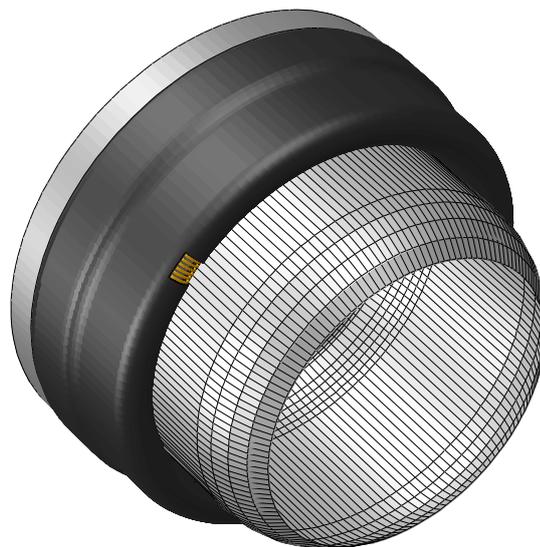


Vergleich von Simulationsansätzen in der FEM von Luftfedern mit Axialbalg hinsichtlich Fadenhaftung und Submodelltechnik

Masterthesis

B. Eng. Felix Hohmann



1. Prüfer (HAW): Prof. Dr.-Ing. G. Kolarov
2. Prüfer (TBVC): Dipl.-Math. T. Brüger
Betreuung (TBVC): Dipl.-Ing. M. Metzger

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Studiendepartment Maschinenbau und Produktion
Berliner Tor 21
20099 Hamburg
Internet: www.mp.haw-hamburg.de

in Zusammenarbeit mit:

Vibracoustic GmbH & Co. KG
A company of the TrelleborgVibracoustic Group
Hörstener Straße 45-47
21079 Hamburg
Internet: www.tbvc.com
E-Mail: info@tbvc.com
Telefon: 040 - 4134 - 0

und mit Unterstützung von:

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Professur für Maschinenelemente und rechnergestützte Produktentwicklung
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg
Internet: www.hsu-hh.de/mrp

Verfasser: Felix Hohmann, Matrikel-Nr.: 1907342
Abgabedatum: 30.04.2013
1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Georgi Kolarov (HAW-Hamburg)
2. Prüfer: Dipl.-Math. Thorsten Brüger (Vibracoustic GmbH & Co. KG)
Betreuer TBVC: Dipl.-Ing. Michael Metzger (Vibracoustic GmbH & Co. KG)
Betreuer HSU: Dipl.-Ing. (FH) Michael Welsch
(Helmut-Schmidt-Universität Hamburg)

Erklärung

Hiermit versichere ich, Felix Hohmann, dass ich die vorliegende Masterthesis mit dem Thema "Vergleich von Simulationsansätzen in der FEM von Luftfedern mit Axialbalg hinsichtlich Fadenhaftung und Submodelltechnik" ohne fremde Hilfen selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Aufgabenstellung	1
1.2. Inhalt der Arbeit	2
2. Grundlagen	3
2.1. Luftfedern allgemein	3
2.1.1. Geschichte	3
2.1.2. Luftfederarten	3
2.1.3. Aufbau von Rollbälgen	4
2.1.4. Materialien	6
2.1.5. Balgfertigung	10
2.2. FEM	12
2.2.1. Grundgleichungen der Kontinuumsmechanik	12
2.2.2. Nichtlinearitäten	14
2.2.3. Elementtypen	19
2.2.4. Modellierungstechniken	20
3. Standardbalgmodell	25
3.1. CAE-Processing	25
3.1.1. Modellierung der Beschlagteile	29
3.2. Luftfedersimulation	29
3.2.1. Kennlinie	29
3.2.2. Verklemmung	33
3.2.3. Beanspruchungsanalyse	33
4. Vollvernetztes Balgmodell	35
4.1. CAE-Processing und Validierung	36
4.1.1. Aufwandsminimierung durch Submodell	40
4.1.2. Geometrie und Werkstoffeigenschaften	42
4.1.3. Validierung des Verbunds	45
4.2. Luftfedersimulation	57
4.2.1. Kennlinie	58
4.2.2. Verklemmung	61
4.2.3. Beanspruchungsanalyse	61
4.2.4. Submodell und Haftschrift	67

5. Fazit und Ausblick	81
6. Literaturverzeichnis	85
A. Anhang	89
A.1. 3.2.2 Verklemmung	89
A.2. 4.2.2 Verklemmung	91
A.3. Axialbalg-Generierungsskript (GUI)	95
A.4. Maße der Balgvarianten	115
A.5. Versuchsaufbau	122
A.5.1. Kennlinienmessung	122
A.5.2. Torsions-Kopplungs-Prüfstand	123
A.5.3. Zugversuch	124
A.5.4. Druckversuch	125

Abbildungsverzeichnis

2.1. Übersicht der Balgarten [1, 2]	4
2.2. Balgaufbau	5
2.3. Luftfederbein Mercedes M-Klasse (W166) (v.) [3]	6
2.4. Chloropren Kautschuk	7
2.5. Fäden im Anlieferungszustand	9
2.6. Haftsysteeme	10
2.7. Balgfertigung [3]	11
2.8. Nichtlinearitäten bei einer Luftfeder-Simulation	12
2.9. Materieller Punkt durch Bewegungsfunktion beschrieben	13
2.10. Vergleich der Kontakt-Modellierungen	17
2.11. Kontakt-Modellproblem [4, Abb. 10-1]	18
2.12. Implementierung der Rebarteknik [5, Kap. 3.7.2]	21
2.13. Schema der Vollvernetzung	22
2.14. Schema der Submodelltechnik	23
3.1. Stand der Technik - Luftfederauslegung Vibracoustic	25
3.2. Arbeitsablauf mit Perl-Skript - allgemeines Modell	26
3.3. Möglichkeiten der Elementierung über Balgdicke	27
3.4. Ablauf des ASST (AirSpringSimulationTool) - vereinfachtes Modell	28
3.5. Beschlagteile in der Simulation	29
3.6. Durchmesser eines Rollbalgs mit Außenführung [6]	30
3.7. Ablauf der Kennlinienberechnung	32
4.1. Arbeitsablauf mit Axialbalg-Generierungsskript	36
4.2. Grafische Eingabemaske des Axialbalg-Generierungsskripts	37
4.3. Modellierung der Balganbindung	38
4.4. Vernetzung eines Balgsegments im Schnitt	39
4.5. Randbedingungen der Submodellzelle	42
4.6. Schnitt eines Luftfederbalgs: real, idealisiert, FEM (v.l.)	42
4.7. Parameterermittlung nach uniaxialen Zugversuch	43
4.8. Zugversuch	47
4.9. Ergebnisse des Zugversuchs	48
4.10. Verformung der Fäden (Draufsicht - links real - rechts FEM)	49
4.11. Druckversuch	50
4.12. Ergebnisse des Druckversuchs	51

4.13. Maße für Ausformungsversuch und Höhenpositionen	52
4.14. Lastfälle der Simulation	53
4.15. Vergleich der Ausformung Balg 1	55
4.16. Vergleich der Ausformung Balg 2	56
4.17. Lastfälle der Kennlinien-Simulation	59
4.18. Vergleich der Kennlinien	60
4.19. Luftfedermodell in Fahrzeugachse - W166 AMG VA li.	62
4.20. Auswertungsknoten für Fadenspannung (roter Punkt)	63
4.21. Vergleich der Fadenspannungen	64
4.22. Auswertungsknoten für Dehnung (roter Punkt)	65
4.23. Vergleich der Dehnungen im Verbund	66
4.24. Positionierung des Submodells	68
4.25. Ergebnisse der Größenbestimmung des Submodells	70
4.26. Auswertungspositionen im Schnitt beider Balgvarianten	72
4.27. Auswertung der Dehnungen	73
4.28. Auswertung der Dehnungsänderungen	74
4.29. REM Aufnahme - Balgschnitt	75
4.30. Auswertungspositionen im Schnitt beider Balgvarianten	76
4.31. Auswertung der Dehnungen in der Haftschrift	77
A.1. Axialsym. Modell und Ergebnis der Verklemmungsberechnung	89
A.2. Ersatzrechnung der Verklemmung	91
A.3. Flächenpressung bei Verklemmersatzsimulation	93
A.4. Vergleich der Flächenpressung (Unterseite des Balgs)	94
A.5. Servohydraulischer Ein-Achsen-Prüfstand	122
A.6. Torsions-Kopplungs-Prüfstand (Vorder- und Seitenansicht)[7]	123
A.7. Prüfaufbau des Zugversuchs	125
A.8. Prüfaufbau des Druckversuchs	126

Tabellenverzeichnis

2.1. Solid-Elementtypen in Abaqus 6.12	19
4.1. verwendete Balgvarianten	43
4.2. Parameter für Materialmodelle	44
4.3. Moduln für orthotropes Material der Fäden	45
4.4. Varianten zur Validierung	46
4.5. Bewertungsmatrix - Muster	58
4.6. Bewertungsmatrix - Kennlinienberechnung	60
4.7. Bewertungsmatrix - Fadenspannungsberechnung	65
4.8. Bewertungsmatrix - Dehnungen im Verbund	67
4.9. Daten des Submodells zur Zellgrößenbestimmung	69
4.10. Daten des Submodells im Anwendungsbeispiel - Torsion	72
4.11. Daten des Submodells zur Abbildung der Haftschrift	75
4.12. Simulationszeiten - Globalmodell - Standardbalgmodell	78
4.13. Simulationszeiten - Globalmodell - vollvernetztes Modell	78
4.14. Simulationszeiten - Submodell	79
A.1. Bewertungsmatrix - Verklemmungsberechnung	94

Formelzeichen und Symbole

A_W	mm^2	Verdrängerfläche
c	N/mm	Steifigkeit
C_{10}	–	1. Koeffizient - Mooney-Rivlin
C_{01}	–	2. Koeffizient - Mooney-Rivlin
C_{10}	–	1. Koeffizient - Yeoh
C_{20}	–	2. Koeffizient - Yeoh
C_{30}	–	3. Koeffizient - Yeoh
D_{ijkl}	N/mm	Eintrag der Elementsteifigkeitsmatrix ($i, j, k, l = 1, 2, 3$)
$E_{(i)}$	N/mm^2	E-Modul ($i = 1, 2, 3$, wenn richtungsabhängig)
ϵ_{ik}	%	Eintrag des Dehnungstensors
f	Hz	Frequenz
F_i	N	Kraftkomponente ($i = x, y, z$)
\mathbf{F}	–	Deformationsgradient
g	mm	Spalt zwischen zwei Kontaktkörpern
$G_{(ij)}$	N/mm^2	Schubmodul ($i, j = 1, 2, 3$, wenn richtungsabhängig)
I_i	–	Invarianten ($i = 1, 2, 3$)
κ	–	Isentropenexponent
l, L	mm	Länge
λ	–	Streckungsverhältnis
M_z	Nmm	Moment
μ_0	N/mm^2	infinitesimales Schubmodul
ν_{ij}	–	Querkontraktionszahl ($i, j = 1, 2, 3$, wenn richtungsabhängig)
p	N/mm^2	hydrostatischer Druck
$p_{\ddot{u}}$	N/mm^2	Überdruck in der Luftfeder
ϕ	rad od. $^\circ$	Drehwinkel
ψ	Nmm/mm^3	Formänderungsenergie
σ_{ik}	N/mm^2	Eintrag des Spannungstensors
V	mm^3	Volumen ($i=0, 1$)
W	Nmm	Arbeit
Υ	–	Hilfsvariable für Einträge der Elementsteifigkeitsmatrix

1. Einleitung

Die Vibracoustic GmbH & Co. KG ist ein global aufgestellter Automobilzulieferer und auf Gummibauteile in der Schwingungstechnik spezialisiert. Zum Produktportfolio gehören Antriebsdämpfer, Motorlager, Tilger, Auspuffaufhängungen, Fahrwerkslager und Luftfedern im Bereich der PKW und Nutzfahrzeuge. Eine der Kernkompetenzen des Geschäftsbereichs Luftfedern in Hamburg liegt in der Entwicklung und Herstellung von Luftfederbälgen. Ausschlaggebend für die Qualität einer Luftfeder ist die Betriebsfestigkeit der Bälge, die auf ca. 300000 Kundenkilometer des PKWs ausgelegt werden. Vor den ersten Betriebsfestigkeitsprüfungen mit einem neuen Luftfederbalg wird die Konstruktion mittels FEM-Simulation überprüft. Somit ist die FEM ein wichtiges Werkzeug in der Entwicklungsphase und hilft Schwachstellen frühzeitig zu erkennen. Neben den Beanspruchungen im Balg lassen sich durch die Simulation weitere Daten ermitteln, wie zum Beispiel die axiale Kennlinie der gesamten Luftfeder oder der benötigte Bauraum in der Fahrzeugachse. Auf Grund der immer höheren Anforderungen an die Luftfeder, der kürzeren Entwicklungszeiten und des steigenden Kostendrucks ist eine genaue Aussage mittels FEM-Simulation mittlerweile unerlässlich und hat einen großen Stellenwert in der Entwicklung bekommen. Aus diesem Anlass werden in dieser Arbeit die derzeitigen Modellierungstechniken angewendet, erweitert und auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht.

1.1. Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die verschiedenen Simulationsansätze der FEM für Luftfedern mit Axialbalg zu vergleichen und mit Versuchen zu validieren. Die heute in der Praxis angewandten Modellierungstechniken,

- Verschmierungstechnik Rebar
- Vollvernetzung

sollen dabei zur Anwendung kommen, sowie eine Kombination mittels hybrider Modellierung (Submodell). Für die Verschmierungstechnik Rebar kann das vorhandene Balg-Generierungs-Skript¹ verwendet werden und für die Vollvernetzung und das Submodell soll jeweils ein Skript entwickelt werden, welches es

¹Balgenerierungsskript von M. Metzger (Vibracoustic GmbH & Co. KG) und M. Wilhelm (Daimler AG)

ermöglicht, ein parametrisiertes Modell in der FEM-Software Abaqus 6.12 der Firma Dassault Systèmes zu generieren.

Die Modelle sollen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bzgl. Kennlinienberechnung, Beanspruchungsanalyse, der Qualität der Ergebnisse, der Robustheit (numerische Konvergenz), der Einsatzmöglichkeit für kinematische Analysen verglichen und für den Einsatz in der Produktentwicklung bewertet werden. Des Weiteren soll anhand des entwickelten parametrisierten Submodells bei der hybriden Modellierung die Kombination der Ansätze geprüft und verglichen werden.

1.2. Inhalt der Arbeit

Im Folgenden wird zunächst die Luftfederung vorgestellt und ein kurzer Einblick in die Geschichte, sowie den Aufbau, die Materialien und die Fertigung gegeben. Des Weiteren werden die Grundlagen der FEM und die angewendeten Techniken zusammengefasst in Abschnitt 2.2 dargestellt. In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Technik anhand des Standardbalgmodells in der Berechnung und Auslegung erfasst und die analytische Beschreibung einer Luftfeder erläutert. Im 4. Kapitel ist das erweiterte Balgmodell erklärt und das im Rahmen der Arbeit entstandene Axialbalg-Generierungs-Skript wird vorgestellt. Des Weiteren werden dort die beiden Modellierungstechniken angewendet und eine Validierung durchgeführt. Es folgen Vergleiche zwischen dem Standardbalgmodell, der erweiterten Modellierung und Versuchsergebnissen. Ebenso wird die Submodelltechnik mit der Kombination der zwei Ansätze verglichen und in einem Beispiel mit zwei verschiedenen Luftfederbalgvarianten angewendet. Dieses Anwendungsbeispiel wird in Bezug auf die Abbildung der Haftsicht des Verbunds erweitert. Zum Abschluss werden die Ergebnisse und Erkenntnisse in einem Fazit diskutiert und ein Ausblick formuliert.

2. Grundlagen

2.1. Luftfedern allgemein

2.1.1. Geschichte

Der Ursprung der Luftfeder findet sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in den USA. Hier entstand die Idee von luftgefederten Fahrzeugen und erste Patente wurden angemeldet. Auf Grund der jungen Entwicklung der Vulkanisation von Elastomeren und des großen Verschleißes der zur Verfügung stehenden Werkstoffe kam die Luftfederung zunächst nur in Prototypen zum Einsatz. Durch die Erkenntnisse aus der Reifenentwicklung und der Erfindung von Kunstfasern (Nylon und Perlon) nach dem zweiten Weltkrieg schaffte die Luftfederung den Serienstart in Form von Zweifaltenbälgen in Omnibussen. Es folgte darauf der Einsatz in europäischen Omnibussen und später auch in LKW, Bahnen und Zügen des öffentlichen Nahverkehrs [8, 9, 10]. Im Jahr 1960 wurde erstmals mit dem Borgward P100 ein PKW in Europa serienmäßig mit einer Luftfeder ausgestattet. Die Vorteile der Luftfederung beim PKW im Vergleich zur Stahlfederung liegen zum einen in der nahezu beladungsunabhängigen Eigenfrequenz des Aufbaus und zum anderen in der Niveauregulierung. Im Jahr 1967 erfolgt die zunächst letzte Serieneinführung von luftgefederten PKW mit dem Mercedes W108 und W109 in Europa, da der Komfort durch den dickwandigen Aufbau des Balges ungenügend war und die Druckversorgung im begrenzten Bauraum des PKW Schwierigkeiten bereitete. Erst Ende der 90er Jahre lebte die Luftfederung für den PKW durch die genaueren Fertigungsmethoden, den somit dünneren Balgaufbau mit größerem Komfort und die kompaktere Kompressorentchnik von neuem auf [11].

2.1.2. Luftfederarten

Die erste Luftfederart im Serieneinsatz war die bereits genannten Zweifaltenbalg-Luftfeder. Der Balg sieht zwei kleinen seitlich aufeinander gestapelten Reifen ähnlich und hält den Innendruck durch das fadenverstärkte Elastomer. Die Federung erfolgt über die Stauchung und Streckung der Falten. Des Weiteren gibt es Abwandlungen mit einer oder mehreren Falten, die nach dem gleichen Prinzip arbeiten und sich allgemein **Faltenbalg-Luftfeder** nennen. Diese wird heute noch bei Fundamentlagerung und Schwingungsisolierungen eingesetzt, bei denen

ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen horizontaler und vertikaler Steifigkeit benötigt wird [8, 2].

Eine weitere Bauart stellt die **Halbbalg-Luftfeder** dar, welche bei Schienenfahrzeugen auf Grund der horizontalen Weichheit eingesetzt wird. Die vertikalen Federwege sind im Verhältnis zu den horizontalen Auslenkungen gering [1].

Die dritte Luftfederart ist die **Rollbalg-Luftfeder**, die sich bei Straßenfahrzeugen durchgesetzt hat. Bei dieser Bauart lassen sich durch das Abrollen des Balgs auf dem Kolben große vertikale Federwege realisieren, die bei PKW und Nutzfahrzeugen erforderlich sind [2]. Abbildung 2.1 zeigt die genannten Balgarten.

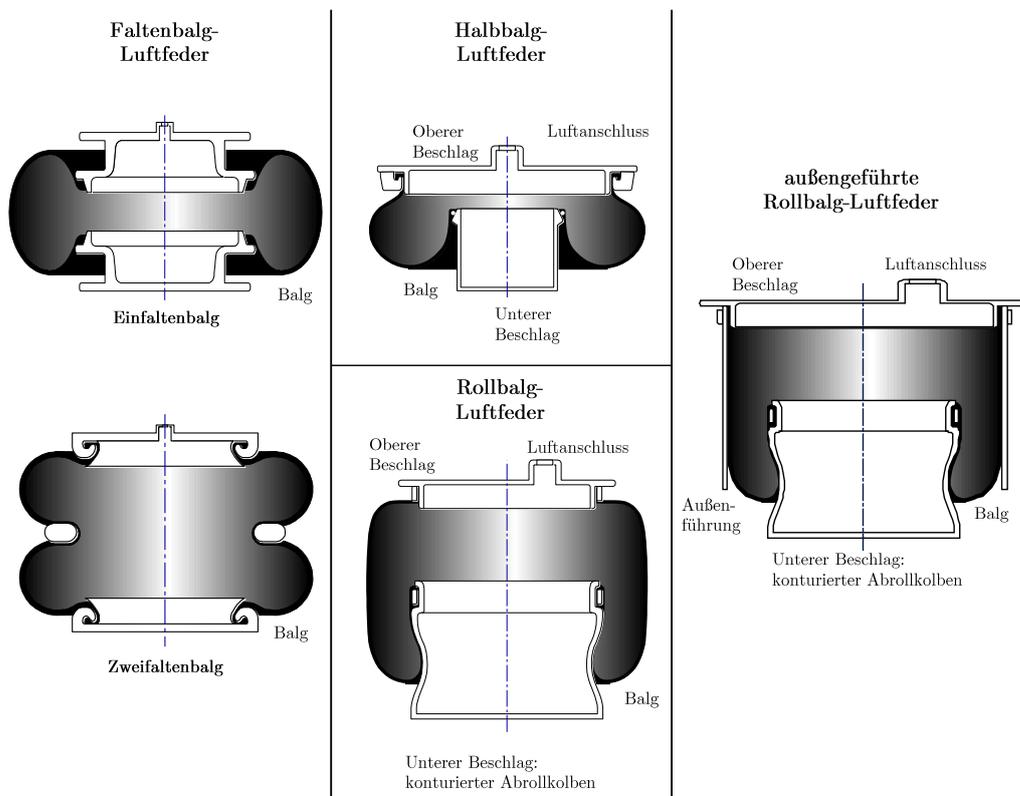


Abbildung 2.1.: Übersicht der Balgarten [1, 2]

Im Folgenden wird auf die genauere Unterteilung der Rollbalg-Luftfeder im PKW eingegangen.

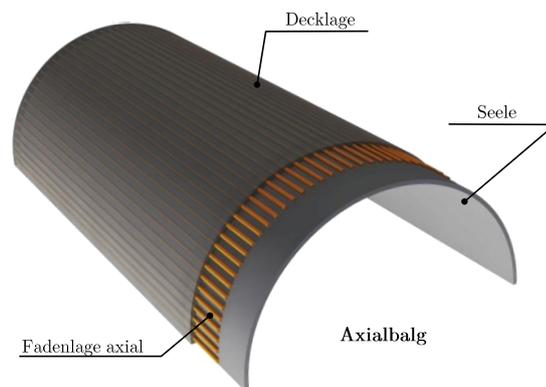
2.1.3. Aufbau von Rollbälgen

Der Rollbalg ist im Fertigungszustand schlauchförmig (vgl. Abbildung 2.2-a) und besteht aus einem mehrschichtigen Verbund. Das Elastomer bildet die Matrix und der Faden übernimmt hierbei die Aufgabe des Festigkeitsträgers, so

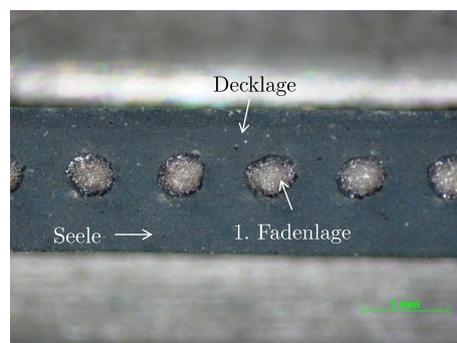
dass sich der Balg bei Druckbeaufschlagung gleichmäßig ausformt. Die Rollbälge sind in zwei weitere grundlegende Bauarten zu unterscheiden: Kreuzlagen- und Axialbälge. Beim Kreuzlagenbalg wird der Festigkeitsträger in zwei Schichten unter einem Winkel in den Verbund gebracht. Die zweite Fadenlage besitzt den entgegengesetzten Winkel der ersten Fadenlage, so dass sich beide Fadenlagen kreuzen. Der Axialbalg hingegen besitzt nur eine Fadenlage, die axial im Balg verläuft. Der grundsätzliche Unterschied zwischen den beiden Varianten liegt in der Ausformung unter Druck. Der Kreuzlagenbalg kann sich frei ausformen, wohingegen der Axialbalg durch eine Außenführung gestützt werden muss [12]. Im Folgenden beschränken sich die Ausführungen auf den Axialbalg, da dieser Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist. Ein schematischer Aufbau ist in Abbildung 2.2-b zu sehen und eine Mikroskopaufnahme von einem Balgschnitt ist in Abbildung 2.2-c dargestellt.



(a) Fertigungslänge [3]



(b) Schichten im Axialbalg [2]



(c) Axialbalg im Schnitt [3]

Abbildung 2.2.: Balgaufbau

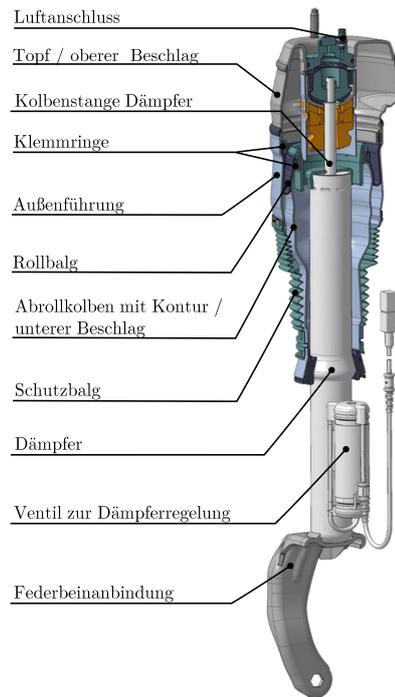


Abbildung 2.3.: Luftfederbein Mercedes M-Klasse (W166) (v.) [3]

Abbildung 2.3 zeigt ein komplettes Luftfederbein mit verbautem Axialbalg, Beschlagteilen und dem integrierten Dämpfer.

2.1.4. Materialien

Nachdem die Luftfederarten und der Balgaufbau erläutert wurden, soll im Folgenden genauer auf die Materialien und den daraus entstehenden Verbund eines Luftfederbalgs eingegangen werden.

Elastomer

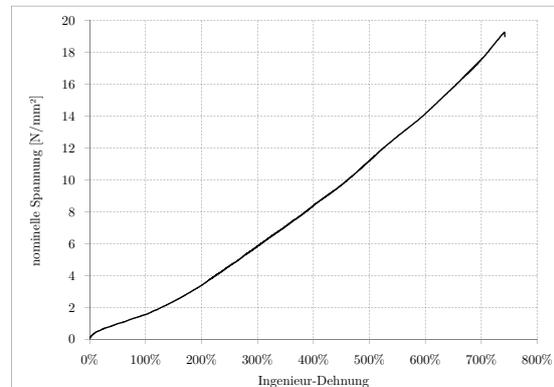
Elastomere stellen neben den Thermoplasten und den Duroplasten eine eigene Gruppe der Kunststoffe dar. Sie entstehen durch weitmaschige Vernetzung von amorphen, thermoplastischen Vorprodukten (Kautschuk). Durch die chemischen Bindungen sind die Polymerketten locker fixiert und das Elastomer bekommt dadurch sein hochelastisches Verhalten oberhalb der Glasübergangstemperatur. Im Gegensatz zu energie-elastischen Festkörpern mit hohem Elastizitätsmodul (z.B. Stahl) sind Elastomere entropie-elastisch [13]. Die Triebkraft, die den verformten Werkstoff wiederum in die Ursprungsform bringt, stellt die Entropie ("Unordnung") dar. Ist das Elastomer unbelastet, sind die Polymerketten statistisch verknäult und es herrscht die größtmögliche Entropie. Unter Belastung werden

die Ketten gestreckt und es entsteht eine geordnete Ausrichtung in Beanspruchungsrichtung mit geringerer Entropie. Bei anschließender Entlastung nimmt der Werkstoff wiederum seinen Ursprungszustand mit größtmöglicher Entropie an [14].

Die Gruppe der Elastomere lässt sich weiter unterteilen in **Naturkautschuk** (NR - "*natural Rubber*") und **synthetischen Kautschuk** (SR - "*synthetic Rubber*"). Der Naturkautschuk findet z.B. im Nutz- und Schienenfahrzeugbereich der Luftfedern Anwendung. Die synthetischen Elastomere lassen sich weiter unterteilen in die Dien-¹ und Nicht-Dien-Kautschuke². Für PKW-Luftfedern werden bei der Vibracoustic CR-Mischungen (CR - "*chloropren Rubber*") eingesetzt, die zu den Dien-Elastomeren zählen.



(a) Kautschukrohnmischung in Streifenform



(b) Kennlinie einer CR-Mischung

Abbildung 2.4.: Chloropren Kautschuk

Die Inhaltsstoffe, aus denen die Kautschukrohnmischung besteht, sind sehr vielfältig. Sie werden deshalb auch Mehrkomponenten-Gemische genannt, die aus bis zu 20 Komponenten aufgebaut sein können. Durch die Kombination der jeweiligen Bestandteile lassen sich die Eigenschaften des Endproduktes gezielt verändern. Ein wichtiger Bestandteil sind z.B. Füllstoffe wie Ruß oder gefällte Kieselsäuren, die großen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Elastomers nehmen und das Endprodukt verstärken [16]. Eine weitere wichtige Komponente sind Weichmacher, die zum einen zu einer besseren Verarbeitbarkeit führen und die thermischen Einsatzgrenzen des Werkstoffs verschieben können. So führt ein größerer Anteil an Weichmachern zu einer besseren Kälteflexibilität. Im Gegenzug verschlechtern sich die Eigenschaften bei Wärme, da die Weichmacher bei höheren Temperaturen verdampfen und es zu einer Verhärtung des Elastomers

¹Dien-Kautschuke: SBR, EPR, BR, IR, NBR, CR, IIR [15]

²Nicht-Dien-Kautschuke: Q, ACM, TM, etc. [15]

kommt. Weitere Bestandteile sind Alterungsschutzmittel, die die Beständigkeit gegen äußere Einflüsse verbessern und ein Vernetzungssystem für den formgebenden Schritt im Herstellungsprozess, der auch Vulkanisation genannt wird. Bei der Vulkanisation werden die Polymerketten der Kautschukrohmmischung bei hoher Temperatur (in der Regel $> 140^{\circ}\text{C}$) und unter Druck kovalent miteinander gebunden. Die Menge und Art des Vernetzungssystems bestimmt die Vernetzungsdichte bzw. den Vernetzungsgrad und somit die physikalischen Eigenschaften, wie Härte, Zugfestigkeit, Reißdehnung, Reibung, Setzverhalten und Ermüdung des Endprodukts [14]. Bevor es zur Vulkanisation kommt, muss die Rohmischung zunächst in die gewünschte Form gebracht werden. Nach EYERER et al. [17] gibt es folgende vier klassische Methoden:

- Pressverfahren (CM - Compression Molding)
- Transferpressen (TM - Transfer Molding)
- Spritzgießverfahren (IM - Injection Molding)
- Kontinuierliche Vulkanisation

Die Herstellung des Luftfederbalgs erfolgt nach einem gesonderten Verfahren, welches aus einer Kombination und Abwandlung von Pressverfahren und kontinuierlicher Vulkanisation besteht. Die Beschreibung dieses Verfahrens erfolgt in Abschnitt 2.1.5.

Faden

Den Festigkeitsträger im Luftfederbalg stellt der Faden dar. Dieser kann aus verschiedenen gezwirnten synthetischen Fasern bestehen. In dieser Arbeit kommen ausschließlich PES-Fäden aus Polyethylenterephthalat und PA-Fäden aus PA 6.6 (= poly(hexamethylene adipamide)) zum Einsatz. Neben den beiden genannten technischen Fasern gibt es noch weitere, die als Festigkeitsträger verwendet werden, wie z.B. Aramide (Kevlar[®], uvm.) [15].

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der PET-Faden auch Polyesterfaden und der PA-Faden Nylon genannt. Die Ausgangsform der Fasern sind Kunststoffpellets, die unter Stickstoff geschmolzen und gefiltert durch eine Spinnöse gepresst werden. Nach dem Austritt aus der Düse kühlen die Fäden an Luft oder Stickstoff ab. Bei Polyamid-Fasern folgt ein Trocknungsprozess. Bevor die fertigen Filamente auf einer Trommel aufgewickelt werden, erfolgt noch der Auftrag einer Schlichte, die das Aufwickeln und Verstrecken erleichtert [15].

Die fertiggestellten Fasern werden im Anschluss zu einem Garn verdrillt. Das Garn wird mit der Einheit Titer [dtex] angegeben, welche eine Angabe für Masse pro Längeneinheit [g/10.000m] ist. Bei der Verdrillung werden die Drehungen

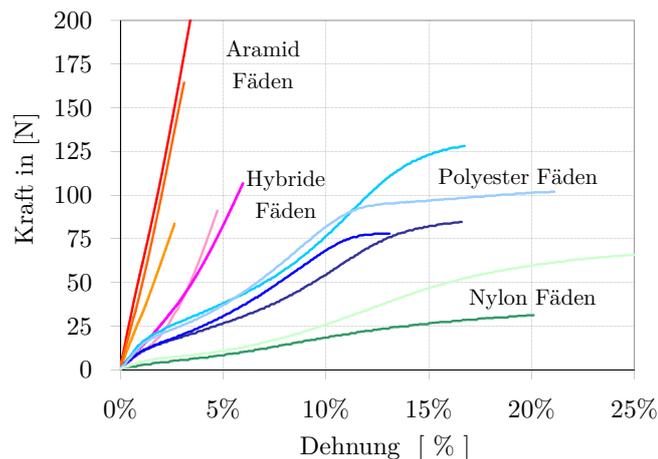
in Touren pro Meter [T/m] gezählt und die Drehrichtung wird jeweils mit Z-Schlag (rechts steigend, Drehrichtung links) oder S-Schlag (links steigend, Drehrichtung rechts) bezeichnet. Durch das Verdrillen mehrerer Garne entsteht der Faden (Zwirn), der auch aus Garnen verschiedener Materialien bestehen kann (hybrider Faden). Beim Zwirn werden ebenfalls die Drehungen in Touren pro Meter angegeben [T/m]. In der Fadenbezeichnung wird angegeben, welche Anzahl an Garnen zu einem Faden verzwirnt wurden. Zum Beispiel steht 1x2 für einen Faden, der aus zwei Garnen gezwirnt ist. Des Weiteren ist der Schlag und die Drehung des Garns und des Zwirns angegeben [12]. In Abbildung 2.5 sind eine Fadenrolle (a) und zwei Polyesterfäden mit verschiedenen Haftsystemen dargestellt (b: links Faden mit Haftvermittler; rechts Faden mit Haftvermittler + Overcoat). Abbildung 2.5-c zeigt eine Reihe von Kennlinien verschiedener Fäden.



(a) Fadenrolle



(b) Polyesterfäden mit versch. Haftsystemen



(c) Kennlinie verschiedener Fäden

Abbildung 2.5.: Fäden im Anlieferungszustand

Ein wichtiger Faktor für den Einsatz des Fadens im Verbund ist die Haftung in der Elastomermatrix. Diese wird mit einem Haftsystem hergestellt, welches aus mehreren Komponenten besteht. Die Substanzen stellen zwischen den zwei Substraten eine enge physikalische und/oder chemische Bindung her. Für die Haftung zwischen Fasern und Kautschuk werden wässrige Systeme wegen eines leichteren Auftrags eingesetzt. Der Faden wird zunächst bei der Herstellung mit einem Pre-Dip versehen, der später die Bindung zwischen Faden und Haftvermittler herstellen soll. Anschließend wird der wässrige Haftvermittler durch ein Tauchbad aufgetragen [18]. Als weitere Komponente kann ein sog. Overcoat ebenfalls im Herstellungsprozess des Fadens aufgetragen werden. Nach dem Auftrag dieser Substanzen wird das Fadenmaterial getrocknet und zur Auslieferung auf Rollen gewickelt.

Nach der Einbettung in die Matrix und der anschließenden Vulkanisation reagiert das Haftvermittlersystem und geht mit Elastomer und Faden eine Bindung ein. Eine weitere Alternative zu dem auf den Faden aufgetragenen System kann eine bei der Balgherstellung eingebrachte Kleberlage darstellen (vgl. Abschnitt 2.1.5). Abbildung 2.6 zeigt die verschiedenen Haftsysteme.

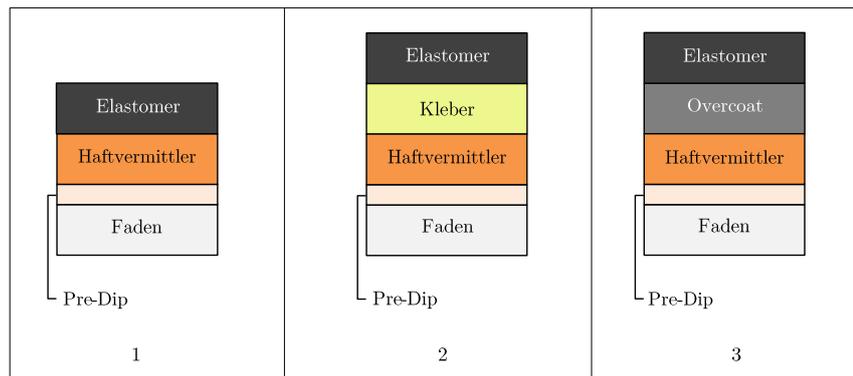


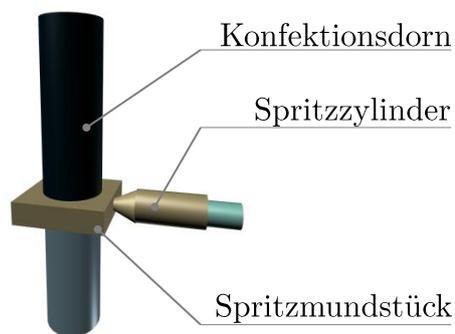
Abbildung 2.6.: Haftsysteme

2.1.5. Balgfertigung

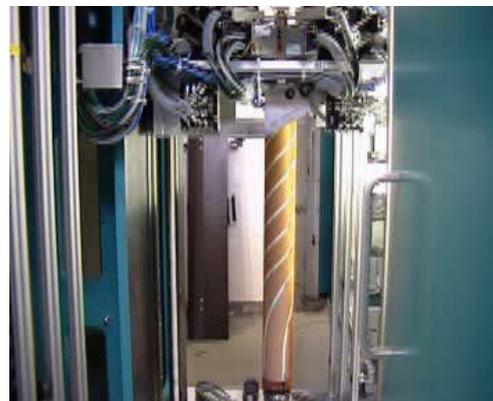
Die Fertigung des Luftfederbalgs erfolgt durch eine Kombination und Abwandlung der in Abschnitt 2.1.4 aufgezählten Herstellungsprozesse. Zunächst wird ein Metalldorn, der den Konfektionsdurchmesser³ des Endprodukts hat, über einen gering temperierten Extruder mit einer ersten Schicht der Rohmischung bestückt. Dieser Vorgang wird "Umdüsung der Seele" genannt und ist in Abbildung 2.7-a schematisch dargestellt. Es folgt der Auftrag des Klebers durch ein

³In der Serien- und Prototypenherstellung stehen bei der Vibracoustic Dorne mit festgelegten Konfektionsdurchmessern zur Verfügung.

Schwallbad⁴. Anschließend werden die Fäden mit Hilfe eines Fadenlegers auf die zuletzt aufgetragene Schicht gelegt und währenddessen mit einer geringen Kraft in das unvulkanisierte Rohprodukt gedrückt (vgl. Abbildung 2.7-b und -c). Danach kann eine weitere Kleberschicht folgen. Abschließend wird die Decklage aufgetragen, was über den im ersten Schritt bereits eingesetzten Extruder erfolgt. Zwischen den genannten Schritten fährt der Dorn auf der Fertigungsstraße die einzelnen Stationen an und wird jeweils nach einem Prozessschritt mittels Sensoren vollständig geprüft⁵ (vgl. Abbildung 2.7-d). Der vollständig bestückte Metalldorn wird nun in einer Heizröhre unter Druck und Temperatur vulkanisiert. Anschließend erfolgt die Entformung mittels Pressluft, die zwischen Balg und Dorn eingebracht wird [3].



(a) Umdüsung



(b) Fadenleger



(c) Dorn mit Fäden



(d) Bildererkennung

Abbildung 2.7.: Balgfertigung [3]

⁴entfällt bei kleberlosem Balg

⁵Es werden die Fadenabstände mittels Bildererkennung geprüft und die Schichtdicken gemessen (100% Prüfung).

2.2. FEM

In der klassischen FEM-Anwendung wird häufig zur Vereinfachung linearisiert gerechnet, da dies für einfache Probleme ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Bei einer Luftfeder ist diese Linearisierung des Systems nicht mehr zulässig, da folgende Nichtlinearitäten mit abgebildet werden müssen (siehe auch Abbildung 2.8):

- Große Verschiebungen und Rotationen (geometrische Nichtlinearität)
- Elastomer (nichtlineares Materialverhalten)
- Kontakt zwischen Balg und Beschlagteilen

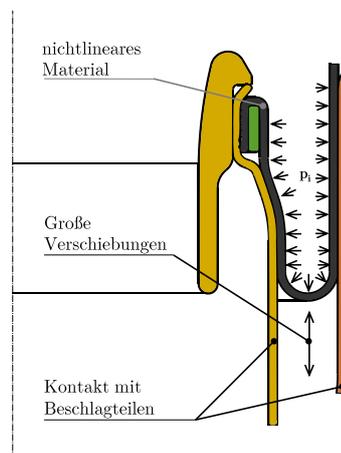


Abbildung 2.8.: Nichtlinearitäten bei einer Luftfeder-Simulation

Bevor die Abbildung der Luftfeder in der Simulation genauer erläutert wird, sind in diesem Kapitel die theoretischen Grundlagen zusammengefasst aufgeführt. Basis hierfür stellt die Kontinuumsmechanik dar, aus der die grundlegenden Begriffe und Zusammenhänge im folgenden Abschnitt dargestellt sind. Des Weiteren werden die oben aufgeführten Nichtlinearitäten sowie die Elementtypen der FEM erläutert. Abschließend wird auf die Modellierungstechniken eingegangen, die bei einer Luftfederberechnung Anwendung finden.

2.2.1. Grundgleichungen der Kontinuumsmechanik

Die Feldtheorie der Kontinuumsmechanik ermöglicht eine Erweiterung der Mechanik auf Nichtlinearitäten. Die materiellen Punkte des *Kontinuums* lassen sich zu jedem Zeitpunkt t im euklidischen Raum eindeutig beschreiben. Sie werden

in der Ausgangskonfiguration mit dem Vektor \mathbf{X} beschrieben. Bewegt sich ein Punkt, so wird sein momentaner Ort durch eine Bewegungsfunktion beschrieben [5, Kap. 1.4.1], [19, S. 49].

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, t) \quad (2.1)$$

Der Deformationsgradient \mathbf{F} ergibt sich aus der Bildung des Gradienten der Bewegungsfunktion [5, Kap. 1.4.1].

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} \quad (2.2)$$

In Abbildung 2.9 ist schematisch die Bewegung zweier infinitesimal kleiner materieller Punkte dargestellt [19, S. 49, Formel 175], [20, S. 35, Abb. 1.3].

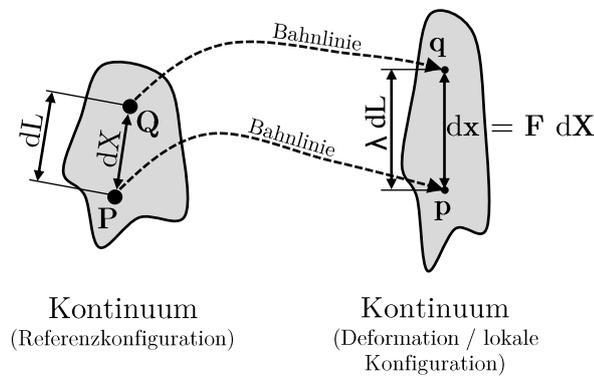


Abbildung 2.9.: Materieller Punkt durch Bewegungsfunktion beschrieben

Um die Verformung des Körpers zu beschreiben wird das Streckungsverhältnis eingeführt. Bei der Betrachtung einer infinitesimalen Zuglänge der Ausgangskonfiguration $d\mathbf{X}$ in Bezug auf die aktuelle Konfiguration ergibt sich dieses Verhältnis nach [5, Kap. 1.4.1].

$$dL^2 = d\mathbf{X}^T \cdot d\mathbf{X} \quad (2.3)$$

$$dl^2 = d\mathbf{x}^T \cdot d\mathbf{x} \quad (2.4)$$

$$\lambda = \frac{dl}{dL} = \sqrt{\frac{d\mathbf{x}^T \cdot d\mathbf{x}}{d\mathbf{X}^T \cdot d\mathbf{X}}} \quad (2.5)$$

Daraus resultiert, dass bei einem $\lambda = 1$ keine Streckung vorliegt und es sich um eine reine Starrkörperbewegung handelt. Unter Einbringung der Richtungsvektoren und Anwendung der Variationsrechnung ergibt sich ein Eigenwertproblem,

$$(\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} - \lambda^2 \mathbf{I}) \cdot \mathbf{N} = 0 \quad (2.6)$$

welches als Lösung die "Hauptstreckungen" $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ liefert [5, Kap. 1.4.1-7]. Zur Vereinfachung und für die weitere Verwendung ist in der Literatur der Ausdruck $\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} = \mathbf{C}$ als *rechter Cauchy-Green-Tensor* und $\mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T = \mathbf{b}$ als *linker Cauchy-Green-Tensor* zusammengefasst [21, Gleichung 2.65 und 2.79].

Mit den oben genannten Eigenwerten werden für die spätere Verwendung im Materialgesetz die drei Invarianten berechnet.

$$I_1 = \text{tr}\mathbf{b} = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.7)$$

$$I_2 = \text{tr}\mathbf{b}^{-1}\det\mathbf{b} = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_1^2\lambda_3^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 \quad (2.8)$$

$$I_3 = \det\mathbf{b} = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \quad (2.9)$$

2.2.2. Nichtlinearitäten

Liegen bei einem Problem Nichtlinearitäten vor, hat dies große Auswirkungen auf den Berechnungsprozess. Zunächst wird das Problem nicht mehr in einem Schritt wie in der linearen FEM gelöst, sondern es erfolgt eine inkrementelle Last- oder Verschiebungsaufbringung. Des Weiteren wird ein anderer FEM-Ansatz verwendet [22]. Im Folgenden werden die zu Anfang dieses Abschnitts aufgezählten Nichtlinearitäten und ihre Auswirkungen beschrieben.

Geometrische Nichtlinearität

Bei großen Verformungen und Rotationen treten zwei nichtlineare Phänomene auf. Zum einen ändert sich durch die großen Verschiebungen im Vergleich zur Ausgangskonfiguration die Wirkungsrichtung der Kräfte und Randbedingungen, die somit umverteilt werden müssen. Zum anderen bewirken die großen Verzerrungen einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen den Verzerrungstensoren und den Verschiebungsgradienten [22]. Diese Zusammenhänge lassen sich durch die Erweiterung des Prinzips der virtuellen Verschiebung lösen, welches in seiner Ausgangsform auch der linearen FEM zu Grunde liegt. Bei diesem Prinzip wird davon ausgegangen, dass die virtuelle Gesamtarbeit des betrachteten Systems zu null wird. D.h. die durch aufgebrachte virtuelle Verschiebungen hervorgerufene Arbeit ist gleich der Formänderungsarbeit der inneren Kräfte [22]:

$$\delta W = \delta W_{int} - \delta W_{ext} = 0 \quad (2.10)$$

In der linearen Theorie wird nach dem *Abaqus Theory Manual* [5] folgende Gleichung zur Berechnung der inneren Arbeit gelöst:

$$\delta W_{int} = \int_V \boldsymbol{\sigma} : \delta \mathbf{D} dV = \int_S \delta \mathbf{v} \cdot \mathbf{t} dS + \int_V \delta \mathbf{v} \cdot \mathbf{f} dV = \delta W_{ext} \quad (2.11)$$

Der erste Summand in 2.11 beschreibt die Arbeit durch die Kräfte auf der Oberfläche S und der Zweite die inneren Kräfte durch die Verformung des Volumens

V. Für die nichtlineare Geometrie wird der Ansatz erweitert. Nach Umformungen wie der Zerlegung des Spannungstensors in gestaltändernden Anteil (Deviator) und Volumenanteil (Kugeltensor) und der Linearisierung für ein Lastinkrement ergibt sich nach [5, 22]:

$$\delta W_{int} = \int_{V^0} \mathbf{J}(\mathbf{S} : \delta \mathbf{e} - p \delta \varepsilon^{vol}) dV^0 = \int_{V^0} \delta U dV^0 \quad (2.12)$$

Aus dieser Beziehung kann die tangentielle Steifigkeitsmatrix für das aktuelle Inkrement gebildet und die Lösung iterativ gefunden werden [22].

Nichtlinear elastisches Material

Linear elastisches Verhalten von Werkstoffen lässt sich mit dem verallgemeinerten Hook'schen Gesetz nach ROBERT HOOKE (1635-1703) beschreiben. Dies besagt, dass sich die Verformung mit dem E-Modul proportional zur Belastung verhält: $\sigma = E\varepsilon$ [23]. Bei nichtlinearem Materialverhalten gilt keine Proportionalität. Der Zusammenhang zwischen Verformung und Belastung wird durch eine Funktion beschrieben, die z.B. abhängig von der Verformungsenergie ist. Das in dieser Arbeit verwendete Materialmodell **Mooney-Rivlin** ist ein in der Praxis gebräuchliches Modell für die Beschreibung von hyperelastischen Werkstoffen, wie in diesem Fall von Elastomeren [24]. Bei Elastomeren kommt hinzu, dass sie als nahezu inkompressibel gelten und somit eine Volumenkonstanz aufweisen. Dies muss zum einen bei der Wahl des Elementtyps (vgl. Abschnitt 2.2.3) und zum anderen im Materialmodell berücksichtigt werden. Es folgt daraus für die dritte Invariante $I_3 = 1$ [21, S. 223]. Somit verbleiben I_1 und I_2 als die einzigen unabhängigen Variablen der Verformung. Für die kinematische Kopplung bei Inkompressibilität dient der hydrostatische Druck p , der in der Funktion der Verformungsenergie als unbestimmter *Lagrange Multiplikator* fungiert und später in Abschnitt 2.2.3 noch näher erläutert wird.

$$\Psi = \Psi(\mathbf{F}) - p(J - 1) \quad (2.13)$$

Dieser kann über das Gleichgewicht und die Randbedingungen bestimmt werden. Aus (2.13) ergibt sich nach einigem Umformen und Einsetzen der Spannungstensor nach Gleichung (2.14) mit dem Volumenverhältnis $J = 1$ für Volumenkonstanz [21, S. 222 ff].

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + 2\frac{\partial\Psi}{\partial I_1}\mathbf{b} - 2\frac{\partial\Psi}{\partial I_2}\mathbf{b}^{-1} \quad (2.14)$$

Zur Bestimmung der Spannung sind die Ableitungen der Verformungsenergie (2.13) nach der ersten und der zweiten Invariante erforderlich. Die Verformungsenergie ist über das Materialmodell bestimmt und wird bei Mooney-Rivlin durch eine lineare Funktion der beiden Invarianten abgebildet.

$$\Psi_{Mooney} = c_1(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + c_2(\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} - 3) \quad (2.15)$$

$$= c_1(I_1 - 3) + c_2(I_2 - 3) \quad (2.16)$$

Somit kann das Material durch zwei Koeffizienten vollständig beschrieben werden. Die Materialkonstanten $c_1 = C_{10}$ und $c_2 = C_{01}$, aus denen sich ein infinitesimales Schubmodul mit $\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01})$ berechnen lässt [5, Kap. 4.6.1], werden in Abschnitt 4.1.2 an eine Prüfkörperkennlinie angepasst (siehe Tab. 4.2 auf Seite 44).

Ein weiteres Materialmodell speziell zur Abbildung von rußverstärkten Elastomeren wurde von YEOH entwickelt. Hierbei wird ebenfalls das Materialverhalten über die Verformungsenergie beschrieben. Es werden drei Materialkonstanten benötigt und es besteht die alleinige Abhängigkeit von der ersten Invariante [21], mit $c_1 = C_{10}$, $c_2 = C_{20}$ und $c_3 = C_{30}$:

$$\Psi_{Y_{eoh}} = c_1(I_1 - 3) + c_2(I_1 - 3)^2 + c_3(I_1 - 3)^3 \quad (2.17)$$

Die Materialkonstanten werden mit Ergebnissen aus Zugversuchen und der sich aus den Koeffizienten ergebenden analytischen Kennlinie in Abschnitt 4.1.2 ebenfalls ermittelt.

Kontakt

Der Kontakt ist die dritte Nichtlinearität in den später behandelten Berechnungen, da die äußeren Kräfte von der Verformung des Körpers abhängig sind [22]. Es gibt folgende drei Modellierungstechniken [4]:

- Knoten-zu-Knoten Kontakt
- Knoten-zu-Fläche Kontakt
- Fläche-zu-Fläche Kontakt

Die erste Technik ist die älteste und findet kaum noch Anwendung. Es werden zwischen den in Kontakt tretenden Knoten Elemente modelliert. Deshalb müssen diese Knoten möglichst nah beieinander liegen und dürfen während der Simulation kaum tangential Verschiebungen aufweisen, da sonst durch Exzentrizitäten Momente erzeugt werden und sich das Ergebnis in der Kontaktzone verschlechtert. Diese Voraussetzung führt zu großen Einschränkungen und ist dadurch nicht geeignet.

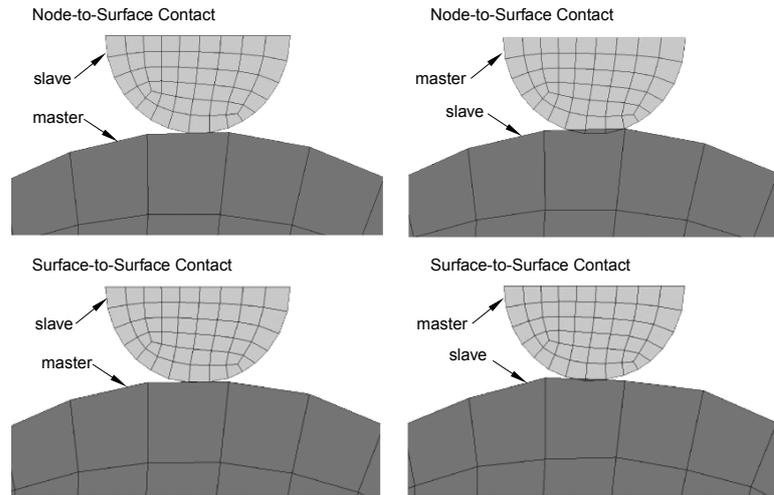


Abbildung 2.10.: Vergleich der Kontakt-Modellierungen mit verschiedenen master-slave-Definitionen [24, Kap. 37.1.1]

Beim Knoten-zu-Fläche Kontakt wird eine *"master"*- und eine *"slave"*-Fläche definiert. Erstere liefert die Flächeninformation und die Zweite die Knoten, die mit der Fläche in Kontakt treten sollen. Der *"slave"*-Knoten kann einen beliebigen Punkt der *"master"*-Fläche berühren. Aus diesem Grund kann es durch Unterschiede in der Netzfeinheit zwischen *"master"* und *"slave"* zur Durchdringung der beiden Körper kommen und zu einem Fehler in der Bestimmung der Flächenpressung. Dies passiert beispielsweise wenn die *"master"*-Fläche sehr fein und die *"slave"*-Fläche mit den Knoten sehr grob diskretisiert ist, wie in Abbildung 2.10 oben dargestellt. Bei der letzten genannten Modellierungstechnik wird ebenfalls eine *"master"*- und *"slave"*-Fläche definiert. Für die Kontaktbedingung wird hier der kürzeste Abstand zwischen zwei Integrationspunkten auf den beiden Flächen gesucht. Bei dem Fläche-zu-Fläche-Kontakt führt eine unterschiedliche Diskretisierung zu keiner sichtbaren Durchdringung (vgl. Abbildung 2.10 unten) und ergibt den geringsten Fehler bei der Flächenpressung nach [24, Kap. 37.1.1].

Für die Erklärung der Kontaktformulierung wird folgendes Modell zur Veranschaulichung einer Kontaktpaarung zwischen einem verformbaren und einem starren Körper nach RUST [4] eingeführt. Der elastische Körper wird durch eine Feder mit der Federsteifigkeit k repräsentiert und mit einer Kraft F belastet, die eine Verformung u hervorruft. In der Entfernung Δx befindet sich das starre Hindernis. Das Modell der Kontaktpaarung ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

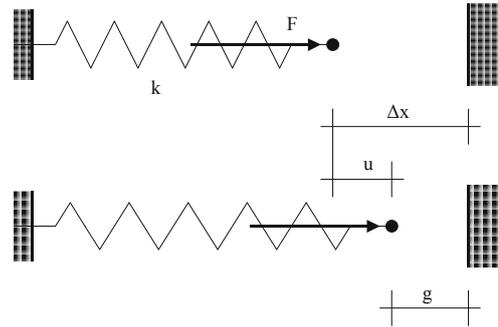


Abbildung 2.11.: Kontakt-Modellproblem [4, Abb. 10-1]

Der Abstand zwischen Feder und Hindernis ("gap") ergibt sich zu:

$$g = \Delta x - u \quad (2.18)$$

Solange dieser Abstand größer als Null ist findet keine Berührung statt und es gilt:

$$ku = F \quad (2.19)$$

Wird der Abstand $g < 0$ muss die Gültigkeit $g = 0$ über eine Nebenbedingung erzwungen werden, damit keine Durchdringung auftritt. Die Kontaktkraft F_c ergibt sich demnach zu:

$$F_c = k\Delta x - F \quad (2.20)$$

Für die Abbildung des Kontaktproblems in der FEM gibt es zwei Methoden. Die "Penalty"- und die "Lagrange"-Multiplikator-Methode. Bei der "**Penalty**"-**Methode** wird bei geschlossenem Kontakt auf die potentielle Energie des Systems ein Strafterm addiert, so dass diese, wie im statischen Gleichgewichtszustand, minimal wird. Dieser Strafterm enthält die Kontaktsteifigkeit k_n , die auf das vorliegende Kontaktproblem angepasst werden muss. Es ergibt sich das Optimierungsproblem:

$$W = \frac{1}{2}ku^2 - uF + \frac{1}{2}k_n g^2 \rightarrow Min. \quad (2.21)$$

$$W = \frac{1}{2}ku^2 - uF + \frac{1}{2}k_n (\Delta x - u)^2 \rightarrow Min. \quad (2.22)$$

Nach RUST [4] strebt k_n gegen unendlich, wenn die Kontaktbedingung erfüllt werden soll. Auf Grund der Numerik ist dies nicht möglich und es bleibt bei dieser Methode immer eine kleine Durchdringung der Kontaktpartner.

Bei der **Lagrange-Multiplikator-Methode** wird anstelle des Strafterms das Produkt von Lagrange-Multiplikator λ und Abstand g zur potentiellen Energie

addiert. Der Multiplikator λ stellt somit eine weitere Unbekannte im System dar und es ergibt sich:

$$W = \frac{1}{2}ku^2 - uF + \lambda g(u) \rightarrow Min. \quad (2.23)$$

Nach Lösung des Optimierungsproblems erhält man nach RUST [4] den *Lagrange*-Multiplikator als Kontaktkraft. Eine weitere Möglichkeit zur Lösung des Kontaktproblems besteht aus der Kombination von beiden vorgestellten Methoden. Diese nennt sich **Augmented-Lagrange-Methode** und wird in einigen FEM-Programmen standardmäßig gewählt. Die Methode ist unabhängig von der Kontaktsteifigkeit und bietet eine bessere numerische Konvergenz [4].

2.2.3. Elementtypen

Als FEM-System wird Abaqus in der Version 6.12 der Firma Dassault Systèmes verwendet. In diesem stehen Solid-Elementtypen mit linearem und quadratischem Ansatz zur Verfügung auf die in diesem Abschnitt etwas näher eingegangen wird. Diese können jeweils mit voller oder reduzierter Integration gewählt werden. Weiterhin steht eine hybride Finite-Element-Formulierung zur Verfügung, die insbesondere bei inkompressiblen Werkstoffen angewendet werden muss. Tabelle 2.1 listet die Elementtypen und Bezeichnungen auf.

Tabelle 2.1.: Solid-Elementtypen in Abaqus 6.12

	lineare Integration	quadratische Integration
voll integriert	C3D8	C3D20
reduziert	C3D8R	C3D20R
voll integriert hybrid	C3D8H	C3D20H
reduziert hybrid	C3D8RH	C3D20RH

Ansatzfunktionen

Bei der Berechnung mit finiten Elementen wird zum Einen die Geometrie durch die Vernetzung diskretisiert und zum Anderen werden die sich ergebenden Feldgrößen innerhalb der Elemente approximiert. Im Laufe der Entwicklung der FE-Methode haben sich zwei Ansatzfunktionen für die Approximation etabliert und sind in jedem praxistauglichen FEM-Programm implementiert. Diese Funktionen werden durch Polynome beschrieben und unterscheiden sich in ihrer Polynomordnung. Daraus folgt die lineare und die quadratische Ansatzfunktion nach WRIGGERS [25]. Aus dem Polynomgrad ergibt sich die erforderliche Anzahl

an Integrationspunkten. Bei linearem Ansatz werden hierfür die zwei Gauss-Integrationspunkte des isoparametrischen Elements verwendet. Für den quadratischen Ansatz werden pro Elementkante drei Gaussintegrationspunkte benötigt. In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Elemente mit linearem Ansatz verwendet.

Reduzierte Integration

Die reduzierte Integration der Elemente ist eine einfache Methode um die Recheneffizienz zu steigern. Dabei wird die Steifigkeitsmatrix unterintegriert und reduziert somit die Anzahl der verwendeten GAUSS-Punkte. Dies führt zu einer Reduzierung der Integrationspunkte, so dass eine geringere Anzahl an Punkten vorliegt, als für den Polynomgrad der Ansatzfunktion nötig wären (z.B. wird beim 8-Knoten Quaderelement nur ein GAUSS-Punkt benötigt). Vorteile dieser Elemente sind das verhinderte "*locking*" bei Inkompressibilität, die recht gute Genauigkeit bei groben Netzen, die Robustheit bei Netzverzerrungen und die erlaubte Implementierung von allgemeinen Materialgesetzen. Der Nachteil dieser Formulierung ist die Instabilität der Elemente [25]. So ist es nötig, künstliche Stabilisierungsparameter zu wählen, um den sog. "Hourglass-Effekt" zu vermeiden⁶. Dieser Elementtyp wird von der FE-Software Abaqus standardmäßig gewählt und in der späteren Anwendung für den Faden verwendet.

Hybride Elemente

Der hybride Elementtyp ist für die Berechnung von inkompressiblen Materialien entwickelt worden. Bei den normalen Elementen würde bereits eine kleine Verschiebung zu großen Druckspannungen im Elementinneren führen und eine Singularität darstellen, womit die Lösung des Problems scheitert. Diese Singularität wird durch das Einführen einer weiteren unabhängigen Variable eliminiert. Diese Variable stellt den hydrostatischen Druck im Element dar und ist durch einen Lagrange-Multiplikator mit den Verschiebungen des Elements gekoppelt. Die hybride Formulierung verhindert ebenfalls das oben genannte "*locking*" [5, Kap. 3.2.3]. Dieser Elementtyp wird für die Bereiche, die aus dem Elastomer bestehen, im späteren verwendet.

2.2.4. Modellierungstechniken

Um den in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Verbund des Luftfederbalgs in der FEM-Simulation abzubilden, gibt es verschiedene Modellierungstechniken. Die gebräuchlichsten Methoden werden im Folgenden vorgestellt.

⁶Es kommt dabei zu Elementdeformationen, die einer Sanduhr ("Hourglass") ähnlich sehen. Hierbei entstehen Deformationen, die keiner Verzerrungsenergie zugeordnet sind (vgl. [25, S. 394])

Rebar

Die Rebar-Technik⁷ ist die gebräuchlichste und effizienteste Methode zur Abbildung des Verbunds, da hierbei der Faden im Verbund nicht modelliert werden muss. Stattdessen werden seine Eigenschaften über die Elemente des Verbunds "verschmiert". D.h. in dem isoparametrischen finiten Element wird eine Fläche definiert, auf der die Fäden verlaufen. Neben der Position im Element muss zudem ein Winkel angegeben werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit mehrere "Layer" in einer Element-Schicht zu definieren. Beispielhaft ist in Abbildung 2.12-a ein solches Element dargestellt. Das lokale Koordinatensystem g ist auf das Element bezogen und die Koordinate t verläuft in Richtung des Fadens. Als Eigenschaften der Rebar-Schicht wird der Abstand der Fäden, der Querschnitt und das Material (elastisch oder hyperelastisch) angegeben [24].

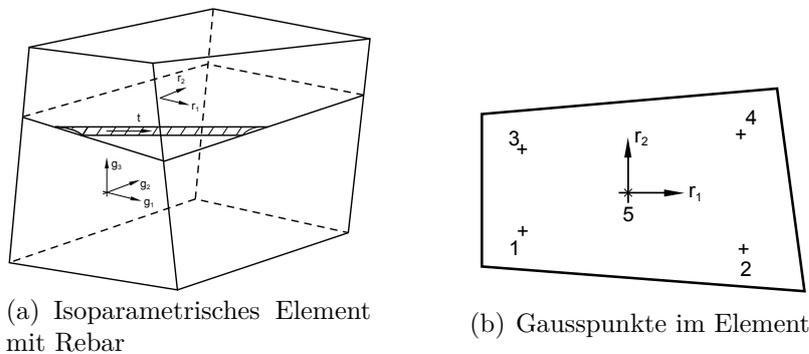


Abbildung 2.12.: Implementierung der Rebar-Technik [5, Kap. 3.7.2]

Je nach Ordnung des zugrunde liegenden Elements wird die definierte Eigenschaft auf 3×3 , 2×2 oder 1×1 Gauss-Punkte integriert (vgl. Abbildung 2.12-b). Mit dieser Modellierungstechnik ist es möglich einen Ausschnitt des Luftfederbalgs ("Streifen"-Modell) oder den gesamten Balg zu simulieren.

Vollvernetzung

Bei der Vollvernetzung wird der Luftfederbalg vollständig in seinem Querschnitt modelliert. D.h. der Querschnitt des Fadens ist ausmodelliert und das Netz wird dementsprechend angepasst. Je nach Anwendungszweck kann ein Streifen mit z.B. nur einem Faden und zyklischer Symmetrie erstellt werden. Wenn das Modell in der Simulation quer zur Federachse oder in einer Fahrzeugachse unter Kinematik ausgelenkt werden soll, ist ein volles Modell ohne Ausnutzen der

⁷Der Begriff Rebar ist eine Abkürzung aus dem Englischen und steht für "reinforcing bar". Übersetzt bedeutet es Betonstabstahl oder Bewehrungsstahl [26].

Symmetrie nötig. In Abbildung 2.13 ist schematisch die Implementierung der Vollvernetzung aufgezeigt.

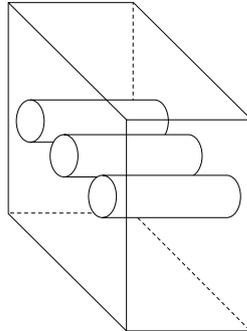


Abbildung 2.13.: Schema der Vollvernetzung

Durch die Vollvernetzung des Luftfederbalgs ist es möglich die Beanspruchungen im Verbund genauer zu betrachten. Auch der Beanspruchungszustand am Faden wird abgebildet, da dieser im FEM-Netz implementiert ist. Ein Nachteil dieser Technik ist der erhöhte Rechenaufwand durch die feine Vernetzung.

Submodelltechnik

Wenn der Beanspruchungszustand zwischen den Fäden oder im Verbund im Fokus steht, gibt es eine weitere Methode der Berechnung. Bei dieser Technik wird zunächst die gesamte Luftfeder als Globalmodell mit Rebar-Technik oder Vollvernetzung simuliert. Im Anschluss erfolgt eine weitere Berechnung eines Ausschnitts des Luftfederbalgs mit Randbedingungen aus der globalen Rechnung. Der Ausschnitt beinhaltet den vollvernetzten Verbund inkl. Abbildung des Fadens und kann auf Grund der geringen Abmaße feiner vernetzt werden. Die Berechnung des globalen Modells kann in der Regel mit einem größeren Netz durchgeführt werden. In Abbildung 2.14 ist schematisch ein Submodell mit den Randbedingungen zum Globalmodell skizziert.

Der Nachteil besteht in der möglichen Nichtkonformität der elastischen Verformung, da nur eine Feldgröße (Verschiebung oder Spannung) auf den Rand des Submodells übertragen werden kann. In Abaqus sind diese beiden Submodell-techniken als "*node-based*" und "*surface-based*" implementiert [5, Kap. 2.15.1].

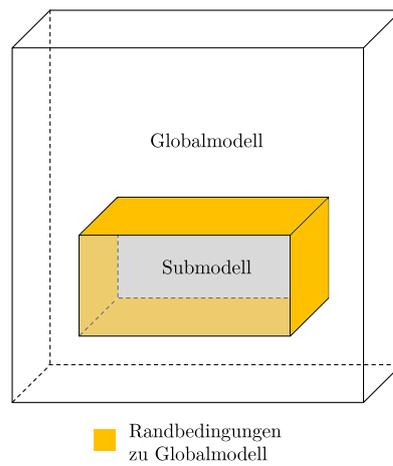


Abbildung 2.14.: Schema der Submodelltechnik

3. Standardbalgmodell

Die Simulation bekommt in der Entwicklung einen immer größeren Stellenwert, da die Ansprüche an das Bauteil höher, die Entwicklungszeiten kürzer und der Kostendruck größer werden. Deshalb ist es wichtig, in der Simulation die Realität möglichst genau abzubilden. Bei der Luftfeder werden verschiedene Bereiche in der Berechnung und Simulation betrachtet, die sich in drei Hauptbereiche gliedern lassen: Kennlinie, Verklemmung und Beanspruchung im Verbund, wie schematisch in Abbildung 3.1-a gekennzeichnet und in 3.1-b in einer Übersicht dargestellt.

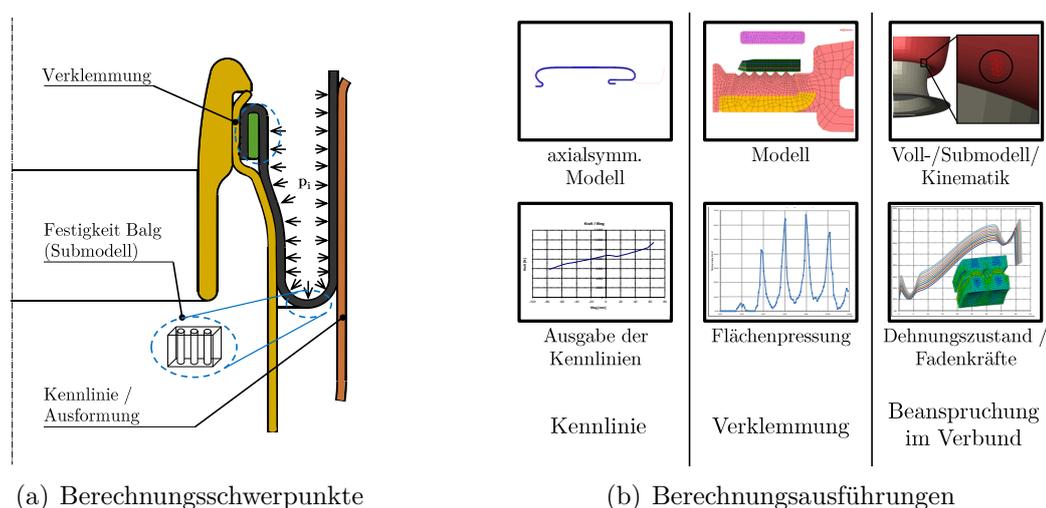


Abbildung 3.1.: Stand der Technik - Luftfederauslegung Vibracoustic

Im Folgenden wird das im Entwicklungsalltag eingesetzte Standardbalgmodell und seine Erstellung beschrieben. Im Anschluss wird der Einsatz des Modells in den drei Bereichen erläutert, der im Kapitel 4 im Vergleich mit dem dort vorgestellten vollvernetzten Balgmodell erfolgt.

3.1. CAE-Processing

Das Standardbalgmodell basiert auf der in Abschnitt 2.2.4 vorgestellten Rebar-Technik. Auf Grund der Variantenvielfalt der Luftfederbälge wurde ein Perl-

Skript erstellt, welches der automatisierten Erstellung eines allgemeinen Modells dient¹. Es kann sowohl Kreuzlagen- als auch Axialbälge generieren, wobei in dieser Arbeit nur die Funktionalität zur Erzeugung von Axialbälgen genutzt wird. Der Arbeitsablauf dieses Skripts ist in Abbildung 3.2 dargestellt und in drei Schritte untergliedert: "Pre-Processing", Berechnung, "Post-Processing". Die Grundlage im "Pre-Processing" stellt die Eingabedatei dar. Hier wird die Balgeometrie, die Ausrichtung im Fahrzeugkoordinatensystem² und der Montageablauf festgelegt. Die Modellerstellung erfolgt durch die Übergabe dieser Datei an ein Perl-Skript, welches das fertig vernetzte Balgmodell und eine Steuerungsdatei ausgibt. Die Steuerungs-Datei kann entsprechend mit Montagewegen und -reihenfolge, wahlweise mit einer Achskinematik und den Materialdaten angepasst werden. Die beiden Dateien werden anschließend an den Abaqus-Solver übergeben und die Berechnung wird durchgeführt. Als Ausgabe erhält man im "Post-Processing-Schritt" eine Ausgabe-Datei, die zuvor angeforderte Daten wie z.B. Kräfte und Wege von Kontrollknoten enthält, und die Abaqus-Ausgabe-Datenbank. Die Ausgabe-Datei wird über ein weiteres Skript ausgewertet, welches eine mit Microsoft-Excel kompatible Datei erzeugt, die z.B. Kennlinien oder Fadenkräfte enthält. Die Ausgabe-Datenbank, die von Abaqus standardmäßig erstellt wird, enthält die Geometrie mit den jeweils angeforderten Feld-Variablen, die im Abaqus CAE (Pre- und Post-Processor) betrachtet werden kann.

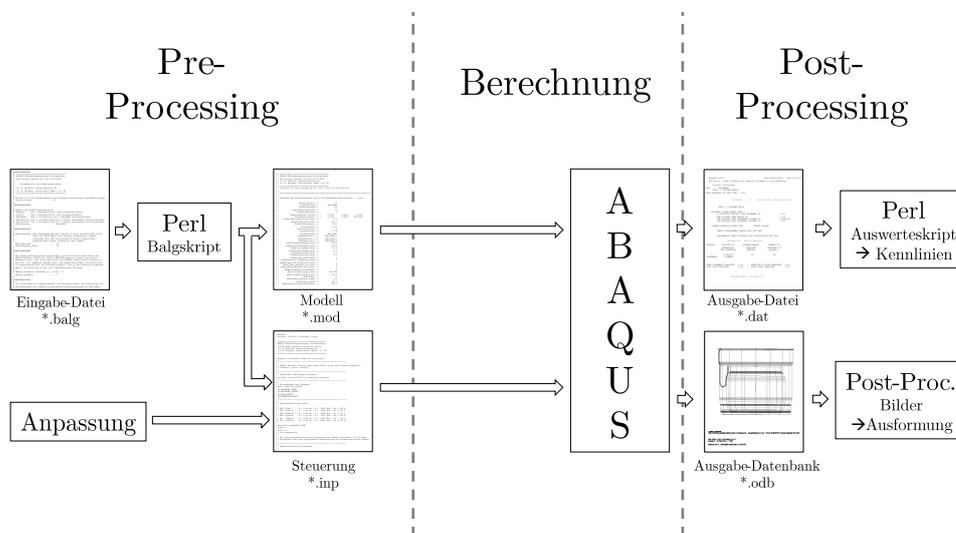


Abbildung 3.2.: Arbeitsablauf mit Perl-Skript - allgemeines Modell

Je nach Einsatzbereich kann die Modellart und -auflösung variiert werden. Es

¹Entwickelt und erstellt von M. Wilhelm (Daimler AG) und M. Metzger (Vibracoustic)

²Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der Mitte der Achse der Vorderräder. Die x-Achse zeigt zum Heck, die y-Achse zum vorderen rechten Rad und die z-Achse nach oben.

können sowohl vollständig aufrotierte als auch Streifenmodelle mit verschiedenen Elementgrößen erstellt werden. Des Weiteren besteht neben einer Modellierung mit Solid-Elementen auch die Möglichkeit eines Membranmodells. Auf Grund der zunehmenden Rechenleistung ist ein Modell mit Solid-Elementen ausreichend schnell simuliert und die Variante mit Membranmodellierung findet kaum noch Anwendung. Über die Balgdicke ist eine verschiedene Anzahl an Elementen einstellbar. Die größte Einstellung ("Embedded") sieht vor, dass ein Element über die Balgdicke generiert wird. Die Rebar-Technik wird, wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, über Flächenelemente implementiert. Diese Elemente liegen in den Solidelementen an der für den Faden angegebenen Position. Die Einstellung "Mehrschicht" erzeugt zwei Solid-Schichten mit den Rebar-Layern direkt zwischen den Elementen. Die feinste Einstellung "Neunschicht"³ erzeugt beim Axialbalg sechs Solid-Schichten mit dem Rebar-Layer in der mittleren Knotenschicht. In Abbildung 3.3 sind die verschiedenen Elementierungen des Skripts skizziert. In den späteren Vergleichsrechnungen werden unterschiedliche Einstellungen verwendet.

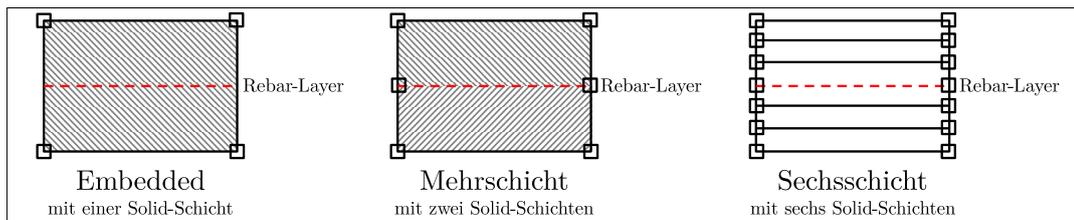


Abbildung 3.3.: Möglichkeiten der Elementierung über Balgdicke

Ein weiteres automatisiertes Skript, welches ebenfalls auf der Rebar-Technik basiert und vereinfacht ist, stellt das ASST (AirSpringSimulationTool)⁴ dar. Dieses Tool dient ausschließlich der axialen Kennlinienberechnung und hat deshalb einen fest vorgeschriebenen Ablauf. Daraus ergibt sich eine einfache Bedienung und Kenntnisse des zu Grunde liegenden FEM-Programms sind nicht nötig. Das Modell wird axialsymmetrisch aufgebaut, da dies für die Bestimmung der Kennlinie und die Abbildung der Kolbenkonturen ausreichend ist. Auf der Ein- und Ausgabeseite ("Pre-" und "Post-Processing") basiert das Tool auf Microsoft Excel und berechnungsseitig auf der FEM-Software MSC Marc/Mentat. In Abbildung 3.4 ist der Ablauf des Tools dargestellt.

³Die Benennung "Neunschicht" stammt aus der Erstellung des Kreuzlagenbalgs mit neun Solid-Sichten und zwei Fadenlagen.

⁴entwickelt von der Vibracoustic; Weiterentwicklung, Erweiterung und Excelein-/ausgabe von Felix Hohmann (Vibracoustic)

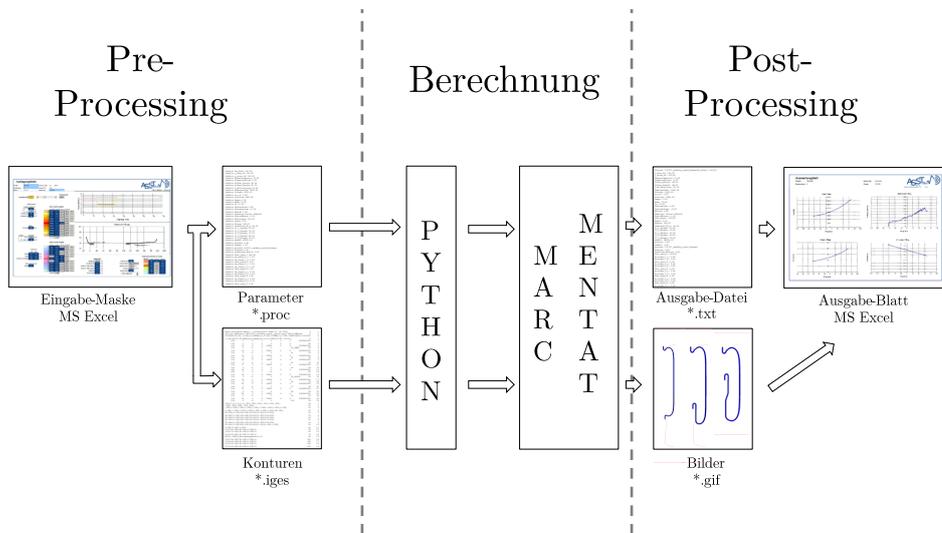


Abbildung 3.4.: Ablauf des ASST (AirSpringSimulationTool) - vereinfachtes Modell

Zunächst werden im "Pre-Processing"-Schritt über die Excel-Eingabe-Datei der Balgaufbau, die Montage und die Konturen der Beschlagteile definiert. Diese Excel-Datei ermöglicht über Makros den Export der Konturen in ein CAD-Format (IGES) und eine Parameter-Datei. Diese Dateien werden an die Berechnung übergeben, die über Marc Mentat in Kombination mit Python durchgeführt wird. Es erfolgt die automatische Modellerstellung inkl. der Durchführung der Simulation. Im Anschluss an die Berechnung ist ein weiteres Skript für die Auswertung in Marc Mentat zuständig. Diese Auswertung sammelt die Ergebnisse in einer Ausgabe-Datei und erstellt Bilder der Federungszustände. Die Ergebnisse werden im "Post-Processing"-Schritt von der Auswertungs-Datei in Excel eingelesen und für den Anwender aufbereitet. Das Auswertungsblatt enthält alle zuvor getätigten Eingaben und die Ergebnisse inkl. der dargestellten Kennlinien (Kraft, Steifigkeit, Volumen, Druck).

Die Unterschiede der beiden vorgestellten Skripte liegt in ihrer Handhabung und dem Einsatzgebiet. Das ASST ist ausschließlich für die Kennlinienberechnung einsetzbar und auf ein axialsymmetrisches Modell beschränkt. Dies ermöglicht kurze Rechenzeiten und eine einfache Handhabung. Das Perl-Skript hingegen ist universell und kann auf spezielle Anwendungsfälle angepasst werden. Allerdings sind für die Anwendung erweiterte Kenntnisse in der FEM nötig und es ist in der Regel mit längeren Simulationszeiten auf Grund der höheren Komplexität zu rechnen. Im Rahmen dieser Arbeit kommt für die Modellierungstechnik Rebar ausschließlich das Perl-Skript zum Einsatz, da neben der Kennlinien-Simulation weitere Rechnungen durchgeführt werden, die ein 3D-Modell erfordern.

3.1.1. Modellierung der Beschlagteile

Neben der Modellierung des Luftfederbalgs sind die Beschlagteile für die Simulation relevant. Es werden jeweils die Außenführung und der Abrollkolben (siehe Abb. 2.3 auf Seite 6) abgebildet. Sie werden in der Steuerungsdatei des jeweiligen Skripts als "analytical rigid surface" vom Typ "revolute" definiert. Hierfür werden aneinandergereiht Linien und Radien angegeben, die die abzubildende Kontur möglichst genau darstellen. In der späteren Rechnung wird der sich ergebene Pfad aufrotiert und fungiert als Kontaktfläche [24]. Die Definition dieser Flächen lässt sich direkt in der Steuerungsdatei durchführen oder im Abaqus CAE von einer CAD-Geometrie ableiten, wenn dieser Linien und Radien zugrunde liegen. In Abbildung 3.5 sind zwei Beschlagteile der später berechneten Luftfeder (W166 AMG Vorderachse) aufrotiert (l.) und im Schnitt (r.) dargestellt.

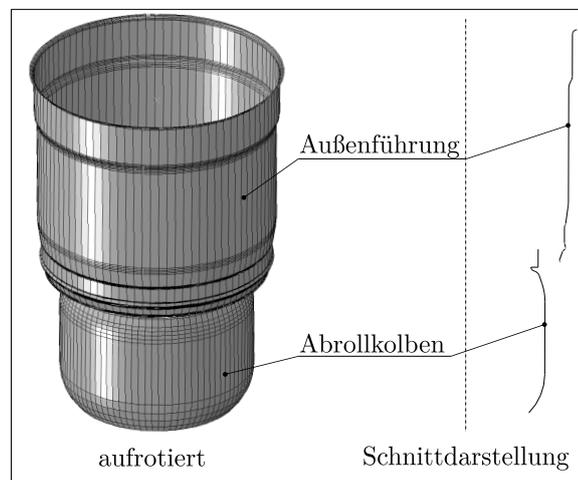


Abbildung 3.5.: Beschlagteile in der Simulation

3.2. Luftfedersimulation

3.2.1. Kennlinie

Die Eigenschaft der Luftfeder wird primär durch ihre Kennlinie beschrieben. Diese ergibt sich aus dem Kraft-Weg-Verlauf einer Messung oder Simulation. Im Rahmen der Vorauslegung einer Luftfeder stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, diese Kennung im Vorwege zu bestimmen. Diese wird in der Auslegung axial bestimmt, was eine analytische Berechnung ermöglicht. Im Folgenden werden die Grundlagen und das Funktionsprinzip einer Luftfeder erläutert und auf die analytische Berechnung eingegangen. Im Anschluss wird die Bestimmung mittels FEM-Simulation beschrieben.

Grundlagen

Das Funktionsprinzip der Luftfeder ist ähnlich zu dem der Gasfeder. Beide Arten arbeiten nach dem Prinzip der Volumenfederung mit dem Unterschied, dass bei der Luftfeder das Volumen von einem Balg, einer flexiblen faserverstärkten Membran, umschlossen ist [6]. Beim Federvorgang ergibt sich durch das eingeschlossene Luftvolumen eine thermodynamische Zustandsänderung. Diese führt durch die Ausformung des Balgs, der Volumenänderung und der daraus resultierenden Druckänderung zu der Charakteristik und Kennlinie⁵ der Luftfeder. Der Kennlinienverlauf ist durch Anpassung von Balg und Beschlagteilen veränderbar, wovon in der Abstimmung⁶ der Luftfeder Gebrauch gemacht wird. Zur analytischen Beschreibung dieser Charakteristik gibt es z.Zt. zwei Ansätze in der Literatur. Zum einen den klassischen Ansatz nach VOSS [1] und PAHL [6], bei dem die Steifigkeit der Balgwand "verschmiert" wird und zum anderen ein vollständiger Ansatz mit einem Zwei-Phasen-Modell nach WELSCH [27] und LÖCKEN et al. [2].

Bei der **klassischen Beschreibung** wird zum Ausgleich der Membranelastizität die sog. wirksame Fläche (od. wirksamer Durchmesser) anstelle einer Verdrängerfläche eingeführt. Diese steht im Zusammenhang mit der äußeren Kraft der Luftfeder und des wirkenden Innendrucks, es gilt [1]:

$$F = p_{\text{ü}} A_W \quad (3.1)$$

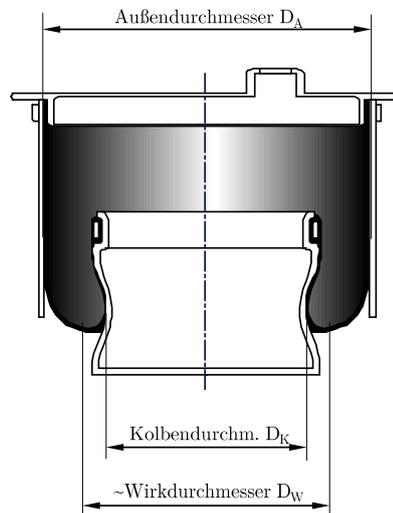


Abbildung 3.6.: Durchmesser eines Rollbalgs mit Außenführung [6]

⁵Kraft der Luftfeder über dem Federweg

⁶Bei der Abstimmung der Luftfeder wird zunächst die Steifigkeit in Konstruktionslage über die genannten Anpassungen eingestellt. Der Steifigkeitsverlauf über dem Federweg kann anschließend über die Änderung der Abrollkontur beeinflusst werden.

Durch die flexible Balgwand, die das Gasvolumen einschließt, ist der wirksame Durchmesser stets kleiner als der Durchmesser des ausgeformten Balgs. Der äußere Begrenzungskreis dieses fiktiven Durchmessers liegt nach VOSS [1] an dem tiefsten Punkt der Rollfalte, wo die Tangenten der Balgwand senkrecht zur Federkraft stehen. Abbildung 3.6 zeigt den Rollbalg mit den angetragenen Durchmessern.

Beim Federvorgang ändert sich das Volumen in der Luftfeder und die Luft wird komprimiert (Einfedern) bzw. expandiert (Ausfedern). Die daraus resultierende Druckänderung lässt sich mit

$$p_1 = p_0 \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^\kappa \quad (3.2)$$

beschreiben [6]. Der Isentropenexponent κ gibt dabei an, ob der Federvorgang statisch (isotherm) mit $\kappa = 1$ oder dynamisch (adiabat) mit $\kappa \approx 1.4$ ist. Mit den Annahmen aus 3.1, 3.2 und der Gesamtsteifigkeit

$$c_{gesamt} = \frac{dF}{ds}, \quad (3.3)$$

lässt sich die vereinfachte Luftfedersteifigkeit mit:

$$c = p_{\ddot{u}} \frac{dA_W}{ds} + A_W \frac{dp_{\ddot{u}}}{ds} \quad (3.4)$$

nach VOSS [1] und PAHL [6] angeben. Der erste Summand in Gleichung 3.4 stellt die Federrate in Abhängigkeit der Änderung der wirksamen Fläche durch die Kolbenkontur dar und der Zweite in Abhängigkeit der Volumenänderung.

Beim **vollständigen Ansatz** wird die Elastizität des Balgs und des Volumens in einem Zwei-Phasen-Modell betrachtet. Die Gesamtsteifigkeit teilt sich in die thermodynamische Steifigkeit, die durch die Volumenänderung und die Komprimierung des Gases entsteht und in die mechanische Steifigkeit des Balgs nach WELSCH [27] und LÖCKEN et al. [2] auf:

$$c_{gesamt} = c_{therm} + c_{mech} \quad (3.5)$$

Die thermodynamische Steifigkeit ist, wie auch im klassischen Ansatz, abhängig von der Geschwindigkeit des Federvorgangs. Es wird ebenfalls von den Grenzfällen mit unendlich langsamer Federung (isotherm) und schneller Federbewegung mit hohen Frequenzen (adiabat) ausgegangen. Mit dem Druck um die Ruhelage (K0-Lage) p_0 , dem Volumen in K0 V_0 , dem Umgebungsdruck p_u und den Koeffizienten V_1 und V_2 ergibt sich nach LÖCKEN et al. [2]:

$$c_{stat} = p_0 \frac{V_1^2}{V_0} - (p_0 - p_u) V_2 \quad (3.6)$$

$$c_{dyn} = \kappa p_0 \frac{V_1^2}{V_0} - (p_0 - p_u) V_2 \quad (3.7)$$

Die Koeffizienten V_1 und V_2 lassen sich um die K0-Lage mit $i_R = 1/2$ wie folgt bestimmen [2]:

$$V_1 = \pi(R_a^2 - R_0^2) - \frac{\pi R_a^2}{i_R} \quad (3.8)$$

$$V_2 = -4\pi R_0 \tan(\alpha_0) \quad (3.9)$$

Die mechanische Steifigkeit ließe sich ebenfalls analytisch beschreiben. Hierfür gibt es derzeit noch keine Umsetzung. In der Arbeit von WELSCH [27] wird ein phänomenologisches Modell verwendet, welches von einer linear veränderlichen Steifigkeit über dem Federweg ausgeht. Dies hat bei den großen Dehnungen im Elastomer jedoch keine ausreichende Genauigkeit. Für eine exaktere Bestimmung der mechanischen Eigenschaften des Rollbalgs kann eine FEM-Simulation herangezogen werden, da hierbei die thermodynamische Zustandsänderung durch den Federvorgang und die mechanische Eigenschaft der Rollfalte direkt gekoppelt sind, sodass erst durch einen nachträglichen Rechengang die beiden Steifigkeiten wiederum entkoppelt werden können.

Berechnungsmodell

Die FEM-Simulation ermöglicht es die Kennlinie jeder Balgvariante mit konturierten Beschlagteilen jeglicher Art zu berechnen. Die Kennlinienberechnung ist in mehrere Lastfälle aufgeteilt, in denen die Montage des Luftfederbalgs und die Positionierung der Beschlagteile erfolgt. Die Kennlinie wird anhand eines vollen axialen Federvorgangs (max. Ausfederung bis max. Einfederung) aufgenommen. In Abbildung 3.7 ist der Ablauf skizziert. Auf Grund der axialen Federbewegung ist hierbei ein Streifenmodell mit zyklischer Symmetrie ausreichend. Die Vergleichsrechnungen werden mit einem Streifenmodell in Abschnitt 4.2.1 aufgeführt und mit Prüfstandsmessungen abgeglichen.

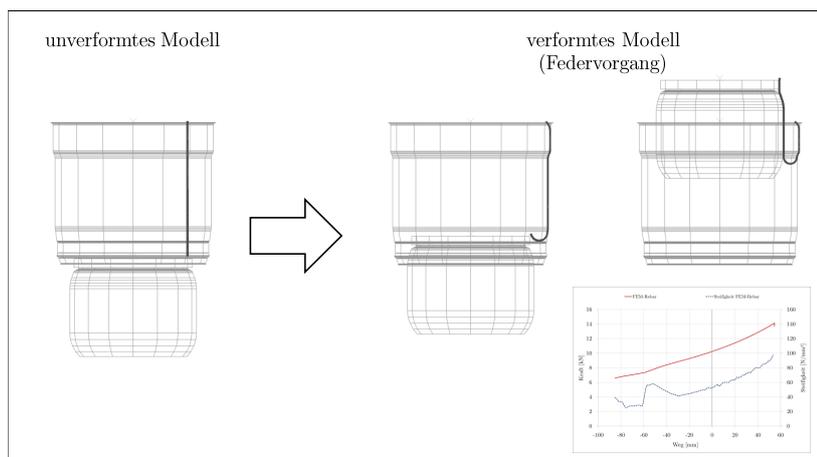


Abbildung 3.7.: Ablauf der Kennlinienberechnung

3.2.2. Verklemmung

siehe Abschnitt A.1 auf Seite 89 (gesperrter Inhalt im Anhang)

3.2.3. Beanspruchungsanalyse

Die Beanspruchungsanalyse vom Luftfederbalg ist in zwei grundlegende Bereiche einzuteilen:

- Beanspruchung des Fadenmaterials
- Beanspruchung im Elastomer

Für die Untersuchung der Beanspruchung beider Bereiche ist die Simulation eines vollständig modellierten Luftfederbalgs erforderlich und eine axialsymmetrische Modellierung ist nicht mehr ausreichend. Hierzu kann die Kinematik der Fahrzeugachse gegeben sein oder die Achse wird mit Hilfe eines Balkenersatzmodells nachmodelliert. Mit diesem Modell lassen sich an den verschiedenen Positionen Fadenkräften auswerten. Da das Fadenmaterial nur Zugkräfte aufnehmen sollte, ist hierbei ein Auslegungskriterium die Vermeidung von Fadenstauchungen unter Achskinematik. Das zweite Auslegungskriterium sind die auftretenden Kräfte unter Achskinematik bei zulässiger maximaler Last, die einen je nach Fadenmaterial spezifischen Wert nicht überschreiten dürfen. Ein weiteres Auslegungskriterium, welches durch das Fadenmaterial zum größten Teil beeinflusst wird, ist die Ausformung des Balgs im Bauraum des Fahrzeugs. In der Simulation werden verschiedene Federpositionen angefahren und in ein CAD-System überführt. Hier kann der ausgeformte Balg in den Bauraum des Fahrzeugs importiert werden und es erfolgt eine Freiganguntersuchung [28]. Für den späteren Vergleich werden Ausformung und Fadenkräfte verwendet.

Bei der Untersuchung der Beanspruchung im Elastomer stößt man an die Grenze der Rebar-Technik (näheres hierzu in Abschnitt 4.2.3). Eine Aussage über den Dehnungszustand zwischen den Fäden ist auf Grund der "Verschmierung" der Steifigkeiten über die Elemente nicht möglich. Im Querschnitt ist lediglich die gemittelte Dehnung dargestellt, die sich durch die Aufweitung des Balgs geometrisch ergibt. Unter diesen Gesichtspunkten entstand die Motivation eines vollvernetzten Balgmodells für den Axialbalg, welches im folgenden Kapitel vorgestellt und angewendet wird.

4. Vollvernetztes Balgmodell

Durch die Entwicklung in der Computertechnik ist es heutzutage möglich, die Diskretisierung der Simulationsmodelle immer weiter zu verfeinern, um so genauere und detailliertere Ergebnisse zu erhalten. Bei der Luftfederberechnung ist eine detaillierte Abbildung notwendig, wenn der Verbund mit Faden und Elastomer betrachtet werden soll. Das zuvor vorgestellte Standardbalgmodell ist hierfür nur bedingt geeignet, da über die Verschmierungstechnik Rebar nur die globalen Eigenschaften wie Kennlinie, Ausformung und Reaktionskräfte abbildbar sind. Einzig lassen sich die Fadenkräfte als Ergebnis der Beanspruchung im Verbund auswerten. Die Abbildung des Dehnungszustandes im Querschnitt des Balgs ist somit nicht ausreichend genau möglich. Aus diesem Grund ist ein vollvernetztes Balgmodell nötig, welches sowohl die globalen Eigenschaften bei ausreichend Rechenleistung abbilden kann, als auch detaillierte Ergebnisse im Luftfederbalg mittels Submodelltechnik liefert. Für den Kreuzlagenbalg wurde im Rahmen einer Diplomarbeit bereits ein Mikroskopmodell (Submodell) von PHAM [29] entwickelt. Diesem Modell liegt ein globales Modell der Luftfeder in der FEM-Software ABAQUS zu Grunde, aus dem die Randbedingungen in Form von Fadenverschiebungen über eine Parameterdatei an die FEM-Software Marc Mentat übergeben werden. In MSC Marc Mentat wird die parametrische Zelle des Kreuzlagenbalgs skriptgesteuert aufgebaut, berechnet und ausgewertet.

Eine weitere Neuerung im Bereich der Modellierung stellt ein Fadenmodell von DONNER (TU Chemnitz) [30] dar. Hier wird die Ausformung des Fadens mit den einzelnen Garnen und die Verzwirnung berücksichtigt. Zunächst wird der Faden mit seiner Zwirnung und Geometrie modelliert. Durch eine Validierungsrechnung wird die Eigenschaft an einen Zugversuch angepasst und die Materialparameter werden in das eigentliche Materialmodell überführt. Das Materialmodell lässt sich auf ein beliebiges Netz anwenden, welches fein genug ist und bildet die Orthotropie sowie den Zwirn unter Beanspruchung im Verbund ab.

In Zukunft wird die kontinuierliche Steigerung der Rechenleistung eine fortlaufende feinere Modellierung ermöglichen. Hieraus entsteht die Motivation des im nächsten Abschnitt vorgestellten vollvernetzten Balgmodells, welches sowohl die globale, als auch die Submodellebene für den Axialbalg bedienen kann.

4.1. CAE-Processing und Validierung

Für die Erstellung des Luftfederbalgs nach der Modellierungstechnik Vollvernetzung (vgl. Abschnitt 2.2.4) wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Python-Skript entwickelt und erstellt. Das Skript ist in dem Pre- und Post-Processor von Abaqus (Abaqus CAE) über ein GUI ("Graphical User Interface") implementiert. Die Eingabe der Daten erfolgt direkt auf der grafischen Ebene. Der Ablauf des Skripts ist in Abbildung 4.1 und die grafische Oberfläche in Abbildung 4.2 dargestellt.

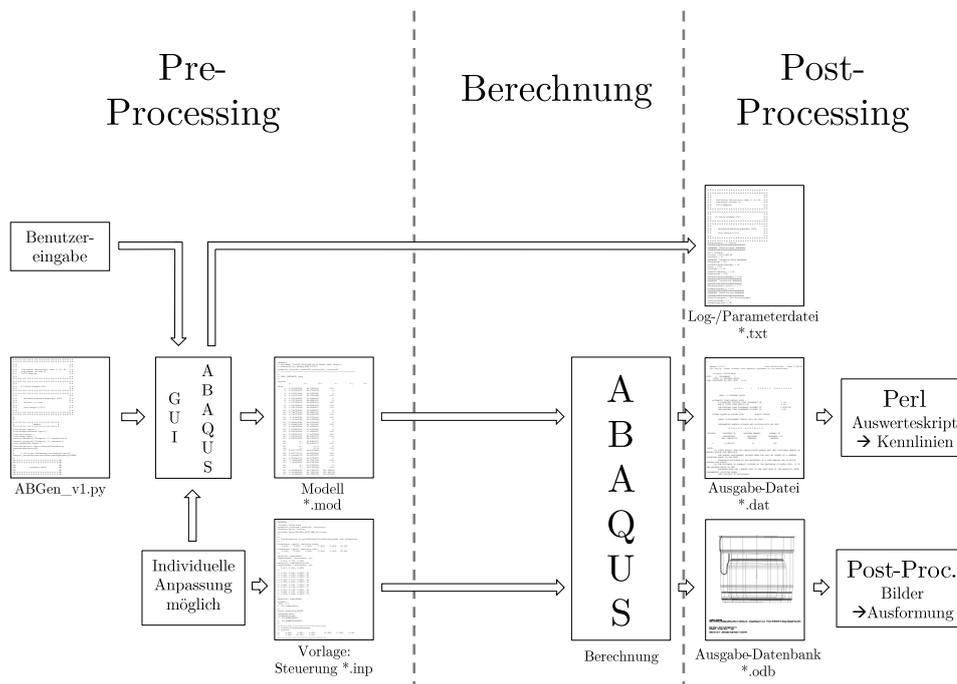


Abbildung 4.1.: Arbeitsablauf mit Axialbalg-Generierungsskript (GUI + Abaqus CAE)

In der Eingabemaske wird Benennung, Geometrie, Aufweitung des Balgs, wahlweise eine Ausrichtung im Fahrzeugkoordinatensystem und die Vernetzung angegeben. Des Weiteren können mehrere Modellarten vom 1-3 Streifenmodell bis hin zum Vollmodell gewählt werden. Nach Eingabe der Daten wird das Skript ausgeführt und steuert direkt den CAE-Kern an. Hierbei werden die Operationen zur Modellerstellung ausgeführt. Nach abgeschlossener Erstellung kann das Modell nach Wunsch im Abaqus CAE modifiziert werden. Anderenfalls wird die ausgegebene Modell- und Parameterdatei aus dem Arbeitsverzeichnis entnommen.

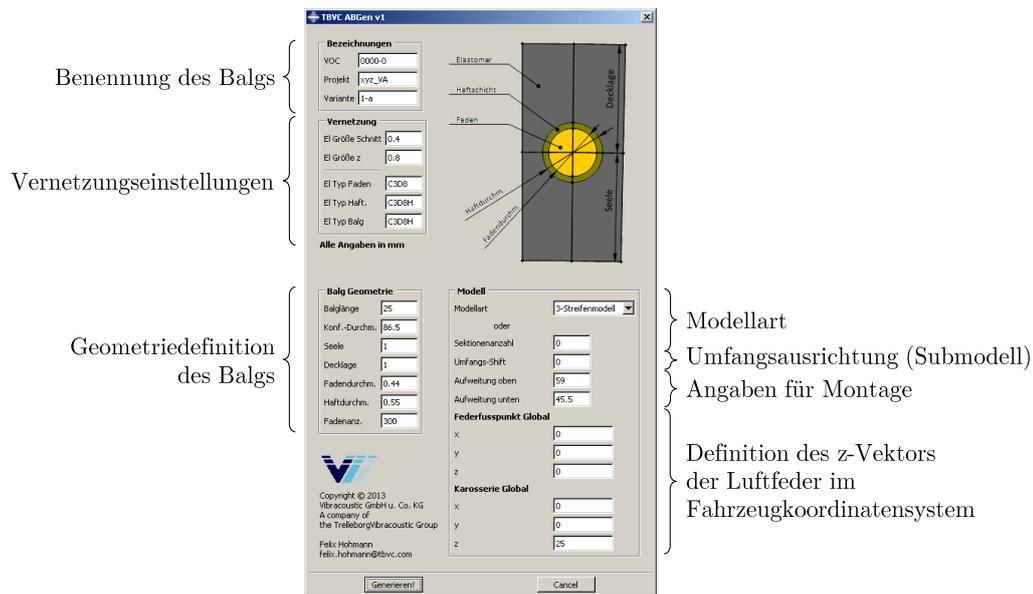


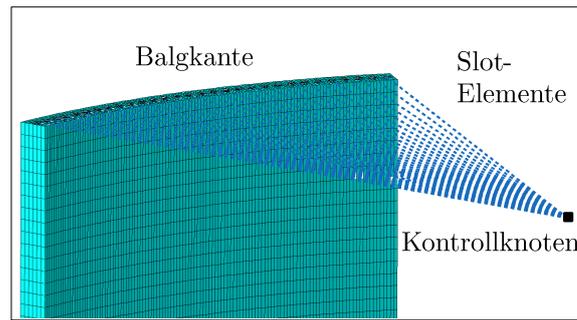
Abbildung 4.2.: Grafische Eingabemaske des Axialbalg-Generierungsskripts

Die Steuerung des Modells erfolgt ähnlich wie bei dem Balgskript aus Abschnitt 3.1 mit einer Datei, die Materialdaten, Montageschritte und Ausgabeanforderungen enthält. Im Folgenden werden Aufbau des Skripts und die Arbeitsschritte zusammengefasst erläutert. Der Quelltext befindet sich im Anhang in Abschnitt A.3.

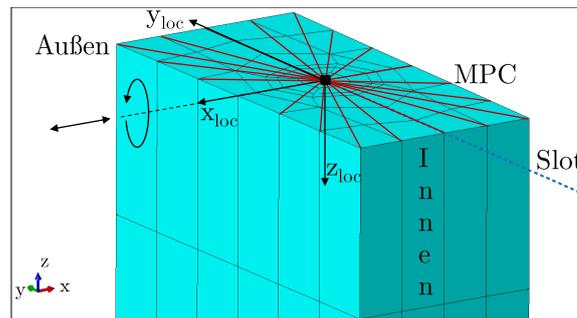
Aufbau und Funktionsweise des Axialbalg-Generierungsskripts

Zu Beginn der Hauptroutine werden die Vektoren zur Ausrichtung des Luftfederbalgs errechnet. Dies erfolgt nach der gleichen Konvention wie im Perl-Balgskript für die Rebar-Technik¹ aus Abschnitt 3.1. Anschließend werden die Punkte zur Erstellung der Skizze des Balgquerschnitts errechnet. Die Skizze bildet einen Sektor mit einem Faden ab (vgl. Abbildung 4.2 und 4.4). Es erfolgt die Erstellung der Skizze mit anschließender Extrusion und der angegebenen Balglänge im Ursprung des globalen Koordinatensystems. Für die Definition der Materialien werden drei Bereiche definiert: Faden, Haftschrift und Elastomer. Nach der Erstellung der Referenzknoten, die sich in der Mitte des Balgs jeweils auf der Höhe der oberen und unteren Kante befinden, wird das Segment je nach Eingabe aufrotiert und zu einem "Part" vereint. Danach werden über Unterfunktionen die Knotensets erstellt. Anschließend erfolgt die translatorische Verschiebung und rotatorische Ausrichtung nach dem angegebenen Vektor.

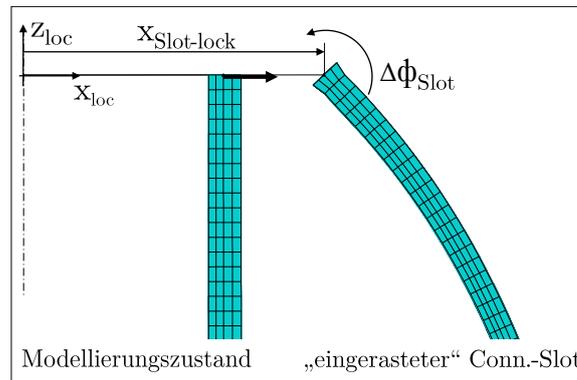
¹Die lokale x-Achse liegt in der Ebene, die von der lokalen z-Achse und der globalen x-Achse aufgespannt wird.



(a) Connector-Elemente



(b) MPC-Definition



(c) Bewegung der Connector-Elemente

Abbildung 4.3.: Modellierung der Balganbindung

Für die später in der Berechnung erforderliche Aufweitung des Luftfederbalgs und die Verbindung mit dem Kontrollknoten zur Aufbringung der Randbedingungen werden sog. "Connector-Elemente" verwendet und durch das Skript erstellt. Sie besitzen ein eigenes Koordinatensystem und die Bewegungsfreiheitsgrade können vorgegeben werden. Des Weiteren lässt sich ein "Einrast-Punkt" ("Lock") definieren, an dem der Knoten des "Connectors" fixiert wird. Pro Segment (Faden) wird jeweils oben und unten ein "Connector-Element" erstellt, was eine Verbindung zwischen Kontrollknoten in der Balgmitte und Knoten

im Fadenmittelpunkt herstellt. Exemplarisch ist eine Balgoberkante mit Slot-Elementen und Kontrollknoten in Abbildung 4.3-a dargestellt. Als Freiheitsgrad wird die x-Achse des lokalen Koordinatensystems definiert, welche in radialer Richtung zum jeweiligen Segment ausgerichtet ist. Die Rotation um diese Achse und die z-Achse ist blockiert. Eine Rotation um die Achse in Umfangsrichtung (lokale y-Achse) ist frei, um die Bildung einer Rollfalte während der Montage zu ermöglichen. Die Bewegungen der Connector-Elemente sind in Abbildung 4.3-c zu sehen. Der Knoten des Fadenmittelpunkts ist über ein MPC (= "MultiPoint-Constraint" [24]) vom Typ "Coupling / Kinematic" mit den übrigen Knoten der Balgkante des jeweiligen Segments verbunden. Der MPC-Definition ist ebenfalls ein lokales Koordinatensystem zugewiesen. Dieses ist mit der lokalen x-Achse in Umfangsrichtung des Balgs ausgerichtet. Die Translation in die lokale x-Richtung (entspricht Umfangsrichtung) ist freigelassen um eine Aufweitung des Balgs zu ermöglichen. In Abbildung 4.3-b ist ein Segment mit MPCs und Koordinatensystem dargestellt.

Nachdem alle Sets, Flächen, Slots und MPCs erstellt sind, wird die automatische Vernetzung nach den Angaben aus der GUI-Eingabe durchgeführt. Das Netz ist durch die am Anfang generierte Querschnittsskizze des Balgs zu einer Struktur "gezwungen". So wird um den Faden eine Elementschicht mit der Maßangabe der Haftschrift erzeugt und durch die Mittellinien wird eine symmetrische Vernetzung eines Segments bewirkt. In Abbildung 4.4 sind vernetzte Balgstreifen in verschiedenen Netzfeinheiten im Schnitt dargestellt. Die fett gedruckten Linien zeigen die zugrunde liegende Skizze.

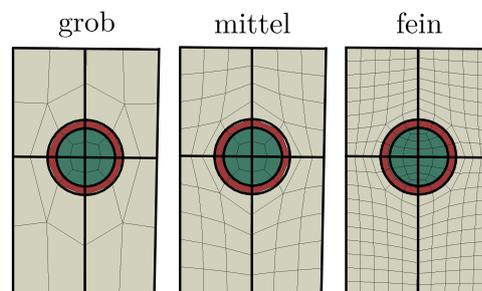


Abbildung 4.4.: Vernetzung eines Balgsegments im Schnitt

Das Modell wird nach Fertigstellung im Arbeitsverzeichnis von Abaqus abgelegt, kann jedoch wahlweise im Abaqus CAE noch nachbearbeitet werden und wiederholt herausgeschrieben werden. Die Steuerung des Modells erfolgt über eine Steuerungsdatei wie im Ablauf in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Datei beinhaltet:

- Transformation der Kontrollknoten (nur bei Ausrichtung unter Kinematik nötig)

- Materialdaten
- Angabe der auszuwertenden Knoten (Reaktionskräfte, etc.)
- Angabe zur zyklischen Symmetrie (nur bei Streifenmodell)
- Beschlagteile und Kontaktdefinition
- Lastfälle zur Montage und zum Federvorgang

Der Aufbau der Steuerungsdatei ist an den des Balgskripts (Abschnitt 3.1) angelehnt, um Modelle direkt übernehmen zu können.

4.1.1. Aufwandsminimierung durch Submodell

Wenn zur Betrachtung des Beanspruchungszustands im Verbund eine feinere Diskretisierung nötig ist, kann mit der aktuellen Rechenleistung ein gesamtes vollvernetztes Balgmodell nur mit hohem Zeitaufwand von über einer Woche² simuliert werden. Hier wird durch die Submodelltechnik Abhilfe geschaffen. Es werden durch eine globale Berechnung mit einem gröberen Netz die Randbedingungen für die Submodelle bereitgestellt (siehe Abschnitt 2.2.4 auf Seite 20). Das Submodell kann beliebig im Balg positioniert werden und erhält ein deutlich feineres Netz als das Globalmodell. Zur Erstellung des Submodells wird ebenfalls das Axialbalg-Generierungs-Skript aus dem vorherigen Abschnitt verwendet. Der Aufbau des globalen Modells kann nach beiden Modellierungstechniken erfolgen. Im Folgenden wird auf den Aufbau, die Randbedingungen und die Positionierung des Submodells näher eingegangen.

Aufbau des Submodells

Zur Erstellung eines Submodells wird im Axialbalg-Generierungsskript die Modellart "Submodell" gewählt. Bei dieser Voreinstellung werden min. vier Segmente erzeugt und die Erstellung der "Connector-Elemente" und "MPCs" wird übersprungen. Die Länge der Submodellzelle wird über die Balglänge bestimmt und die Höhenposition über die Angabe des Federfußpunktes. Steht das Globalmodell nicht senkrecht auf der globalen z-Achse, sondern im Fahrzeugkoordinatensystem, muss die Position in Achsrichtung durch Vektorrechnung ermittelt werden³. In Umfangsrichtung lässt sich die Mikroskopzelle mit der Option "Umfangs-Shift" positionieren, indem ein Winkel in Grad vorgegeben wird. In der Ausgangsposition befindet sich die Zelle mit der Längsschnittkante auf der yz-Ebene im 1. Quadranten der xy-Ebene. Eine detailliertere Darstellung dieses

²Vollvernetztes Balgmodell benötigt acht Tage Rechenzeit auf 12 CPUs mit einem Arbeitsspeicherbedarf von 100 GByte (siehe Tab. 4.13 auf Seite 78).

³Normierung des lokalen z-Vektors der Luftfeder auf die Länge 1 und die anschließende Multiplikation mit der gewünschten Höhenposition ergibt den neuen Federfußpunkt

Vorgangs erfolgt in Abschnitt 4.2.4.

Die Steuerung der Mikroskopzelle erfolgt wie beim Globalmodell über die Steuerungsdatei. Es ist für jeden Lastfall der globalen Rechnung ein Lastfall für das Submodell anzulegen. Jeder davon enthält die für das Submodell spezifischen Randbedingungen der vier Schnittkanten und den Innendruck als Last. Dieser kann aus dem Globalmodell übernommen und mittels Tabelle gesteuert werden (vgl. [24, Kap. 33.1.2 Amplitude curves]). Wenn der zu untersuchende Bereich zu dem Zeitpunkt der Auswertung am Abrollkolben oder der Außenführung anliegt, sind die Beschlagteile aus dem Globalmodell ebenfalls zu übernehmen. Ist nur die Rollfalte von Interesse, kann die Kontaktdefinition ausgelassen werden und es wird eine kürzere Rechenzeit erreicht.

Randbedingungen

Wie in Abschnitt 2.2.4 bereits beschrieben wurde, gibt es in Abaqus zwei Arten der Submodelltechnik [5]:

- "*node-based*" - Übertragung der **Verschiebungen** von Global- zu Submodell
- "*surface-based*" - Übertragung der **Spannungen** von Global- zu Submodell

Nach dem "*Abaqus analysis manual*" [24] ist die erstgenannte die gebräuchlichste und empfohlene Methode. Aus diesem Grund wird in nachfolgenden Submodellberechnungen die "*node-based*"-Technik angewendet. Des Weiteren ist nach der "*ANSYS Documentation*" [31] darauf zu achten, dass die Ränder des Submodells weit genug vom Ort der Auswertung entfernt sind⁴. Somit sind mindestens zwei oder drei Submodelle mit unterschiedlichen Größen zur Validierung nachzurechnen und zu vergleichen ob sich die Ergebnisse des Dehnungs- oder Spannungszustandes über die Modellgrößen verändert. Für die verschiedenen Modellgröße wird die Anzahl der Segmente variiert. Der Vertrauensbereich über der Länge wird anhand des Dehnungsverlaufs validiert (siehe Abschnitt 4.2.4 auf Seite 67). In Abbildung 4.5 ist ein Submodell mit sechs Segmenten und den farbig markierten Randbedingungen dargestellt. Für die Balginnen-/außenseite werden keine Randbedingungen aus dem Globalmodell übertragen, sondern der Kontakt mit den Beschlagteilen für die Außenseite und der Innendruck aus dem Globalmodell für die Innenseite definiert.

⁴Dies beruht auf dem Prinzip von St. Venant, was besagt, dass sich Unregelmäßigkeiten am Krafteinleitungspunkt ab einem gewissen Abstand vernachlässigen lassen, da sie sehr schnell abklingen [31]

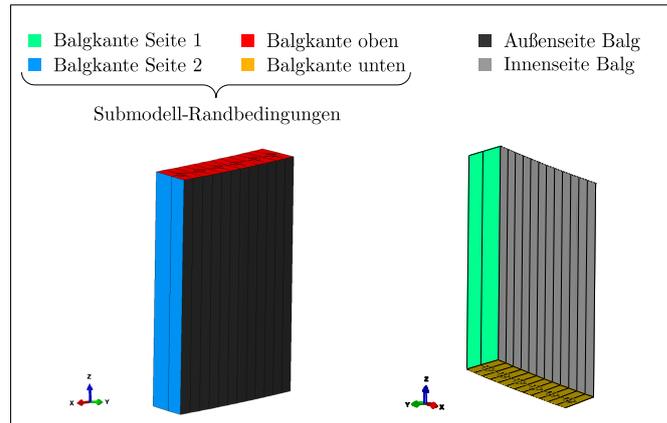


Abbildung 4.5.: Randbedingungen der Submodellzelle

4.1.2. Geometrie und Werkstoffeigenschaften

Vermessung der Balgvarianten

Für eine genaue Abbildung der Luftfederbälge in der Simulation sind neben den Materialkennwerten die Maße der Komponenten des Verbunds und deren Ausrichtung im Balgquerschnitt von Bedeutung. Beim Standardbalgmodell werden idealisierte Maße aus der Fertigungsvorschrift verwendet. Von diesen Maßen wird nach Erfahrungswerten ein Betrag abgezogen, sodass man sich der tatsächlichen Balgdicke nach der Vulkanisation annähert (vgl. Abschnitt 2.1.5). Ebenso wird die Position des Fadens nach Fertigungsvorschrift angegeben. Wenn die Beanspruchung im Elastomer im Fokus steht, ist eine genauere Positionierung der Fäden erforderlich. Somit wurden von den verwendeten Luftfederbälgen nach der Fertigung Schnitte angefertigt und unter dem Mikroskop vermessen. Abbildung 4.6 zeigt eine Mikroskopaufnahme, die davon abgeleitete idealisierte Geometrie und rechts die wiederum daraus abgeleitete Diskretisierung im FEM-Modell. Die Ergebnisse der Vermessung der Balgvarianten sind im Anhang in Abschnitt A.4 abgedruckt.

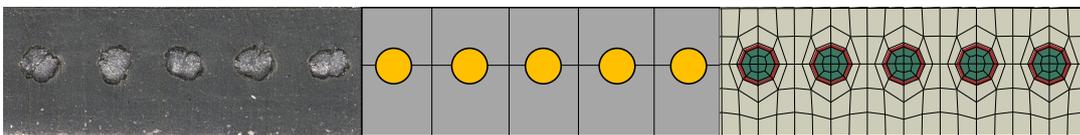


Abbildung 4.6.: Schnitt eines Luftfederbalgs: real, idealisiert, FEM (v.l.)

Die verwendeten Balgvarianten sind in Tabelle 4.1 aufgelistet und werden im Nachfolgenden Balg 1 und Balg 2 genannt.

Tabelle 4.1.: verwendete Balgvarianten

Balg-variante	Faden	Fadenanzahl	Mischung	Konfektionsdurchmesser
Balg 1	Polyester	300 Stck.	Mischung 1	95 mm
Balg 2	Polyamid	300 Stck.	Mischung 2	95 mm

Materialmodell des Elastomers

Für eine genauere Abbildung des Verbundes sind die zwei vorgestellten Modelle Mooney-Rivlin und Yeoh aus Abschnitt 2.2.2 zum Vergleich herangezogen worden. Zum einen wurden die für das Modell Mooney-Rivlin eingesetzten Standardparameter⁵ genutzt und zum anderen auf einen Zugversuch angepasste Parameter mit beiden Modellen. Der Zugversuch wurde im Rahmen der Arbeit vom Lieferanten der Elastomermischung durchgeführt. In Abbildung 4.7 sind die Ergebnisse der Parameterermittlung für die zwei verwendeten Elastomermischungen dargestellt. Es sind jeweils die gemessenen Zugversuche (gestrichelt), die Standard Koeffizienten für Mooney-Rivlin (gepunktet), das angepasste Modell Mooney-Rivlin (hellblau) und das ebenfalls angepasste Materialmodell Yeoh (schwarz) dargestellt. In Abbildung 4.7-a ist zusätzlich eine gemessene Hysterese dargestellt (dunkelblau).

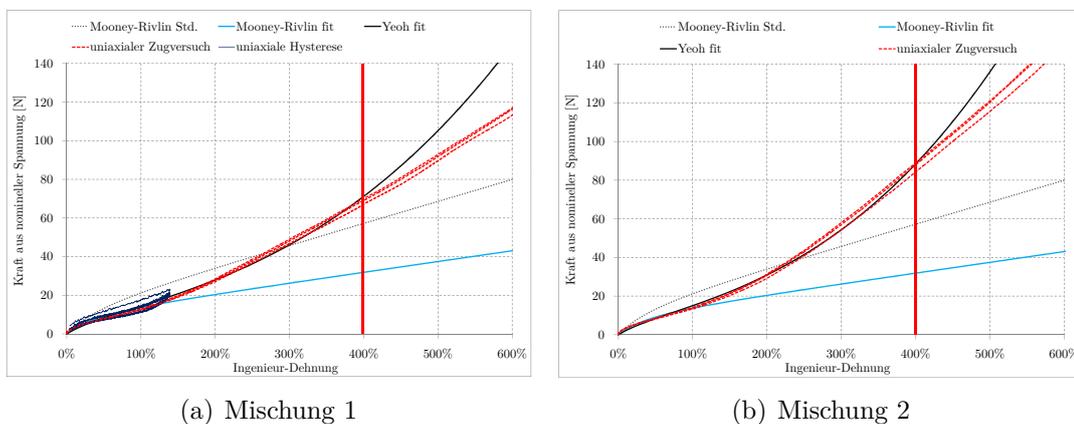


Abbildung 4.7.: Parameterermittlung nach uniaxialen Zugversuch

Das angepasste Modell Mooney-Rivlin ist bei beiden Elastomermischungen gleich, da der Anfangsbereich der Kraft-Weg-Kurve nahezu identisch ist und der Be-

⁵Die Standardparameter sind einer Tabelle entnommen, die eine Korrelation zwischen Shore-Härte und den Mooney-Rivlin Parametern herstellt.

reich ab 120% Ingenieurs-Dehnung⁶ mit dem Modell nicht mehr abbildbar ist. Der "S-Schlag" der Messung lässt sich besser mit dem Yeoh-Modell bis zu einer Dehnung von 400%⁷ abbilden. In Tabelle 4.2 sind die Materialkoeffizienten aufgelistet.

Tabelle 4.2.: Parameter für Materialmodelle

Mischung	1			2		
Mooney-Rivlin Std.	C_{10} 0.352	C_{01} 0.088		C_{10} 0.328	C_{01} 0.082	
Mooney-Rivlin fit	C_{10} 0.17	C_{01} 0.15		C_{10} 0.17	C_{01} 0.15	
Yeoh	C_{10} 0.24	C_{20} 0.0046	C_{30} 0	C_{10} 0.24	C_{20} 0.007	C_{30} 0

Materialmodell des Fadens

Für den Faden werden isotrop und orthotrop elastische Eigenschaften in den Modellen verwendet. Bei der Modellierungstechnik Rebar wird nur die isotrope Eigenschaft angegeben, da die Quereigenschaften des Fadens nicht auf die Elementsteifigkeit im FE-Modell übertragen werden (vgl. [24]). Aus den Kennlinien des Fadenmaterials liegt die Anfangssteigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve vor und es ergibt sich somit ein E-Modul von 4000 MPa für den Polyester-Faden und 2000 MPa für den Polyamid-Faden. Diese E-Moduln werden für das orthotrope Materialmodell in Zugrichtung übernommen. Die Fadeneigenschaften in Querrichtung wurden, angelehnt an die Arbeit von PHAM [29], abgeschätzt und mit Test-Simulationen auf numerische Stabilität überprüft. Die verwendeten Moduln für die beiden Fadenmaterialien sind in Tabelle 4.3 aufgelistet.

⁶120% Ingenieurs-Dehnung entsprechen ca. 80% logarithmischer Dehnung

⁷400% Ingenieurs-Dehnung entsprechen ca. 110% logarithmischer Dehnung

Tabelle 4.3.: Moduln für orthotropes Material der Fäden

Faden	Polyester	Polyamid
E_{11}	50	50
E_{22}	50	50
E_{33}	4000	2000
ν_{12}	0.3	0.3
ν_{23}	0.3	0.3
ν_{31}	0.3	0.3
G_{12}	1000	1000
G_{23}	1000	1000
G_{13}	1000	1000

Die Eingabe in den Steuerungs-Dateien für die FEM-Software Abaqus erfolgt gemäß der Gleichungen 4.1-4.9 des ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL [24]:

$$D_{1111} = E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})\mathcal{Y} \quad (4.1)$$

$$D_{2222} = E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})\mathcal{Y} \quad (4.2)$$

$$D_{3333} = E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})\mathcal{Y} \quad (4.3)$$

$$D_{1122} = E_1(\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23})\mathcal{Y} \quad (4.4)$$

$$D_{1133} = E_1(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32})\mathcal{Y} \quad (4.5)$$

$$D_{2233} = E_2(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31})\mathcal{Y} \quad (4.6)$$

$$D_{1212} = G_{12} \quad (4.7)$$

$$D_{1313} = G_{13} \quad (4.8)$$

$$D_{2323} = G_{23} \quad (4.9)$$

mit

$$\mathcal{Y} = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}} \quad (4.10)$$

4.1.3. Validierung des Verbunds

Um die Berechnungsvarianten in nachfolgenden Abschnitten etwas einzugrenzen werden die Materialparameter des Verbunds anhand von drei Versuchen validiert und ausgewählt. Hierzu wurden Zug- und Druckversuche an Balgausschnitten (Abschnitt A.5.3 und A.5.4) durchgeführt, sowie die Ausformung der Axialbälge in einem Torsions-Kopplungs-Prüfstand (Abschnitt A.5.2) untersucht. Für die Validierung sind zwei Balgvarianten mit gleicher Fadenanzahl, jedoch unterschiedlichem Faden- und Matrixmaterial verwendet worden (Balg 1 und Balg 2).

Im Folgenden werden die Validierungsrechnungen beschrieben und die Ergebnisse im Vergleich zu den Messungen aufgezeigt. Die jeweiligen Versuchsaufbauten sind im Anhang in A.5 beschrieben. In Tabelle 4.4 sind die Varianten über eine Matrix definiert. Für beide Balgvarianten und alle drei Versuche ergibt sich eine Anzahl von 42 Simulationen.

Tabelle 4.4.: Varianten zur Validierung

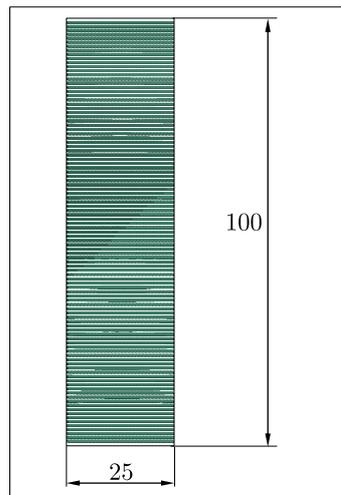
#	Mod.- technik		Materialmod. Elastomer			Mat. Faden	
	Rebar	Voll	Yeoh	M. fit ⁸	M. Std. ⁹	iso	ortho
1		x	x			x	
2		x	x				x
3		x		x		x	
4		x			x	x	
5	x		x			x	
6	x			x		x	
7	x				x	x	

Zug

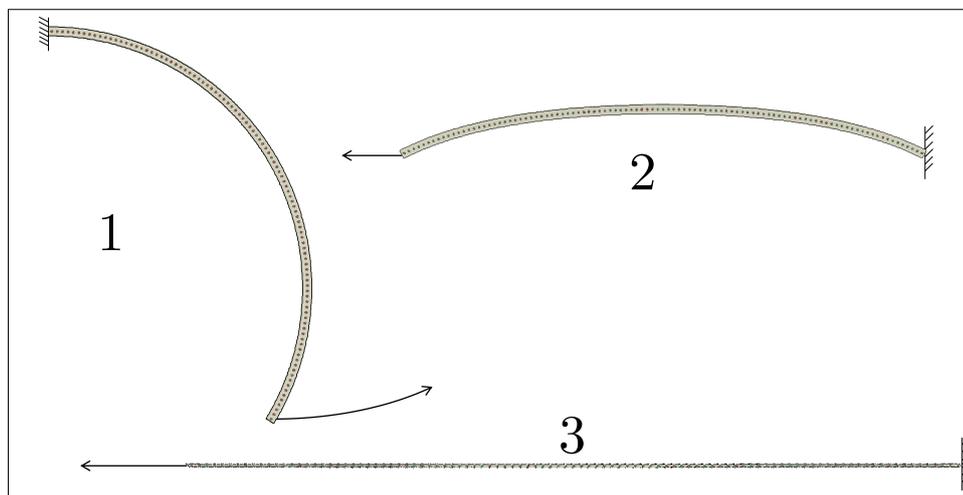
Beim Zugversuch wird an einem Balgstreifen mit den Maßen 100x25mm quer zum Festigkeitsträger gezogen, damit die Eigenschaften des Fadens in Längsrichtung nicht dominieren und der Einfluss der Orthotropie bewertet werden kann. Der Schnitt erfolgt so, dass die kurze Schnittkante parallel zu den Fäden verläuft (vgl. Abb. 4.8-a). Das Modell wird mit den beiden Modellierungstechniken und den vorgestellten Skripten aus Abschnitt 3.1 und 4.1 erstellt. Es erfolgt zunächst auf Grund der runden Form des Balgs ein Lastfall zur Ausrichtung, bis der Balgstreifen nahezu eben ist. Im Anschluss wird der Streifen weggesteuert uniaxial um 200mm analog zum Versuch ausgelenkt. Die drei Lastfälle sind in Abbildung 4.8-b dargestellt.

⁸Materialmodell Mooney-Rivlin mit angepassten Parametern an uniaxialen Zugversuch

⁹Materialmodell Mooney-Rivlin mit Standard Parametern



(a) Balgausschnitt



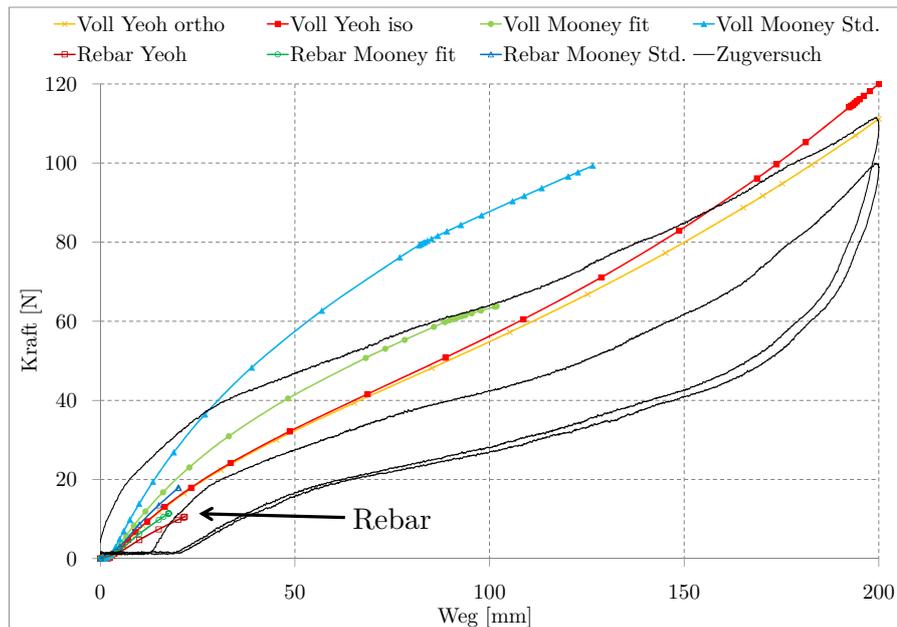
(b) Lastfälle der Simulation

Abbildung 4.8.: Zugversuch

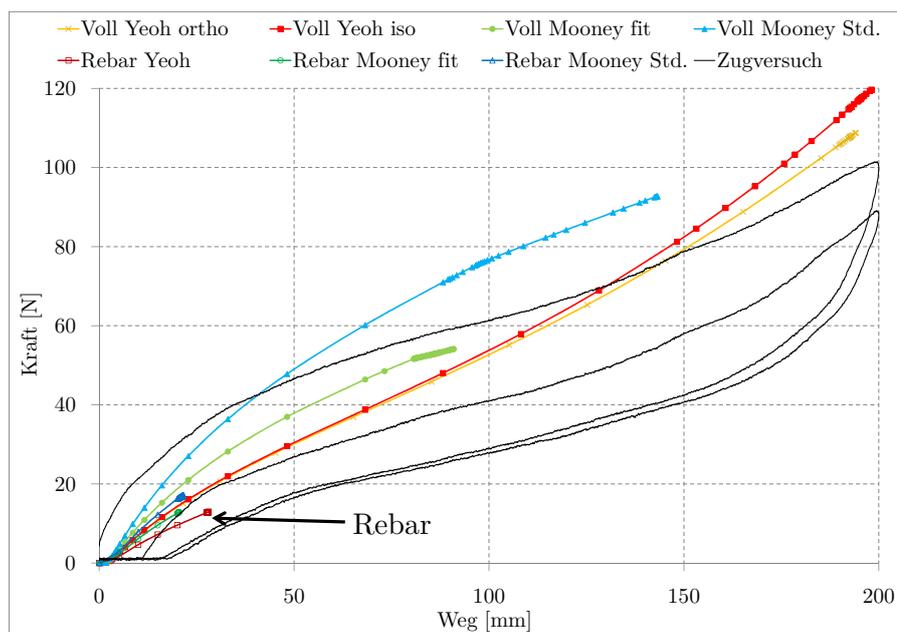
In Abbildung 4.9 sind jeweils die Ergebnisse der Simulation mit der Messung dargestellt. Die Messung wurde in zwei Zyklen durchgeführt, um die über Belastungswiederholungen veränderlichen Eigenschaften des Elastomers durch den sog. Mullins-Effekt¹⁰ zu veranschaulichen¹¹. In den Diagrammen ist die vollständige Hysterese dargestellt.

¹⁰Der Mullins-Effekt bezeichnet die Spannungserweichung des Elastomers, die insbesondere bei gefüllten Elastomeren auftritt und von der Vorbelastung abhängt [18].

¹¹Durch Vorversuche wurde sichergestellt, dass sich beim Zugversuch nach dem zweiten Zyklus keine signifikanten Veränderungen im Materialverhalten ergeben.



(a) Balg 1



(b) Balg 2

Abbildung 4.9.: Ergebnisse des Zugversuchs

Die Simulation zeigt, dass die numerische Konvergenz bei dem Yeoh-Vollmodell am besten ist. Bei diesen Varianten kam die Simulation zum erfolgreichen Abschluss. Die schlechteste numerische Konvergenz zeigt die Rebar-Technik. Dies

ist durch die Einschnürung des Elastomer-Faden-Verbundstreifens zu begründen. Hierbei werden die Fäden gestaucht und dies führt bei der Rebar-Ver schmierungstechnik zu Instabilitäten. Bei der Vollmodellierung hingegen ist der Faden wie ein Stab im Elastomer eingebunden und kann die Druckkräfte aufnehmen. In der Realität hingegen kann der Faden diese Druckkräfte nicht aufnehmen und es kommt zu einer Einschnürung. Dies wird bei keinem der behandelten Modelle berücksichtigt. Dennoch bildet das Vollmodell diesen Versuch am Besten ab. Wenn beide Modellierungstechniken mit dem Yeoh-Materialmodell verglichen werden, zeigt die Kurve des Rebar-Modells eine frühe Degression und ist somit zu "weich". Dies liegt an der nicht im Modell abgebildeten Quersteifigkeit des Fadens. Bei der Rebar-Technik werden nur die Steifigkeiten in Längsrichtung der Fasern auf die Elemente übertragen [24]. Beim Vergleich der Simulationen mit isotropem und orthotropem Faden stellt sich heraus, dass der Einfluss auf den Kurvenverlauf gering ausfällt. Bei der Betrachtung der Fäden im verformten Verbund gibt es hingegen einen deutlichen Unterschied in der Simulation. Der isotrope Faden biegt sich in Zugrichtung und der orthotrope bleibt annähernd gerade in der Matrix (siehe Abbildung 4.10). In den Versuchen zeigt sich durch das Relief des Fadens am Balg ein gerader Verlauf. Somit führt die Orthotropie zu einer besseren Approximation.

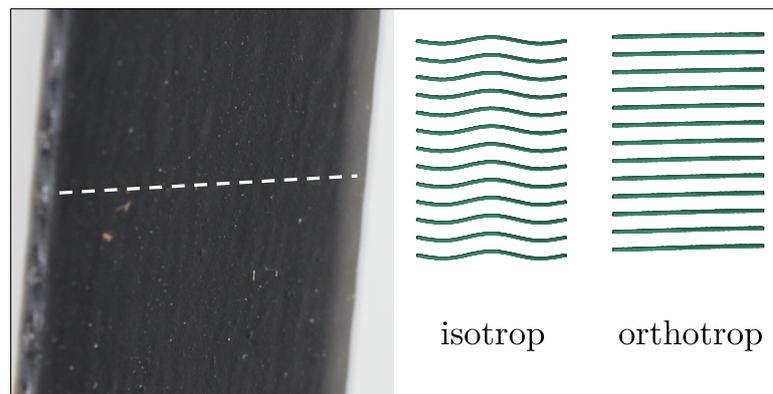
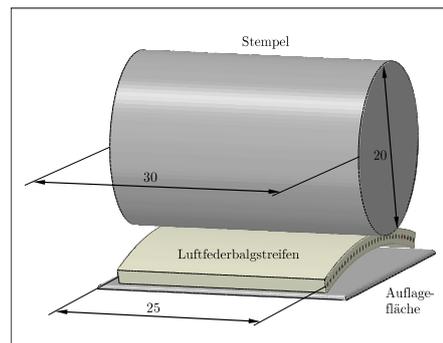


Abbildung 4.10.: Verformung der Fäden (Draufsicht - links real - rechts FEM)

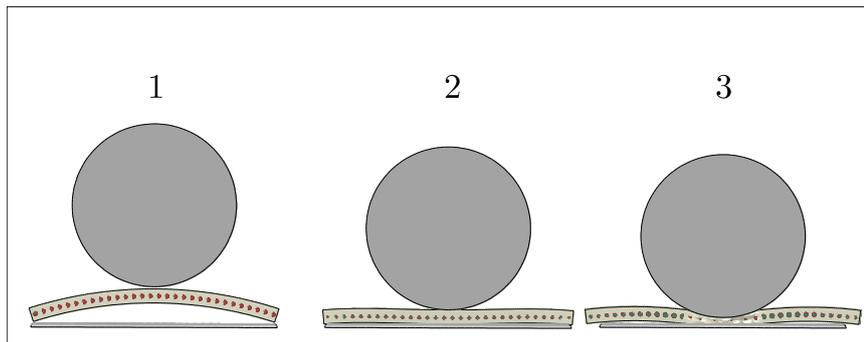
Druck

Beim Druckversuch wird mit einem 30mm langen Zylinder (20mm Durchmesser), parallel zu den Fäden angeordnet, auf einen Balgstreifen mit der Länge von 25mm gedrückt (vgl. Abbildung 4.11-a). Der Versuchsaufbau wird im Anhang in Abschnitt A.5.4 aufgezeigt. Die FEM-Simulation erfolgt mit einem Solid-Modell in drei Lastfällen, die in Abbildung 4.11-b dargestellt sind. Der Zylinder und die Auflagefläche sind als Starrkörper definiert. Im ersten Lastfall wird der Zylinder an den Balgstreifen herangefahren, um die Kontakte zu finden. Im zweiten wird

der Balg durch weiteres Verfahren des Zylinders an die Auflagefläche herangefahren, bis dieser den Abstand der Balgdicke zur Auflagefläche erreicht hat. Im letzten Lastfall wird der Balg bis zum Abbruch der Simulation gedrückt. Dieser Lastfall wird zum Vergleich mit dem Versuch ausgewertet. Als Kontaktformulierung wird der Knoten-zu-Fläche Kontakt mit der Augmented-Lagrange-Methode eingestellt (siehe Abschnitt 2.2.2 auf Seite 14). Der Knoten-zu-Fläche Kontakt wird gewählt, da die Verteilung der Flächenpressung in dieser Simulation nicht ausgewertet wird und eine geringere Rechenzeit auf Grund der Variantenvielfalt erwünscht ist.



(a) Aufbau

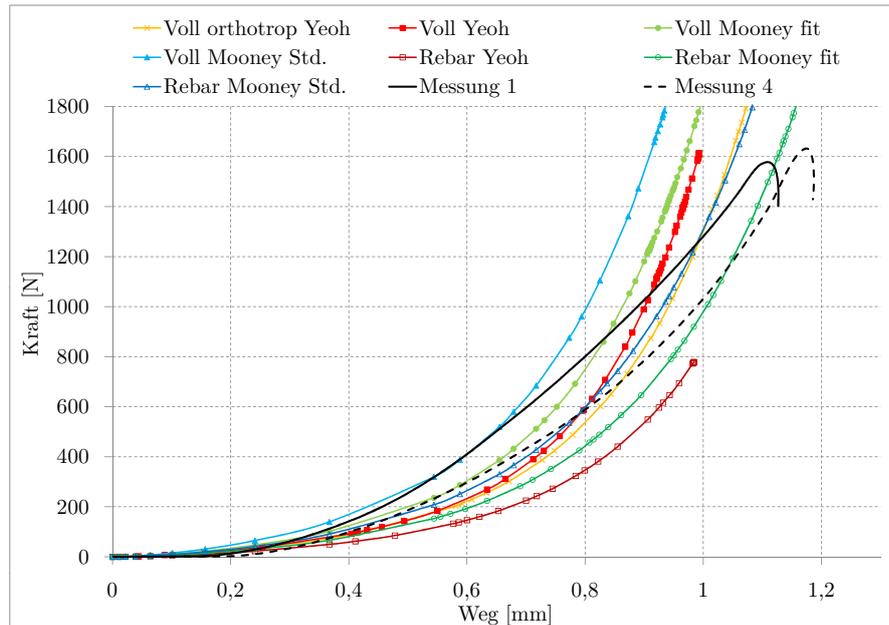


(b) Lastfälle der Simulation

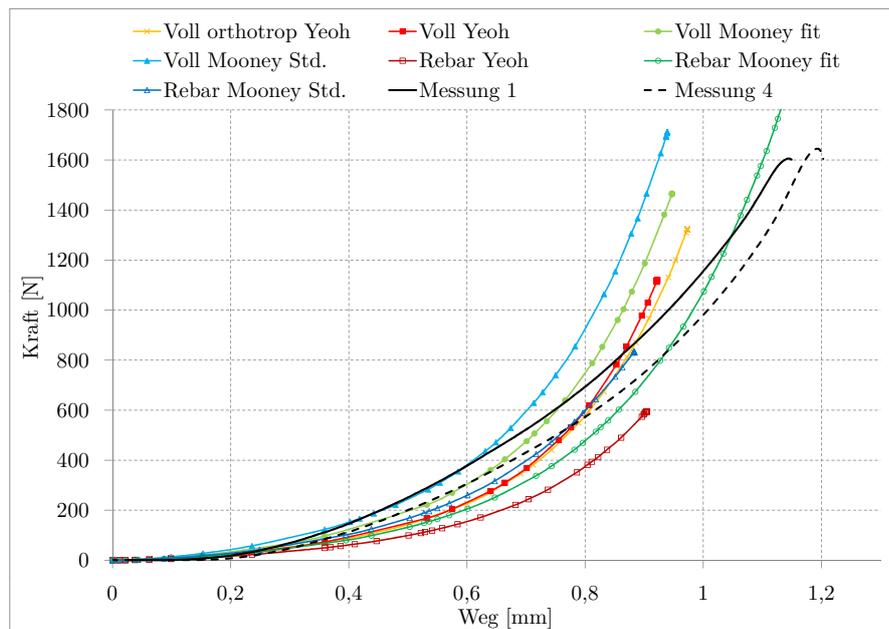
Abbildung 4.11.: Druckversuch

In Abbildung 4.12 sind die Ergebnisse der Simulation mit den Messungen jeweils für beide Balgvarianten dargestellt. Der Druckversuch wurde kraftgesteuert in vier Zyklen durchgeführt (vgl. Anhang A.5.4). Durch die Materialeigenschaften des Elastomers ergibt sich wie beim zuvor behandelten Zugversuch bei wiederholter Belastung ein verändertes Materialverhalten. Aus diesem Grund ist der erste und vierte Zyklus im Diagramm eingezeichnet, um diesen Effekt zu veranschaulichen¹².

¹²Durch Vorversuche wurde sichergestellt, dass sich beim Druckversuch nach dem vierten



(a) Balg 1



(b) Balg 2

Abbildung 4.12.: Ergebnisse des Druckversuchs

Ein Problem bei der Auswertung des Druckversuchs stellt die Sensibilität der
Zyklus keine signifikanten Veränderungen im Materialverhalten ergeben.

Kurven auf Dickenschwankungen des Luftfederbalgs dar. Fertigungsbedingt können Schwankungen der Balgdicke von bis zu $2/10$ mm auftreten. Um diese Ungenauigkeit zu mindern sind die Balgproben mit einem Messschieber vermessen worden und die mittlere Dicke ist in die Auswertung des Versuchs eingeflossen. Dennoch sind in der Auswertung deutliche Tendenzen der verschiedenen Varianten zu verzeichnen. Die Rebar-Modellierungstechnik zeigt mit dem angepassten Yeoh und Mooney-Rivlin Materialmodell ein zu weiches Verhalten. Dies ist, wie beim Zugversuch, auf die nicht abgebildete Quersteifigkeit des Fadens in der Rebar-Formulierung zurückzuführen. Erst mit den etwas zu steif gewählten Materialparametern (Mooney Std., siehe Abb. 4.7 auf Seite 43) nähert sich das Ergebnis mit dieser Modellierungstechnik der Messung an. Die im Mittel besten Ergebnisse liefert die Vollmodellierung mit dem Yeoh-Materialmodell, wobei die Variante mit orthotropem Fadenmaterial eine etwas bessere Approximation darstellt und sich numerisch am robustesten verhält. Bei der Rebar-Formulierung ist das angepasste Mooney-Rivlin Materialmodell numerisch am stabilsten.

Ausformung

Die dritte Art zur Validierung des Balgs stellt der Vergleich der freien Ausformung dar. Hierzu wird ausschließlich der mit geringem Druck beaufschlagte Luftfederbalg betrachtet und in drei Positionen vermessen. Der Versuch erfolgte im Torsions-Kopplungs-Prüfstand, der im Anhang in Abschnitt A.5.2 beschrieben wird. Die Balglänge im Prüfstand beträgt bei allen Varianten 310mm, jedoch ergibt sich durch die Einspannung des Balgs eine Streuung der Einspannlänge, die in der Simulation abgebildet wird. Aus diesem Grund ist die Einspannlänge bei jeder Variante vor der Messung ermittelt worden und in die Modellerstellung der beiden Balgvarianten eingeflossen. Die genannten Maße sind anhand einer Skizze in Abbildung 4.13 dargestellt, ebenso wie die Höhenpositionen¹³, an denen die Durchmesser ermittelt werden. Im Versuch wurde hierfür der Balg vor der Messung an den Positionen markiert und in der Simulation die Knotennummern im jeweiligen Modell für die Auswertung ermittelt.

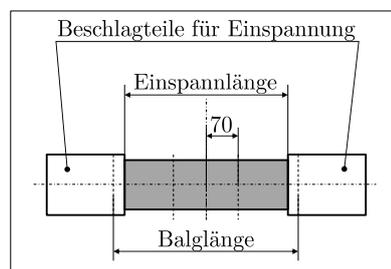


Abbildung 4.13.: Maße für Ausformungsversuch und Höhenpositionen

¹³Mitte der Einspannlänge und jeweils 70mm über/unter der Mitte

Die Lastfälle der Simulation sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Im ersten Lastfall wird zunächst der Balg mit einem Druck von 0.01bar beaufschlagt und die Einspannung der Balgenden werden mit einer radialen Kraft zur Aufweitung gezwungen, so dass die Connector-Elemente "einrasten" (vgl. Abschnitt 4.1). Im zweiten Lastfall wird der Solldruck von 0.5bar aufgebracht und die Balgenden aus Gründen der numerischen Stabilität um 10mm zusammengefahren. Anschließend wird die radiale Kraft an den Balgenden zu Null gesetzt, da die Connector-Elemente bereits "eingerastet" sind. Im vierten bis sechsten Lastfall werden die drei Positionen aus dem Versuch des Torsions-Kopplungs-Prüfstandes angefahren. Die Positionen ergaben sich aus den Abmaßen des Prüfstandes und erlauben sowohl die freie Ausformung als auch die Bildung einer Falte am oberen und unteren Anbindungspunkt.

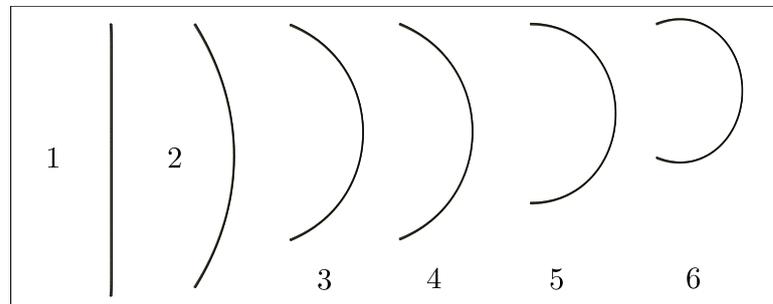


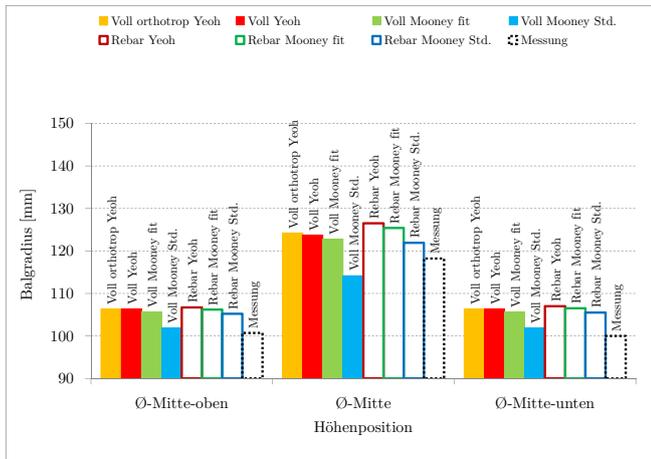
Abbildung 4.14.: Lastfälle der Simulation

Für die Auswertung und den Vergleich mit der Messung sind zwei Methoden gewählt worden. Zum einen sind die drei Durchmesser/Radien in einem Diagramm über der Höhe des Balgs aufgetragen. Zum anderen ist der visuelle Vergleich gewählt worden, bei dem die Balgstreifenmodelle der Simulation zusammen in verschiedenen Farben über dem Foto des Versuchsbalgs dargestellt werden. Die Auswertung erfolgt in drei Positionen (Abstand zwischen den Balgeinspannungen):

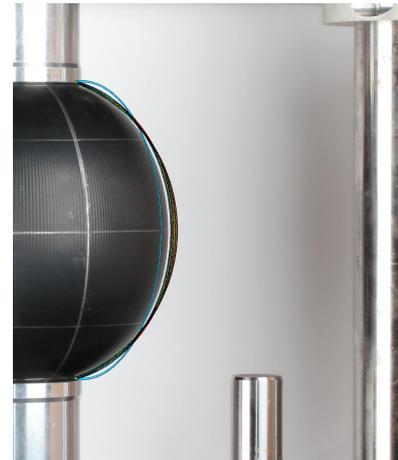
- maximale Position - 227mm
- mittlere Position - 187.6mm
- minimale Position - 148.2mm

Die genannten Diagramme sind im Folgenden in Abbildung 4.15 und 4.16 jeweils links und der visuelle Vergleich rechts dargestellt. Bei der Auswertung der Ausformung sind ähnliche Tendenzen wie beim Zug- und Druckversuch zu verzeichnen. Die Rebar-Modellierungstechnik mit dem angepassten Yeoh und Mooney-Rivlin Materialmodell weisen die größten Durchmesser auf und sind demzufolge

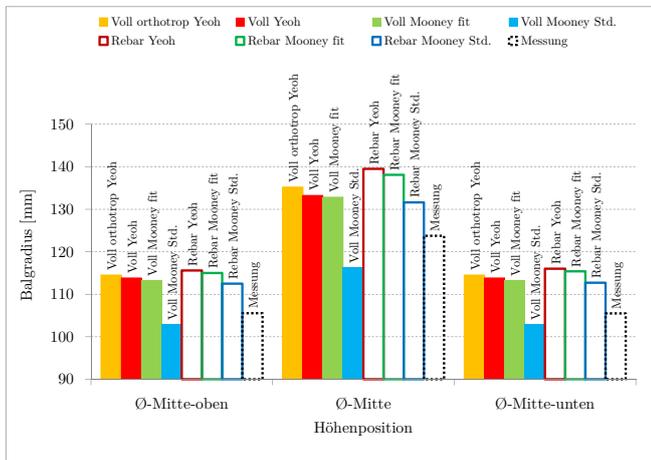
wie auch bei den anderen beiden Versuchen zu weich. Den kleinsten Durchmesser, der bei beiden Balgvarianten unter den gemessenen Durchmessern aus den Versuchen liegt, zeigt die Vollmodellierung mit dem Materialmodell Mooney-Rivlin und den Standard-Materialparametern (Mooney Std., siehe Abb. 4.7 auf Seite 43). Auch dieses Ergebnis ist analog zum Zug- und Druckversuch, genauso wie die Rebar-Technik in Kombination mit dem übernommenen Materialmodell Mooney-Rivlin. Auch bei der Ausformung wird die weichere Verbundeigenschaft mit Rebar-Formulierung durch die zu steife Materialeigenschaft des Elastomers kompensiert. Die besten Übereinstimmungen mit der Messung zeigt die Vollmodellierung mit dem angepassten Yeoh-Materialmodell sowohl mit orthotropem und isotropem Fadenmaterialmodell. Bei Betrachtung des visuellen Vergleichs ist zusätzlich noch die Beurteilung der Faltenausbildung in den verschiedenen Balgpositionen möglich. Bei der Maximalposition nimmt der Balg nahezu seinen Gleichgewichtszustand ein, bei dem ein Kräftegleichgewicht herrscht und die Axialkraft zu Null wird. In diesem Zustand stimmen alle Materialmodell-Kombinationen noch gut mit der realen Ausformung überein. Dies ändert sich mit zunehmendem Zusammenfahren des Balgs. Bei der Minimalposition kommt es zu der Ausbildung einer Rollfalte, die durch das vollvernetzte Modell mit orthotropem Faden und Yeoh-Materialmodell am besten ausgebildet wird. Das "weichste" Verhalten zeigt auch hier die Rebar-Technik mit den angepassten Materialmodellen (Yeoh und Mooney fit).



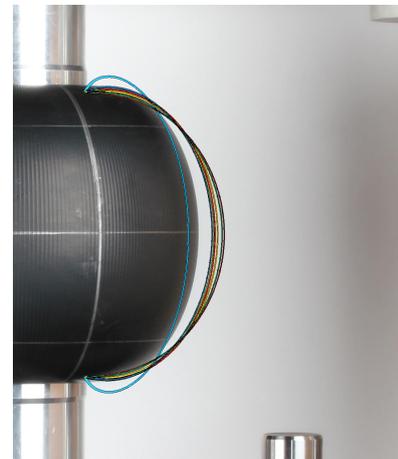
(a) Auswertung max. Position



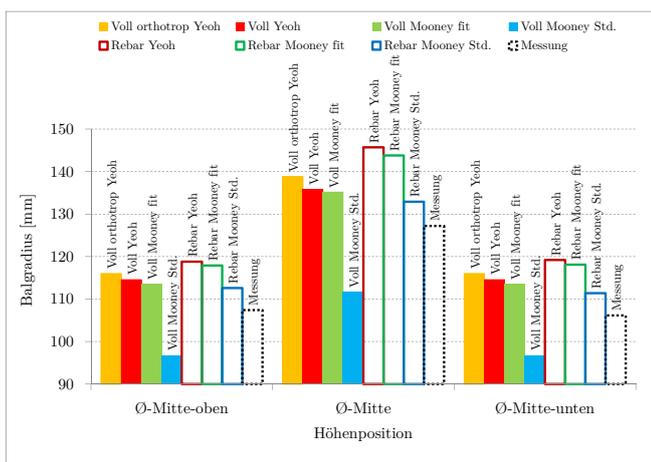
(b) Bilder max. Position



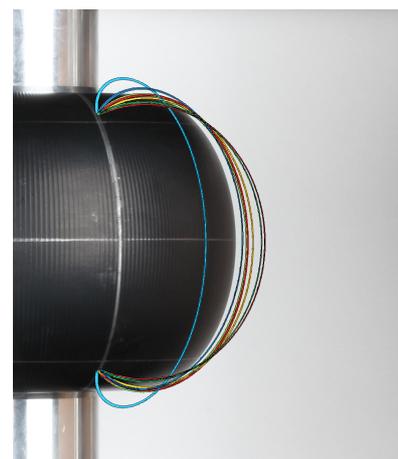
(c) Auswertung mitt. Position



(d) Bilder mitt. Position

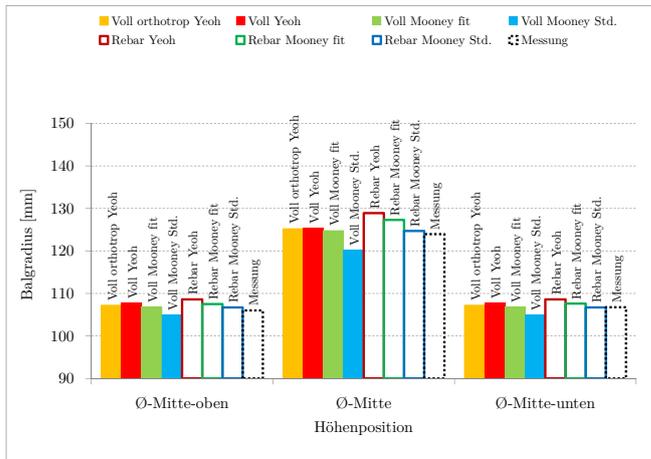


(e) Auswertung min. Position

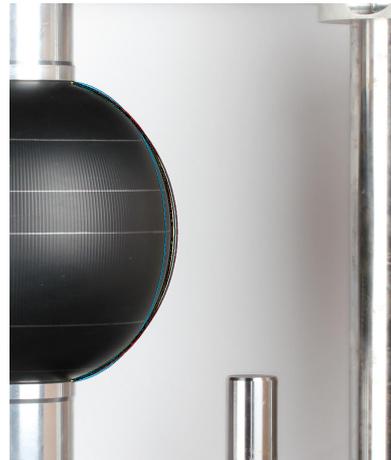


(f) Bilder min. Position

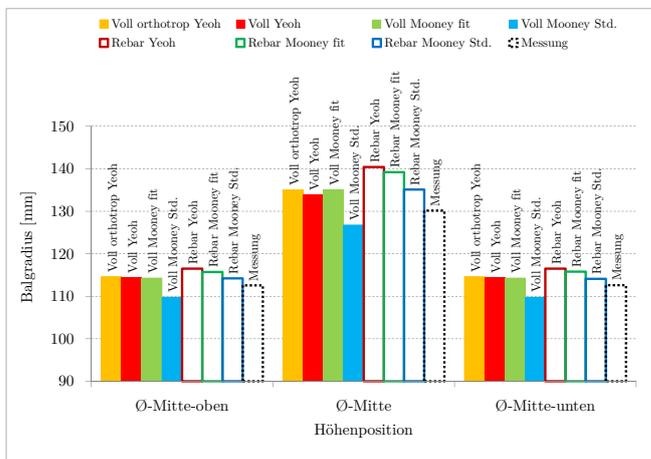
Abbildung 4.15.: Vergleich der Ausformung Balg 1



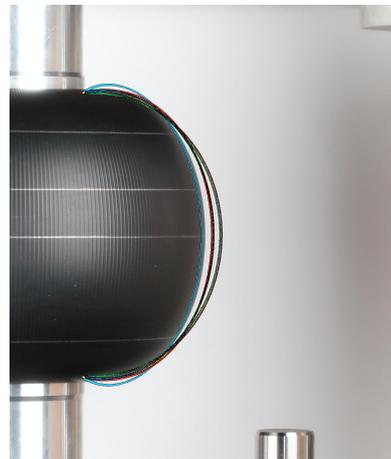
(a) Auswertung max. Position



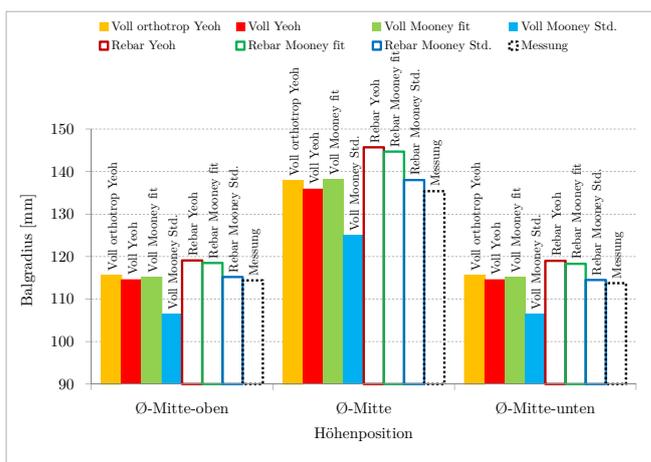
(b) Bilder max. Position



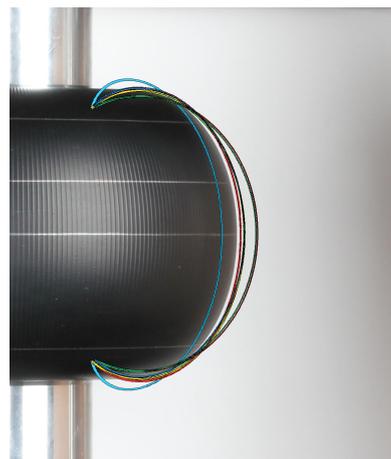
(c) Auswertung mitt. Position



(d) Bilder mitt. Position



(e) Auswertung min. Position



(f) Bilder min. Position

Abbildung 4.16.: Vergleich der Ausformung Balg 2

Fazit

Die Validierung der Materialmodelle zeigt bei allen drei Versuchen die gleichen Tendenzen. Zunächst wird der Unterschied zwischen den beiden Modellierungstechniken deutlich. Es ist festzustellen, dass sich die Rebar-Technik bei der Abbildung des Verbunds unter den gezeigten Beanspruchungen zu "weich" verhält. Besonders ist dies beim Zugversuch bzw. der Ausformung zu beobachten. Durch die Kombination mit einem "härteren" Materialmodell kann dieses Verhalten kompensiert werden, wie es sich bei der Ausformung in Abbildung 4.15 und 4.16 bei dem Materialmodell Mooney-Rivlin mit den Standardparametern zeigt (siehe Abb. 4.7 auf Seite 43). Dieses "weichere" Verhalten ist auf die nicht abgebildete Quersteifigkeit des Fadens in der Rebarformulierung zurück zu führen. Beim Druckversuch hingegen ist dieser Einfluss geringer, da hier die Eigenschaften des Elastomers überwiegen. Die Unterschiede der verwendeten Materialmodelle und deren Parameter lassen sich beim Zugversuch sowohl an der Kraft-Weg-Kurve als auch beim Betrachten des verformten Balgstreifens im Prüfstand erkennen. Bei den Kraft-Weg-Kurven zeigt das Yeoh-Modell mit orthotropen Fadenmaterialeigenschaften die besten Ergebnisse, ebenso bei der Verformung des Fadens im Verbund (siehe Abb. 4.10 auf Seite 49). Dennoch sind alle Ergebnisse nur Annäherungen an die Versuchsergebnisse, da auch beim vollvernetzten Modell noch die Vereinfachung des ideal-runden Fadens gemacht wird und das Fadenmaterial in der Simulation Druckkräfte aufnehmen kann (Einschnürung beim Zugversuch). Zu den Validierungsversuchen ist noch hinzuzufügen, dass es sich dabei bewusst um überzogene Szenarien handelt, die in der Luftfeder während des normalen Betriebs nicht vorkommen. Sie sollten nur dazu dienen, die Grenzen aufzuzeigen und so eine robuste Validierung durchführen zu können. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit dem Materialmodell Yeoh und der orthotropen Fadenmaterialeigenschaft die beste Approximation erreicht wird. Im Folgenden wird demnach mit dieser Konfiguration das vollvernetzte Balgmodell berechnet. Beim Standardbalgmodell können dem Fadenmaterial auf Grund der Rebar-Formulierung keine orthotropen Eigenschaften zugewiesen werden. Das Elastomer wird ebenfalls mit dem Yeoh-Materialmodell erstellt.

4.2. Luftfedersimulation

Die Grundlagen und Bereiche der Simulation einer Luftfeder sind bereits in Abschnitt 3.2 erläutert worden und werden im Folgenden angewendet. Das Standardbalgmodell aus Abschnitt 3.1 wird mit dem hier vorgestellten vollvernetzten Modell verglichen. Für den Vergleich sind für jeden Bereich der Luftfedersimulation Berechnungen oder Ersatzberechnungen durchgeführt worden. Für die Kennlinienberechnung wurden Messungen zur Absicherung der Simulation verwendet. In den Bereichen Verklebung, Dehnungszustand und Submodell ist ein

Abgleich mit der Realität nicht direkt möglich, jedoch wurde hierfür die zuvor in Abschnitt 4.1.3 durchgeführte Validierung an die herrschenden Beanspruchungen des Luftfederbalgs angelehnt. Die Simulationen sind auf die Balgvariante Balg 1 beschränkt (siehe Tab. 4.1 auf Seite 43), da die Unterschiede der Materialien bereits bei der Validierung gezeigt wurden. Einzig beim Submodell wird eine Variation des Balgs für die Beanspruchungsanalyse durchgeführt, da hier Unterschiede durch die Balggeometrie erwartet werden. Für den Vergleich der Modellierungstechniken bei Kennlinien-, Verklemmungsberechnung und Teilen der Beanspruchungsanalyse (Fadenkräfte und Dehnungszustand) wird jeweils eine Bewertungsmatrix ausgefüllt. Die Bewertung erfolgt mit Daumensymbolen. Das Symbol  steht für gute Qualität, geringe Komplexität, geringen Aufwand oder gute numerische Robustheit. Das jeweilige Gegenteil stellt das Symbol  dar und eine mittelmäßige Bewertung das Symbol . Ein Muster der Bewertungsmatrix ist in Tabelle 4.5 zu sehen.

Tabelle 4.5.: Bewertungsmatrix - Muster

	Standard- balgmodell	vollvernetztes Balgmodell
Qualität der Ergebnisse		
Modellkomplexität		
Aufwand d. Modellerstellung		
numerische Robustheit		

4.2.1. Kennlinie

Für die Kennlinien-Simulation sind die Beschlagteile Außenführung und Abrollkolben aus dem CAD-Modell der Luftfeder übernommen und als "analytical rigid surface"¹⁴ in der Steuerungsdatei eingebunden worden. Vom Balg wird ein Streifen mit zyklischer Symmetrie modelliert¹⁵. Die Simulation ist in zehn Lastfälle aufgeteilt, die in Abbildung 4.17 nebeneinander mit Außenführung, Abrollkolben und verformtem Balg dargestellt sind.

¹⁴Über Angabe von Linien und Radien erzeugt Abaqus eine rotationssymmetrische Fläche [24]. Die Linien und Radien lassen sich aus einem Schnitt der 3D-Geometrie ableiten.

¹⁵Für das Standardbalgmodell ist ein hundertstel vom Balgumfang modelliert und für den vollvernetzten Balg ein Streifen mit einem Fadensegment.

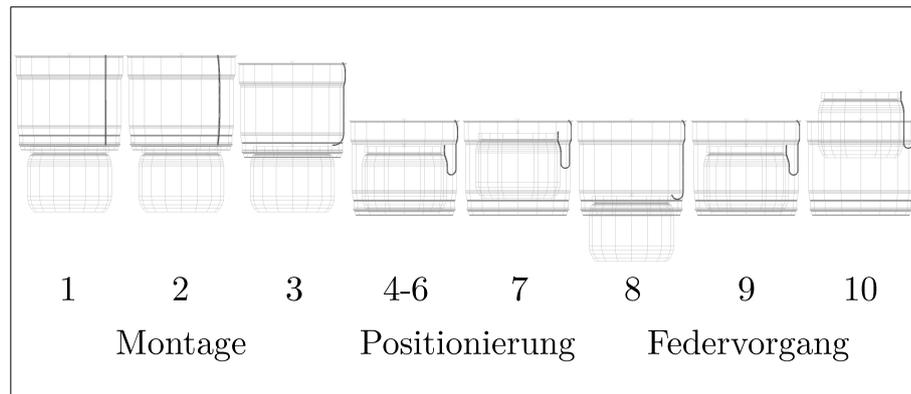


Abbildung 4.17.: Lastfälle der Kennlinien-Simulation

Es erfolgt in den ersten Lastfällen die Montage. Hierfür wird zunächst der Balg zur Stabilisierung mit einem minimalen Druck von 0.01bar beaufschlagt. Anschließend wird der Druck erhöht und eine radiale Kraft wird auf die Balgkante oben und unten aufgebracht. Diese Kraft sorgt für die Aufweitung des Balgs und das "Einrasten" der Connector-Elemente (siehe Abschnitt 4.1 auf Seite 36). Des Weiteren kommt es zum Kontakt zwischen Balg und Außenführung. Bei der Kontaktmodellierung wird der Balg als "*slave*"- und die Beschlagteile als "*master*"-Fläche definiert. Als Kontaktmodellierungstechnik wird der Knoten-zu-Fläche Kontakt gewählt, da die Flächenpressungen nicht relevant sind und die Simulation bei dieser Methode schneller durchgeführt werden kann (siehe Abschnitt 2.2.2 auf Seite 14). Als Kontakt-Algorithmus wird die Augmented-Lagrange-Methode eingestellt, da sich diese in der Praxis als stabil erweist. Im dritten Schritt der Montage wird die Außenführung in Richtung des Abrollkolbens weggesteuert verfahren. Dadurch bildet sich die Rollfalte und es kommt zum "Umstülpen" bzw. Einrollen des Balgs. Danach folgt die Positionierung in Konstruktionslage, die in diesem Fall axial erfolgt. Anschließend wird der K0-Druck¹⁶ eingestellt. In nachfolgenden Lastfällen wird der Druck über die Änderung des Volumens vom FE-Programm durch die isentrope Zustandsänderung bestimmt. Nach der Positionierung in Fahrlage wird die Luftfeder vollständig ausgefedert und es folgt der Einfedervorgang, bei dem die Kennlinie später ausgewertet wird. Hierbei wird zu Gunsten der Stabilität und der Auswertung darauf geachtet eine Schrittweite von 1mm Federweg pro Inkrement nicht zu überschreiten.

Die Kennlinien-Simulation ist nur für die Balgvariante Balg 1 aufgeführt, da andere Materialien oder Materialkombinationen keinen Einfluss auf den Kurvenverlauf haben. Dies ist damit zu begründen, dass die Thermodynamik beim Federvorgang die Balgeigenschaften dominiert. Die Berechnungen sind mit bei-

¹⁶Druck in Konstruktionslage der Luftfeder

den vorgestellten Modellierungstechniken durchgeführt worden und in Abbildung 4.17 zusammen mit zwei Messungen dargestellt. Es handelt sich dabei um eine statische Kennlinie mit einer Prüffrequenz von 0.01Hz und einem Isentrophenexponenten von $\kappa = 1$ in der Simulation. Die vollen Linien stellen die Kraft und Steifigkeit der Messung, die grob gestrichelten die Simulation mit der Rebar-Technik und die fein gestrichelten Linien die Simulation mit dem Vollmodell dar. Die Steifigkeitskurven der Simulation entsprechen der ersten Ableitung der Kraft nach dem Federweg. Sowohl zwischen den zwei Modellvarianten als auch im Vergleich zur Messung sind erwartungsgemäß keine Abweichungen außerhalb der Toleranz von 5% zu verzeichnen. Die Bewertungsmatrix ist in Tabelle 4.6 dargestellt.

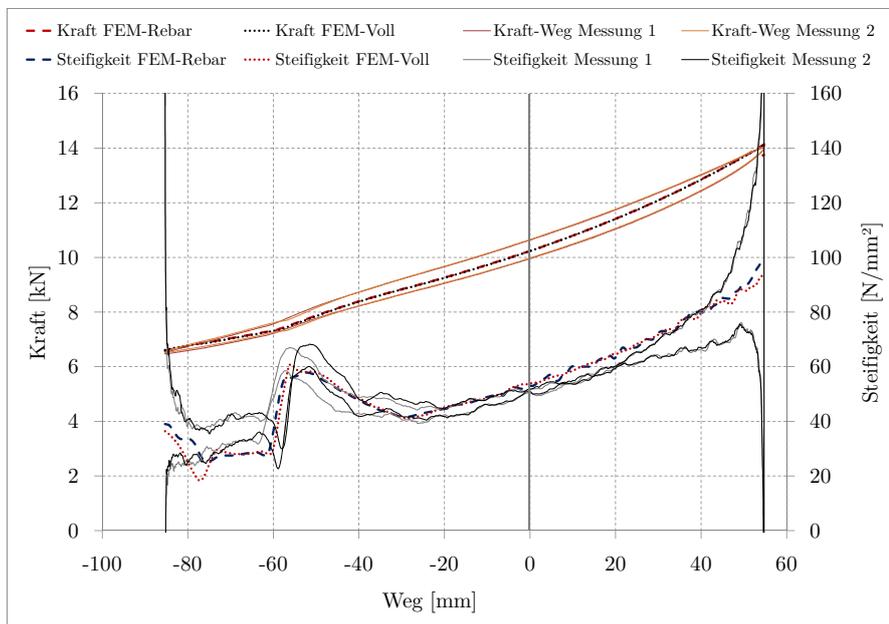


Abbildung 4.18.: Vergleich der Kennlinien

Tabelle 4.6.: Bewertungsmatrix - Kennlinienberechnung

	Standard- balgmodell	vollvernetztes Balgmodell
Qualität der Ergebnisse	👍	👍
Modellkomplexität	👍	👎
Aufwand d. Modellerstellung	👍	👎
numerische Robustheit	👍	👎

4.2.2. Verklemmung

siehe Abschnitt A.2 auf Seite 91 (gesperrter Inhalt im Anhang)

4.2.3. Beanspruchungsanalyse

Für die Beanspruchungsanalyse ist es nötig, wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, den Luftfederbalg vollständig zu modellieren. Eine Symmetrie kann nicht mehr ausgenutzt werden, da der Federvorgang in der Fahrzeugachse nicht mehr axial erfolgt. Des Weiteren ist es erforderlich, das Verhalten der Fahrzeugachse an die Luftfederanbindung zu übertragen. Hierfür gibt es zwei gängige Methoden. Die erste besteht aus der Nachmodellierung der Achse mit Balkenelementen, die jeweils an den Gelenken und Fahrwerksbuchsen angebunden sind. Bei dieser Methode besteht die Möglichkeit die Steifigkeiten der Fahrwerksbuchsen¹⁷ zu berücksichtigen und es ist sichergestellt, dass die Luftfeder auf dem gesamten Federweg die Bewegungen aus dem realen Fahrzeug nachfährt. Die zweite Methode ist mit etwas weniger Aufwand in der Modellierung verbunden. Hierbei werden die einzelnen Federpositionen aus einem CAD-Modell übernommen. Dem CAD-Modell kann eine Elasto-Kinematik¹⁸ oder Starrkinematik¹⁹ zu Grunde liegen. Für die Positions- und Ausrichtungsbestimmung der Luftfeder werden im CAD-Modell Achsenkreuze an der Karosserieanbindung (oben) und der Luftfederanbindung (unten) erstellt. Diese Achsenkreuze, die ein kartesisches Rechtssystem darstellen, erleichtern die Steuerung und das Abbilden von relativen Verdrehungen zwischen den Anbindungspunkten. Für die Luftfederanbindung am Lenker werden für beliebige Federpositionen weitere Achsenkreuze erstellt, die zusammen einen Federvorgang darstellen. Im FEM-Modell werden an der oberen und unteren Anbindung der Luftfeder die Achsenkreuze mit Hilfe von starren Elementen erstellt. Nach der Positionierung der Luftfeder können mittels des unteren Achsenkreuzes die Positionen aus dem CAD in einzelnen Lastfällen angefahren werden, in denen anschließend eine Auswertung stattfindet.

Für die Beanspruchungsanalyse in dieser Arbeit wird die als zweites genannte Methode angewendet. Hierzu wurden aus dem CAD-Modell die Fahrzeugachse, die Klemmringe der Luftfeder in der Konstruktionslage und die Achsenkreuze der jeweiligen Federpositionen exportiert. Die Bauteile in Konstruktionslage werden für die Kontrolle der Positionierung der Luftfeder und Bestimmung der

¹⁷Die Fahrwerksbuchse bindet die Komponenten der Achse an die Karosserie oder andere Bauteile an. Die Buchsen bestehen aus Metall und Elastomer. Durch die Auslegung der Steifigkeiten in den verschiedenen Belastungsrichtungen kommt es zu einer elastischen Anbindung, um so den Fahrkomfort zu verbessern.

¹⁸Berücksichtigung der Elastizitäten der Fahrwerksbuchsen beim Federn oder weiteren Lastfällen, wie Lenken, Bremsen oder Beschleunigen

¹⁹Entspricht der Bewegung der Achse ohne Elastizitäten

lokalen z-Achse benötigt. In Abbildung 4.19-a ist die in Konstruktionslage korrekt positionierte Luftfeder mit den CAD-Daten und den Achsenkreuzen für die Federpositionen dargestellt. Das Koordinatensystem ist unten ebenfalls eingeblendet und nach der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Konvention zu lesen²⁰.

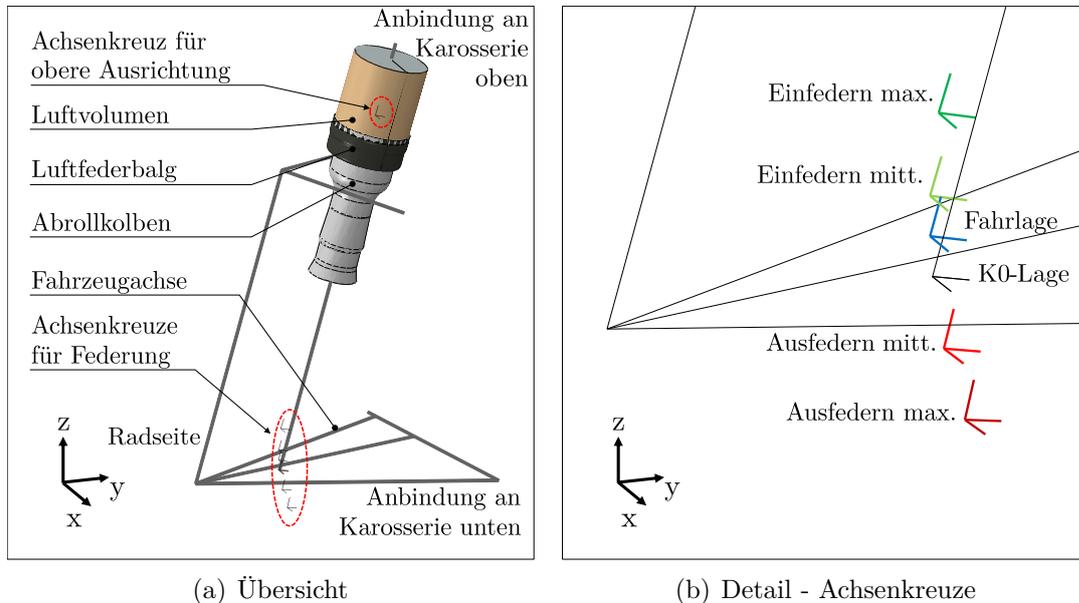


Abbildung 4.19.: Luftfedermodell in Fahrzeugachse - W166 AMG VA li.

Der im Folgenden beschriebene Modellaufbau und die Steuerung des Modells sind auf beide vorgestellte Luftfedermodelle anwendbar und übertragbar. Es wird lediglich die Modelldatei für die Berechnung ausgetauscht²¹. Für den Aufbau des FEM-Modells werden die Koordinaten der Achsenkreuze und die Höhenposition der Klemmrings aus den CAD-Daten ermittelt. Die Modellierung des Luftfederbalgs erfolgt senkrecht auf dem unteren Klemmring, weshalb die Mittelachse des unteren Klemmrings als Vektor ebenfalls benötigt wird und in das jeweilige Skript eingegeben werden muss. Das Aufweiten und Einrollen der Luftfeder erfolgt axial über die Kontrollknoten an den Balgenden. Diese Kontrollknoten werden in das lokale Koordinatensystem der Luftfeder transformiert, sodass ein axiales Einfedern vereinfacht wird²². Die Montage erfolgt wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben. Anschließend wird das Modell am oberen Ende in Konstruktionslage gebracht. Dies geschieht mit Hilfe des oberen Achsenkreuzes

²⁰Die x-Achse zeigt zum Heck, die y-Achse liegt auf der Mittelachse beider Vorderräder und die z-Achse zeigt senkrecht nach oben.

²¹vgl. Ablaufdiagramme der Modelle in Abbildung 3.2 auf Seite 26 und Abbildung 4.1 auf Seite 36

²²Es muss lediglich in lokale z-Richtung den Montagewegen entsprechend verschoben werden.

(vgl. Abbildung 4.19-a), das an den Knoten der Enden zu den jeweilig gemessenen Koordinaten aus dem CAD-Modell verfahren wird. In Abbildung 4.19-b sind die unteren Achsenkreuze im Detail abgebildet, die während der Federung angefahren werden. Die K0-Lage (Konstruktionslage) an der Unterseite ist bereits im Modellierungszustand erreicht, da die Balgmodellierung auf der unteren Anbindung erfolgte. Die Fahrlage entspricht der Federposition des ruhenden Fahrzeugs und die Ein- bzw. Ausfederung wurde für eine genauere Abbildung der Federbewegung in zwei Schritte unterteilt. Die Umrechnung und Aufbereitung der Koordinaten aus dem CAD wird mit Hilfe einer dafür erstellten Excel-Tabelle durchgeführt. Die Simulationen der beiden Modelle werden jeweils bis zur Fahrlage durchgeführt, da die Abbildung des Federvorgangs mit dem vollvernetzten Modell zu viel Rechenzeit beanspruchen würde. Die im Folgenden aufgeführten Auswertungen erfolgen auf dem Umfang am innersten Punkt der Luftfeder (Rad abgewandte Seite).

Fadenbeanspruchung

Wie bereits in Abschnitt 3.2.3 erläutert, sind die Beanspruchungen des Fadens eines der Auslegungskriterien der Luftfeder. Es dürfen keine Ent- und Überlastungen des Festigkeitsträgers während des Federvorgangs unter Kinematik auftreten. Somit werden im Folgenden die Fadenspannungen aus beiden Modellen ausgewertet und verglichen.

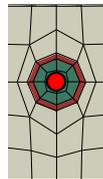


Abbildung 4.20.: Auswertungsknoten für Fadenspannung (roter Punkt)

Bei dem Standardbalgmodell mit Rebar-Technik wird als Ausgabe die "Rebar-Force" angefordert und zum Vergleich über den Fadenquerschnitt in eine Spannung umgerechnet. Beim vollvernetzten Balgmodell werden die Spannungen in Fadenrichtung (S_{33}) in der Mitte des Fadens verwendet, wie in Abbildung 4.20 markiert. Der Pfad verläuft wie beim Dehnungsverlauf vom Abrollkolben zur Außenführung in der Federposition Fahrlage. In Abbildung 4.21 ist der Verlauf der Spannungen der beiden Modellierungsvarianten dargestellt. Die gestrichelte Linie stellt das Rebarmodell und die volle Linie das vollvernetzte Modell dar. Die markanten Stellen wie Konturveränderungen und die Rollfalte sind jeweils gekennzeichnet. Bei den Verläufen ist kein deutlicher Unterschied zu erkennen. Die Fadenspannungen des vollvernetzten Modells liegen bis zu dem Bereich der Außenführung ca. 5% über denen des Rebar-Modells. Für das Rebar-Modell

sind die Ergebnisse für ein Sechsschicht- und Mehrschichtmodell (zwei Elementschichten) dargestellt. Sie unterscheiden sich erst im Bereich der Außenführung voneinander.

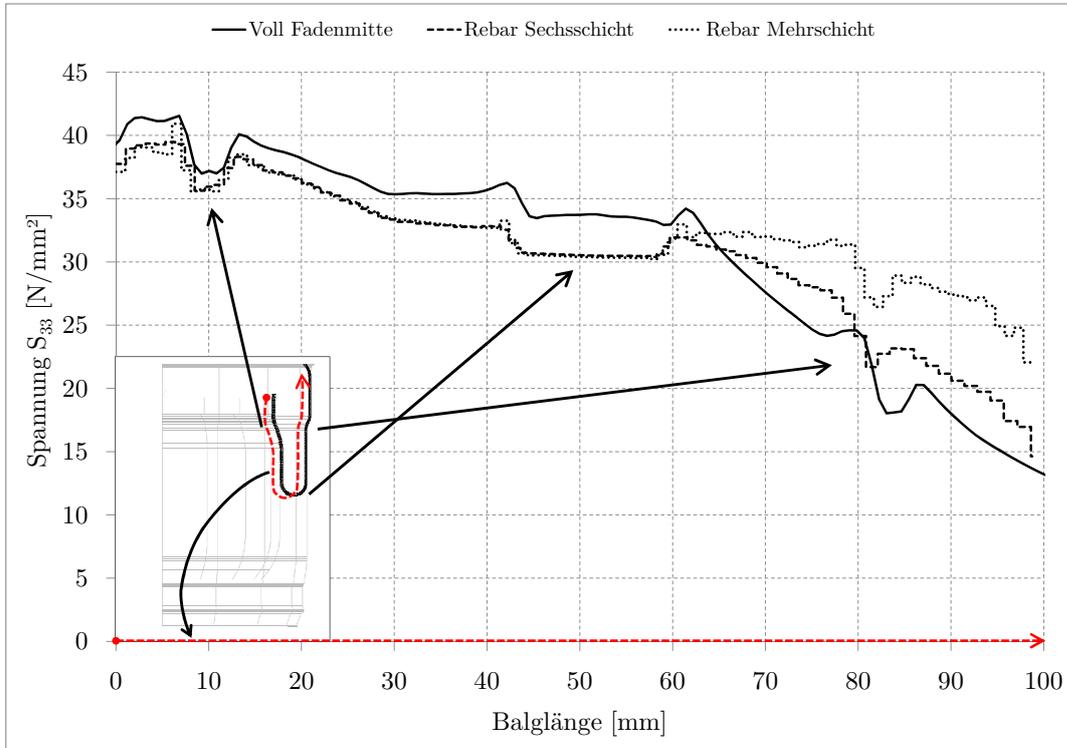


Abbildung 4.21.: Vergleich der Fadenspannungen

Die in der Validierung erwähnten Quereigenschaften des Fadens, die bei der Rebar-Technik nicht berücksichtigt werden, wirken sich bei den Fadenspannungen positiv auf das Ergebnis aus, da nur die Eigenschaften in Zug-/Druckrichtung berücksichtigt werden. Das vollvernetzte Modell hingegen bildet die Eigenschaften in alle Richtungen ab und der Faden kann somit auch Biegung aufnehmen. Durch die einzelnen Filamente und die Zwirnung kann der Faden im realen Bauteil kaum Biegung aufnehmen. Aus diesem Grund ist der Spannungsanteil S_{33} in der Mitte des Fadens in Fadenrichtung ausgewertet worden. Für die Ermittlung der Fadenbeanspruchung ist die Rebar-Formulierung demnach völlig ausreichend, da auch die Simulationszeit des vollvernetzten Modells unter Achskinetik mit derzeitiger EDV unakzeptabel ist. Die Rechenzeiten werden zum Ende dieses Abschnitts erläutert. In Tabelle 4.7 ist die Bewertungsmatrix mit einem zusätzlichen Bewertungspunkt (Eignung für Kinematik) dargestellt. Es zeigt sich, dass das vollvernetzte Balgmodell in diesem Bereich der Beanspruchungsanalyse noch keine Vorteile aufweist.

Tabelle 4.7.: Bewertungsmatrix - Fadenspannungsberechnung

	Standard- balgmodell	vollvernetztes Balgmodell
Qualität der Ergebnisse	👍	👍
Modellkomplexität	👎	👎
Aufwand d. Modellerstellung	👍	👎
numerische Robustheit	👍	👎
Eignung f. Kinematik	👍	👎

Dehnungen im Verbund

Um den Beanspruchungszustand im Elastomer abzubilden, kann die Dehnung als Maß herangezogen werden. Die Auswertung erfolgt zwischen den Fäden entlang des Balgs, da hier beide Modelle eine Knotenschicht aufweisen. In Abbildung 4.22 ist ein Bereich des Balgs vom vollvernetzten Modell im Schnitt dargestellt und der Auswertungsknoten markiert.

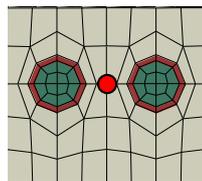


Abbildung 4.22.: Auswertungsknoten für Dehnung (roter Punkt)

In Abbildung 4.23 sind die logarithmischen maximalen Hauptnormaldehnungen des vollvernetzten Modells als volle Linie und die des Standardbalgmodells mit Rebar-Technik gestrichelt dargestellt. Die Auswertung erfolgt von der Balgunterkante vom Abrollkolben zur Balgoberkante an der Außenführung. Im Verlauf der Dehnung sind die markanten Positionen wie Konturverlaufsänderungen und die Rollfalte durch Markierungen zu erkennen. Die Verläufe jedoch unterscheiden sich deutlich voneinander. Dies ist damit zu begründen, dass bei der Rebar-Technik der Fadenquerschnitt und seine Quersteifigkeit nicht im Querschnitt abgebildet sind und somit der gesamte Balg die Dehnung aufnehmen kann. Bei dem vollvernetzten Modell hingegen besteht ca. die Hälfte des Umfangs in der Zwischenlage aus Fäden²³. Die Dehnung nimmt auf Grund des Steifigkeitsunterschieds der Materialien hauptsächlich das Elastomer auf, wodurch sich die

²³Umfang in Zwischenlage = $2\pi(95mm/2 + 0.99mm) = 304.7mm$ und Umfang der Fadenanteile = $300 \cdot 0.47mm = 141mm$ ergibt als Quotient 2.2

höheren Dehnungen begründen. Wenn nun der Dehnungsverlauf des Rebarmodells mit dem Faktor des Fadenanteils auf dem Umfang multipliziert wird, trifft das Ergebnis den Verlauf des vollvernetzten Modells mit etwas Abweichung. Die Dehnungsverläufe der beiden Techniken sind in Abbildung 4.23 dargestellt.

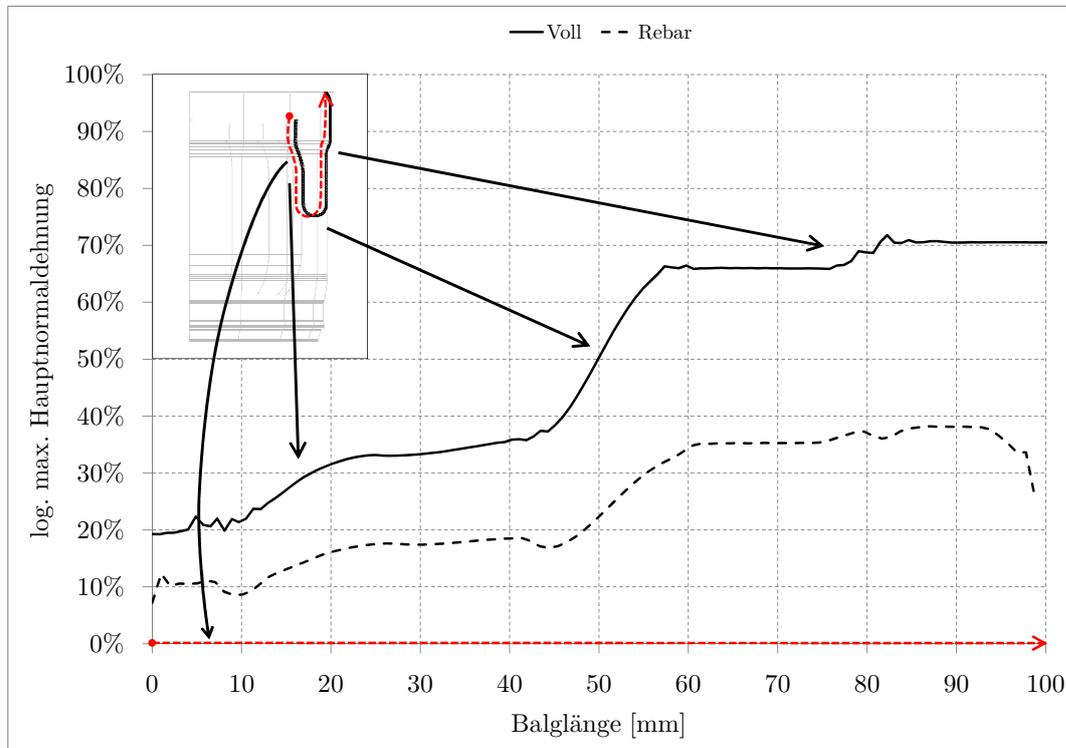


Abbildung 4.23.: Vergleich der Dehnungen im Verbund

In diesem Bereich der Beanspruchungsanalyse zeigt sich, dass die Rebar-Technik nicht für die Abbildung des Dehnungszustandes im Verbund geeignet ist. In der Beanspruchungsanalyse ist zudem der Dehnungszustand am Faden relevant, der nur durch ein vollvernetztes Modell abgebildet werden kann. Die Bewertungsmatrix in Tabelle 4.8 zeigt dennoch, dass beim vollvernetzten Modell starke Defizite auf Grund des komplexen und rechenaufwändigen Modells vorliegen. Aus diesem Grund wird im nachfolgenden Abschnitt die Submodelltechnik angewendet, die sowohl Komplexität als auch Rechenaufwand signifikant verringern soll (siehe Abschnitt 4.1.1 auf Seite 40).

Tabelle 4.8.: Bewertungsmatrix - Dehnungen im Verbund

	Standard- balgmodell	vollvernetztes Balgmodell
Qualität der Ergebnisse		
Modellkomplexität		
Aufwand d. Modellerstellung		
numerische Robustheit		
Eignung f. Kinematik		

4.2.4. Submodell und Haftschrift

In diesem Abschnitt wird das in 4.1.1 beschriebene Submodell angewendet und beide Modellierungstechniken als Globalmodell verglichen. Zunächst wird auf die Positionierung der Submodellzelle eingegangen. Bevor der Vergleich der Modellierungstechniken durchgeführt wird, ist die Größenbestimmung des Submodells zur Absicherung des ausreichenden Abstands zu den Rändern dargestellt. Als Globalmodell dient das im Abschnitt zuvor angewendete Kinematikmodell mit Anpassungen für eine Implementierung der Zelle. Im Anschluss wird die Submodellzelle in zwei Beispielen angewendet. Im zweiten Beispiel wird die Haftschrift des Fadens modelliert und ausgewertet.

Positionierung des Submodells

Vor der Erstellung der Submodellzelle muss der Ort im Luftfederbalg zunächst gewählt werden. Für die Vergleiche und Auswertungen in dieser Arbeit wird die innen liegende Seite der Luftfeder gewählt²⁴, da hier die Breite der Rollfalte durch die Kinematik am schmalsten ausgebildet ist und einen Ort von höherer Beanspruchung für den Verbund darstellen kann.

Die Erstellung des Submodells erfolgt wie in Abschnitt 4.1 beschrieben über das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Axialbalg-Generierungs-Skript (AB-Gen). Die Positionierung auf dem Umfang erfolgt durch die Angabe eines Winkels. Wenn dieser Winkel den Betrag null erhält, wird das Submodell an der yz-Ebene im 1. Quadranten der xy-Ebene erstellt. In Abbildung 4.24-a ist eine Draufsicht eines Globalmodells zusammen mit einem Submodell abgebildet. Die Positionierung in der Höhe ist in Abbildung 4.24-c veranschaulicht. Die Position ist mit einem Kreis markiert und wird für die Größenbestimmung und Vergleichsrechnung der Modellierungstechniken verwendet. Die Wahl dieser Po-

²⁴Innenliegend ist bezogen auf das Fahrzeug. Das Submodell befindet sich somit auf der Motor zugewandten Seite der Feder, wie in Abbildung 4.24-c gekennzeichnet.

sition begründet sich durch die geringere Rechenzeit, da an dieser Stelle nur bis zur Fahrlage simuliert werden muss.

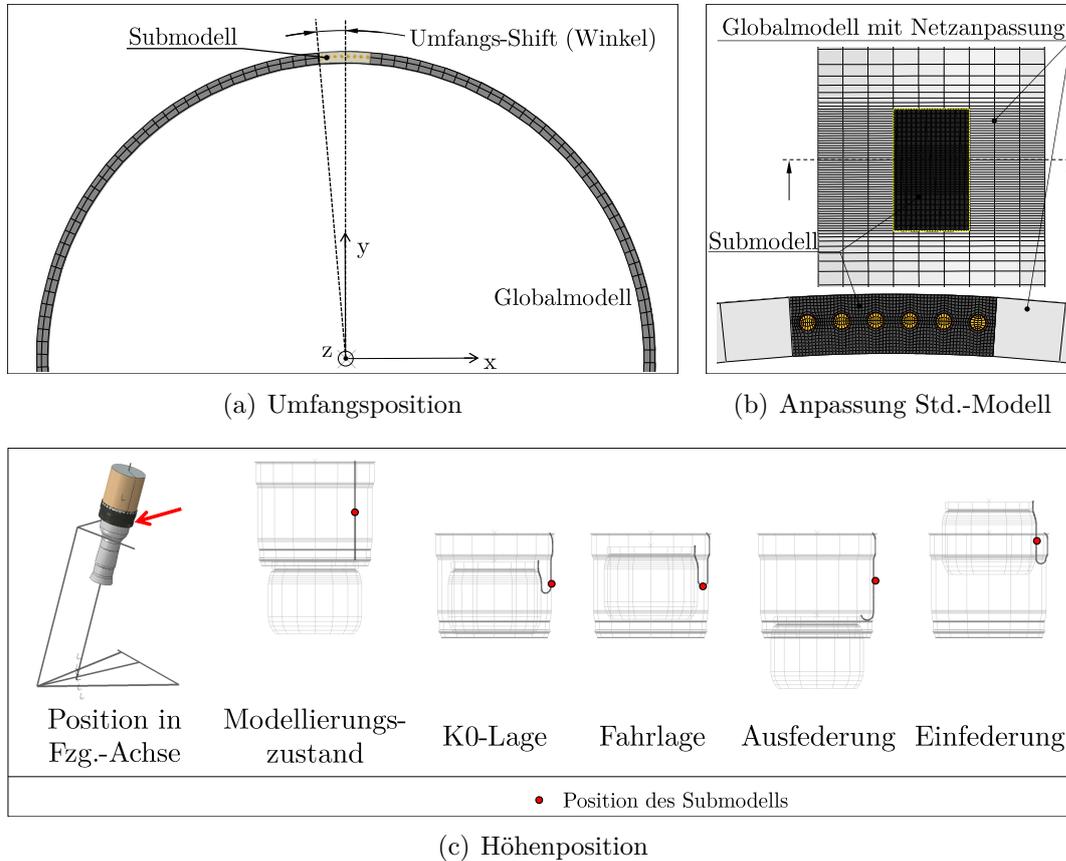


Abbildung 4.24.: Positionierung des Submodells

Ein weiteren Aspekt für die Positionierung stellt die Vorbereitung des Globalmodells dar. Es ist auf Grund einer fehlerfreien Übertragung der Randbedingungen empfehlenswert die Vernetzung des Globalmodells so anzupassen, dass die Elementkanten an den Rändern des Submodells mit denen des Globalmodells übereinstimmen²⁵. Das Standardbalgmodell lässt eine Variation der Vernetzung über die Balglänge zu, die hierfür angewendet wird (vgl. Abbildung 4.24-b). Auf dem Umfang wird die Elementgröße so eingestellt, dass zwei Fadensegmente aus dem Submodell in ein Segment aus dem Globalmodell passen, so müssen die Segmente in gerader Anzahl erstellt werden. In Längsrichtung wird an der Position

²⁵Einige Submodellberechnungen bei der Modellvorbereitung haben dies bestätigt. Wenn sich das Submodell im Kontaktbereich des Balgs befindet, ist die genaue Übereinstimmung der Kanten ausschlaggebend und kann anderenfalls zum Divergieren der Simulation führen, wenn z.B. Knoten-zu-Fläche Kontakt in dem Globalmodell gewählt wurde.

des Submodells auf eine Elementgröße von 0.2mm verfeinert. Beim vollvernetzten Modell ist eine variable Vernetzung über die Länge nicht vorgesehen. Aus diesem Grund wird dort nach der Modellerstellung in Abaqus CAE nachträglich eine Netzanpassung in der Länge vorgenommen, so dass die Elementkanten aufeinander liegen und die Vernetzung an der späteren Position des Submodells feiner ist. Eine Anpassung im Umfang ist nicht nötig, da das vollvernetzte Modell, ebenfalls wie das Submodell, in Fadensegmente aufgeteilt ist. Bei der Positionierung auf dem Umfang ist darauf zu achten, dass der "Shift-Winkel" immer ein vielfaches von dem Winkel eines Fadensegmentes ist.

Bestimmung der Zellengröße

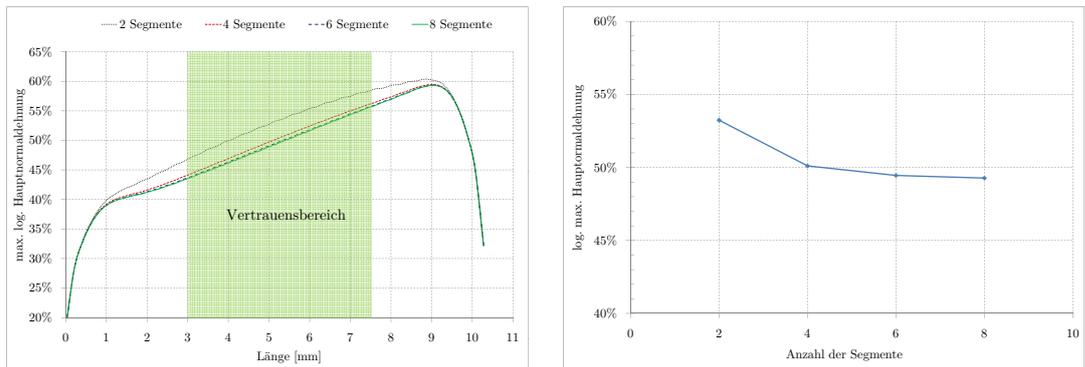
Zur Bestimmung der optimalen Submodellgröße wird das Standardbalgmodell auf Grund der kürzeren Rechendauer als Globalmodell verwendet und zunächst in die Fahrlage gebracht (siehe Abschnitt 4.2.3 auf Seite 61). Das Submodell wird in der Rollfalte positioniert, sodass in der Auswertung entlang der Fäden ein deutlicher Dehnungsanstieg auf Grund der Durchmesseränderung entsteht. Die Länge des Submodells wird nicht variiert und auf 10mm festgelegt, da hier anhand der Stetigkeit des Dehnungsverlaufs eine Aussage über den Vertrauensbereich gemacht werden kann. Den zu variiierenden Parameter stellt die Anzahl der Fadensegmente auf dem Umfang dar. Es wird mit zwei Segmenten (Abbildung von zwei Fäden) begonnen und bei jeder weiteren Variante kommen zwei Segmente hinzu, bis keine signifikante Änderung des Dehnungsverlaufs im Vertrauensbereich zu verzeichnen sind. Die Auswertung der Dehnungen erfolgt zwischen den Fäden der mittleren Segmente. Zur Übersicht sind die Eckdaten des Submodells in Tabelle 4.9 zusammengefasst.

Tabelle 4.9.: Daten des Submodells zur Zellgrößenbestimmung

Höhenpos. am Balg (v.u.)	52mm (Rollfalte in Fahrlage)
Umfangs-Shift	variabel (Mitte d. Submodells in yz-Ebene)
Segmentanzahl	2, 4, 6, 8
Länge des Submodells	10mm
Elementgröße	0.1mm x 0.2mm (Querschnitt x Längenrichtung)

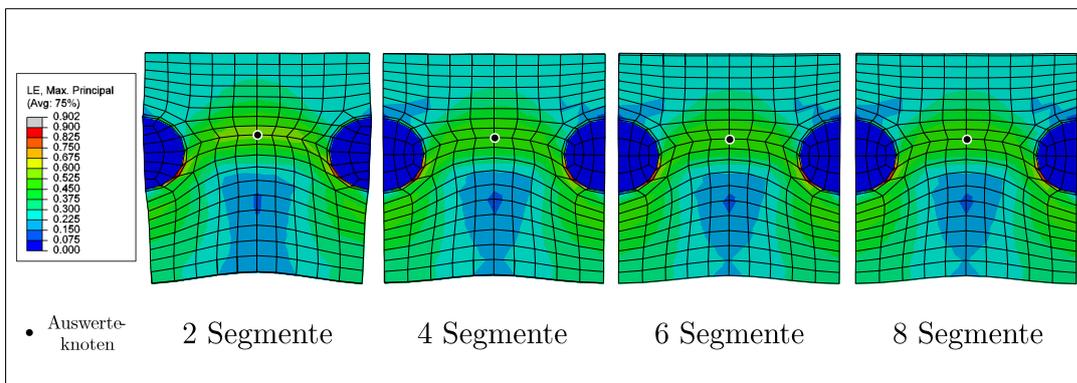
Die Auswertungen des Dehnungsverlaufs sind in Abbildung 4.25-a dargestellt. Die Auswertung erfolgt entlang eines Knotenpfades zwischen den Fäden, wie in Abbildung 4.25-c gekennzeichnet. Es ist ein Konvergieren der Verläufe durch die Änderung der Segmentanzahl zu erkennen. Zwischen zwei und vier Segmenten gibt es einen deutlichen Abfall der Dehnung. Zwischen sechs und acht Segmenten ist kein sichtbarer Unterschied zu vermerken. In Abbildung 4.25-b ist

die Dehnung in der Mitte des Vertrauensbereichs über die Segmentanzahl zur Veranschaulichung der Konvergenz dargestellt. Diese Ergebnisse sind durch den visuellen Vergleich in Abbildung 4.25-c ebenfalls belegt. Hierfür wurde aus der Mitte des Submodells (tiefster Punkt in der Rollfalte) der Schnitt dargestellt. Die umgebenden Segmente sind nicht abgebildet, sondern ausschließlich die Mitte des Modells mit jeweils einem halben Faden. Für die folgenden Submodell-Simulationen werden sechs Segmente gewählt, da dies einen optimalen Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit darstellt.



(a) log. max. Hauptnormaldehnung

(b) Konvergenz (Mitte d. Vertrauensbereichs)



(c) max. Hauptnormaldehnungen im Querschnitt

Abbildung 4.25.: Ergebnisse der Größenbestimmung des Submodells

Vergleich der Modellierungstechniken

Um den Einfluss des Globalmodells zu untersuchen, soll das Submodell mit sechs Segmenten jeweils mit den Randbedingungen aus dem vollvernetzten Modell und dem Rebarmodell berechnet werden. Die Berechnung soll wie in der Zellgrößenbestimmung bis zur Fahrlage erfolgen und analog dazu ausgewertet werden. Die Ergebnisse mit der Rebertechnik als Globalmodell liegen somit bereits vor. Aus

Gründen der numerischen Konvergenz war es nicht möglich das Submodell mit den Randbedingungen aus dem vollvernetzten Globalmodell zu simulieren. Auf Grund dieser Schwierigkeit ist zur Erprobung verschiedener Varianten mit unterschiedlicher Vernetzung ein Streifenmodell als vollvernetztes Globalmodell und ein dazu passendes Submodell erstellt worden. Es konnte keine Kombination gefunden werden, die sich numerisch stabil verhält. Auch wenn das Submodell die gleiche Vernetzung wie das Globalmodell erhält und die Knoten inzident sind. Da diese Simulation nur als Vergleich dienen sollte und eine Anwendung in der Praxis auf Grund der hohen Simulationszeiten des vollvernetzten Globalmodells ohnehin nicht möglich ist, wird weiterhin das Standardbalgmodell als globales Modell verwendet. Wenn der Ort der Auswertung des Submodells nach den Empfehlungen aus dem vorherigen Abschnitt von den Rändern entfernt ist, kann von einem vertrauenswürdigen Ergebnis ausgegangen werden. In der Validierung in Abschnitt 4.1.3 hat sich in dem überhöhten Versuch der freien Ausformung gezeigt, dass das Rebarmodell unter diesen Prüfbedingungen die globalen Eigenschaften hinreichend genau abbildet.

Anwendungsbeispiel - Torsion

Als Anwendungsbeispiel wurde ein Szenario der Luftfeder mit Torsion gewählt. Die Torsion kann beim Lenken, Beschleunigen oder Bremsen des Fahrzeugs in jeweils beiden Drehrichtungen um die Luftfederhochachse auftreten. In diesem Beispiel wird sich auf den Drehsinn beschränkt, der beim Bremsen auftreten kann²⁶. Als Globalmodell wird das Standardbalgmodell unter Achskinematik in Fahrlage um $\phi = +3^\circ$ um die z-Achse der Luftfeder (lokales Luftfederkoordinatensystem) tordiert. Für einen Vergleich sind zwei Balgvarianten gewählt worden. Die Erste entspricht der in den Abschnitten zuvor verwendeten Balgeometrie, die Zweite der Geometrie, die auch im Abschnitt der Validierung verwendet wurde (siehe Abschnitt 4.1.3 auf Seite 45). Sie weist ein anderes Fadenmaterial, eine andere Elastomermischung und eine veränderte Geometrie auf. Beide Varianten sind in Abbildung 4.26 nebeneinander dargestellt. Die Position des Submodells entspricht der gleichen wie im Abschnitt zuvor. Die Daten sind in Tabelle 4.10 zusammengefasst.

²⁶Beim Bremsvorgang wird durch die Kraftübertragung zur Straße das Rad nach hinten gedrückt. Eine elastische Verschiebung ist durch die Fahrwerksbuchsen möglich und führt zu einer Torsion der Luftfeder.

Tabelle 4.10.: Daten des Submodells im Anwendungsbeispiel - Torsion

Höhenpos. am Balg (v.u.)	52mm (Rollfalte in Fahrlage)
Umfangs-Shift	3.6°
Segmentanzahl	6
Länge des Submodells	10mm
Länge des Vertrauensbereichs	4-5mm
Elementgröße im Vertrauensbereich	0.1mm x 0.2mm (Quer x Längs)

Die Auswertung der Simulationen erfolgt entlang des Fadens in der Mitte des Submodells im Vertrauensbereich vom Abrollkolben zur Außenführung. Es werden die maximalen logarithmischen Hauptnormaldehnungen bei 0° und 3° Torsion verwendet. Als Auswertungsorte sind zunächst acht Knotenpfade um den Faden erstellt worden, die in Abbildung 4.26 im Schnitt gekennzeichnet sind. Zur besseren Differenzierung der Ergebnisse wurden drei Knotenpfade für die Darstellung in Abbildung 4.27 gewählt.

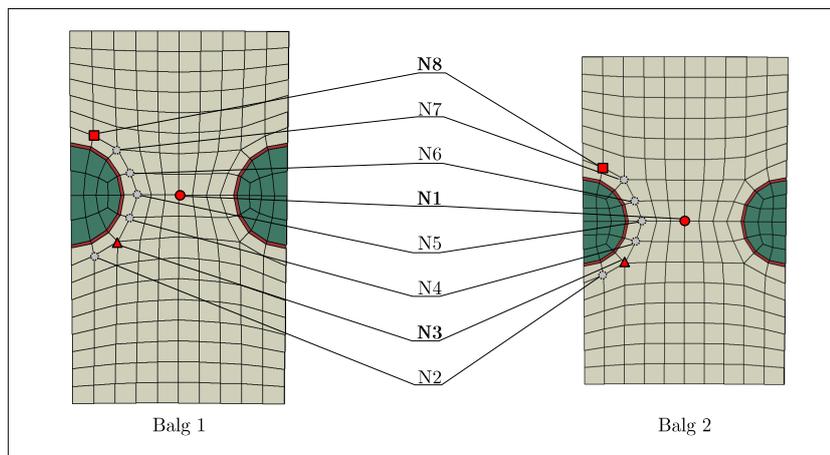


Abbildung 4.26.: Auswertungspositionen im Schnitt beider Balgvarianten

Die unterschiedlichen Auswertungsorte lassen sich in dem Diagramm deutlich voneinander unterscheiden und sind durch die geschweiften Klammern zusammengefasst und gekennzeichnet. Die jeweiligen zusammengefassten gestrichelten und vollen Linien zeigen die Änderung der Dehnung von 0° auf 3° Torsion. Es lassen sich die beiden Balgvarianten an allen Auswertungspfaden voneinander unterscheiden. Es ist festzustellen, dass die Balgvariante Balg 2 ein niedrigeres Dehnungsniveau an den Knotenpfaden im Vergleich aufweist und nach der

einfachsten Festigkeitshypothese²⁷ als schadenstoleranter zu bewerten ist.

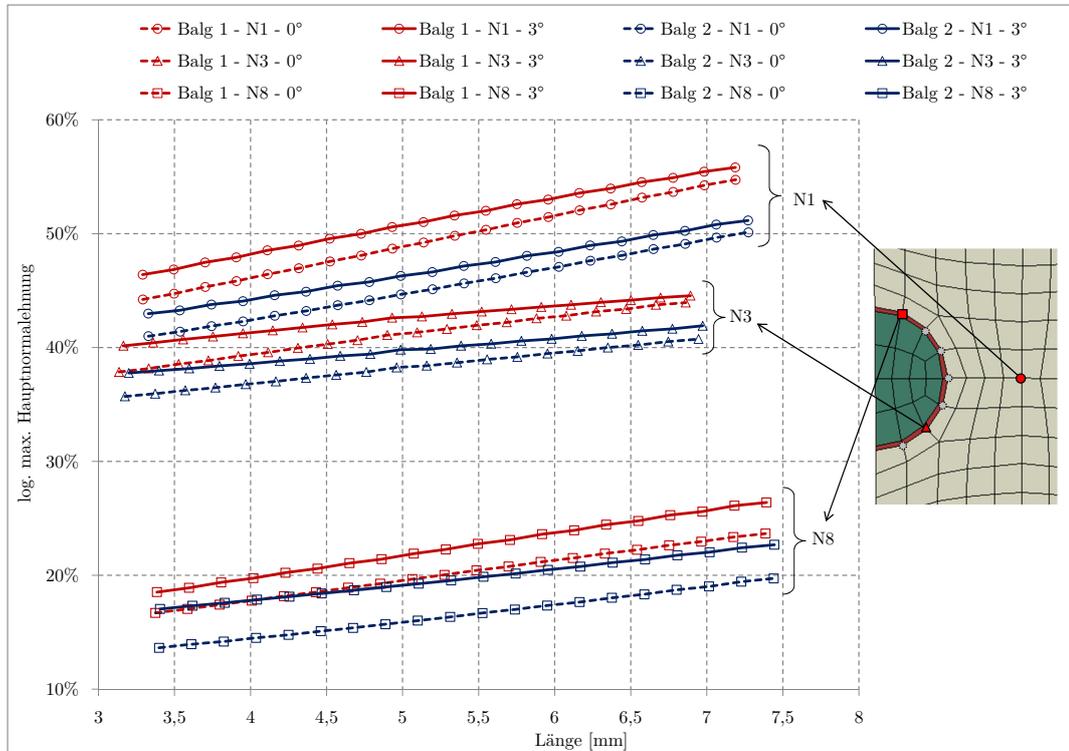


Abbildung 4.27.: Auswertung der Dehnungen

Eine weitere Auswertung ist in Abbildung 4.28 dargestellt. Hier sind die Dehnungsänderungen von 0° auf 3° Torsion jedes Balges und Auswertungsortes aufgetragen. Die Auswertungsorte sind mit den geschweiften Klammern zusammengefasst. Der Auswertungsort oberhalb des Fadens (zur Außenseite) weist die größte Dehnungsänderung auf und verhält sich bei beiden Balgvarianten gegenläufig. Die Pfade zwischen den Fäden und unterhalb des Fadens verlaufen fallend und unterscheiden sich bei Balgvariante Balg 2 kaum voneinander. Anhand dieser Auswertung ist festzustellen, dass die Dehnungsänderungen bei Balgvariante Balg 1 im Mittel geringer sind.

²⁷Die einfachste Festigkeitshypothese ist die größte Hauptnormaldehnung nach FLAMM et. al. [32]

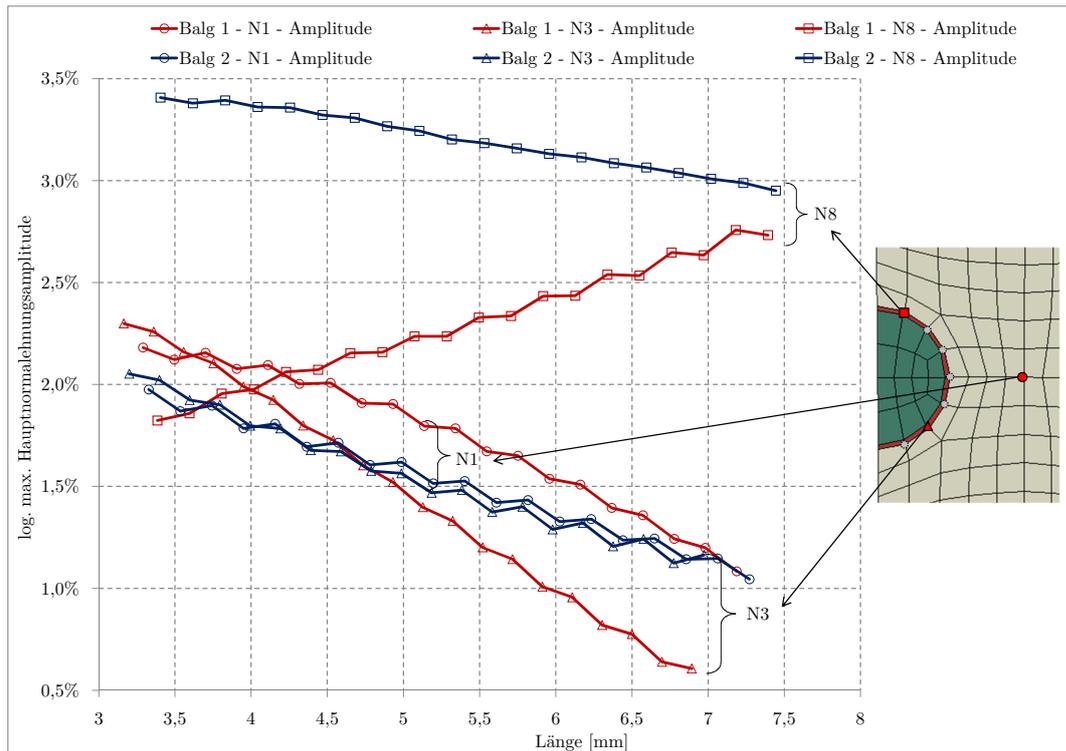


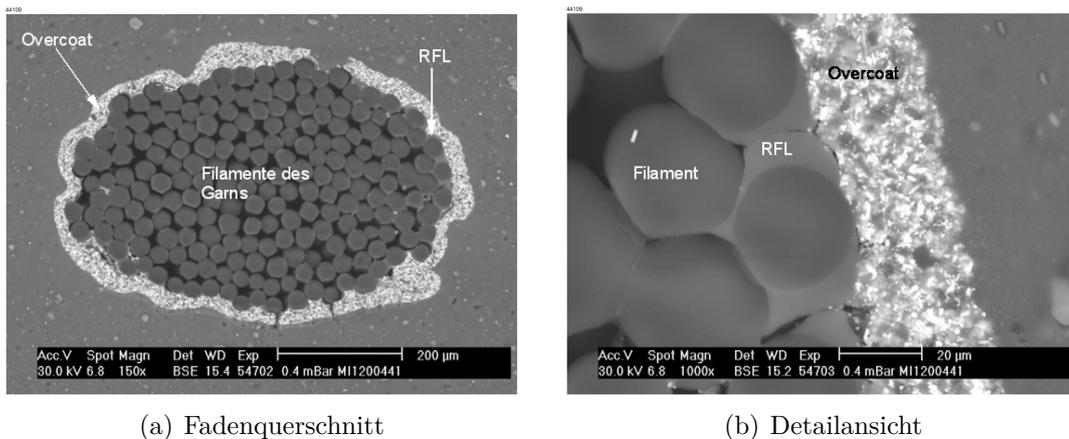
Abbildung 4.28.: Auswertung der Dehnungsänderungen

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt, dass sich Unterschiede in der Balgeometrie und den Materialien in einer Auswertung deutlich voneinander trennen und bewerten lassen. Das entwickelte Submodell ist somit für eine Balgoptimierung mit einem Globalmodell unter Einfluss der Achskinematik geeignet.

Abbildung der Haftschrift

Der Faden im Verbund kann von einem Haftvermittler umgeben sein, wie in Abschnitt 2.1.4 vorgestellt. Bei den behandelten Fäden in den zwei Balgvarianten handelt es sich um Fadenmaterial mit einem "Overcoat"-Haftsystem, welches im Durchschnitt eine Schichtstärke von ca. $2\text{-}3 \frac{1}{100} \text{ mm}$ hat. In Abbildung 4.29 sind zwei REM Aufnahmen²⁸ dargestellt, die den Schichtaufbau um den Faden veranschaulichen. Da die Schichtstärke über den Umfang und die Länge des Fadens variiert, muss an dieser Stelle ein Mittelwert verwendet werden, da in dem diskretisierten Modell der Faden und der Bereich der umgebenden Haftschrift einen Kreisquerschnitt aufweisen. Es wird eine Schichtstärke von $\frac{3}{100} \text{ mm}$ festgelegt und in den folgenden Modellen verwendet.

²⁸Aufnahmen von einem Raster-Elektronen-Mikroskop der Freudenberg Forschungsdienste KG Weinheim - Schadensanalyse SA1200142



(a) Fadenquerschnitt

(b) Detailansicht

Abbildung 4.29.: REM Aufnahme - Balgschnitt

Um die beschriebene Haftschrift im FEM-Modell ausreichend abzubilden ist eine sehr feine Diskretisierung nötig, die mit aktuellem Hardware-Equipment nur durch ein Submodell in einem sinnvollen zeitlichen Rahmen simuliert werden kann. Es wird das Submodell aus dem Anwendungsbeispiel zuvor übernommen und die Länge sowie Vernetzung angepasst. Es werden beide Balgvarianten Balg 1 und Balg 2 verwendet und es wird das Szenario der Torsion in Fahrlage simuliert. Die Eckdaten des verwendeten Modells sind in Tabelle 4.11 aufgelistet. Die Haftschrift wird ebenfalls in der Vernetzung angepasst, so dass zwei Elemente über die Dicke der Haftschrift erzeugt werden.

Tabelle 4.11.: Daten des Submodells zur Abbildung der Haftschrift

Höhenposition am Balg (v.u.)	54mm (Rollfalte in Fahrlage)
Umfangs-Shift	3.6°
Segmentanzahl	6
Länge des Submodells	7mm
Länge des Vertrauensbereichs	1-2mm
Elementgröße im Vertrauensbereich	0.05mm x 0.1mm (Quer x Längs)
Dicke der Haftschrift	$\frac{3}{100} mm$
Elementierung der Haftschrift	2 Elemente über Dicke

In Abbildung 4.30 sind die beiden Balgvarianten im Schnitt dargestellt. Die angepasste Vernetzung des Submodells ist im oberen Teil der Abbildung zu erkennen. Die Randsegmente sind mit 0.1mm Kantenlänge vernetzt, da dieser Bereich auf die Auswertung keinen Einfluss nimmt und eine stärkere Vergrößerung zu

einem schlechten Netz führt. Im Detail ist das linke der mittleren Segmente dargestellt. Die Haftschrift wurde nur bei den mittleren Fäden mit zwei Elementen in Dickenrichtung versehen, da diese für die Auswertung relevant sind. Die Auswertungspositionen an denen die Pfade in Fadenrichtung erstellt wurden sind mit den jeweiligen Symbolen gekennzeichnet. Für die Auswertung sind alle Positionen bis auf N3 verwendet worden.

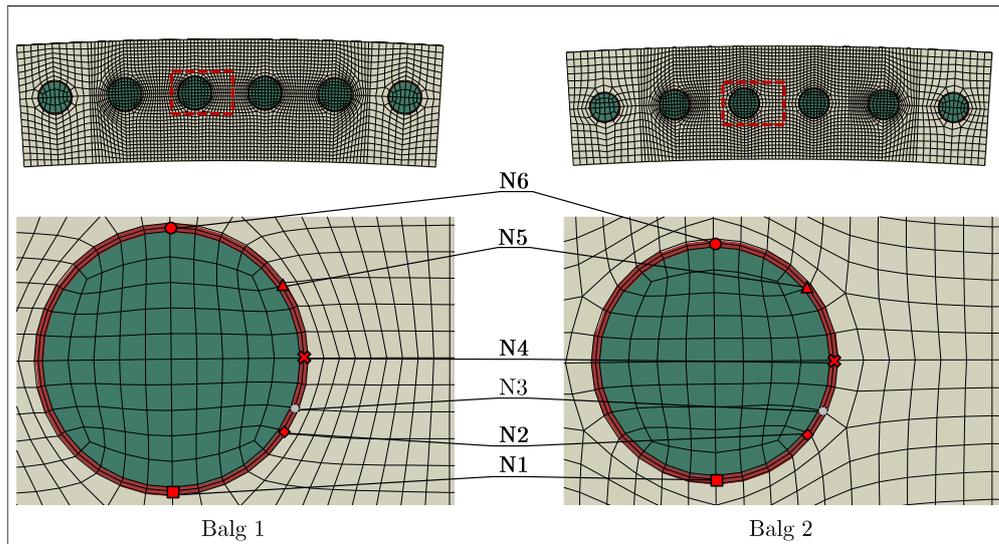


Abbildung 4.30.: Auswertungspositionen im Schnitt beider Balgvarianten

In Abbildung 4.31 sind die Dehnungen im Vertrauensbereich dargestellt. Die Verläufe der Pfade sind mit den geschweiften Klammern gruppiert. Die gestrichelten Linien stellen den Zustand mit 0° Torsion und die vollen mit 3° Torsion dar. Das höchste Dehnungsniveau stellt sich an der Position N2 ein, die sich seitlich am Faden der zur Balginnenwand zugewandten Seite befindet. Diese Position ist beim Axialbalg typischerweise der Ort der größten Dehnung, da das Elastomer durch den Innendruck zwischen den Fäden hindurch gedrückt wird. Das Niveau der Dehnung ist bei Balgvariante Balg 1 etwas höher als bei Balg 2. Des Weiteren wird an dieser Auswertungsposition deutlich, dass sich durch die Torsion nur geringe Änderungen ergeben, ebenso wie bei Position N1 und N6. Somit ist hier keine starke Abhängigkeit von der Torsion zu verzeichnen. Anders verhalten sich die Positionen seitlich vom Faden (N4 auf 3 Uhr) und oben seitlich (N5 auf 2 Uhr). Hier ist eine deutliche Dehnungsänderung durch die Torsion zu verzeichnen, da eine Scherung zwischen Faden und Elastomer entsteht. Anhand der Ergebnisse und unter der Anwendung der einfachsten Festigkeitshypothese (max. Hauptnormaldehnung) ist die Balgvariante Balg 2 in der Haftschrift als schadenstoleranter bei Torsion einzuordnen.

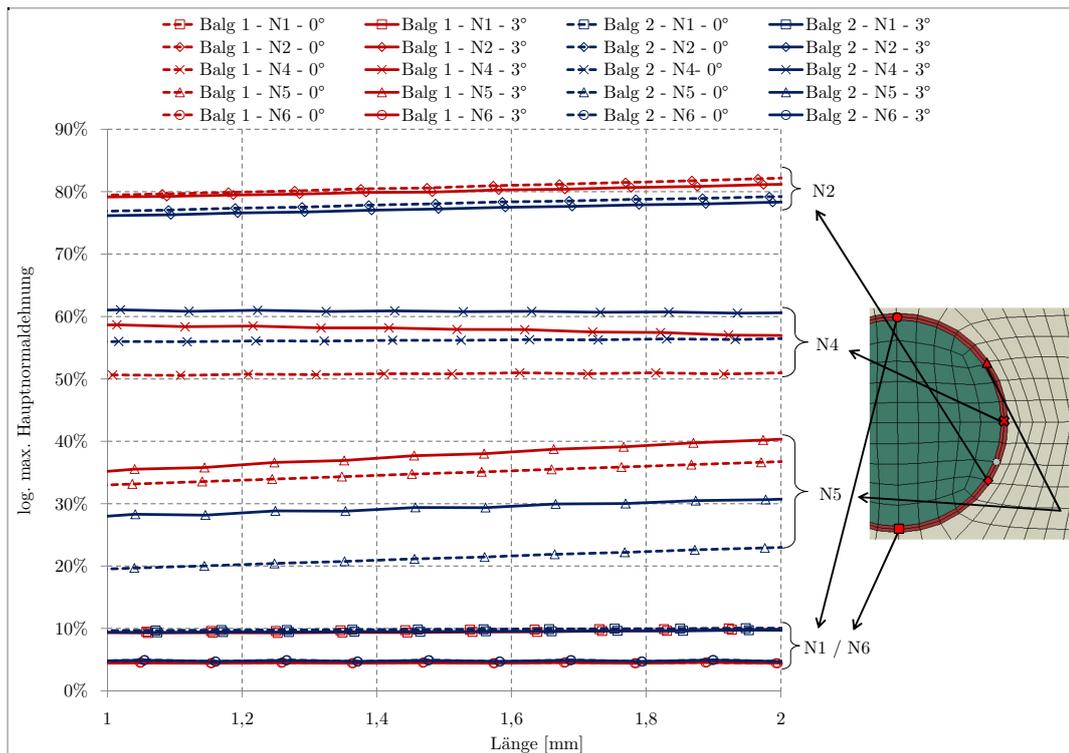


Abbildung 4.31.: Auswertung der Dehnungen in der Haftschrift

Abschließend lässt sich sagen, dass eine Abbildung der Haftschrift des Fadens durch die Submodelltechnik möglich ist. Die Besonderheit im Vergleich zu einem vollvernetzten Streifenmodell mit zyklischer Symmetrie, bei dem eine Abbildung der Haftschrift ebenfalls realisierbar ist, besteht darin, dass bei dieser hybriden Modellierungstechnik der Einfluss der Kinematik der Fahrzeugachse in die Simulation mit einfließt. In den häufigsten Fällen werden dadurch die Besonderheiten der Beanspruchung auf den Balg erst ersichtlich [3]. Im Anschluss an diese Arbeit könnten Untersuchungen mit anderen Materialeigenschaften in der Haftschrift erfolgen, da anzunehmen ist, dass sich der Haftvermittler steifer als das Elastomer verhält.

Simulationszeiten

In den Tabellen 4.12-4.14 sind die Simulationszeiten der verwendeten Modelle aufgetragen. Die Simulationen wurden teilweise mit unterschiedlichen Anzahlen von Prozessoren (CPUs) durchgeführt. Aus diesem Grund ist für eine Vergleichbarkeit, neben der Gesamtzeit, die Zeit pro CPU angegeben²⁹. Des Weiteren wurde die numerische Konvergenz der Modelle bewertet. Da alle Modelle mit

²⁹Beide Zeitangaben sind den Ergebnis-Dateien der Simulationen entnommen.

den gleichen oder ähnlichen Steuerungsdateien simuliert wurden, ist die Vorgabe der Lastfälle und Inkrementgrößen ähnlich. Somit ist das Konvergenzverhalten mit der Anzahl an "Cut-Backs"³⁰ in Korrelation gesetzt. Beispielsweise führt eine im Vergleich geringere Anzahl an "Cut-Backs" zu einer positiv bewerteten numerischen Konvergenz. Bei dem Vergleich der Simulationszeiten und der num. Konvergenz wird deutlich, dass ein vollvernetztes Modell mit Achskinematik nicht für die Produktentwicklung in Betracht kommt. Das Submodell hingegen verhält sich stabiler und ist für eine Anwendung in der Produktentwicklung gut geeignet. Besonders, da das Standardbalgmodell für nahezu jede Luftfeder erstellt wird und es nur einer einfachen Netzanpassung für das Submodell bedarf.

Tabelle 4.12.: Simulationszeiten - Globalmodell - Standardbalgmodell

Berechnung	Var.	CPUs	Zeit (h)	CPU-Fakt.	h/CPU	RAM (GByte)	num. Konv.
Kinematik bis Fahrlage	Balg 1	2	4.04	1.34	5.40	1	👍
Bsp.-Torsion / Haftschrift	Balg 1	2	4.18	1.33	5.55	1	👍
	Balg 2	2	5.56	1.19	6.58	1	👎

Tabelle 4.13.: Simulationszeiten - Globalmodell - vollvernetztes Modell

Berechnung	Var.	CPUs	Zeit (h)	CPU-Fakt.	h/CPU	RAM (GByte)	num. Konv.
Kinematik bis Fahrlage	Balg 1	16	183	12.8	2337	85	👎

³⁰Wenn in einer durch den Solver festgelegten Iterationsanzahl kein Gleichgewicht gefunden wird, erfolgt ein Neustart dieses Schrittes mit einer verringerten Schrittweite.

Tabelle 4.14.: Simulationszeiten - Submodell

Berechnung	Seg.	Var.	CPUs	Zeit (h)	CPU- Fakt.	h/ CPU	RAM (GB)	num. Konv.
Kinematik bis Fahrlage	2	Balg 1	4	1.05	3.66	3.84	2	
	4			3.42	3.77	12.88	4.7	
	6			5.98	3.77	22.54	7.8	
	8			9.22	3.82	35.24	10.8	
Bsp.- Torsion	6	Balg 1	4	6.34	3.67	23.26	8	
		Balg 2		5.62	3.78	21.27	6.8	
Bsp.- Haftschicht	6	Balg 1	4	57.37	3.49	200.02	33	
		Balg 2		53.54	3.46	185.04	29	

5. Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Vergleich von zwei Modellierungsansätzen von Luftfedern mit Axialbälgen aufgeführt und in den möglichen Teilbereichen, die durch Versuche abbildbar sind, validiert. Die erste Modellierungstechnik "Verschmierungstechnik Rebar" wird in der Entwicklung eingesetzt und die Modelle wurden in dieser Arbeit mit Hilfe des dort verwendeten Skripts erstellt (siehe Abschnitt 3.1 auf Seite 25). Für die zweite Technik "Vollvernetzung" ist im Rahmen dieser Arbeit ein Skript erstellt worden, welches diese Technik einsetzt und einen Axialbalg in beliebiger Größe, Detaillierung und Position im Fahrzeugkoordinatensystem generiert. Des Weiteren ermöglicht dieses Skript die Erstellung eines Submodells, welches universell mit beiden Modellierungstechniken als Globalmodell einsetzbar ist. Das Skript lässt sich in Abaqus CAE mittels GUI ("Graphical User Interface") steuern und das Modell gegebenenfalls im "Pre-Processor" nachbearbeiten (siehe Abschnitt 4.1 auf Seite 36).

Die Validierung ist in drei Versuche untergliedert und zeigt die grundlegenden Unterschiede der beiden Techniken. Diese bestehen in der Abbildung des Fadens und der Berücksichtigung der Eigenschaften in Querrichtung. Bei der Rebar-Technik werden die Eigenschaften des Festigkeitsträgers ausschließlich in Fadenrichtung berücksichtigt. Das führt zu einem "weicheren" Verhalten des Verbunds in den durchgeführten Validierungsversuchen. Ebenfalls wird der Einfluss des Materialmodells vom Elastomer und Faden verdeutlicht und zeigt, dass die Standard-Parameter für das Materialmodell Mooney-Rivlin deutlich zu steif gewählt sind (siehe Abschnitt 4.1.3 auf Seite 45). Dies wird schon bei der Parameterermittlung nach einem uniaxialen Zugversuch der zwei verwendeten Elastomermischungen deutlich (siehe Abb. 4.7 auf Seite 43). Nach der Validierung sind Vergleiche in den drei Bereichen der Luftfedersimulation aufgeführt: Kennlinie, Verklemmung und Beanspruchungsanalyse (siehe Abschnitt 4.2 auf Seite 57). In den ersten beiden Bereichen Kennlinie und Verklemmung sind keine signifikanten Unterschiede der Techniken zu verzeichnen. Ebenso bei der Auswertung der Fadenspannungen in der Beanspruchungsanalyse des Luftfederbalgs. Einen deutlichen Unterschied gibt es jedoch bei der Auswertung der Dehnungen im Verbund. Da bei der Rebarteknik die Quersteifigkeit des Fadens nicht berücksichtigt wird, verteilen sich die Dehnungen auf dem gesamten Umfang des Balgs. Beim vollvernetzten Modell werden die Dehnungen hauptsächlich vom Elastomer zwischen den Fäden aufgenommen, was dem realen Verhalten des Balgs deutlich näher kommt (siehe Abb. 4.23 auf Seite 66). Im Hinblick auf die numerische Ro-

bustheit, die Modellkomplexität und Rechenzeit bietet das Rebarmodell jedoch deutliche Vorteile, so dass ein vollvernetztes Modell in der Produktentwicklung nur eingesetzt werden sollte, wenn die Beanspruchung im Verbund untersucht wird. Hier eignet sich ein Streifenmodell mit zyklischer Symmetrie bei axialer Federung bzw. die Submodelltechnik bei Untersuchung unter Achskinematik des Fahrzeugs. Die Submodelltechnik stellt eine gute Kombination aus Detailierung und Rechenzeit dar. Vor dem Einsatz des Submodells ist zunächst die Größe variiert worden, um den Erhalt vertrauenswürdiger Ergebnisse sicher zu stellen. Dies ergab, dass das Submodell aus mindestens sechs Fadensegmenten bestehen sollte und für die Auswertung die Bereiche im Abstand von 2-3mm von der oberen und unteren Kante ausgeschlossen werden müssen (siehe Abb. 4.25 auf Seite 70). Ein Vergleich zwischen Standard- und vollvernetztem Balgmodell als Globalmodell ist aus Gründen der numerischen Konvergenz nicht möglich gewesen (siehe Abschnitt 4.2.4 auf Seite 67). Da das globale Verhalten des Luftfederbalgs mit dem Rebarmodell mit den Messungen gut übereinstimmt und das Submodell nach den Empfehlungen aus der Zellgrößenbestimmung ausgewertet wird, ist mit vertrauenswürdigen Ergebnissen zu rechnen. Somit stellt das Standardbalgmodell als Globalmodell mit dem vollvernetzten Submodell eine gute Kombination dar. Ein weiterer Vorteil, der beim Einsatz in der Produktentwicklung zum Tragen kommt, besteht darin, dass durch die Auslegung der Luftfeder das Standardbalgmodell bereits existiert und der Mehraufwand nur aus der Erstellung des Submodells mittels Abaqus GUI (ABGen) besteht.

Abschließend ist das Submodell mit dem Standardbalgmodell als Globalmodell in einem Anwendungsbeispiel eingesetzt worden. Hierzu wurde das Luftfedermodell unter Achskinematik in Fahrlage um 3° tordiert, um bspw. das Szenario eines Bremsvorgangs nachzustellen. Es sind zwei Balgvarianten verwendet worden und die Auswertung lässt eine gute Differenzierung und Bewertung der beiden Varianten zu. Die Rechenzeiten liegen mit ca. 10 Stunden pro Variante¹ im vertretbaren Rahmen, wenn man bedenkt, dass man die Beanspruchung unter Abbildung der Achskinematik erhält. Eine solche Rechnung kann beispielsweise am Ende eines Arbeitstages gestartet und zu Beginn des nächsten ausgewertet werden. Mit einer Anpassung des Globalmodells (gröbere Vernetzung) ließen sich die Rechenzeiten noch reduzieren. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für das Submodell ist die Abbildung der Haftschrift des Fadens. Hierzu sind mittels REM-Aufnahmen aus bereits erfolgten Bauteilanalysen die Schichtdicken gemittelt und mit Hilfe des Skripts in Abaqus im Submodell modelliert worden. Auch hier wurden die zwei Balgvarianten berechnet und in den Ergebnissen zeigt sich ebenfalls, dass eine Differenzierung und Bewertung der Varianten im Bereich der Haftschrift möglich ist. Da die Schichtdicken sehr gering ausfallen, ist eine feine Diskretisierung nötig und die Rechenzeiten des Submodells fallen mit 55 Stunden sehr lange aus. Somit ist hier eine Simulation von mehreren

¹4 Stunden - Globalmodell; 6 Stunden - Submodell

Varianten zeitaufwendig. Jedoch wird der Rechenzeitaufwand im Hinblick auf die steigende Rechenleistung sinken. Die Abbildung der Haftschrift hat gezeigt, dass es möglich ist, diese zu bewerten und verschiedene Balgvarianten untereinander zu vergleichen.

In der Anwendung des Axialbalg-Generierungs-Skripts haben sich Möglichkeiten der Optimierung gezeigt, wie zum Beispiel der Erstellung einer automatisierten Auswertung des Submodells. Es könnten Knoten oder Elementsets definiert werden, von denen später gezielt mit dem bereits bestehenden Auswertungsskript des Standardbalgmodells ein Auslesen der Ergebnisse erfolgen könnte. Des Weiteren wäre eine Lesefunktion des GUIs für die Anwendung hilfreich, die es ermöglicht, bereits erstellte Balgvarianten inkl. der Koordinaten im Fahrzeugkoordinatensystem wiederholt einzulesen und zu generieren.

Im Nachfolgenden könnten mit dem Submodell weitere Untersuchungen, wie die Variation der Materialeigenschaft der Haftschrift erfolgen und dessen Einfluss auf die Beanspruchung. Ebenso könnte die Implementierung des zu Beginn von Kapitel 4 angesprochenen Fadenmodells von DONNER [30], welches die Zwirnung berücksichtigt, zielführend sein. Zudem bedarf es eines geeigneten Verfahrens anhand des globalen Modells die kritischen Orte im Luftfederbalg zu bestimmen, an denen die Auswertung eines Submodells erfolgsversprechend wäre. Wenn die angepassten Parameter des Materialmodells YEOH weiter zum Einsatz kommen, sollten zur Absicherung für die eingesetzten Mischungen zyklische Versuche erfolgen. Der verwendete Zugversuch bildet nur die Eigenschaften der ersten Belastung des Elastomers ab. Da sich die Eigenschaften durch den Mullins-Effekt bei zyklischer Belastung verändern, ist es für die Abbildung des realen Bauteils sinnvoller, die Materialparameter an einen zyklischen Versuch anzupassen. Des Weiteren sollte ein biaxialer Zugversuch und ein Druckversuch mit den ermittelten Materialkoeffizienten überprüft werden, da dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war.

6. Literaturverzeichnis

- [1] VOSS, H.: *Die Luftfederung, eine regelbare Fahrzeugfederung*. 1988.
- [2] LÖCKEN, F., M. WELSCH, F. MANTWILL und T. FORKE: *Analytische und numerische Modellierung des dynamischen Steifigkeits- und Hystereseeffekts einer Luftfeder*. 2012.
- [3] TRELLBORG VIBRACOUSTIC GMBH: *Firmeninterne Unterlagen*. Trellborg-Vibracoustic GmbH, Weinheim.
- [4] RUST, WILHELM: *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen*. Vieweg + Teubner, 2009.
- [5] *Abaqus Theory Manual, Version 6.12-2*.
- [6] PAHL, HANS.-JOACHIM.: *Luftfedern in Nutzfahrzeugen*. LFT Germany GmbH, Dormagen, 2002.
- [7] DRESCHER, MATTHIAS: *Konzeption eines Prüfstandes zur Untersuchung des Torsions-Kopplungs-Effektes von Luftfederbälgen*, 2012.
- [8] GIECK, JACK: *Riding on air: A history of air suspension*. Society of Automotive Engineers, Warrendale and Pa, 1999.
- [9] STUMP, E.: *Gegenwärtiger Entwicklungsstand der Omnibusluftfedern*. ATZ, (10), 1958.
- [10] NIEHUS, G.: *Entwicklung von Luftfederbälgen*. ATZ, (9), 1959.
- [11] PELZ, P., T. BRÜGER und J. MERK: *Numerische Festigkeitsauslegung von Luftfedern*. Materials Testing, (9), 2007.
- [12] VIBRACOUSTIC GMBH & CO. KG: *Schwingungstechnik für Automobile*. Vibracoustic GmbH & Co. KG, Weinheim, 2002.
- [13] ELIAS, HANS-GEORG: *An introduction to polymer science*. VCH, 1997.
- [14] DOMININGHAUS, HANS, PETER ELSNER, PETER EYERER und THOMAS HIRTH: *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendung, 7. Auflage*. Springer-Verlag, 2008.

-
- [15] ELIAS, HANS-GEORG: *Macromolecules*. Wiley-VCH, 2009.
- [16] FREUDENBERG FORSCHUNGSDIENSTE KG: *Elastomere Werkstoffe*. Freudenberg Forschungsdienste KG, 2001.
- [17] EYERER, PETER, THOMAS HIRTH und PETER ELSNER: *Polymer Engineering - Technologie und Praxis*, 1. Auflage. Springer-Verlag, 2008.
- [18] DOMININGHAUS, HANS, PETER EYERER, PETER ELSNER und THOMAS HIRTH: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. Springer-Verlag, 2005.
- [19] ALBERS, BETTINA: *Technische Mechanik B, Einführung in die Kontinuumsmechanik*. Technische Universität Dresden, 2008.
- [20] BETTEN, JOSEF: *Kontinuumsmechanik - Elastisches und inelastisches Verhalten isotroper und anisotroper Stoffe*. Springer-Verlag, 2. erw. Aufl., 2001.
- [21] HOLZAPFEL, GERHARD A.: *Nonlinear solid mechanics*. Wiley, 2008.
- [22] KUNA, MANFRED: *Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen*. Vieweg + Teubner, 2008.
- [23] RÖSLER, JOACHIM, HARALD HARDERS und MARTIN BÄKER: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*, 3. Auflage. Vieweg + Teubner, 2008.
- [24] *Abaqus Analysis User's Manual, Version 6.12-2*.
- [25] WRIGGERS, PETER: *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*. Springer-Verlag, 2001.
- [26] *BEOLINUGS - Online-Wörterbuch*. <http://dict.tu-chemnitz.de>; Stand: 25. Oktober 2012.
- [27] WELSCH, MICHAEL: *Der Einfluss der Rollbalgkonstruktion auf die Charakteristik einer Luftfeder*, 2007.
- [28] METZGER, MICHAEL und THORSTEN BRÜGER: *Luftfedern vom Verständnis zur Funktionssicherheit*. In: *1. Tagung DVM-Arbeitskreis Elastomerbauteile*, Weinheim, 2011.
- [29] PHAM, TRAM ANH: *FE-Berechnungen und Beanspruchungsanalyse des Elastomers an einem Luftfederbalg -Automatismen und Verifikation*, 2008.
- [30] DONNER, HENDRIK: *Anwendungsorientierte Modellierung anisotroper Struktureigenschaften von Cord-Gummi-Kompositen*, 2011.
- [31] *Release 11.0 Documentation for ANSYS*.

-
- [32] FLAMM, M., T. STEINWEGER und U. WELTIN: *Festigkeitshypothesen in der rechnerischen Lebensdauervorhersage von Elastomeren*. KGK, Bd. 56, 2003.
- [33] DRESCHER, MATTHIAS: *Untersuchung des Torsions-Kopplungs-Effekts von Luftfederbälgen*, 2012.