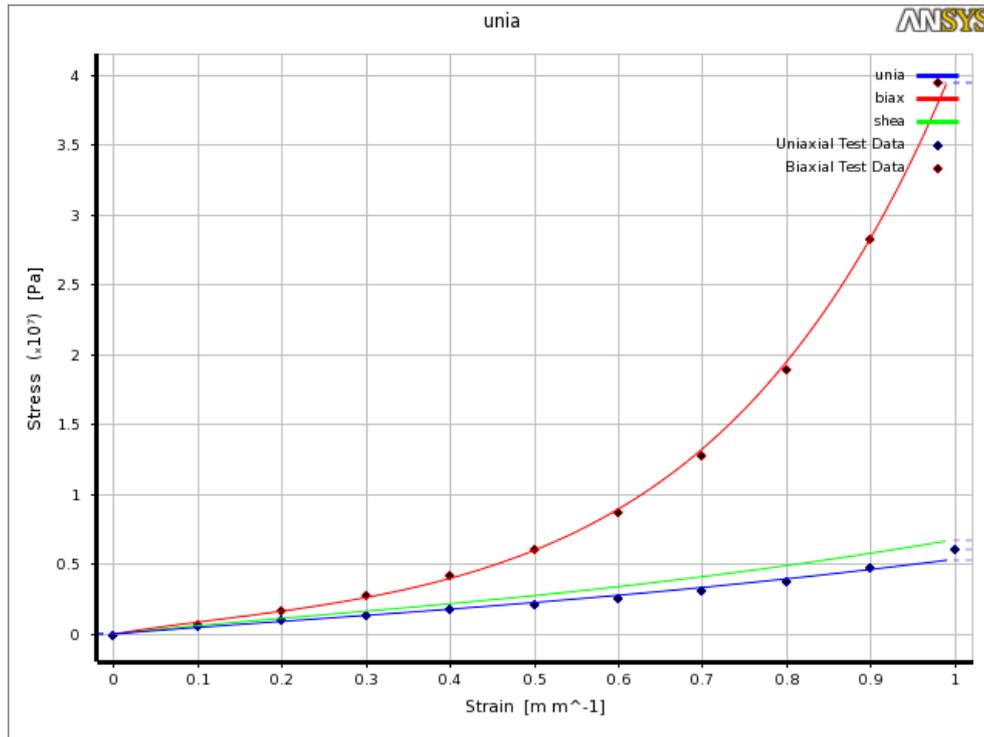


Abbildung 10: Ogden Fitting 3ter Ordnung

Eine Ausnahme zu den üblichen Materialmodellen stellt die Response Function Methode dar. Das „Modell“ der Response Functions beruht auf der näherungsweise Ermittlung der Ableitungen der Verzerrungsenergiefunktion nach den Invarianten I_1 und I_2 . Der allgemeine Spannungszustand hyperelastischer, inkompressibler Materialien ist durch

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + dev \left[2 \frac{\partial W}{\partial I_1} b_{ij} - 2I_3 \frac{\partial W}{\partial I_2} b_{ij}^{-1} \right] \quad (9)$$

gegeben [1].

δ_{ij} = Kronecker delta ($\delta_{ij} = 1, i = j; \delta_{ij} = 0, i \neq j$)

p = Druck

b_{ij} = linker Cauchy-Green Deformationstensor

Zusätzlich gilt bei volumetrischer Deformation

$$p = \frac{\partial W}{\partial J}. \quad (10)$$

Sind die Ableitungen (Response Functions) W_{I_1} , W_{I_2} und W_J bekannt bzw. können aus experimentellen Daten bestimmt werden, sind auch die Spannungen berechenbar. Die Ableitungen W_{I_1} und W_{I_2} (und W_J) sind dabei im Allgemeinen Funktionen der beiden Invarianten I_1 und I_2 (und J). Die deviatorischen Spannungen erhält man aus der Deformation $W_J = \frac{\partial W}{\partial J}$ und den Ableitungen des elastischen Potentials $W_{I_1} = \frac{\partial W}{\partial I_1}$ und $W_{I_2} = \frac{\partial W}{\partial I_2}$. Diese Ableitungen werden Antwortfunktionen (Response Functions) genannt. Für isotrope Hyperelastizität können sie analytisch bestimmt werden. Man kann sie jedoch ebenfalls aus den Messdaten erhalten, in dem die Parameter der Potentialfunktionen auf die Messdaten gefittet werden.

Nach den Gleichungen [1]

$$\sigma_{11} = 2(\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1}) \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^{-1} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (11)$$

für eine uniaxiale Zugbelastung,

$$\sigma_{11} = 2(\lambda_1^2 - \lambda_1^{-4}) \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (12)$$

für eine biaxiale Zugbelastung und

$$\sigma_{11} = 2(\lambda_1^2 - \lambda_1^{-2}) \left[\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \right] \quad (13)$$

reiner Schubbeanspruchung besteht ein Zusammenhang zwischen Spannung, Deformation und den Antwortfunktionen. Die experimentellen Daten beinhalten Informationen über gemessene Deformationen und Spannungen. Die einzige Unbekannte ist die Gleichung für die Antwortfunktionen. Die volumetrische Antwortfunktion bekommt man aus Gleichung (10) entweder analytisch oder aus den Messdaten, in dem man das Volumenverhältnis dem Druck gegenüber stellt. Aus den Versuchsdaten kann der Druck ermittelt werden, was zur volumetrischen Antwortfunktion führt. Somit stehen alle Größen zur Verfügung und die Spannung kann berechnet werden.

5 Simulationstechnologie Fluid Pressure Penetration [1]

Die Fluid Pressure Penetration Technologie simuliert ein Fortschreiten von Fluid bzw. Luft aufgrund der aktuellen Kontaktsituationen. In diesem speziellen Fall wird ein Ausbreiten des Öls auf der Oberseite des Kolbens bis zum Dichtungspaket simuliert.

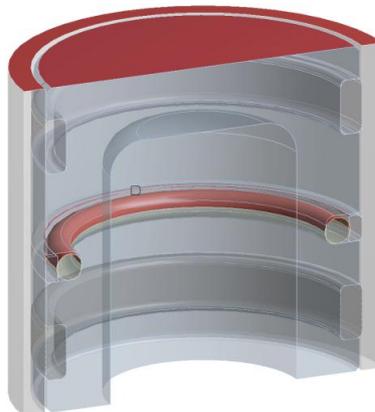


Abbildung 11: Rote Flächen: Startpunkte für Fluid Pressure Last

Die Ausbreitung des Fluiddrucks erfolgt von zuvor festgelegten Startpunkten bzw. Flächen. In Abbildung 11 sind diese rot dargestellt. In diesem Bereich wird die Kontaktsituation untersucht. Ist der Kontaktdruck an den angrenzenden Kontaktelementen niedriger als der aufgeprägte Druck von 100 bar, so pflanzt sich der Fluiddruck weiter fort. Dieser Vorgang wiederholt sich solange bis der Kontaktdruck der Kontaktelemente den aufgeprägten Druck von 100 bar überschreitet und die Propagation stoppt. Ein entscheidender Vorteil dieser Technologie gegenüber einer manuellen Definition des Fluiddruckbereichs ist, dass vor Rechnungsbeginn nicht festgelegt werden muss, in welchem Bereich der Fluiddruck anliegt. Das Erkennen des Kontaktstatus mit dem dazugehörigen Kontaktdruck und ein Fortschreiten des Fluiddrucks erfolgt vollautomatisch.

Ändern sich die Kontaktbedingungen zwischen dem O-Ring, der Dichtung, dem Kolben und dem Zylinder so wird der Fluiddruck mit der dazugehörigen Oberfläche automatisch angepasst. Wird beispielsweise der O-Ring bei Belastung mit dem Fluiddruck deformiert, sodass sich die Kontaktsituation von „offen“ auf „geschlossen“ ändert, so wirkt der Fluiddruck jetzt auf eine andere Oberfläche, was Auswirkung auf den Fluiddruck hat. Somit ist ein iteratives Vorgehen zur Bestimmung der Oberfläche notwendig, was bei Anwendung der Fluid Pressure Penetration Technologie automatisch passiert.

6 Ergebnisse

6.1 Lastschritt 1 – Zusammenbau

Im ersten Lastschritt erfolgt der Zusammenbau des Kolbensystems, d. h. die geometrische Penetration, hervorgerufen durch den O-Ring, wird minimiert. In der Abbildungen 12 sind das Dichtungspaket und die Gleitringe nach dem 1. Lastschritt zu sehen. Die Abbildung 13 zeigt eine detaillierte Darstellung des Dichtungspakets. Der O-Ring wurde zusammengedrückt und begrenzt zusammen mit dem Dichtring den Fluidbereich.

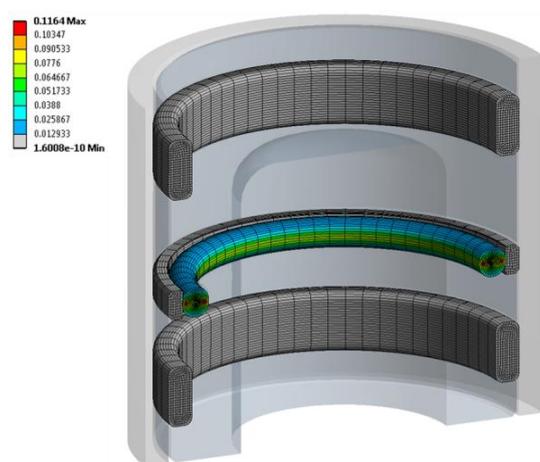


Abbildung 12: Globale Ansicht des Verzerrungszustands für die hyperelastische Dichtung nach dem 1. Lastschritt

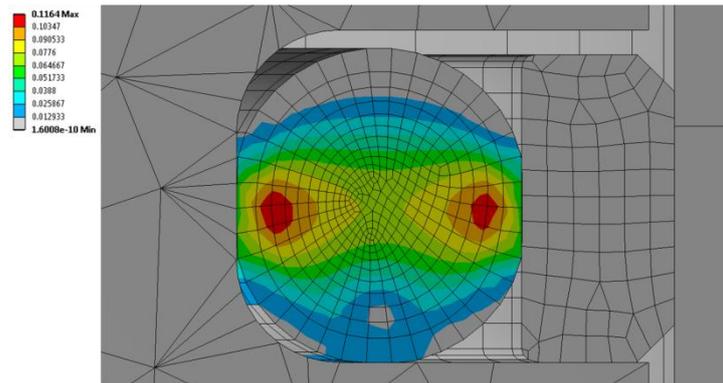


Abbildung 13: Detailansicht des Verzerrungszustands für die hyperelastische Dichtung nach dem 1. Lastschritt

Nach dem Zusammenbau betragen die auftretenden Dehnungen am hyperelastischen O-Ring ca. 11 Prozent und sind gleichmäßig über den Umfang verteilt, was in Abbildung 12 erkennbar ist.

6.2 Lastschritt 2 – Fluidruckbelastung

Im zweiten Lastschritt wird der Fluidruck von 100 bar aufgebracht. Der Fluidruck breitet sich von den zuvor festgelegten Startpunkten (siehe Abschnitt 5 Fluid Pressure Penetration), abhängig von der aktuellen Kontaktsituation aus und komprimiert den hyperelastischen O-Ring weiter, welcher sich aufgrund des wirkenden Drucks an die Nutform anpasst und den Dichtring an die Kolbenwand drückt. In Abbildung 14 ist eine detaillierte Darstellung des O-Rings und des Dichtrings zu sehen. Die maximalen Dehnungen des O-Rings betragen 41 Prozent.

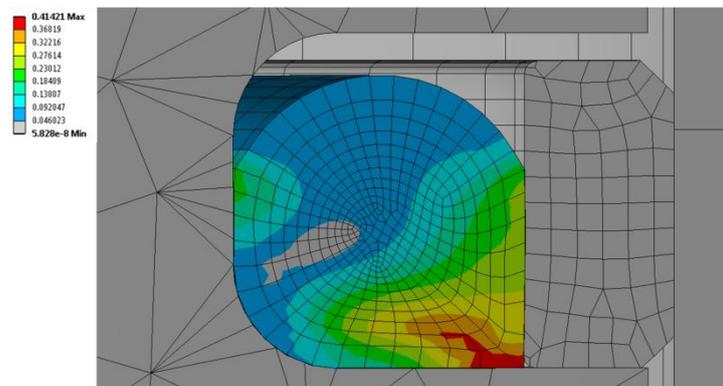


Abbildung 14: Dehnungszustand der hyperelastischen Dichtung nach Aufbringen des Fluidrucks

6.3 Lastschritt 3 – Radiale Verschiebung

Im letzten Lastschritt wird der Zylinder um 0,3 mm radial verschoben, was ein Kippen des Kolbens im ausgefahren Zustand simulieren soll. Durch die einseitige Belastung ändert sich die Druckverteilung zwischen den Bauteilen, sodass eine Seite weiter belastet wird, wohingegen die gegenüberliegende Seite entlastet wird. In Abbildung 15 ist der Verlauf der Kontaktdrücke zwischen dem Dichtring und dem Kolben dargestellt.

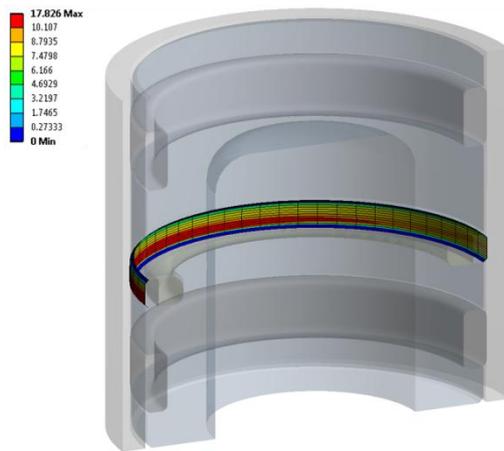


Abbildung 15: Kontaktdruck zwischen dem Dichtring und dem Kolben nach einer radialen Verschiebung

Die einseitige Belastung hat zur Folge, dass auf der belasteten Seite der O-Ring komprimiert wird und die Dehnungen gegenüber dem Lastschritt 2 zunehmen (Abbildung 16). Auf der entlasteten Seite gibt der O-Ring nach und folgt der Bewegung (Abbildung 17).

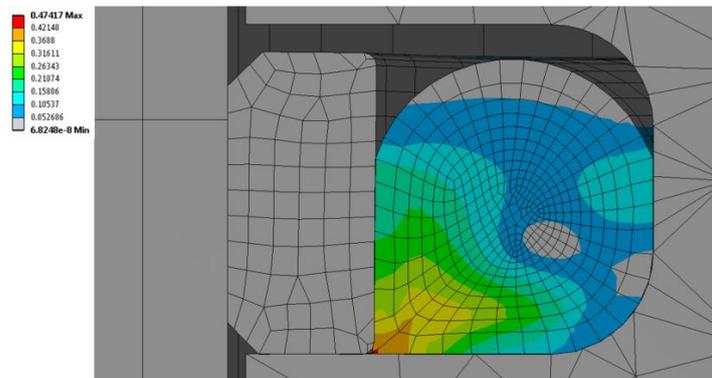


Abbildung 16: Ansicht der höher belasteten Seite der hyperelastischen Dichtung nach der radialen Verschiebung; Der Spalt zwischen Kolben und Zylinder verkleinert sich auf 0,2 mm.

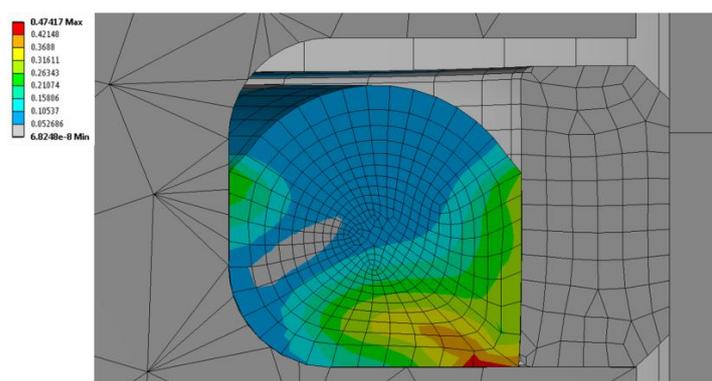


Abbildung 17: Ansicht der entlasteten Seite der hyperelastischen Dichtung nach der radialen Verschiebung; Der Spalt zwischen Kolben und Zylinder vergrößert sich um 0,3 mm auf 0,8 mm

Es treten maximale Dehnungen von 47 Prozent auf. In Abbildung 18 ist der Fluiddruck der Kontaktelemente dargestellt. Der aufgebrauchte Druck von 100 bar liegt nur bis zum Dichtungspaket an. Die Funktionsfähigkeit des hydraulischen Systems kann gewährleistet werden, da die Kombination aus O-Ring und Dichtung vollständig abdichtet und ein Fortschreiten des Drucks und ein dadurch resultierender Druckabfall vermieden wird.

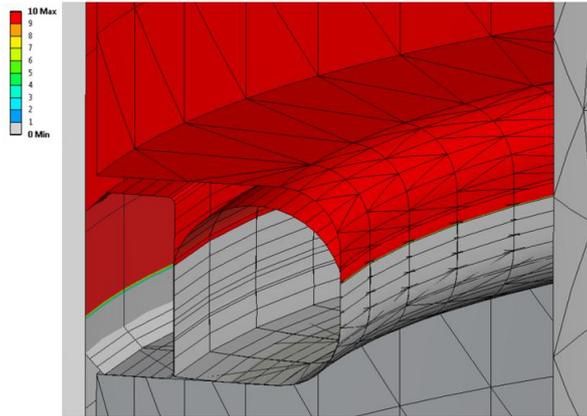


Abbildung 18: Fluiddruck der Kontaktelemente in MPa; Kein Durchdringen der Flüssigkeit gewährleistet.

7 Zusammenfassung

Die Simulation von hyperelastischen Dichtungen stellt eine Herausforderung an die Finite Elemente Methode dar. Die implementierten Materialmodelle können das hyperelastische Verhalten nachbilden. Mit der Technologie „Fluid Pressure Penetration“ erfolgt die Lastverteilung des Fluiddrucks in Abhängigkeit des Kontaktstatus vollautomatisch, sodass ein manueller Abgleich entfällt. Die Funktionssicherheit des hydraulischen Systems kann gewährleistet werden, da der Kolben mit dem Dichtungspaket gegenüber dem Zylinder abgedichtet wird und diese Dichtigkeit bei seitlicher Belastung bestehen bleibt.

Für die Auslegung von Dichtungen erweist sich die 3D-FEM Simulation als hilfreiches Werkzeug. Im Anschluss an eine Vorauslegung kann eine systematische Variation von Eingabeparametern erfolgen. Hierzu werden Geometrieparameter definiert und eine Anzahl an Varianten gerechnet. Mithilfe der Optimierungssoftware optiSLang können die Sensitivitäten der einzelnen Eingabeparameter berechnet werden. Die Software ANSYS bietet somit eine umfassende und innovative 3D-FEM Lösung für die Berechnung von zuverlässigen und robusten, hyperelastischen Dichtungen in Kombination mit Fluid Pressure Penetration.

Referenzen

- [1] ANSYS, Inc., 2013. *ANSYS 14.5 Help*. Manual
- [2] CADFEM GmbH, 2013. *Berechnung von Gummi- und Schaumstoffbauteilen*. Seminarunterlagen