



# Entwicklung eines Verfahrens für die Auslegung von Drucktampons mit FEM- Simulation zur Digitalisierung der Drucktamponherstellung

vom Fachbereich Maschinenbau an der  
Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)  
genehmigte  
**D i s s e r t a t i o n**

von

Ahmad Al Aboud, M.Sc.

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Oliver Weeger

Darmstadt 2023

Al Aboud, Ahmad:

„Entwicklung eines Verfahrens für die Auslegung von Drucktampons mit FEM-Simulation zur Digitalisierung der Drucktamponherstellung“

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2023

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-236255

Tag der Einreichung: 29.11.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 28.02.2023

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, die vorgelegte Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades “Doctor Ingenieur (Dr.-Ing.)” mit dem Titel “ Entwicklung eines Verfahrens für die Auslegung von Drucktampons mit FEM-Simulation zur Digitalisierung der Drucktamponherstellung” selbständig und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel erstellt zu haben. Ich habe bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen.

Darmstadt, den 29.11.2022

---

Ahmad Al Aboud, M.Sc.



## Kurzfassung

Das Hauptziel dieser Dissertation ist eine Digitalisierung der Drucktamponherstellung zur Verbesserung der Druckqualität beim indirekten Tiefdruckverfahren. Der Tampondruck ist ein indirektes Tiefdruckverfahren zum Bedrucken von Objekten mit komplizierten Geometrien oder rauen Oberflächen. So können zum Beispiel Ziffern und Buchstaben auf elektrische Geräte oder elektrolumineszente (EL) Paneele auf Flakons gedruckt werden. Obwohl der Tampondruck in der Werbung und im industriellen Druck weit verbreitet ist, gibt es nur wenige wissenschaftliche Studien über die Herstellung des Drucktampons sowie die Wahl seiner Form, seines Härtegrades und deren Einfluss auf die Druckqualität. Bisher erfolgen Materialauswahl und Formgebung empirisch. Im ersten Schritt wurde ein Workflow zur Digitalisierung der Drucktamponherstellung entwickelt, mit dem Ziel einer Kostensenkung, Verkürzung der Drucktamponentwicklungszeiten und Steigerung seiner Qualität. Dieser Workflow kann sowohl mit kommerzieller Software wie Siemens NX und Abaqus als auch mit Open-Source-Software wie FreeCAD und Salome-Meca durchgeführt werden. Beide Wege erlauben ein gezieltes Optimieren der Drucktampons und werden in dieser Dissertation verglichen. Im zweiten Schritt wurde das Drucktamponmaterial sowohl mit als auch ohne Carbon-Nanotubes durch verschiedene mechanische Materialprüfungen charakterisiert. Die Carbon-Nanotubes im Drucktamponmaterial verhindern die elektrostatische Aufladung eines Drucktampons. In dieser Dissertation wurden einfache und komplexe mechanische Materialprüfungen durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften zu charakterisieren und diese als Input-Parametern für die FEM-Simulation verwenden zu können. Bei den einfachen mechanischen Materialprüfverfahren handelt es sich um den einachsigen Zugversuch, den planaren Zugversuch und den einachsigen Druckversuch und bei den komplexen Materialprüfverfahren um den biaxialen Zugversuch, den volumetrischen Druckversuch und die Bestimmung der Querkontraktionszahl. Zusätzlich wurden die Gussformen der Probekörper mittels Polyjet- und Stereolithographie-3D-Druckern hergestellt. Anschließend wurde eine Methode zur Simulation des Druckprozesses des indirekten Tiefdruckverfahrens in Abaqus und Salome-Meca vorgestellt. Außerdem wurden mechanische und optische Methoden zur Validierung der FEM-Simulation verwendet. Anschließend wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss der Simulationsparameter auf die Simulationsergebnisse zu ermitteln. Die Optimierungsprozesse mit diesem digitalen Workflow führten zur Entwicklung neuer Arten von Drucktampons (Hohl-Drucktampons und Bi-Material-Drucktampons mit oder ohne Carbon-Nanotubes) und zu einer Verbesserung der Druckqualität.



## Abstract

The main goal of this dissertation is a digitalization of the printing pad production to improve the printing quality in the indirect gravure printing process. Pad printing is an indirect gravure printing process for printing on objects with complicated geometries or rough surfaces. For example, numerals and lettering can be printed on electrical equipment or electroluminescent (EL) panels on flacons. Even though pad printing is widely used in advertising and industrial printing, there are few scientific studies on the production of the printing pad and the selection of its shape and degree of hardness and their influence on the printing quality. Until now the selection of materials and shaping of the printing pad are done empirically. In the first step, a workflow for the digitalization of the printing pad production was developed with the aim of reducing costs, shortening the printing pad development time and increasing its quality. This workflow can be performed with commercial software like Siemens NX and Abaqus as well as with open-source software like FreeCAD and Salome-Meca. Both ways allow a targeted optimization of the printing pads and are compared in this dissertation. In the second step, the printing pad material with and without carbon-nanotubes was characterized by various mechanical material tests. The carbon nanotubes prevent the electrostatic charging of a printing pad. In this dissertation, simple and complex mechanical material tests were applied to characterize the mechanical properties and use them as input parameters for FEM simulation. The simple mechanical material testing methods are uniaxial tensile test, planar tensile test and uniaxial compression test and the complex material testing methods are biaxial tensile test, volumetric compression test and determination of transverse contraction number (Poisson's ratio). The molds of the test specimens were also produced in IDD using polyjet and stereolithography 3D printers. Then, a method for simulating the printing process of the indirect gravure process in Abaqus and Salome-Meca was presented. Mechanical and optical methods were used to validate the FEM simulation. Then, a sensitivity analysis was performed to determine the influence of the simulation parameters on the simulation results. The optimization processes using this digital workflow led to the development of new types of printing pads (hollow printing pads and bi-material printing pads with or without carbon-nanotubes) and to an improvement in printing quality.



## Danksagung

Zuerst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam danken, dass er diese Arbeit ermöglicht hat. Sein Ermutigen, Zusprechen, Motivation und all die intensiven fachlichen Diskussionen, haben mich motiviert und maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Ich danke ihm auch für sein Vertrauen in mich und die Aufgaben, an denen ich mich entwickeln konnte.

Mein Dank gilt Prof. Oliver Weeger für das Zweitgutachten, für sein Interesse am Thema und die gute Zusammenarbeit zwischen unseren Instituten.

Meiner lieben Frau Hanan, danke, dass du die beste Ehefrau und die beste Mutter für unsere wunderbare Familie bist, du unterstützt mich weiterhin in meinem gesamten Leben.

Mein ganz besonderer Dank geht an meinen guten Freund Daniel Laumann. Neben deinen kritischen und ehrlichen Korrekturen, deiner ständigen Motivation und Unterstützung, möchte ich dir vor allem für deine Freundschaft danken.

Bedanken möchte ich mich bei Dr.-Ing. Dieter Spiehl, der sich jederzeit Zeit für fachliche Diskussionen nahm. Ich danke Ihnen für Ihre Unterstützung, insbesondere bei unseren Publikationen.

Ich danke allen HASI-Projektpartnern, insbesondere Herrn Jens-Peter Lück für die gute Zusammenarbeit. Besonders danke ich Herrn Klaus Neunz für die gemeinsam verbrachte Zeit und den regen interdisziplinären Austausch.

Mein Dank gilt allen Kollegen und ehemaligen Kollegen des IDD für die tolle Unterstützung und die schöne Zeit. Ganz besonders bedanke ich mich bei Thorsten Euler, Dr.-Ing. Immededdine Afara, Dr.-Ing. Vinzenz Nienhaus und Iman Valizadeh.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, vor allem bei meinen wunderbaren Eltern. Sie haben das Fundament für mich gelegt. Durch ihre Liebe, Ermutigung und ihren Stolz haben Sie mich immer nach vorne gebracht.



Für meine Eltern, meine Frau Hanan und unsere Kinder.



---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation .....	1
1.2. Zielsetzung.....	4
1.3. Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2. Stand der Technik und Wissenschaft.....</b>	<b>6</b>
2.1. Tampondruck .....	6
2.2. Drucktampons .....	9
2.2.1. Herstellung der Drucktampons .....	10
2.2.2. Shore Härte.....	12
2.2.3. Klassifizierung und Auswahl der Drucktampons.....	13
2.2.4. Elektrische Eigenschaften des Silikonkautschuks.....	14
2.3. Stand der Wissenschaft vom Tampondruck.....	16
2.4. Hyperelastische Materialien .....	17
2.4.1. Hyperelastisches Materialmodell .....	17
2.4.2. Beispiele für isotrope Formänderungsenergie-Funktionen.....	21
2.5. FEM-Simulation.....	24
2.5.1. Prinzip der FEM-Simulation.....	24
2.5.2. Vernetzung und Netzelementtypen .....	27
2.5.3. FEM-Programme .....	29
<b>3. Entwicklung eines Workflows .....</b>	<b>30</b>
3.1. Workflow zur Digitalisierung der Herstellung des Drucktampons.....	31
3.2. Auswahl des FEM- und CAD-Programms .....	33
<b>4. Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften .....</b>	<b>36</b>
4.1. Mechanische Eigenschaften von Silikonkautschuk .....	36
4.2. Mechanische Materialprüfverfahren für Silikonkautschuk.....	37
4.2.1. Einachsiger Zugversuch .....	40
4.2.2. Biaxialer Zugversuch.....	42
4.2.3. Einachsiger Druckversuch .....	45
4.2.4. Planarer Zugversuch .....	46
4.2.5. Volumetrischer Druckversuch .....	48
4.2.6. Zugversuch zur Bestimmung der Querkontraktionszahl .....	49
4.3. Messaufbau.....	52

---

4.3.1.	Materialprüfmaschine.....	52
4.3.2.	Herstellung der Silikonkautschuk-Proben .....	55
4.4.	Ergebnisse der mechanischen Materialprüfverfahren für Silikonkautschuk .....	56
4.4.1.	Ergebnisse des Härtemessgeräts zur Verifizierung der Shore A Härte aller Proben.....	56
4.4.2.	Ergebnisse des einachsigen Zugversuchs .....	57
4.4.3.	Ergebnisse des planaren Zugversuchs .....	60
4.4.4.	Ergebnisse des biaxialen Zugversuchs.....	62
4.4.5.	Ergebnisse des einachsigen Druckversuchs .....	64
4.4.6.	Ergebnisse des volumetrischen Druckversuchs .....	66
4.4.7.	Ergebnisse des Zugversuchs zur Bestimmung der Querkontraktionszahl	69
<b>5.</b>	<b>Simulation der Drucktampons.....</b>	<b>72</b>
5.1.	Studien zur Simulation von Silikonkautschuk.....	72
5.2.	Simulation der Drucktampons in Abaqus und Salome-Meca .....	73
5.3.	Inputparameter der FEM-Simulation .....	78
5.3.1.	Berechnung der Materialkonstanten .....	78
5.3.2.	Auswahl der mathematischen Modelle für den Silikonkautschuk.....	88
5.4.	Durchführung der FEM-Simulation .....	89
5.5.	Vergleich zwischen den Ergebnissen von Abaqus und Salome-Meca.....	98
5.6.	Sensitivitätsanalyse .....	103
5.6.1.	Einfluss des Fehlers beim einachsigen und dem planaren Zugversuch .	103
5.6.2.	Einfluss der Verwendung des volumetrischen Druckversuchs statt Poissonzahl .....	107
5.6.3.	Einfluss der Verwendung des einachsigen Druckversuchs statt des biaxialen Zugversuchs .....	109
5.6.4.	Einfluss der Auswahl des mathematischen Materialmodells .....	110
5.7.	Validierung der FEM-Simulation .....	112
5.7.1.	Validierung der FEM-Simulation mittels mechanischer Messungen....	112
5.7.2.	Validierung der FEM-Simulation mittels optischer Messungen .....	116
<b>6.</b>	<b>Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>120</b>
6.1.	Voller Drucktampon .....	120
6.2.	Entwicklung eines Hohl-Drucktampons mit dem digitalen Workflow .....	127
6.3.	Entwicklung eines Bi-Material-Drucktampons mit dem digitalen Workflow ..	136
6.4.	Entwicklung eines antistatischen Hohl-Drucktampons mit dem digitalen Workflow .....	142
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>148</b>
<b>8.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>151</b>

---

<b>A. Anhang .....</b>	<b>165</b>
A.1.Salome-Meca-Skript zur Simulation der Voll- und Hohl-Drucktampons.....	165
A.2.Salome-Meca-Skript zur Simulation der Bi-Material-Drucktampons .....	168
A.3.Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem einachsigen Zugversuch.....	171
A.4.Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem planaren Zugversuch .....	172
A.5.Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem biaxialen Zugversuch.....	173
A.6.Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem einachsigen Druckversuch.....	174
A.7.Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem volumetrischen Druckversuch.....	175
A.8.Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem Zugversuch zur Bestimmung der Querkontraktionszahl.....	176
A.9.Kurvenanpassungen für Materialien mit Shore A Härten 5 bis 20 .....	177
A.10.Einfluss des Fehlers beim einachsigen und dem planaren Zugversuch .....	182
A.11.Einfluss des Fehlers beim volumetrischen Druckversuch .....	183
A.12.Validierung der Salome-Meca Simulationen mittels mechnischer Messungen	184

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

### Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\alpha_a$	-	Dimensionslose Konstanten des Ogden-Modells
$\delta_{ij}$	-	Kronecker-Delta
$\varepsilon$	mm/mm	Dehnung
$\varepsilon_a$	mm/mm	Axialdehnung
$\varepsilon_b$	mm/mm	Biaxiale Dehnung
$\varepsilon_q$	mm/mm	Querdehnung
$\varepsilon_v$	mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup>	Volumetrische Dehnung
$\lambda_1; \lambda_2; \lambda_3$	mm	Streckungsinvarianten
$\lambda$	mm	Streckung
$\lambda_v$	mm <sup>3</sup>	Volumetrische Änderung
$\mu$	N/m <sup>2</sup>	Schermodul
$\mu_n$	MPa	Materialkonstanten des Ogden Modells
$\nu$	-	Poisson-Zahl
$\sigma$	MPa	Cauchy Spannung
$\sigma_b; \sigma_e^b$	MPa	Biaxiale Spannung

### Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
B	-	Der linke Cauchy-Green Deformationstensor
C	-	Der rechte Cauchy-Green Deformationstensor
$C_{ij}; C_{01}; C_{01}; C_1; C_2$	MPa	Materialkonstanten des Mooney-Rivlin Modells
$C_i$	MPa	Materialkonstanten des Yeoh Modells
$E$	N/m <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
$E$	-	Kleinste Fehlerquadrate
F	N	Kraft
$F_x$	N	Kraft in X-Richtung

---

$F_Y$	N	Kraft in Y-Richtung
$F$	-	Deformationsgradienten
$F^t$	-	Transponierte Matrix der Deformationsgradienten
$G$	N/m <sup>2</sup>	Schermodul
$I_1; I_2; I_3$	-	Dehnungsinvarianten
$J$	-	Funktionaldeterminante oder Jacobi-Determinante
$K$	GPa	Bulkmodul
$L$	m	Länge
$L_i$	m	Aktuelle Länge
$L_{0i}$	m	Ausgangslänge
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$S$	N/m <sup>2</sup>	Piola-Kirchhoff Spannung
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche
$t$	s	Zeit
$T_i^{test}$	N/m <sup>2</sup>	Spannungen aus den Testdaten
$T_i^{th}$	N/m <sup>2</sup>	Nominale Spannungen
$T_{L0}$	mm	Testlänge
$v$	mm <sup>3</sup>	Aktuelles Volumen
$v_0$	mm <sup>3</sup>	Ausgangsvolumen
$W$	J	Formänderungsenergie-Funktion
$X$	mm	Ortsvektor

**Abkürzungen und Akronyme**

Ab.Sim	Abaqus-Simulation
a.H.D	Antistatischer Hohl-Drucktampon
2D	Zweidimensional
3D	Zweidimensional
ABAQUS	FEM-Programm von Simulia
ASTM	Association for Testing Materials
B3	Biaxialer Zugversuch für eine Probe mit 3 Shore A Härte
B.M.D	Bi-Material-Drucktampon
BSI	British Standards Institution
CAD	Computer Aided Design
Code_Aster	Open-Source FEM-Programm, ein Modul in Salome-Meca
Cof(C)	Kofaktor von C
DIN	Deutsches Institut für Normung
Det(C)	Determinante von C
FEM	Finite Elemente Methode, die auch als Finite-Elemente-Analyse (FEA) bezeichnet wird
H.D.	Hohl-Drucktampon
IDD	Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, TU Darmstadt
ISO	International Organization for Standardization
K3	Kompersionstest für eine Probe mit 3 Shore A
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, von National Instruments
P3	Planarer Zugversuch für eine Probe mit 3 Shore A Härte
ShA	Shore A Härte
Matlab	Matrix Laboratory: Numerik-Software von Mathworks, USA
Salome-Meca	Open-Source FEM-Programm für wissenschaftliche Berechnungen

SM.Sim	Salome-Meca Simulation
tr(C)	Spur von C
U3	Eiachsige Zugversuch für eine Probe mit 3 Shore A Härte
V3	Volumetrischer Druckversuch für eine Probe mit 3 Shore A Härte



# 1. Einleitung

## 1.1 Motivation

Unter „Drucken“ versteht man nicht nur das Aufbringen einer Farbschicht auf eine Oberfläche, sondern auch das Dosieren von Materialien bzw. Stoffen und das Strukturieren von Oberflächen. Neben dem Auftragen von Farbschichten, um ein Objekt oder eine Verpackung schick und schön zu gestalten oder ein Markenlogo aufzubringen, können auch funktionale Drucke realisiert werden; sei es durch das Aufbringen eines phosphoreszierenden Ziffernblattes auf eine Uhr, oder das Auftragen von elektroaktiven Polymeren für elektrisch leitfähiger Strukturen. Solche Drucke können mit verschiedenen Druckverfahren realisiert werden, die alle ihre spezifischen Anwendungsfelder haben. Zum Drucken auf gekrümmte Oberflächen ist der Tampondruck, ein indirektes Tiefdruckverfahren, geeignet. Zum Aufbringen von elektroaktiven Materialien muss der Drucktampon antistatisches Verhalten aufweisen.

Indirekter Tiefdruck ist ein Druckverfahren, bei dem ein Drucktampon die Farbe von einer gravierten Druckform (Klischee) auf einen Bedruckstoff überträgt. In der Fachliteratur wird dieses Verfahren oft als Tampondruck bezeichnet (Hahne, 2001; Kipphan, 2001). Das indirekte Tiefdruckverfahren bietet eine sehr gute Genauigkeit und eine Auflösung von bis zu 20 µm zum Drucken von hochpräzisen elektronischen Geräten (Pudas et al, 2004). Einer der Hauptvorteile des Tampondrucks besteht darin, dass er zum Bedrucken dreidimensionaler Oberflächen und Produkte aller Formen und Größen verwendet werden kann. Dabei spielt es keine Rolle, ob die zu bedruckenden Objekte gewölbt sind oder eine unebene Oberfläche haben, mit diesem Druckverfahren wird ein hochqualitativer Druck ermöglicht. Der Siebdruck, ein Durchdruckverfahren, kann zum Bedrucken einiger dreidimensionaler Oberflächen verwendet werden, aber die Auflösung des Tampondrucks ist viel höher als die des Siebdrucks (TampoCanada, 2018). Darum wird der Tampondruck in den unterschiedlichsten Branchen eingesetzt, von typischen Alltagsgegenständen (bspw. Geschirr, Blechdosen, Weihnachtskugeln, Golfbälle) über Werbemittel (bspw. Feuerzeuge, Kugelschreiber) oder auch medizinische Produkte (bspw. Spritzen) bis hin zu hoch komplexen Anwendungen z. B. für Flug- und Fahrzeuginnenteile (bspw. Blinker- oder Scheibenwischerhebel), Ziffernblätter für Uhren oder elektrische Leiterbahnen für die Elektronikindustrie (bspw. RFID-Chips, Transistoren, Dehnungsmessstreifen).

Die herkömmlichen Drucktampons sind aus Silikonkautschuken hergestellt. Diese Materialien sind als hyperelastisch zu bezeichnen. Sie sind eine besondere Klasse von Werkstoffen, die auch bei großen Verformungen elastisch reagieren (Fernández et al., 2018).

Die elektrostatische Aufladung herkömmlicher Drucktampons zieht Staub und Druckfarben zur Oberfläche des Drucktampons an. Antistatischen Drucktampons können dies verhindern und sie können beispielweise durch die Zugabe von SWCNTs (Single-Walled Carbon Nanotubes) hergestellt werden. Allerdings ist ihre Lebensdauer deutlich geringer als die herkömmlicheren Drucktampons. Die in dieser Dissertation durchgeführten Simulationen und Tests befassen sich mit diesem Problem. Insbesondere das Bedrucken mechanisch empfindlicher oder geometrisch komplexer Gegenstände (bspw. Zylindern, Golfbällen) ist eine große Herausforderung, für die das Verfahren des Tampondrucks eingesetzt wird.

Vor allem beim Bedrucken von Oberflächen mit großen Höhenunterschieden muss sich der Drucktampon stark verformen können, deshalb werden in diesen Fällen spezielle Hohl-Drucktampons eingesetzt. Die Oberflächengeometrie der Hohl-Drucktampons sowie die Geometrie ihres Innenraums werden handwerklich hergestellt und sind somit nicht quantifiziert.

Die Verformung des Drucktampons und deren Auswirkungen auf die Druckqualität sind allerdings noch kaum wissenschaftlich untersucht. Es gibt bis heute kein automatisiertes Konstruktions-Tool oder eine simulative Betrachtung des Deformationsverhaltens des Drucktampons. Eine exakte Einstellung einer druckaufgabenspezifischen Nachgiebigkeit des Drucktampons (bspw. durch die Geometrie des inneren Hohlraumes oder gar das Einbringen eines weiteren Materials im Sinne eines Bi-Material-Drucktampons) ist dadurch nicht möglich. Die Herstellung des Drucktampons basiert bis heute auf Erfahrungswerten, sowie dem schrittweisen Testen und Anpassen des Drucktampons. Diese Iterationen (Herstellung des Drucktampons, Versand an den Kunden, Durchführung von Testdrucken, Rückversand der Ergebnisse und Änderungswünsche, händisches Anpassen des Drucktampons, erneuter Versand an den Kunden) erzeugen einen enormen Zeitaufwand. Deshalb gibt es einen Bedarf für ein FEM-Simulationsprogramm, welches die mechanischen Spannungen und Verformungen während des Druckprozesses berechnen kann. Hier werden zwei unterschiedlichen FEM-Programme ausgewählt, eine ist Open-Source (Salome-Meca) und die andere ist kommerziell (Abaqus).

Die Motivation der wissenschaftlichen Fragestellung in dieser Arbeit entstand aus dem ZIM geförderten Projekt „HASI“ (Hohl-Drucktampons: Antistatisch und simulationsbasiert mit individuellen Innenformen), indem mittels des FEM-Programms ein Verfahren zur Auslegung der Drucktampons

realisiert wurde (siehe Kapitel 6). Das Projekt fand am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) der Technischen Universität Darmstadt in enger Zusammenarbeit mit dem mittelständischen Unternehmen, Tampo-Technik GmbH statt. Hier stellte sich die Frage, ob die Digitalisierung der Drucktamponherstellung zu einer Verbesserung des indirekten Tiefdruckverfahrens führt und ob eine maßgebliche Verbesserung des Drucktampons durch eine Änderung der Innengeometrie oder durch eine Befüllung mit einem zweiten Material erreicht werden kann.

Um diese Frage zu beantworten wurden FEM-Simulationen an unterschiedlichen Drucktampons mit unterschiedlichen Shore A Härten durchgeführt.

FEM-Simulationen von Drucktampons sind komplexer als Simulationen von Metallen, da sich das Material des Drucktampons nichtlinear verhält. In dieser Dissertation wird das Material des Drucktampons als hyperelastisches Material beschrieben. Hyperelastische Materialien haben ein deutlich anderes mechanisches Verhalten als Metalle, die auch als linear elastische Materialien bezeichnet werden. Die Unterschiede zwischen hyperelastischen und linear-elastischen Materialien sind in Tabelle 1-1 zusammengefasst.

**Tabelle 1-1: Der Unterschied zwischen hyperelastischem und linear elastischem Material. Dabei ist  $\sigma$  die Zugspannung, E das Elastizitätsmodul,  $\varepsilon$  die Dehnung,  $C_{ij}$  die Materialkonstanten und  $\lambda$  die Streckung (Truesdell & Noll, 2004; Al Aboud et al, 2018).**

Linear elastisches Material (Metall)	Hyperelastisches Material (Drucktampon)
$\sigma = E \cdot \varepsilon$	$\sigma_e = f(C_{ij}, \lambda, 1/\lambda)$
Einfache lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung.	Komplexe mathematische Gleichungen werden verwendet (siehe Abschnitt 5.3.1).
Sehr große Kräfte verursachen kleine Deformationen (Gross et al., 2009).	Kleine Kräfte verursachen große Deformationen.
Die Härte wird in Vickers (HV) oder Rockwell (HR) gemessen.	Die Härte wird in Shore A gemessen nach DIN 53505 (2000) und ISO 7619-1 (2010)

Wie in Tabelle 1-1 gezeigt, wird die Härte des Drucktampons in Shore A nach Normen DIN 53505 (2000) und ISO 7619-1 (2010) gemessen, diese Messungen werden in Kapitel 4 ausführlich beschrieben.

## 1.2 Zielsetzung

Das erste Ziel dieser Dissertation ist die Digitalisierung der Herstellung von Drucktampons mit Hilfe von CAD- und FEM-Programmen durch einen digitalen Workflow und die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials mit den einfachen und komplexen Materialprüfverfahren. In diesem Zusammenhang stellen sich drei herausfordernde Fragen: Erstens, kann die Drucktamponherstellung mit einem Workflow mittels CAD- und FEM-Programme digitalisiert werden? Zweitens, kann der digitale Workflow bei der Gestaltung und Optimierung des Drucktampons helfen? Drittens, welche Rolle spielen die komplexen Materialprüfverfahren (der biaxiale Zugversuch und der volumetrische Druckversuch) bei der Charakterisierung des Drucktamponmaterials?

Das zweite Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung der Hohl-Drucktampons und Bi-Material-Drucktampons mittels des digitalen Workflows sowie die Konstruktion und die additive Herstellung ihrer Gussformen. In diesem Zusammenhang stellen sich zwei herausfordernde Fragen: Erstens, kann der digitalen Workflow bei der Gestaltung der Innengeometrie des Hohl-Drucktampons helfen? Zweitens, können die Bi-Material-Drucktampons mittels des digitalen Workflows gestaltet und optimiert werden?

Das dritte Ziel ist, die Einflussgrößen der optimierten neuen Geometrie der Hohl-Drucktampons und Bi-Material-Drucktampons auf die Druckqualität zu untersuchen. In diesem Zusammenhang stellt sich folgende Frage: Führt der durch den digitalen Workflow optimierte Hohl-Drucktampon zu einer Verbesserung der Druckqualität oder Abbildungsgenauigkeit?

Das vierte Ziel ist die Untersuchung der Auswirkungen einer Zugabe von SWCNTs (Single-Walled Carbon Nanotubes). Hier stellt sich die Frage: Welche Einflüsse hat die Zugabe von SWCNT auf den mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials?

## 1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird der Stand der Technik und Wissenschaft erklärt. Zuerst wird der Tampondruck und die Klassifizierung der Drucktampons beschrieben. Danach wird auf die elektrischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials eingegangen. Anschließend werden die mathematischen Modelle für hyperelastische Materialien vorgestellt. Nachfolgend werden die FEM-Programme sowie das Prinzip der FEM-Simulation erklärt.

In Kapitel 3 wird die Digitalisierung der Herstellung der Drucktampons für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) erläutert, indem die neue digitale Konstruktionsmethode der Drucktampons beschrieben wird.

Kapitel 4 befasst sich mit der Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials. Hier werden einfache und komplexe mechanische Materialprüfungen an Probekörpern aus dem Drucktamponmaterial durchgeführt.

Kapitel 5 geht auf die Simulation der Drucktampons ein. Hier werden FEM-Simulationen an unterschiedlichen Drucktamponformen durchgeführt. Es wurden die zwei FEM-Programme Abaqus und Salome-Meca miteinander verglichen. In diesem Kapitel werden die Inputparameter der FEM-Simulation erklärt und die Materialkonstanten berechnet. Anschließend werden eine Validierung und eine Sensitivitätsanalyse für die FEM-Simulation durchgeführt.

Kapitel 6 befasst sich mit Anwendungsbeispielen des digitalen Workflows bei der Entwicklung und Optimierung von Hohl-Drucktampons, Bi-Material-Drucktampons und antistatischen Drucktampons.

Kapitel 7 schließt die Dissertation mit einer kurzen Zusammenfassung, den wissenschaftlichen Erkenntnissen dieser Arbeit und mit einem Ausblick ab.

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

In diesem Kapitel werden die wichtigen Grundlagen dieser Dissertation beschrieben. Zunächst wird der Tampondruck mit dem Schwerpunkt der Farbübertragung bei diesem Druckverfahren beschrieben. Anschließend werden die Herstellung der Drucktampons, ihre Klassifizierung und ihre elektrischen Eigenschaften vorgestellt. Anschließend werden die hyperelastischen Materialmodelle des Drucktamponmaterials, das Prinzip der FEM-Simulation, die Vernetzung der Berechnungsgeometrie und FEM-Programme beschrieben.

### 2.1 Tampondruck

Der Tampondruck ist ein indirektes Tiefdruckverfahren, bei dem die Farbe durch einen elastischen Drucktampon von der Druckform auf den Bedruckstoff übertragen wird (Bodenstein, 2020).

Die Farbübertragung wird von Bühler et al. (2018) beschrieben und hier in Abbildung 2-1 dargestellt: Das Lösemittel verdunstet von der Oberfläche der in der Vertiefung des Klischees (Druckform) liegenden Farbe, wodurch diese klebrig wird (a). Beim Aufpressen des Drucktampons auf das Klischee verformt sich dieser elastisch und die Farbe haftet an dem Drucktampon an (b). Beim Abheben des Drucktampons vom Klischee verbleibt die Farbe an dem Drucktampon und wird aus dem Klischee abgehoben (c). Der Drucktampon wird mit der anhaftenden Farbe zu dem Bedruckstoff bewegt. Durch ein vertikales Anpressen und erneutes Verformen des Drucktampons wird die Farbe auf dem Bedruckstoff abgelegt (d). Anschließend hebt der Drucktampon von der Oberfläche ab und das Druckmotiv verbleibt auf der bedruckten Oberfläche (e).

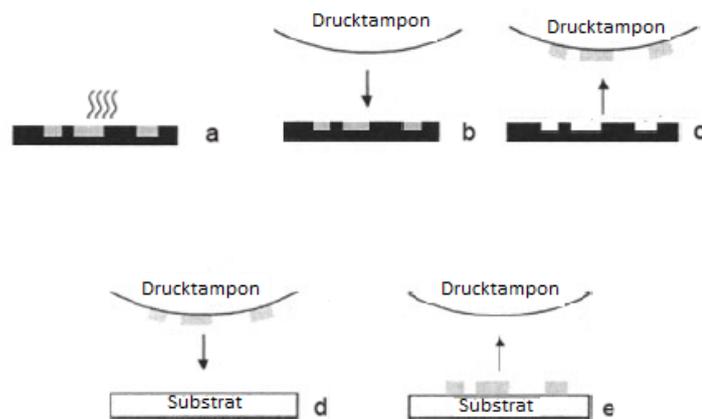


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Farbübertragung durch den Drucktampon (Pietsch & Mennig, 2004).

Die Aufgabe des Drucktampons ist die Übertragung des Druckbildes vom Klischee auf den Bedruckstoff. Die Farbe wird nahezu zu 100 % übertragen. Mit dem Drucktampon werden nicht nur Farben, sondern auch andere Stoffe wie bspw. Morphium, Kleber oder leitfähigen Pasten für Anwendungen aus der Elektrotechnik übertragen (Bodenstein, 2020). Ein Vorteil des Tampondrucks gegenüber anderen Druckverfahren ist, dass die Farbe auf nahezu beliebig geformte Oberflächen (flach, konkav, konvex, genarbt, komplexe 3D-Strukturen) beliebiger Bedruckstoffe (Kunststoff, Glas, Metall, Holz) aufgetragen werden kann. Dadurch eignet sich der Tampondruck sehr gut zum Bedrucken von dreidimensionalen Objekten (Ritzi-Industriedrucktechnik, o.D.). Abbildung 2-2 zeigt Beispiele für den Einsatz des Tampondrucks.



Abbildung 2-2: Unterschiedliche mittels Tampondruck bedruckte Oberflächen z.B. Tasten, Schalter, Flakons, Hebel, Knöpfe und Armaturenkomponenten (Ritzi-Industriedrucktechnik, o.D.).

Der Tampondruck ermöglicht das Bedrucken von Oberflächen in Vertiefungen (Tampon-Technik, o.D.). Auch Flächen mit Höhenunterschieden von mehreren Zentimetern können innerhalb eines Druckzyklus bedruckt werden, siehe Abbildung 2-3. Zum Bedrucken besonders komplexer Oberflächen werden geometrisch besonders aufwendige Drucktampons konstruiert, siehe Abbildung 2-4.



**Abbildung 2-3:** Auf der linken Seite befindet sich ein Drucktampon zum Drucken einer Vertiefung und auf der rechten Seite einer zum Bedrucken einer Struktur mit Höhenunterschieden (Tampon-Technik, o.D.).



**Abbildung 2-4:** Auf die komplexe zu bedruckende Oberfläche angepasste Drucktampongeometrien (Tampon-Technik, o.D.).

Mit dem Tampondruck können, wie bereits in Abbildung 2-2 gezeigt, auch mechanisch empfindliche Produkte wie z. B. dünne Glasflakons bedruckt werden. Damit eine hohe Druckqualität (Abbildungsgenauigkeit) erreicht werden kann, muss der Drucktampon eine ausreichende Nachgiebigkeit aufweisen. Die Elastizität des Drucktampons ermöglicht eine Anpassung an die zu bedruckende Oberfläche. Daher werden ausschließlich hyperelastische Materialien für Drucktampons verwendet. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass sich der Drucktampon an die gesamte Oberfläche des Bedruckstoffes

anpassen und die Druckfarbe ablegen kann, ohne einen zu hohen Anpressdruck aufzubringen. Die elastische Verformbarkeit sowie die Geometrie des Drucktampons müssen das Abrollen des Drucktampons auf dem Bedruckstoff ermöglichen. Die entsprechende Nachgiebigkeit kann durch das Einbringen von Längs- oder Querlöchern in den Drucktampon realisiert werden (Lück, 1999).

## 2.2 Drucktampons

Die Drucktampons werden aus Silikonkautschuk hergestellt und sind in verschiedenen Qualitäten, Formen und Härten erhältlich. Der Vorteil dieses Materials zeigt sich unter anderem in einem stark farbabweisenden Verhalten (Dies ermöglicht die Farbübertragung von annähernd 100 %), dauerelastischen Materialeigenschaften, eine hohe Abformgenauigkeit, chemische Beständigkeit gegenüber schwachen Säuren und Alkalien sowie einer hohen Abriebfestigkeit (Kipphan, 2001). Dadurch ergeben sich Lebensdauern von üblicherweise 50.000 bis 100.000 Druckvorgängen pro Drucktampon. Die Lebensdauer ist abhängig von der Größe, Härte und Form des Drucktampons sowie die Form des Bedruckstoffes. Bei sehr scharfen Ecken oder extremen Krümmungen an einem zu bedruckenden Gegenstand können Risse oder Verschleiß an dem Drucktampon nach 1.000 bis 5.000 Drucken auftreten (Printing-International, o.D.).

Die Oberflächenqualität des Drucktampons ist einer der entscheidenden Faktoren bei der Druckqualität. Luft einschließen bei der Herstellung führen zu einer rauen Oberfläche und damit zu einem unsauberen Druckbild (Lake, 2016). Deshalb müssen die Gussformen der Drucktampons sehr glatt sein. Aus diesem Grund werden die Positivformen des Drucktampons bis heute aus Stahl gefertigt, da die Oberflächenqualität der Stahlpositivform nach der Bearbeitung sehr glatt ist. Die hergestellte Positivform wird nun poliert und mit einem Gießharz ummantelt, wodurch eine Gussform der Drucktampongeometrie entsteht. Hier stellt sich die Frage, ob die Gussformen mit SLA-3D-Druckern mit sehr glatten Oberflächen herstellbar sind?

Alle Drucktampongeometrien ähneln sich dadurch, dass sie eine gewölbte Druckfläche haben, die über das entsprechende Abrollverhalten die Farbübertragung beeinflusst. Die abgeschrägten Seiten zur Druckmitte hin sorgen für die notwendige Stabilität des Drucktampons, um ein verschiebungsfreies Druckbild zu erzeugen. Durch die Abrollbewegung kann der Drucktampon die Farbe sehr gut vom Klischee aufnehmen und auf dem Bedruckstoff abgeben. Da die Spitze des Drucktampons zuerst auf der

Oberfläche des Bedruckstoffes aufsetzt und dadurch bedingt an dieser Stelle die größten Kräfte und potenziellen Verschiebungen auftreten, sollte von einer Farbübertragung in diesem Bereich abgesehen werden (Lück, 1999).

Harte Drucktampons sind ideal für Präzisionsdrucke oder Drucke auf Strukturoberflächen. Sie ermöglichen ein scharfes Druckbild und eine lange Lebensdauer durch ihre mechanische Festigkeit. Durch ihr Abrollverhalten können die Drucktampons im Gegensatz zu weicheren Drucktampons mit einer deutlich geringeren Krümmung hergestellt werden (Lück, 1999).

Weiche Drucktampons sind ideal für stark gewölbte oder mechanisch empfindliche Bedruckstoffe, da sie sich ohne hohen Anpressdruck besser an die geometrischen Konturen des Bedruckstoffes anpassen können. Um Lufteinschlüsse wirksam zu vermeiden, muss die Wölbung stärker als bei den härteren Drucktampons ausgeprägt sein (Lake, 2016). Reicht die Reduzierung der Härte nicht aus, um den Druck eines geometrisch stark gekrümmten oder mechanisch empfindlichen Bedruckstoffes zu gewährleisten, kann auch die Nachgiebigkeit des Drucktampons erhöht werden. Zu diesem Zweck wird der Drucktampon als Hohl-Drucktampon konstruiert. Besonders wichtig ist die Gestaltung im mittleren Bereich des Drucktampons, wo der Anpressdruck am stärksten ist. Um ein exaktes Druckergebnis zu erzielen, muss sich die Spitze ohne Verschiebung in den Hohlraum des Drucktampons hinein verformen können. Gleichzeitig darf sich der Hohl-Drucktampon nicht unkontrolliert verwölben und damit die Druckqualität reduzieren. Die Materialfestigkeit und die Geometrie der Außen- und Innenfläche des Hohl-Drucktampons sind entscheidende Einflussgrößen für die Einstellung der Nachgiebigkeit (Lake, 2016).

### **2.2.1 Herstellung der Drucktampons**

Drucktampons werden aus einer Mischung der Hauptbestandteile Silikonkautschuk und Silikonöl hergestellt. Das Verhältnis dieser beiden Komponenten bestimmt die Härte: Je höher der Anteil an Silikonöl, desto weicher ist der Drucktampon (Al Aboud et al, 2018). Typischerweise werden Drucktampons in Härtegraden zwischen 2 und 18 Shore A hergestellt, Sonderhärten bis über Shore A40, aber auch besonders weiche Drucktampons mit einem Wert von 0 Shore A sind möglich (Al Aboud et al, 2018). Die Härte, die sich bei einer bestimmten Mischung einstellt, ist abhängig von der jeweiligen Charge des Ausgangsmaterials. Um den Einfluss der chargenabhängigen Materialspezifika auf die resultierende Härte zu ermitteln, werden Silikonkautschuke mit unterschiedlichen Mischverhältnissen hergestellt und

hinsichtlich der resultierenden Härte geprüft. Davon ausgehend werden chargenabhängige Kalibrierungstabellen erstellt, die es bei der Herstellung der Drucktampons ermöglichen, definierte Härten zu erreichen (Lück, 1999).

Die finalen Eigenschaften des Drucktampons werden neben den beiden bereits erwähnten Hauptbestandteilen maßgeblich durch die zugegebenen Additive bestimmt. Diese können bspw. die Oberflächenbeschaffenheit beeinflussen (z. B. durch das Regeln des Ausdiffundierens von Silikonöl) oder die Vernetzung (Vulkanisation) steuern. Der Begriff Vulkanisation oder Vernetzung bezeichnet Prozesse, bei denen Silikonkautschuke oder synthetische Kautschuke in elastomere Kunststoffe (Gummis) überführt werden. Während der Vulkanisation bilden sich kovalente Vernetzungen zwischen den Makromolekülen der Kautschuke, sodass die Moleküle nicht mehr frei gegeneinander beweglich sind (McNaught & Wilkinson, 1997). Grundsätzlich kann Silikonkautschuk in Abhängigkeit der Materialspezifika sowie der eingesetzten Additive kondensations- oder additionsvernetzend sein. Die mechanischen Eigenschaften wie die Weiterreißfestigkeit oder auch die Quellbeständigkeit gegenüber Lösungsmitteln sind bei additionsvernetzten Systemen stärker ausgeprägt als bei kondensationsvernetzten Systemen. Einen weiteren großen Vorteil bieten additionsvernetzende Systeme dadurch, dass während der Vernetzung keine Abspaltprodukte entstehen. Zur Vernetzung können beispielsweise Platinkatalysatoren, Schwefel oder Zinn eingesetzt werden. Bei Silikonkautschuk für Drucktampons handelt es sich um raumtemperaturvernetzende Systeme (Lück, 1999). Die mechanischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials werden mit mechanischen Versuchen charakterisiert (siehe Kapitel 4).

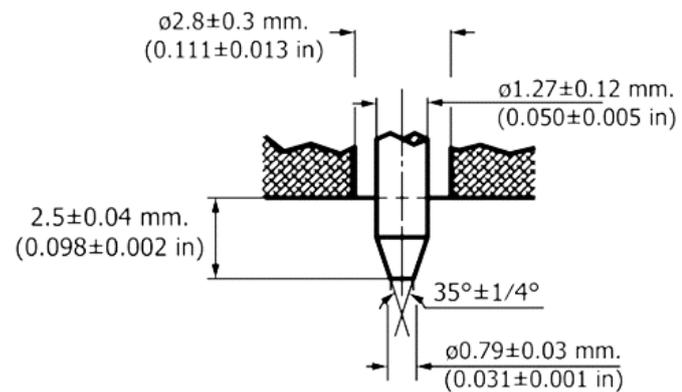
Die Herstellung von Drucktampons ist ein erfahrungsbasierter und händischer Prozess. Es gibt bisher keine digitale Prozesskette oder einzelne digitale Unterstützungs-Tools. Anhand von zweidimensionalen Zeichnungen oder dem zu bedruckenden Objekt selbst wird basierend auf Erfahrung eine grundsätzlich geeignete Drucktampon-Grundform ausgewählt. Aus dieser Grundform wird durch mechanische Verfahren ein Modell (Positivform) aus Stahl hergestellt. Diese Grundform wird händisch so verändert (bspw. durch Drehen, Schleifen), wie sie für die vorliegende Druckaufgabe geeignet erscheint. Dabei entsteht eine Freihandoberfläche, deren exakte Geometrie nicht quantifiziert ist (Lück, 1999). Die Herstellung erfolgt demnach rein handwerklich und nicht bspw. CNC-gesteuert. Das erzeugte Positiv wird nun poliert und mit einem Gießharz ummantelt, wodurch ein Gießharz-Negativmodell der Geometrie entsteht. Das Aushärten des Gießharzes beträgt bei Raumtemperatur ca. einen Tag. Nach dem Aushärten steht nun eine Gussform (Negativ) zur Verfügung, in die flüssiger Silikonkautschuk eingefüllt wird (Lück, 1999).

Auf der Rückseite des Silikonkautschuks wird eine Trägerplatte (zumeist aus Sperrholz) aufgebracht, mit der der Drucktampon später entformt und an der Tampondruckmaschine befestigt werden kann. Um die Eignung des erzeugten Drucktampons für die vorliegende Druckaufgabe zu validieren, werden nun Testdrucke durchgeführt. Zum Erfassen der möglichen Verschiebungen werden Testdrucke auf ein Raster, bspw. Millimeterpapier, aufgebracht (Lück, 1999). Anhand des resultierenden Druckergebnisses werden empirisch notwendige Änderungen der Drucktampongeometrie vorgenommen, für diese Änderungen wird eine neue Grundform aus Stahl gefräst und ein neues Gießharz-Negativmodell erzeugt, um das gewünschte Druckergebnis zu erzeugen, bspw. durch Änderung der Härte oder geometrischer Ausprägungen wie der Steigung oder der Ausprägung der Spitze. Der so gefertigte Drucktampon wird nun an den Auftraggeber weitergegeben, damit dieser den Drucktampon in seiner eigenen Produktion an dem zu bedruckenden Objekt erproben kann. Da die Testdrucke auf einem Raster nicht die Realsituation mit dem tatsächlich zu bedruckenden Objekt simulieren können, sind im Regelfall weitere Änderungen des Drucktampons vonnöten. Aufgrund dieser (häufig mehrfach durchgeführten) Iterationsschleifen sind Fertigungsdauern von 4 – 6 Wochen für neue Drucktampons üblich. Mit finaler vorliegender Drucktampongeometrie wird die Produktion der vom Kunden gewünschten Anzahl an Drucktampons begonnen (Lück, 1999).

### **2.2.2 Shore Härte**

Die Shore- oder die Durometerhärte ist ein Maß für den Widerstand, den ein Material gegen Eindrücken hat. Die Shore-Härte ist nach ihrem Erfinder, Albert Ferdinand Shore, benannt und bietet verschiedene Skalen zur Messung der Festigkeit verschiedener Materialien (Magdum et al, 2019). Es gibt verschiedene Arten von Shore wie A, C und D (ASTM D2240, 2015). Shore A ist für weiche Kautschuke geeignet und Shore C und D werden für Elastomere und weiche Kunststoffe verwendet. Zur Messung der Shore Härte gibt es die Normen ISO 868, DIN 53505 und ASTM 2240 (Hakimi Tehrani, 2019). Die Shore A Härte ist eine einfache und effektive Methode zur Silikonkautschukprüfung und ein einfaches Verfahren zur Härtemessung des Drucktampons. In dieser Dissertation wird die Shore A Härte nach ASTM D2240 (2015) gemessen. Das Prüfverfahren nach ASTM D2240 wird hier gekürzt beschrieben: Die Proben werden auf eine harte und ebene Oberfläche gelegt. Der Eindringkörper des Härtemessgeräts wird in die Probe gedrückt, so dass er senkrecht auf der Probenoberfläche liegt, siehe Abbildung 2-5. Die Shore A Härte wird innerhalb einer Sekunde nach dem festen Kontakt mit der Probe abgelesen. Das Messgerät (Durometer) wird mit einer Kraft von 10 N senkrecht auf die Probeoberflächen gedrückt (ASTM D2240,

2015). Abbildung 2-5 zeigt das Härtemessgerät (Durometer) vom Typ A. Der Eindringkörper hat eine Messhöhe von maximal 2,5 mm und der Kontaktdurchmesser beträgt 0,79 mm. Eine Feder verbindet den Eindringkörper mit dem Indikator. Die Kalibriertoleranz der Feder beträgt  $\pm 1$  Shore A (ASTM D2240, 2015).



**Abbildung 2-5:** Links ist das Härtemessgerät (Durometer) Typ A (ASTM D2240, 2015) während der Messung eines Drucktampons abgebildet. Rechts werden die Form und Dimensionen des Eindruckkörpers dargestellt.

Die alleinige Messung der Shore A-Härte hat jedoch nur eine begrenzte Aussagekraft, deshalb werden andere mechanische Testversuche für die FEM-Simulation gebraucht (AL Aboud et al., 2020).

### 2.2.3 Klassifizierung und Auswahl der Drucktampons

Anhand der Härte des Drucktampons können die Drucktampons in hart, weich und mittelhart unterteilt werden. Die weichen Drucktampon von 0-2 Shore A Härte werden zum Bedrucken von vollflächigen Layouts, starken Wölbungen und empfindlichen Bedruckstoffen verwendet. Die mittelharten Drucktampons von 6-8 Shore A Härte werden zum Bedrucken von strukturierten Oberflächen verwendet. Die harten Drucktampons 12-18 Shore A sind zum Drucken von scharfkantigen Druckbildern (Lück, 1999).

Nach ihrer Form werden Drucktampons in rund, eckig, sattelförmig, lang, Sonderform und Walzen klassifiziert (Bodenstein, 2020). Nach der Konstruktion werden die Drucktampons in Vollmaterial, Hohl-

Drucktampon und Bi-Material-Drucktampons klassifiziert. Die bekannten Hohl-Drucktampons sind mit einer zylinderförmigen oder kugelförmigen Hohlung ausgeführt, siehe Tabelle 2-1.

**Tabelle 2-1: Klassifizierung der Hohl-Drucktampons**

Form der Hohlung	Beispiel	Beschreibung
Zylinder		Zum Bedrucken von zylinderförmigen Bedruckstoffen, z. B. Stifte, Flakons, Rohren.
Innen-Zylinder mit Halbkugel		Zum Bedrucken von kugelförmigen Bedruckstoffen, z. B. Golfbällen, Kugeln.

Die Auswahl des Drucktampons basiert immer noch auf der Erfahrung der Fachleute. Hier gelten bestimmte Regeln, wie z. B. die Faustformel von Kuscharski (2007):

- Der Drucktampon soll so groß wie möglich und so klein wie nötig ausgewählt werden.
- Der Drucktampon soll so spitz wie möglich und so flach wie nötig sein.
- Der Drucktampon soll so hart wie möglich und so weich wie nötig sein.

#### 2.2.4 Elektrische Eigenschaften des Silikonkautschuks

Silikonkautschuk ist nach den experimentellen Untersuchungen von Samakosh und Mirzaie (2019) ein Isolator. Durch die mechanische Verformung während des Druckvorgangs und die daraus resultierende Reibung lädt sich der Drucktampon elektrostatisch auf, dies führt zu Farbspritzern beim Druck. Dieses Problem tritt insbesondere an den Konturen des Druckbildes auf und führt somit zu einer verminderten Druckqualität. Weiterhin verschmutzt der Drucktampon schneller, da Staub und Schmutzteilchen durch die statische Aufladung angezogen werden und an der Oberfläche des Drucktampons anhaften (Lück, 1999). Die Leitfähigkeit der Drucktamponoberfläche ist so gering, dass sie mit handelsüblichen

Widerstandsmessungen (Spannungsmessgeräten) nicht erfasst werden kann. Um jedoch das antistatische Druckverhalten eines Drucktampons in der Praxis bestimmen zu können, hat sich ein einfacher Schnelltest etabliert. Durch mehrfaches Aufdrücken des Drucktampons auf den Tisch wird er potenziell statisch aufgeladen. Anschließend wird er mit geringem Abstand über einige Rußpartikel geführt. Ist der Drucktampon statisch aufgeladen, zieht er eine kleine Menge von Rußpartikeln an (Lück, 1999). Abbildung 2-6 zeigt einen Schnelltest zur Erfassung der statischen Aufladung eines Drucktampons.



**Abbildung 2-6: Schnelltest zur Erfassung der statischen Aufladung eines Drucktampons (Lück, 1999).**

Es gibt grundsätzlich zwei Ansätze, um antistatisches Verhalten zu erreichen. Zum einen kann die Oberfläche ionisiert werden (z. B. durch ionisierte Luft), um die Aufladung zu neutralisieren. Dadurch kann eine statische Aufladung auf einem Drucktampon neutralisiert werden, jedoch verhindert diese Behandlung keine weitere statische Aufladung und muss daher in hoher Frequenz wiederholt werden. Diese Lösung ist auch nicht günstig. Der zweite Ansatz ist der Einsatz von Antistatikmitteln in den eingesetzten Farben oder dem Silikonkautschuk des Drucktampons. Gerade der Einsatz von Antistatikmitteln in den Farben selbst führt jedoch zur Verminderung der Druckqualität und zur Verringerung der Abbildungsgenauigkeit (Lück, 1999).

## 2.3 Stand der Wissenschaft vom Tampondruck

Der Tampondruck ist ein Gebiet, das bisher nur in geringem Umfang wissenschaftlich untersucht wurde. Der Grund dafür könnte sein, dass er bisher nur im grafischen Druck eingesetzt wurde. Die Auswahl der Geometrie und der Shore A Härte nach den Erfahrungen der Fachleute war für den grafischen Druck ausreichend. Heute wird der Tampondruck aber auch in der gedruckten Elektronik eingesetzt.

Es gibt relativ wenige Veröffentlichungen zum Tampondruck. Die bekanntesten Werke zum Tampondruck sind Kipphan (2001) und (Pietsch, 2001). Außerdem ist die vorhandene Literatur zum Tampondruck relativ alt, zu nennen sind hier zum Beispiel „Fachbuch für den Tampondruck“ von Bühner (1988), „Tampondruck: Verfahren und Möglichkeiten“ von Meyer (1994), und „Siebdruck Handbuch“ von Scheer (1999) oder "Innovative Drucktechnologien" von Hahne et al. (2001). Diese Literaturen beschreiben entweder die Tampondruckmaschine oder ihre Anwendungen, aber es gibt keine Studie zur digitalen Gestaltung und Optimierung des Drucktampons.

Neuere Studien zum Tampondruck finden sich nur in „Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung“ von Lake (2016) und „Untersuchung des Tampondrucks und dessen Kantengenauigkeit für die Anwendung in der gedruckten Elektronik“ von Bodenstein (2020). Andere Forschungen befassen sich mit der Automatisierung der Tampondruckmaschinen wie zum Beispiel „Automation improvement of indirect gravure printing with a focus on the mechanical characteristics of silicone rubber pads“ von Hakimi Tehrani (2019).

Einige Unternehmen haben großes Interesse an der Entwicklung und Optimierung von Drucktampons und der Drucktamponherstellung, sie streben eine digitale Methode zur Herstellung von Drucktampons an. Die Herstellung von Drucktampons ist auch im digitalen Zeitalter immer noch ein manueller Prozess. Bisher sind keine modernen Werkzeuge bekannt, die diese Herstellungsprozesse unterstützen.

Die FEM-Simulation des hyperelastischen Materials (Drucktamponmaterial) erfordert verschiedene Eingabeparameter wie die Mooney-Rivlin-Konstanten. Im nächsten Abschnitt werden die hyperelastischen Materialien, die FEM-Simulation und die mechanischen Versuche beschrieben.

## 2.4 Hyperelastische Materialien

In Kapitel 1 wurde erwähnt, dass das Drucktamponmaterial als hyperelastisch bezeichnet wird. Das Material des Drucktampons ist Silikonkautschuk. Silikonkautschuk ist ein hyperelastisches, isotropes Material mit einem relativ kleinen Elastizitätsmodul und einem großen Bulkmodul (Al Aboud et al, 2018; Mansouri et al, 2017). Im 18. Jahrhundert war das Drucktamponmaterial Gelatine. Heutzutage werden bei Raumtemperatur vulkanisierte Silikonkautschuke verwendet (Lück, 2017a; Micro Print, 2012).

Hyperelastische Werkstoffe weisen ein relativ inkompressibles, elastisches Verhalten auf, deshalb hat der Drucktampon eine gute Nachgiebigkeit. Er kann nach einer Entlastung wieder in seine ursprüngliche Form zurückkehren (Nagl, 2014). In den folgenden Abschnitten wird das hyperelastische Materialmodell im Detail beschrieben.

### 2.4.1 Hyperelastisches Materialmodell

Der Ausgangspunkt des hyperelastischen Materialmodells ist die Formulierung einer Formänderungsenergie-Funktion (Kaindl, 2015; Steinmann et al, 2012). Die Formänderungsenergie-Funktion wird in zwei allgemeine Typen in statistische (mikromechanische) Modelle und phänomenologische Modelle klassifiziert, die werden von Steinmann et al, (2012) und Kaindl (2015) erklärt, ein Überblick mit Bezug auf diese Arbeit wird hier gegeben. Die statistischen Modelle stammen aus den molekularen Netzwerktheorien. Die Parameter des statistischen Modells beschreiben die molekularen Größen. Statistische Modelle oder Kettenmodelle liefern die beste Vorhersage für das Verhalten bei größeren Dehnungen unter verschiedenen Deformationszuständen (Arruda & Boyce, 1993). Die wichtigsten statistischen mikromechanischen Modelle sind 3-Ketten-, 4-Ketten-, 8-Ketten- und 21-Kettenmodelle, die alle für mittlere bis große elastische Verformungen von gummiartigen Materialien geeignet sind (Miehe et al, 2004; Steinmann et al, 2012). Aber die statistischen Modelle haben eine komplexe Struktur, so dass sie in einigen Fällen nicht geeignet sind, eine geschlossene und konvergierte Lösung zu liefern. Außerdem sind die statistischen Modelle aufgrund der komplizierten Formen für numerische Lösungen und Simulationen nicht erwünscht (Mansouri and Darijani, 2014; Zhang & Katsube, 1995). Die phänomenologischen Modelle basieren auf einem mathematischen Zusammenhang und behandeln das Problem aus Sicht der Kontinuumsmechanik. Die phänomenologischen Modelle werden mit Dehnungsinvarianten  $I_1$ ,  $I_2$  oder direkt mit Streckungsinvarianten  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  beschrieben. Die phänomenologischen Modellparameter werden durch verschiedene Materialtests wie einachsiger

Zugversuch, Druckversuch und äquibiaxialen Zugversuch ermittelt. Es gibt zwei allgemeine Typen von phänomenologischen Modellen. Die Ogden Modelle sind Modelle mit formulierten Streckungsinvarianten und Modelle wie Neo Hooke, Mooney-Rivlin, Yeoh, Arruda-Boyce und andere sind Modelle mit formulierten Dehnungsinvarianten (Miehe et al, 2004; Steinmann et al, 2012).

Das hyperelastische Materialmodell wird als eine Funktion der Formänderungsenergie definiert. Die Formänderungsenergie-Funktionen hängen normalerweise von Dehnungstensoren wie dem rechten oder dem linken Cauchy-Green-Tensor ab (Steinmann, 2012). Die folgenden Gleichungen werden in unterschiedlichen Literaturen hergeleitet, z.B. in (Altenbach, 2012; Bathe, 2002; Ogden, 1997; Rivlin, 1948a; Rivlin, 1949).

$$C = F^t F \quad (2-1)$$

$$B = F F^t \quad (2-2)$$

Dabei ist  $F^t$  die transponierte Matrix des Deformationsgradienten.  $C$  ist der rechte Cauchy-Greene Deformationstensor und  $B$  ist der linke Cauchy-Greene Deformationstensor. Der Deformationsgradient  $F$  zeigt den Übergang von einem Ausgangszustand zu einem verformten Zustand. In Gleichung (2-3) ist der Deformationsgradient dargestellt.

$$F = \frac{\partial x}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial X_1} & \frac{\partial x_1}{\partial X_2} & \frac{\partial x_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial X_1} & \frac{\partial x_2}{\partial X_2} & \frac{\partial x_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial X_1} & \frac{\partial x_3}{\partial X_2} & \frac{\partial x_3}{\partial X_3} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Hier sind  $X$  und  $x$  die Ortsvektoren des ungeformten und verformten Körpers.

Die Determinante des Deformationsgradienten  $F$  wird als Jacobi-Determinante  $J$  bezeichnet, die in Gleichung (2-4) gegeben ist.  $J$  ist die Volumenänderung zwischen dem Ausgangszustand und dem verformten Zustand zum Zeitpunkt  $t$ .

$$J(X, t) = \det F(X, t) \quad (2-4)$$

Die Formänderungsenergie-Funktion ist eine polynomische Funktion der Hauptdehnung (Gleichung (2-5)) oder der Dehnungsinvarianten (Gleichung (2-6)). Gleichung (2-7) zeigt die allgemeine Form der Formänderungsfunktion (Valizadeh et al, 2021).

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (2-5)$$

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (2-6)$$

$$W = f(I_1, I_2, I_3) + g(K, \dots) \quad (2-7)$$

$W$  ist die Formänderungsenergie-Funktion.  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  sind Hauptdehnungen oder Streckungsinvarianten in die drei Hauptrichtungen.  $I_1, I_2, I_3$  sind Dehnungsinvarianten.

Der Silikonkautschuk ist ein relativ inkompressibles isotropisches Material, die Kompressibilität wird in der Gleichung (2-7) durch das Kompressionsmodul (Bulk-Modul)  $K$  bestimmt. Bei isotropen Materialien sind die Materialeigenschaften in allen Richtungen gleich. Ist das Material inkompressibel, nimmt  $g(K, \dots)$  den Wert Null an und  $I_3 = \det(C) = 1$  (Hoss & Marczak, 2010). Liegt das Bezugskoordinatensystem in Hauptrichtung, können die Dehnungsinvarianten in den Gleichungen (2-8) - (2-9) - (2-10) beschrieben werden (Holzapfel, 2000).

$$I_1 = \text{tr}(C) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2-8)$$

$$I_2 = \text{tr}(\text{Cof}(C)) = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (2-9)$$

$$I_3 = \det C = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (2-10)$$

Dabei bezeichnet  $\text{tr}$  die Spur von  $C$  und  $\text{Cof}$  ist der Kofaktor von  $C$ . Die Streckungen  $\lambda_i$  werden in Gleichung (2-11) gegeben. Dabei bezeichnet  $L_i$  die aktuelle Länge und  $L_{0i}$  ist die Ausgangslänge der Zugprobe (Becker & Gross, 2013).

$$\lambda_i = \frac{L_i}{L_{0i}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2-11)$$

Die zweite Piola-Kirchhoff-Spannung berechnet sich aus der Ableitung der Formänderungsenergie-Funktion nach der rechten Cauchy-Green-Dehnung. Die Ableitungen der Invarianten in Bezug auf den rechten Cauchy-Green-Dehnungstensor sind in Gleichung (2-13) gegeben (Holzapfel, 2000).

$$S = 2 \frac{\partial W}{\partial C} = 2 \sum_{i=1}^3 \frac{\partial W}{\partial I_i} \frac{\partial I_i}{\partial C} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_1}{\partial C} &= I & \frac{\partial I_1}{\partial C_{ij}} &= \delta_{ij} \quad (\text{Kronecker-Delta}) \\ \frac{\partial I_2}{\partial C} &= I_1 I - C & \frac{\partial I_2}{\partial C_{ij}} &= I_1 \delta_{ij} - C_{ij} \end{aligned} \quad (2-13)$$

$$\frac{\partial I_3}{\partial C} = I_3 C^{-1} \quad \frac{\partial I_3}{\partial C_{ij}} = I_3 C_{ij}^{-1}$$

Das Kronecker-Delta  $\delta_{ij}$  nimmt den Wert eins bei  $i = j$  und den Wert Null bei  $i \neq j$ .

Wird Gleichung (2-13) in (2-12) eingesetzt, so ergibt sich die allgemeine Form der zweiten Piola-Kirchhoff-Spannung in Bezug auf drei Dehnungsinvarianten wie folgt.

$$S = 2 \frac{\partial W}{\partial C} = 2 \left[ \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) I - \frac{\partial W}{\partial I_2} C + I_3 \frac{\partial W}{\partial I_3} C^{-1} \right] \quad (2-14)$$

Der Zusammenhang zwischen dem Cauchy-Spannungstensor  $\sigma$  und dem zweiten Piola-Kirchhoff-Spannungstensor  $S$  kann in der Gleichung (2-15) beschrieben werden (Holzapfel, 2000).

$$\sigma = \frac{1}{J} F S F^t \quad (2-15)$$

Mit Hilfe des linken Cauchy-Green-Deformationstensors  $B$  und Gleichung (2-15) kann der Cauchy-Spannungstensor  $\sigma$  wie folgt geschrieben werden. Unter Berücksichtigung von  $I_3(F) = J$  und  $I_3(C) = J^2$  (Bergstroem, 2015), ergibt sich Gleichung (2-17).

$$\sigma = 2 \frac{1}{J} \left[ I_3 \frac{\partial W}{\partial I_3} I + \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) B - \frac{\partial W}{\partial I_2} B^2 \right] \quad (2-16)$$

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial J} I + \frac{2}{J} \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) B - \frac{2}{J} \frac{\partial W}{\partial I_2} B^2 \quad (2-17)$$

Mit Hilfe des rechten Cauchy-Green-Deformationstensors  $\mathcal{C}$  und den letzten Gleichungen kann der Cauchy-Spannungstensor  $\sigma$  wie folgt geschrieben werden.

$$\sigma = \frac{2}{J} F \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \mathcal{C}} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \mathcal{C}} + \frac{\partial W}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \mathcal{C}} \right) F^T \quad (2-18)$$

Die Formänderungsenergie ist eine Funktion des Cauchy-Green-Deformationstensors, die ein allgemeines isotropes hyperelastisches phänomenologisches Modell für Kautschukmaterialien darstellt (Wada et al, 2018). Es gibt verschiedene Formänderungsenergie-Funktionen  $W$  zur Beschreibung des hyperelastischen Materialverhaltens, einige wichtige allgemeine Funktionen werden in dieser Dissertation beschrieben. Im nächsten Abschnitt sind einige Beispiele für isotrope Formänderungsenergie-Funktionen dargestellt.

#### 2.4.2 Beispiele für isotrope Formänderungsenergie-Funktionen

Um das hyperelastische Materialverhalten genau zu beschreiben, wurde seit den letzten fünfzig Jahren intensiv an der Entwicklung von Materialmodellen und Experimenten geforscht. Für gummiähnliche Materialien wurden bereits mehrere isotrope Modelle entwickelt, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

##### Ogden-Modell

Das Ogden-Modell wurde von Ogden (1972; 1997; 2001) entwickelt. Dieses Modell beschreibt die Formänderungsenergie-Funktion  $W$  in Abhängigkeit der Streckungsinvarianten (Hauptdehnungen)  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  und  $\lambda_3$ . Das Ogden-Modell wird häufig für Gummis und biologische Gewebe verwendet. Die Formulierung der Formänderungsenergie-Funktion nach Ogden wird in Gleichung (2-19) dargestellt (Ogden, 2001). Dabei ist  $N$  die Anzahl der Terme in der Formänderungsenergie-Funktion,  $\mu_n$  sind Materialkonstanten oder Materialkennwerte und  $\alpha_n$  sind dimensionslose Konstanten.

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (2-19)$$

Die Konstanten  $\mu_n$  und  $\alpha_n$  werden experimentell bestimmt. Bei kleinen Deformationen bezeichnet der Parameter  $\mu$  das klassische Schermodul (Ogden, 1972; Rackl, 2015).

### Neo-Hooke-Modell

Das Neo-Hookean-Modell wird als Spezialfall des Ogden-Modells für inkompressible Materialien betrachtet. Hier wird die Formänderungsenergie-Funktion aus Gleichung (2-19) hergeleitet, indem  $N = 1$  und  $\alpha_1 = 2$  in Gleichung (2-19) eingesetzt werden. Gleichung (2-20) zeigt die Formänderungsenergie-Funktion nach Neo-Hookean für inkompressible hyperelastische isotrope Materialien.

$$W = \frac{\mu}{2}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (2-20)$$

Dabei ist  $\mu$  das klassische Schermodul. Dieses Modell wird in den FEM-Simulationen zur Beschreibung der sehr weichen Kautschuke verwendet (Holzapfel et al, 2000).

### Polynomiales Modell

Das polynomiale Modell wurde von Rivlin & Saunders (1951) entwickelt. Die Formänderungsenergie-Funktion wird mit den Dehnungsinvarianten  $I_1$  und  $I_2$  des linken Cauchy-Green-Tensors in Gleichung (2-21) gegeben. Gleichung (2-21) wird auch als die allgemeine Rivlin-Gleichung genannt (Holzapfel, 2000; Laksari et al, 2012).

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij}(I_1 - 3)^i(I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i}(J - 1)^{2i} \quad (2-21)$$

Viele Kautschukmaterialien können begrenzte Belastungen ohne erkennbare Volumenänderungen ertragen. Solche Materialien können als inkompressibel betrachtet werden. Bei inkompressiblen hyperelastischen Materialien nimmt  $J$  den Wert eins an (Holzapfel, 2000).

Ein Spezialfall der Gleichung (2-21) wurde früher von Mooney (1940) und Rivlin (1948b) entwickelt. Die Mooney-Rivlin-Gleichung wird bei inkompressiblen hyperelastischen Materialien ( $J = 1$ ) verwendet. Die Mooney-Rivlin-Gleichung wird aus Gleichung (2-21) hergeleitet, indem  $n = 1$ ,  $C_{10} = C_1$ ,  $J = 1$ ,  $C_{11} = 0$ , und  $C_{01} = C_2$  eingesetzt werden. Das Mooney-Rivlin-Modell wird häufig zur Beschreibung

des Verhaltens von inkompressiblen isotropen hyperelastischen Materialien verwendet. Gleichung (2-22) zeigt die Formänderungsenergie-Funktion nach dem Mooney-Rivlin-Modell.

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (2-22)$$

Die Mooney-Rivlin-Konstanten  $C_1, C_2$  werden aus den mechanischen Materialtests bestimmt. Das wird im Detail in Abschnitt 5.3.2 beschrieben.

### **Yeoh-Modell für inkompressible Kautschukmaterialien**

Das Yeoh-Modell ist nur von der ersten Dehnungsinvariante abhängig, es wurde von Yeoh (1993) entwickelt. Die Formänderungsenergie-Funktion wird in Gleichung (2-23) gegeben.

$$W = \sum_{i=1}^N C_i (I_1 - 3)^i \quad (2-23)$$

Es gibt noch weitere Modelle wie z.B. das Arruda-Boyce-Modell, auf die hier nicht eingegangen wird, weil sie im Rahmen dieser Arbeit nicht benötigt werden. Die meisten kommerziellen FEM-Programme, wie z. B. Ansys und Abaqus, unterstützen die bisher hier beschriebenen Materialmodelle. Es gibt ein einfaches Modell, um die Formänderungsenergie-Funktion direkt aus den echten einachsigen Zugversuche zu bestimmen. Dieses Modell wird als Marlow-Modell bezeichnet. Hier werden keine Materialkonstanten bestimmt, da die Formänderungsenergie-Funktion direkt aus eingelesenen Messdaten des einachsigen Zugversuches berechnet werden (Molls, 2013). Dieses Modell ist eine sehr genaue Methode für einachsige Spannungszustände, aber es ist nicht genau für mehrachsige Spannungszustände (Molls, 2013). In dieser Arbeit werden FEM-Simulationen an den Drucktampons unter verschiedene Belastungen durchgeführt. Mooney-Rivlin- und Polynomial-Modelle werden in Anaqus und Salome-Meca benutzt. Im nächsten Abschnitt wird das Prinzip der FEM-Simulation im Detail erklärt.

## 2.5 FEM-Simulation

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) hat seit vielen Jahren im Ingenieurwesen ihre Anwendung gefunden und wird oft für Berechnungsaufgaben in Maschinenbau, Fahrzeugtechnik und Strömungsmechanik benutzt (Klein, 2013). Die Einsatzgebiete sind sehr breit. Im Rahmen von Simulationen wird diese Methode in Statik, Dynamik, Strömungsprobleme, Temperaturprobleme, Akustik und Optimierungsprobleme eingesetzt. Die FEM-Simulation ermöglicht weitgehend realistische Aussagen in der Konzeptfindung und Entwicklung von Bauteilen und Strukturen durch die Simulation der physikalischen Eigenschaften. In Kombination mit CAD gilt die FEM-Simulation heute als die effizienteste Methode zur qualitativen Optimierung der Ingenieursarbeit und zur Qualitätsverbesserung (Klein, 2013).

Der indirekte Tiefdruck oder Tampondruck basiert bis heute auf der Erfahrung der Experten in diesem Bereich und die Arbeit in solche Firmen ist immer noch nicht digitalisiert. Deshalb wird in dieser Dissertation die Simulation im indirekten Tiefdruck (Tampondruck) als Verbesserungsmethode der Drucktampon-Herstellung erforscht.

So wird im folgenden Teil das allgemeine Prinzip der FEM-Simulation erläutert und die einzelnen Parameter zur Simulation des indirekten Tiefdrucks werden beschrieben.

### 2.5.1 Prinzip der FEM-Simulation

Für die FEM-Berechnung werden die Geometrie, die mechanischen Eigenschaften des Materials, das mathematische Modell und ein FEM-Programm benötigt (Klein, 2013). Abbildung 2-7 zeigt den prinzipiellen Ablauf einer FEM-Simulation. Aufgabe von Computer-Aided-Design (CAD) Programmen ist es, vollständige Fertigungs- und Montageunterlagen zu erstellen. In der Praxis werden Einzelteil-, Gruppen- und Montagezeichnungen mit CAD-Programmen erstellt. In den CAD-Programmen werden die Berechnungsgeometrien aus der Konstruktionsgeometrie (CAD-Geometrie) abgeleitet, hier muss als Schnittstelle ein IGES oder Step-Datei erzeugt werden. In den FEM-Simulationen werden Randbedingungen definiert und die Verschiebungen und Reaktionskräfte werden bestimmt. Hier wird ein Eingabeprotokoll erstellt, das die Werkstoffkennwerte, die Randbedingungen und die Kräfte beinhaltet. Der FEM-Löser (FEM-Solver) bekommt alle Informationen von dem Eingabeprotokoll, er löst die Gleichungssysteme abhängig von dem Netz, dem Netzelementtyp, der Steifigkeit der Struktur und den Randbedingungen und bestimmt damit die Verschiebungen. Die Spannungen und die Reaktionskräfte werden aus den Verschiebungen und der Steifigkeitsmatrix berechnet (Brand, 2013; Klein, 2013).

Die Geometrien werden vereinfacht, damit keine Singularitäten oder lange Rechenzeiten entstehen. Hier werden Geometriedetails wie z.B. sehr kleinen Abrundungen gelöscht, die keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben, aber zusätzlichen Rechenaufwand verursachen, da die Vernetzung der kleinen Abrundungen die Anzahl der Netzelemente und die Rechenzeit erhöht. Das wird als Idealisierung der Konstruktionsgeometrie genannt. Nach der Idealisierung wird die Geometrie mit kleinen Netzelementen vernetzt, diese Aufgabe erfolgt mit Vernetzungsalgorithmen (Wagner, 2017). Es gibt viele Vernetzungsalgorithmen wie z.B. Tetrahedral, Hexahedral und 1-2-3-Netzen, diese Algorithmen werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

Die Einsatzgebiete der Finite-Elemente-Methode sind in allen ingenieurtechnischen Bereichen (Brand, 2013; Wagner, 2017). Hier sind einige Beispiele:

- Verformung von Strukturen unter einem statischen oder dynamischen Druck
- Lineare Dynamik, Akustik wie z.B. Schwingungsberechnung im Frequenzbereich
- Simulation von Produktionsprozessen wie z.B. Karosserieherstellung
- Lineare und nichtlineare Berechnungen
- Stationäre und instationäre Wärmeübertragung

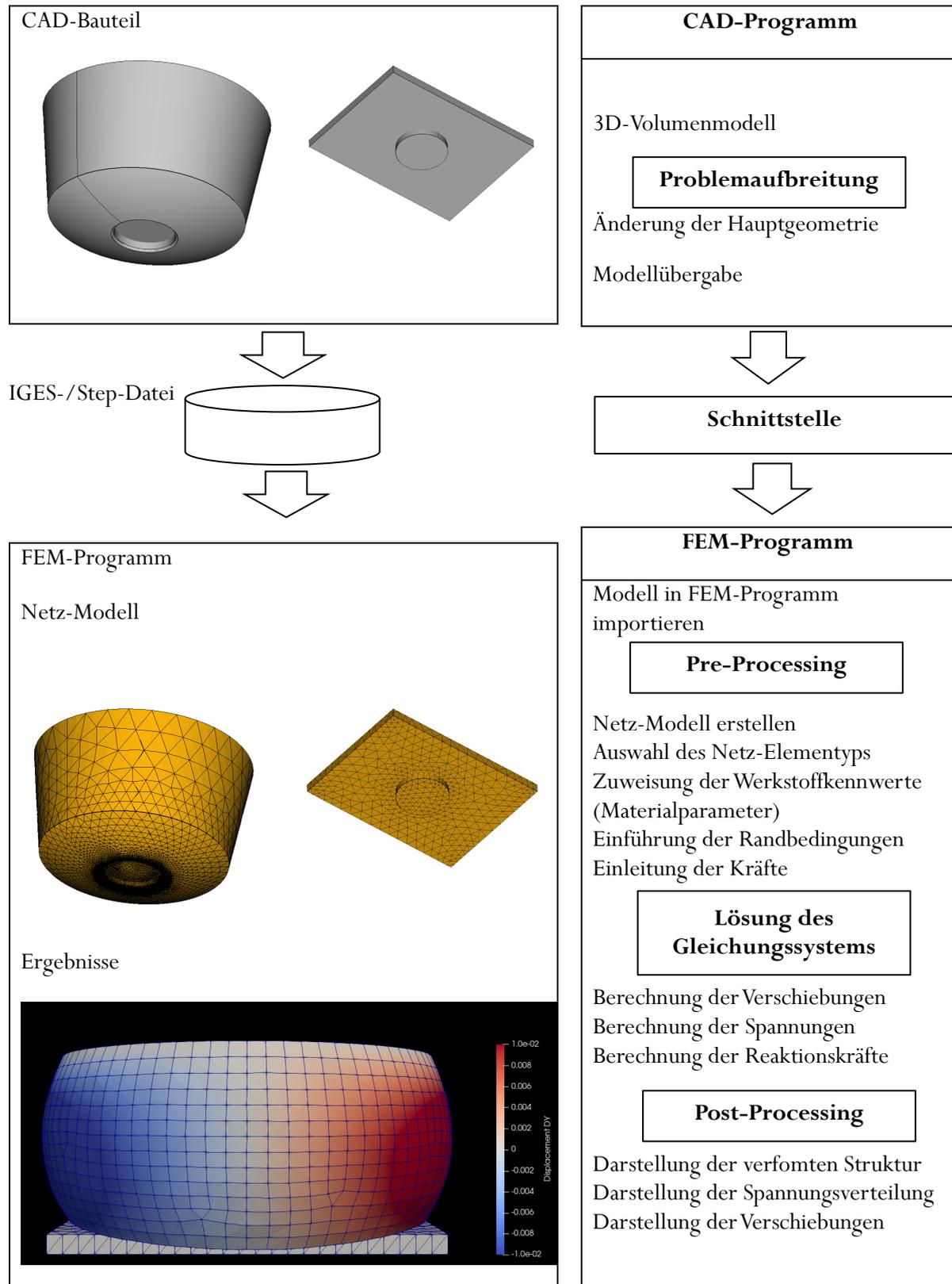


Abbildung 2-7: Ein prinzipieller Ablauf einer FEM-Simulation nach Klein (2013)

### 2.5.2 Vernetzung und Netzelementtypen

Für die Vernetzung der Berechnungsgeometrie stehen heutzutage leistungsfähige kostenlose und preisgünstige Programme zur Verfügung, die teilweise vollautomatisch Netze erstellen können. Die Netzelementtypen und deren Größen spielen eine große Rolle für die Simulationsergebnisse (Wagner, 2017). Im Allgemeinen gibt es eindimensionale, zweidimensionale oder dreidimensionale Netz-Elemente. Abbildung 2-8 veranschaulicht die Netzelementtypen mit ihren Knotenpunkten und den Unterschied zwischen den quadratischen und linearen Netz-Elementen. Das eindimensionale quadratische Netz-Element hat einen Knoten mehr als das eindimensionale lineare Netz-Element (Wagner, 2017). In dieser Dissertation werden nur dreidimensionale Netz-Elemente zur Approximation der dreidimensionalen Drucktampongeometrie verwendet. Ein häufig benutztes Netz-Element ist das lineare Hexaederelement mit 8 Knoten. Das quadratische Hexaeder-Netz-Element wird in kommerziellen Programmen bei quadratischen Elementen genutzt, dieses Netz-Element hat auf jeder Kante einen Knoten, aber nicht auf den Flächen und im Zentrum (Wagner, 2017). Die Pentaederelemente sind Ergänzungselemente, die zur Füllung der Netz-Lücken genutzt werden können, diese Elemente haben eine Prismaform, sie entstehen beim Vernetzen von gekrümmten Oberflächen. Tetraederelemente werden benutzt, wenn die Geometrieform nicht mit Hexaedern vernetzt werden kann (Brand, 2013; Wagner, 2017). Es gibt allgemeine Regeln zur Vernetzung einer Geometrie, die sich hier zusammenfassen lassen (Wünsch and Pilz, 2019):

- Ziel einer Volumenvernetzung für hyperelastische Materialien sollte immer ein quadratisches Hexaeder-Netz sein.
- Hexaeder-Netz-Elemente können bessere Ergebnisse als lineare Tetraeder-Netz-Elemente bei einem gleichen numerischen Aufwand liefern (Brand, 2013).
- Bei Tetraeder-Netz-Elementen sollte immer ein quadratischer Ansatz gewählt werden.
- Lineare Tetraeder-Netz-Elemente sollen aufgrund ihrer Steifigkeit immer vermieden werden.

Bei sehr komplizierten Geometrien werden die quadratischen Tetraeder-Netz-Elemente am häufigsten verwendet. Die Elementkantenlänge spielt auch eine große Rolle bei der Konvergenz einer Simulation (Wünsch & Pilz, 2019). Im nächsten Abschnitt werden die kommerziellen und die Open-Source FEM-Programme erläutert.

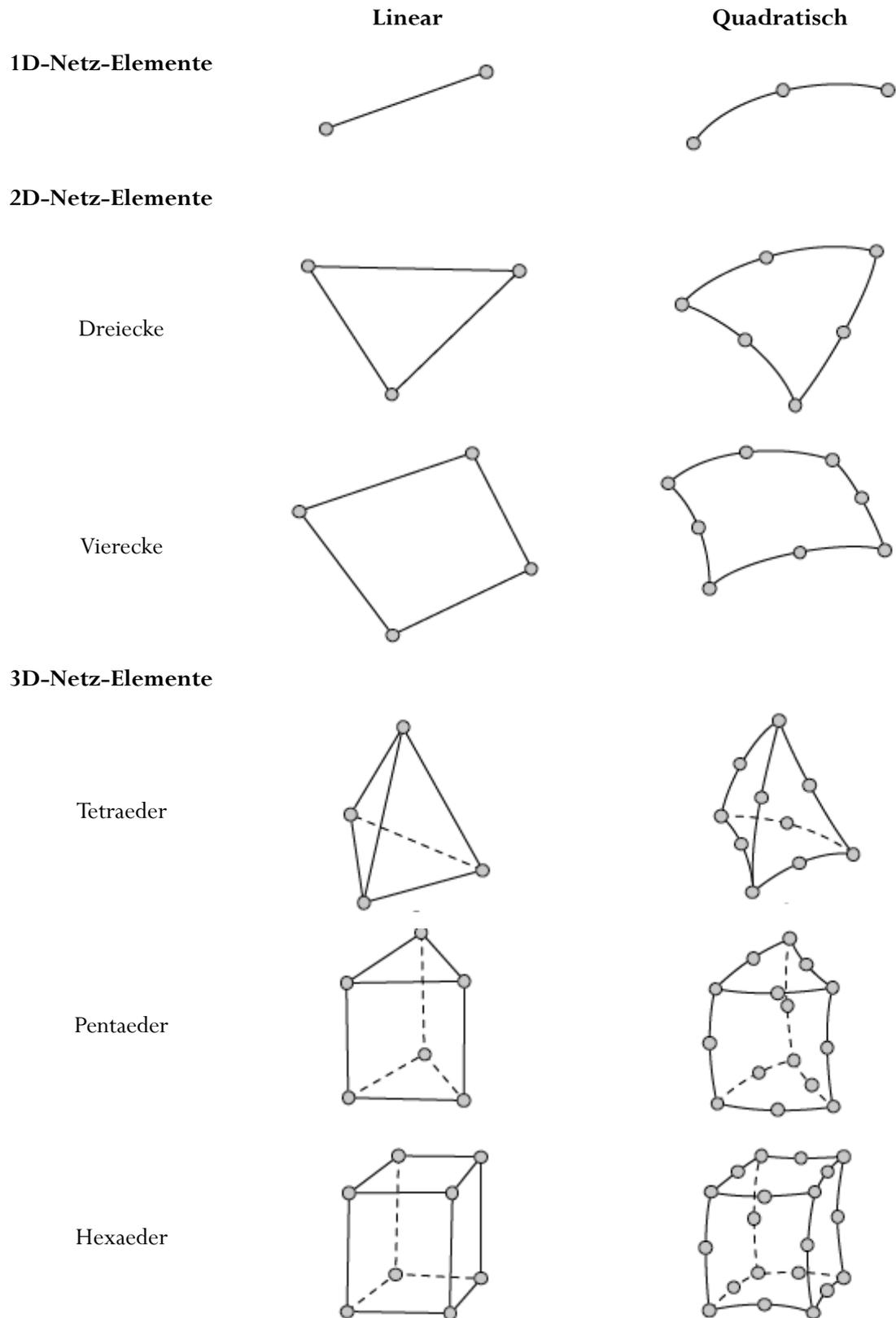


Abbildung 2-8: Netzelementtypen in Abaqus mit ihren Knoten, übernommen von Dassault Systèmes Simulia (2011) und Wunsch & Piltz (2019)

### 2.5.3 FEM-Programme

Die Anwendung der FEM-Simulation wird heute als integraler Bestandteil einer konstruktionsbegleitenden Berechnung gesehen (Klein,2013; Jungh et al, 2017). Neben den CAD-Programmen werden oft auch FEM-Programme benötigt. Einige der CAD-Programme verfügen über FE-Solver und Material-Bibliotheken zur Simulation der bekannten Materialien wie z.B. SolidWorks oder Siemens NX. Die bekanntesten kommerzielle FEM-Programme sind Ansys, Nastran, Marc, I-Deas, Autodesk und Abaqus. Diese Programme sind für die lineare Elastomechanik entwickelt und später für nichtlineare Festigkeitsberechnungen, Dynamik, Wärmeleitung und Strömungsmechanik erweitert worden. Andererseits gibt es viele Open-Source Programme wie z.B. OpenFoam, Z88 und Salome-Meca.

Der Silikonkautschuk ist ein hyperelastisches Material, das durch verschiedene vorher beschriebene Materialmodelle wie Polynomial, Reduziertes Polynom, Ogden, Mooney-Rivlin usw. definiert werden kann. Daher sollte ein Simulationsprogramm gewählt werden, welches hyperelastische Materialmodelle unterstützen kann. Aus den kommerziellen Programmen wird Abaqus ausgewählt, da es die meisten Materialmodelle unterstützt, die zur Simulation von Silikonkautschuk geeignet sind. Bei den Open-Source Programmen hat sich Salome-Meca in vielen Bereichen bewiesen (Fernandes et al, 2017). Salome-Meca hat Materialmodelle, die die Simulation von Silikonkautschuk unterstützen (Klein,2013; Poudel, 2018).

Im nächsten Kapitel wird ein Workflow zur Digitalisierung des Drucktamponherstellung für KMU vorgestellt.

### 3. Entwicklung eines Workflows

Wie bereits erwähnt, ist die Herstellung von Drucktampons und die Optimierung ihrer Formen, Geometrien und ihres Härtegrads immer noch Handarbeit und eine reine Erfahrungssache. Obwohl jeder Drucktamponhersteller Kataloge mit Tausenden von Drucktamponformen hat, gibt es immer noch keine Software oder Methode, die eine geeignete Drucktamponform und Drucktamponhärte für ein zu bedruckendes Substrat (Bedruckstoff) geben kann. Die Digitalisierung der Drucktamponherstellung kann entscheidend zur Kostensenkung, Verkürzung der Produktentwicklungszeiten und Steigerung der Produktqualität beitragen. Die Digitalisierung der Drucktamponherstellung ist eine virtuelle Produktentwicklung mittels CAD- und FEM-Programmen. Sie kann die mittelständischen Unternehmen (KMU) bei der Drucktamponherstellung unterstützen. Unter virtueller Produktentwicklung wird die vollständige Digitalisierung des Produktentwicklungsprozesses von der Planung über die Konstruktion bis zur Validierung der gefundenen Lösung durch FEM-Simulationen und Prüfung der Produkteigenschaften verstanden (Bender & Gerike, 2020). Die Voraussetzungen dafür sind gute und günstige CAD- und FEM-Programme zu finden und digitale Produktmodelle, die alle mechanischen Eigenschaften des Drucktampons darstellen können. Die Digitalisierung der Drucktamponherstellung findet in der Regel in einem Unternehmen statt, das Drucktampons herstellt. Hier werden Änderungen am Ausgangsprodukt (Drucktampons) vorgenommen, um Kosten zu senken oder technische Verbesserungen einzubringen. Diese Produktentwicklung findet parallel zur Herstellung oder Verwendung der realen Drucktampons statt, wobei die initialen Modelle der Drucktampons weiterverwendet werden können. Die digitalen Tätigkeiten bei der virtuellen Produktentstehung eines Drucktampons sind vielfältig: Angefangen bei der Projektplanung, der Anforderungserfassung, der Detailkonstruktion mit CAD-Programmen, der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials, der Berechnung von Materialkonstanten für die Formänderungsenergie-Funktion und den damit verbundenen FEM-Simulationen, Testplanung und Durchführung bis hin zur Erstellung von virtuellen neuen Drucktampons. Die Gussformen der optimierten Drucktampons werden im Rahmen dieser Arbeit mit der Polyjet- und Stereolithographie-3D-Druckern hergestellt. In Zusammenarbeit mit der Firma Tampo-Technik GmbH wurde der neu entwickelte digitale Workflow getestet. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 und 6 dargestellt. In diesem Kapitel wird ein Workflow zur Digitalisierung der Herstellung des Drucktampons beschrieben und geeignete FEM- und CAD-Programme ausgewählt.

### 3.1 Workflow zur Digitalisierung der Herstellung des Drucktampons

Für große Deformationen, wie sie bei Drucktampons auftreten, wurde ein Workflow zur Entwicklung, Untersuchung und Auslegung vom Silikonkautschuk-Drucktampon entwickelt. Prinzipiell ist es nun möglich, die Geometrie eines Drucktampons mittels FEM-Simulation zu untersuchen und zu optimieren. Teilergebnisse dazu wurden bereits in Al Aboud et al (2020) veröffentlicht. Der dazu notwendige Arbeitsablauf ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Für die Durchführung einer simulationsbasierten Geometrieoptimierung von Drucktampons sind bereits gewisse Grundkenntnisse in der Anwendung von FEM- und CAD-Programme empfohlen. Der erste Schritt ist das Laden der zu optimierenden Drucktampongeometrie und der Geometrie des Bedruckstoffs ins FEM-Programm und die Erstellung eines FEM-Modells. Das FEM-Modell enthält die mathematischen Gleichungen, die Geometrien und die Materialdaten des Silikonkautschuks, die anhand der mechanischen Material-Prüfverfahren ermittelt werden müssen (siehe Kapitel 4). Im zweiten Schritt muss der Anwender eine zu optimierende Drucktampongeometrie aus dem Katalog auswählen und in das FEM-Programm importieren. Basierend auf den berechneten Ergebnissen kann der Benutzer dann entscheiden, ob die Ergebnisse den Anforderungen genügen oder ob eine andere modifizierte Drucktampongeometrie simuliert werden soll. Die wichtigste Voraussetzung für eine gute Drucktampongeometrie ist die Nullverschiebung auf der Oberfläche des Drucktampons, das wird in Abschnitten 5.4 und 6.2 beschrieben. Die zweite Anforderung besteht darin, einen niedrigen Innendruck zu halten (dieser kann als Ergebnis der Simulation angezeigt werden), da sehr hohe Drücke nach kurzer Zeit zu einer dauerhaften Verformung des Drucktamponmaterials führen; dies tritt beim Bedrucken von stark gewölbten Bedruckstoffen mit einem harten Drucktampon auf (Lück, 1999). Die dritte Anforderung ist das Abrollverhalten des Drucktampons auf dem Bedruckstoff, es muss homogen und ohne Lufteinschlüsse sein (siehe Abschnitt 5.4). Nach mehreren Iterationen kann die Drucktampongeometrie mit den gewünschten Anforderungen bestimmt werden. Es ist zu beachten, dass die Drucktampongeometrie mit diesem Workflow noch nicht automatisch berechnet werden kann. Dafür ist der Tampondruckprozess zu komplex. Die Bedruckstoffe sind vielfältig und haben unterschiedliche Formen und Größen. Für jeden neuen Bedruckstoff muss eine Drucktampongeometrie entwickelt werden und der Abstand zwischen den Geometrien (Drucktampon/Bedruckstoff) muss für jeden neuen Bedruckstoff angepasst werden.

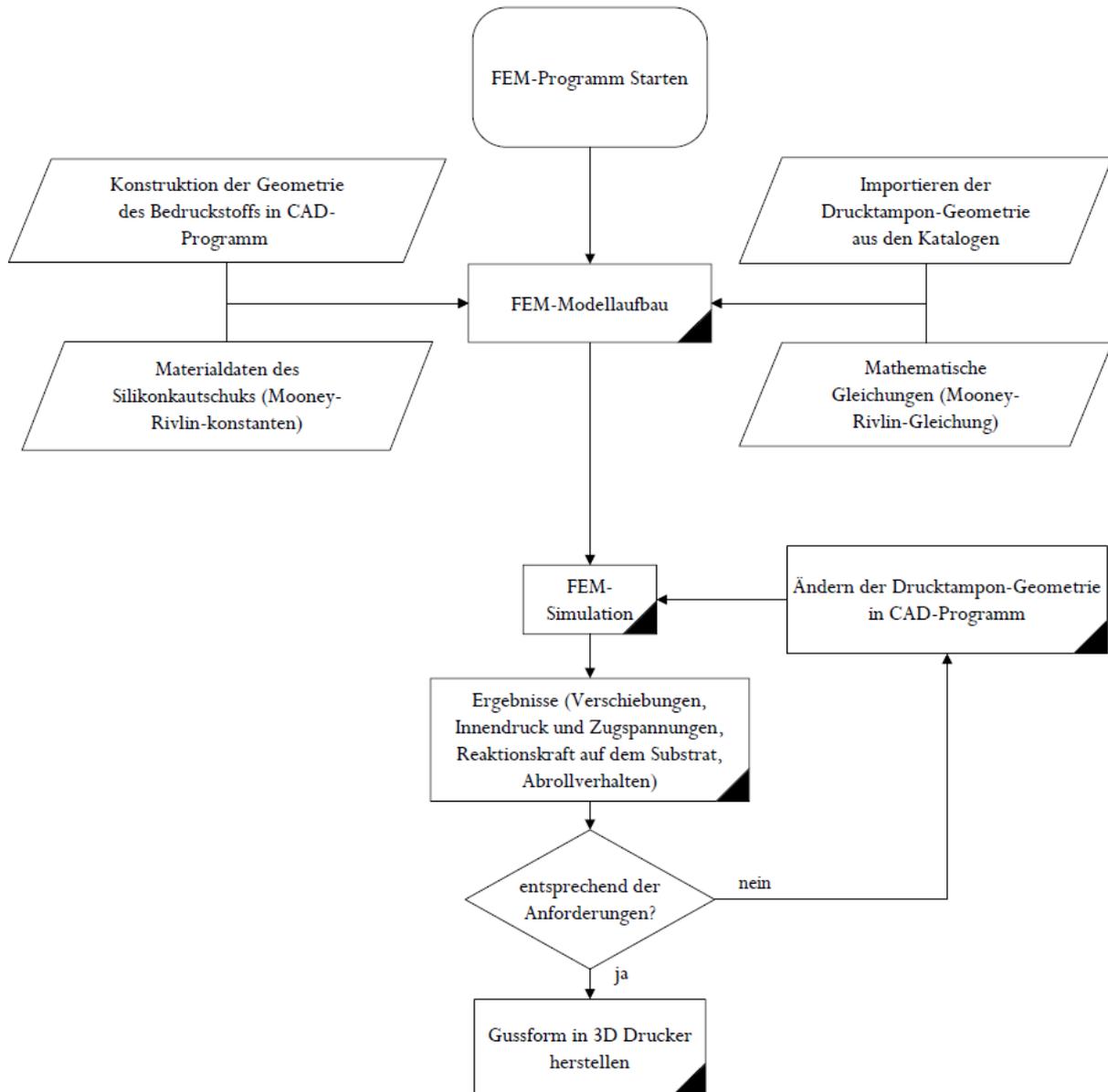


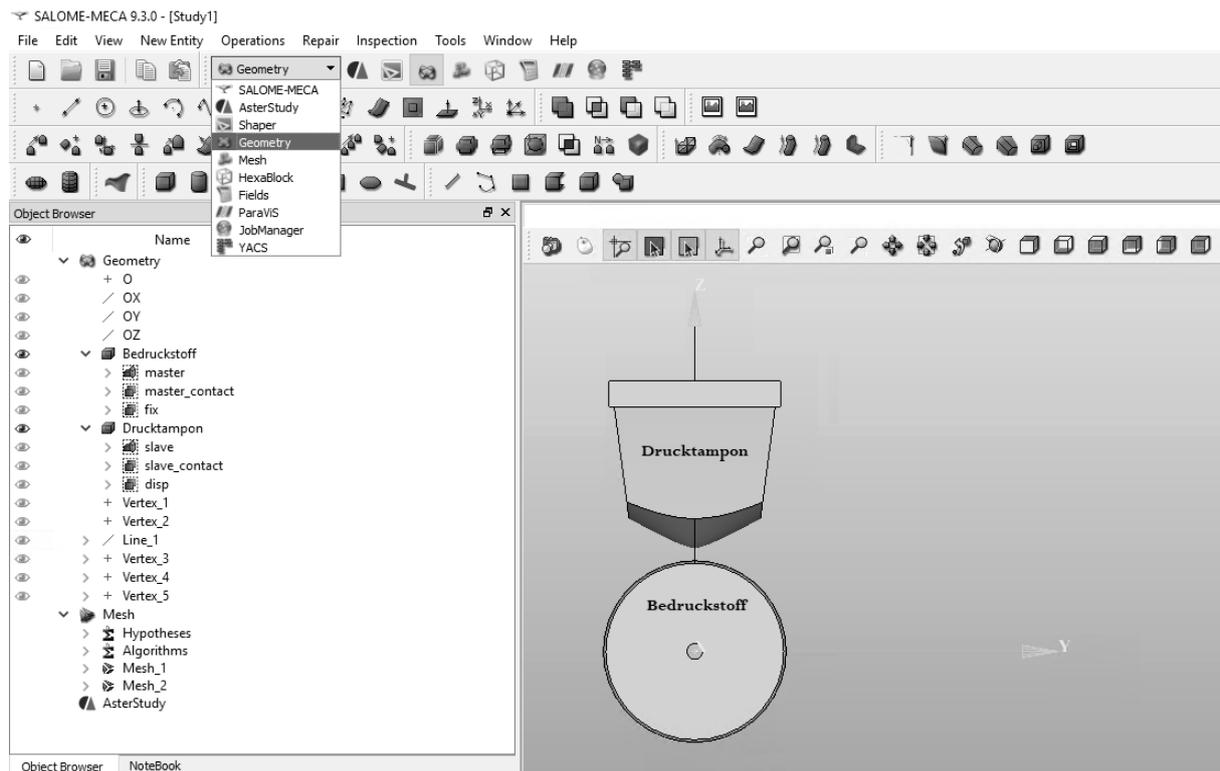
Abbildung 3-1: Arbeitsablauf zur Untersuchung der Drucktampon Geometrie mit Hilfe der FEM-Simulation nach Al Aboud et al (2020).

Die Oberfläche der Geometrie des Bedruckstoffes kann mit einem 3D Scanner erfasst werden. Die Geometrie aus dem 3D Scanner muss nachbearbeitet werden, beispielsweise müssen Löcher in der Geometrie gefüllt werden. Der Aufwand für das Füllen der Löcher ist größer als die Konstruktion mit dem CAD-Programm, daher wird der 3D Scanner nur für sehr komplexe Formen verwendet. Die optimierte Gussform für den Drucktampon wird im Drucker Form 3 von Formlabs mittels Stereolithographie-Verfahrens gedruckt. Die 3D gedruckten Formen müssen mit UV-Licht gehärtet und danach mit Schleifpapier zur Glättung bearbeitet werden.

### 3.2 Auswahl des FEM- und CAD-Programms

Die FEM- und CAD-Programme werden in kommerzielle und Open-Source Programme unterteilt. Die bekanntesten kommerziellen CAD-Programme sind Siemens NX, SolidWorks und CATIA. In jeder Branche ist der Einsatz von CAD-Programmen heute unerlässlich. Aber welches ist das richtige CAD-Programm für ein Drucktampon-Herstellungsunternehmen? Einige Programme sind zu teuer, andere bieten nicht die notwendigen Funktionen (Di Donato & Abita, 2019). Siemens NX und SolidWorks sind etablierte Programmpakete im professionellen Umfeld für CAD, CAM und CAE. Sie sind leistungsfähige Systeme, die den gesamten Produktentwicklungszyklus abdecken. Sie bieten eine einheitliche Plattform für die Produktentwicklung mit Lösungen für Entwicklung, Konstruktion, Simulation und Fertigung (Duhovnik et al, 2014). Für fast jede Branche gibt es spezifische Module und Funktionen, um den Konstruktions- und Simulationsprozess zu vereinfachen und zu beschleunigen (Duhovnik et al, 2014). Aber die CAD Programme wie z.B. Siemens NX und SolidWorks können die Materialkonstanten für die Formänderungsenergie-Funktion nicht berechnen. Dafür gibt es kommerzielle FEM-Programme wie Ansys und Abaqus, welche die Materialkonstanten aus den Materialtests (den Materialprüfverfahren) berechnen können. Die kommerziellen Programme liefern sehr genaue Simulationsergebnisse, aber sie sind für kleine und mittlere Unternehmen zu teuer. FreeCAD ist ein Open-Source CAD-Programm, damit kann die Geometrie des Drucktampons konstruiert und als STEP-, IGES-, BREP- oder STL-Datei gespeichert werden (Falck et al., 2012; Logothetis et al., 2018). Neben der CAD-Konstruktion bietet FreeCAD auch die Möglichkeit zu simulieren. FreeCAD hat einige Stärken: Die gute Verbindung von CAD und FEM, eine sehr einfache Bedienung und eine ständige Weiterentwicklung. Da FreeCAD nicht den primären Fokus auf FEM hat, ist die Dokumentation etwas schwächer, wächst aber stetig (Di Donato & Abita, 2019). Aber FreeCAD kann den Silikonkautschuk-Drucktampon nicht simulieren, weil dieses Programm keine hyperelastischen Materialmodelle hat. Daher wurden Code-Aster und Salome-Meca verwendet. Salome-Meca ist ein modernes Open-Source FEM-Programm mit Pre- und Postprozessor für eine FEM-Simulation ((Delmas and Aimery, 2011) Fernandes et al, 2017). Code-Aster ist in Salome-Meca integriert, um dem Benutzer ein vollständiges Programm mit einem Simulationsworkflow zu bieten. Code-Aster wurde von der staatlichen französischen Elektrizitätsgesellschaft (EDF) entwickelt. Da Code-Aster auf der Programmiersprache Python basiert, kann der Programmiercode in einem beliebigen Texteditor geschrieben werden (Aubry, 2013; Englert-Dudek, 2020). Salome-Meca arbeitet nach dem Prinzip Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe der Daten. Bei der Eingabe (Pre-Processing) werden die Geometriedaten des Drucktampons und des Bedruckstoffs aus FreeCAD eingelesen. Zu diesem Zweck werden CAD-Schnittstellen wie STEP, IGES, BREP oder STL verwendet. Ein CAD-Modell besteht aus

Linien, Flächen und Volumen. In der Eingabe werden die Kanten und die Flächen mit spezifischen Namen bezeichnet, so dass später in Code-Aster die Randbedingungen definiert werden können. Ein Netz-Modell hat die äußere Form des CAD-Modells, besteht aber aus vielen kleinen Elementen. Ein Netz-Modell wird mit Hilfe eines Vernetzungsmoduls aus einem CAD-Modell erstellt. Dazu muss die Art der Netz-Elemente (Hexaeder, Tetraeder oder Pentaeder) und ihre Größe (die richtige Netzfeinheit) festgelegt werden (Englert-Dudek, 2020).



**Abbildung 3-2: Eingabe (Pre-Processing) in Salome-Meca. Die aus FreeCAD importierten Geometrien werden als Master (Bedruckstoff) und Slave (Drucktampon) bezeichnet. Die Flächen des Bedruckstoffs werden als fix und master-contact bezeichnet. Die bewegliche Oberfläche des Drucktampons wird disp benannt. Die Kontaktfläche des Drucktampons wird als slave-contact bezeichnet.**

Für eine nichtlineare FEM-Berechnung eines hyperelastischen Materials müssen auch die Materialdaten eingegeben werden, deshalb müssen die mechanischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials charakterisiert werden. Für den Bedruckstoff sind das Elastizitätsmodul (E-Modul), die Poisson-Zahl und die Dichte notwendig. In der Verarbeitung (Processing oder Gleichungslöser) werden die Netz-Daten in Code-Aster eingelesen und die Randbedingungen und Materialdaten definiert. Der Gleichungslöser berechnet die Spannungen, Verformungen und Dehnungen aus dem FEM-Modul und speichert die Ergebnisse in umfangreichen Matrizen (Englert-Dudek, 2020). Im Tampondruck wird der Bedruckstoff befestigt und der Drucktampon bewegt sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit zum Bedruckstoff. In

der Ausgabe (Post-Processing) werden die berechneten Spannungen, Verformungen und Dehnungen mit Hilfe des Postprozessors (ParaView-Modul) grafisch dargestellt. Das Abrollverhalten des Drucktampons auf dem Bedruckstoff sowie die Verschiebungen und die Verformung spielen eine entscheidende Rolle bei der Optimierung der Drucktampongeometrie, das wird in Abschnitten 5.4 und 6.2 beschrieben. Im nächsten Kapitel wird die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der Drucktamponmaterials beschrieben.

## 4. Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften von Silikonkautschuk beschrieben, um die Input-Parameter für die FEM-Simulation in Abschnitt 5.3 zu ermitteln. Zunächst werden die mechanischen Eigenschaften von Silikonkautschuk erklärt. Anschließend werden die mechanischen Prüfverfahren für Silikonkautschuk vorgestellt. Anschließend wird der Messaufbau vorgestellt. Danach werden die Messergebnisse der mechanischen Prüfverfahren erläutert.

### 4.1 Mechanische Eigenschaften von Silikonkautschuk

Ein gut fließfähiger raumtemperaturvernetzender Silikonkautschuk mit niedriger Viskosität und sehr hoher Elastizität ist besonders gut geeignet zur Herstellung der Drucktampons (Wacker Chemie, o.D.a). Die chemische Zusammensetzung von Silikonkautschuk gibt den daraus hergestellten Vulkanisaten die folgenden Eigenschaften (Wacker Chemie, o.D.a):

- hohe Wärmebeständigkeit
- gute Tieftemperaturbeständigkeit
- Witterungsbeständigkeit, Chemikalienbeständigkeit
- exakte Reproduktion von Formteilen bis ins kleinste Detail
- sehr niedrige Shore A Härte bis 0 Shore A ist möglich
- hohe Ein- und Weiterreißfestigkeit
- hohe Dehnbarkeit und Elastizität

Bei den mechanischen Eigenschaften des Silikonkautschuks stellt, neben der in Shore A angegebenen Härte, der Weiterreißwiderstand einen der wichtigsten Parameter dar. Werte über etwa 10 N/mm bedeuten, dass es sich um eine höhere Ein- und Weiterreißfestigkeit handelt (Wacker Chemie, o.D.b). Die Weiterreißfestigkeit wird nach ASTM D624 (2012) gemessen. Die Dichte des Silikonkautschuks mit 12 Shore A Härte (mittlere Härte) liegt bei 1,22 g/cm<sup>3</sup>, sie wird nach ISO 2781 (2018) gemessen. Die Reißfestigkeit ist 3,5 N/mm<sup>2</sup> und Reißdehnung liegt bei 600 % (Wacker Chemie, o.D.a). Der Silikonkautschuk weist eine Nichtlinearität des Materialverhaltens auf, welche in der FEM-Simulation berücksichtigt werden muss. Bei der FEM-Simulation ist vor allem der nichtlineare Zusammenhang zwischen dem Materialverhalten und den Freiheitsgraden wichtig, da dies einen iterativen Lösungsansatz und damit einen erhöhten Rechenaufwand erfordert. Für eine FEM-Berechnung des Silikonkautschuk-Drucktampons gibt es Materialmodelle wie z.B. Mooney-Rivlin- und Polynomial-Modell, diese sind in Abschnitt 2.4.2 beschrieben.

## 4.2 Mechanische Materialprüfverfahren für Silikonkautschuk

Die Auswahl der richtigen Prüfverfahren mit den richtigen Proben für den Silikonkautschuk (Drucktamponmaterial) spart viel Zeit bei der Charakterisierung des Materialverhaltens (Wagner, 2017). Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, werden Drucktampons aus Silikonkautschuk hergestellt, der mit Silikonöl gemischt wird, um eine passende Shore A Härte zu erreichen. Durch diese Mischung erhält der Drucktampon unterschiedliche mechanische Eigenschaften. Neben dem bekannten Wert der Shore A Härte des Materials ist es notwendig, auch die anderen mechanischen Eigenschaften von Silikonkautschuk zu bestimmen, um Konstanten der Formänderungsenergie-Funktion (Materialkonstanten) zu bestimmen (Al Aboud et al, 2020). Die mechanischen Eigenschaften dieses Drucktamponmaterials wurden durch mechanische Prüfverfahren ermittelt, die in einem klimatisierten Raum bei einer Temperatur von  $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Luftfeuchtigkeit von  $50 \pm 5 \text{ } \%$  durchgeführt wurden. Für die Versuchsdurchführung wurde eine Materialprüfmaschine mit PC-Kopplung genutzt, nämlich die Prüfmaschine Zwick Z050. In Abschnitt 4.3 werden die Prüfbedingungen beschrieben.

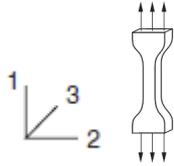
Im Allgemeinen können für die in Abaqus verfügbaren hyperelastischen Materialmodelle die Materialkonstanten entweder direkt angegeben werden oder es können experimentelle Messergebnisse (Spannungs-Dehnungs-Werte) ermittelt und von Abaqus daraus automatisch die Materialkonstanten bestimmt werden. Die Eigenschaften von gummiartigen Materialien können von einer Charge zur anderen stark variieren; daher sollten, wenn Daten aus mehreren Experimenten benutzt werden, alle Experimente an Proben aus derselben Charge durchgeführt werden (Simulia, 2014). Die Berechnung der Materialkonstanten wird in Abschnitt 5.3.2 detailliert beschrieben. Die Materialkonstanten werden durch die kleinste Fehlerquadrate  $E$  bestimmt. Gleichung (4-1) zeigt die Berechnung der kleinsten Fehlerquadrate (Simulia, 2014).

$$E = \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{T_i^{th}}{T_i^{test}}\right)^2 \quad (4-1)$$

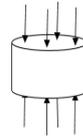
$E$  ist das relative Fehlermaß,  $T_i^{test}$  ist ein Spannungswert aus den Testdaten und  $T_i^{th}$  ergibt sich aus einem der im Folgenden abgeleiteten nominalen Spannungsausdrücke (Simulia, 2014).

Im Folgenden werden die geeigneten Prüfverfahren zur Untersuchung des Materialmodells beschrieben. Sie sind in Abbildung 4-1 dargestellt. Für ein homogenes, isotropes Material reichen die Prüfdaten aus den folgenden Prüfverfahren aus, um die Materialkonstanten zu charakterisieren (Simulia, 2014).

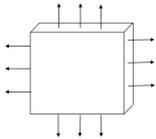
- Einachsige Zug- und Druckbelastung
- Äquibiaxiale Zugspannung und einachsige Kompression
- Planare Zugspannung und Kompression (auch als reine Scherung bezeichnet)
- Volumetrische Zugspannung und Kompression



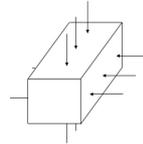
einachsige Zugspannung  $\lambda_1 = \lambda_u = 1 + \varepsilon_u$



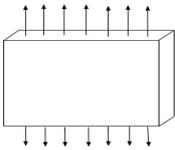
einachsige Kompression  $\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\lambda_u$



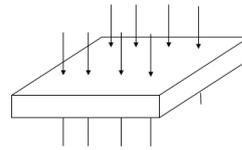
biaxiale Zugspannung  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_B = 1 + \varepsilon_B$



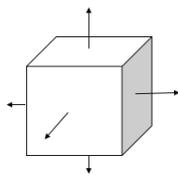
biaxiale Pressung  $\lambda_3 = 1/\lambda_B^2$



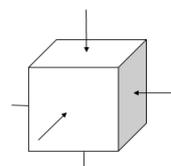
planare Zugspannung  $\lambda_1 = \lambda_5 = 1 + \varepsilon_5$



planare Kompression  $\lambda_2 = 1; \lambda_3 = 1/\lambda_5$



volumetrische Zugspannung  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_V$



volumetrische Kompression  $\frac{V}{V_0} = \lambda_V$

**Abbildung 4-1: Prüfverfahren und Spannungszustände zur Untersuchung und Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials nach (Simulia, 2014).**

Bei hyperelastischen Materialien können einfache mechanische Prüfverfahren (einachsiger Zugversuch, planarer Zugversuch und der einachsige Druckversuch) verwendet werden, um die Materialkonstanten zu

charakterisieren. Die Kombination von mehreren Tests verbessert die Charakterisierung des hyperelastischen Materialverhaltens. Obwohl es acht verschiedene mechanische Prüfverfahren gibt, wird festgestellt, dass nach der Annahme der Inkompressibilität die folgenden Prüfverfahren identisch werden (Simulia, 2014; Steinmann et al, 2012):

- Einachsige Spannung und äquibiaxiale Kompression
- Äquibiaxiale Zugspannung und einachsige Kompression
- Planare Zugspannung und planare Kompression

In dieser Arbeit werden die Materialkonstanten mit diesen drei Prüfverfahren und den komplexen Prüfverfahren (biaxialer Zugversuch, volumetrischer Druckversuch und die Bestimmung der Querkontraktionszahl) charakterisiert und anschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Der Projektpartner Tampo-Technik GmbH ist ein Drucktamponhersteller und hat die Probekörper aus demselben Material und mit demselben Verfahren wie bei der Drucktamponherstellung hergestellt, um sicher zu gehen, dass sie die gleichen Eigenschaften aufweisen. Zunächst wird der einachsige Zugversuch beschrieben.

#### 4.2.1 Einachsiger Zugversuch

Im einachsigen Zugversuch werden die Silikonkautschukproben in eine Richtung belastet und entlastet, um die Spannungs-Dehnungseigenschaften von vulkanisierten Silikonkautschuken zu bestimmen. Für diesen Versuch werden die Parameter des einachsigen Zugversuchs nach den Standardnormen ISO 37, DIN 53504 und ASTM 412 ausgewählt (ASTM D412, 2016; ISO 37, 2017; DIN 53504, 2017). Im physikalischen einachsigen Zugversuch werden kontinuierlich die Zugkraft und die Testlänge an der Probe gemessen und daraus die Spannung und die Dehnung berechnet (ISO 37, 2017). Die Dehnung kann durch den Traversenweg der Materialprüfmaschine oder durch einen indirekten Dehnungsaufnehmer (Videoextensometer) ermittelt werden. Die Ermittlung der Probendehnung anhand des Traversenweges für das Silikonkautschukmaterial wird durch die Verformung der Radien (E und F in Abbildung 4-2) der Zugprobe verfälscht. Deshalb wird die Probendehnung anhand eines Videoextensometers gemessen, das berührungslos Längsdehnung und Querdehnung der Zugproben misst (Shinoda & Bathurst, 2004). Die Formen der Zugproben nach ISO 37 (2017) und ihre Dimensionen sind in Abbildung 4-2 und Tabelle 4-1 dargestellt. Für die Durchführung des einachsigen Zugversuchs wird die Probe Typ 1 verwendet. Die Standarddicke dieser Zugprobe beträgt  $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ . Um die Ergebnisse des einachsigen Zugversuchs mit den Ergebnissen des biaxialen und des planaren Zugversuchs kompatibel zu halten, werden die Proben mit einer Dicke von  $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$  für diese drei Materialprüfverfahren verwendet. Ein weiterer Grund für diese Auswahl ist die einfache Vorbereitung der Probekörper. Nach dem Mischen von Silikonkautschuk mit Silikonöl steigt die Viskosität dieser Mischung an, so dass kleine und sehr dünne Proben (unter 1 mm) nicht gegossen werden können. Die kleinen und dünnen Zugproben reißen auch an der Zugmaschine ab, bevor die maximale Dehnung erreicht ist. Der Abstand zwischen den zwei Referenzlinien wird als Testlänge bezeichnet. Die Zugprobe wird am Probenhalter der Materialprüfmaschine eingeklemmt und es muss beachtet werden, dass die Endlaschen der Zugprobe symmetrisch eingespannt sind, damit die Zugspannung gleichmäßig über den Querschnitt der Zugprobe verteilt wird. Die Prüfmaschine wird mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von 150 mm/min gestartet. Jede Zugprobe wird dreimal auf verschiedene Laststufen belastet und entlastet, für eine FEM-Simulation mit Abaqus wird nur das Spannungs-Dehnungs-Diagramm während der Belastung aus allen Materialprüfverfahren verwendet. Die Entlastungskurve kann einige zusätzliche Informationen über das Materialverhalten liefern, wie z. B. Hysterese und Mullins-Effekt (Kahraman et al, 2010).

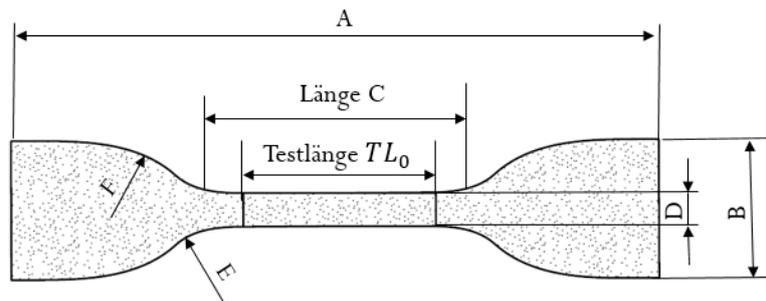


Abbildung 4-2: Allgemeine Form der Zugproben, die Abmessungen der Zugproben nach ISO 37 (2017) sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Die Dimensionen der Probe sind grafisch dargestellt.

Tabelle 4-1: Abmessungen der einachsigen Zugproben nach ISO 37 (2017).

Abmessungen in mm	Typ 1	Typ 1A	Typ 2	Typ 3	Typ 4
A gesamte Probenlänge	115	100	75	50	35
TL Testlänge	$25 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$
B Endlaschenbreite	$25 \pm 1$	$25 \pm 1$	$12,5 \pm 1$	$8,5 \pm 0,5$	$6 \pm 0,5$
C Länge des schmalen Bereichs	$33 \pm 2$	$21 \pm 1$	$25 \pm 1$	$16 \pm 1$	$12 \pm 0,5$
D Breite des schmalen Bereichs	$6,2 \pm 0,2$	$5 \pm 0,1$	$4 \pm 0,1$	$4 \pm 0,1$	$2 \pm 0,1$
E Übergangsradius außen	$14 \pm 1$	$11 \pm 1$	$8 \pm 0,5$	$7,5 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
F Übergangsradius innen	$25 \pm 2$	$25 \pm 2$	$12,5 \pm 1$	$10 \pm 0,5$	$3 \pm 0,1$
Dicke der Zugprobe	$2 \pm 0,2$	$1 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$	$1 \pm 0,2$

Nach dem Gießen des Silikonkautschukmaterials in Formen zur Herstellung der Proben müssen die Zugproben mindestens 16 Stunden auf Raumtemperatur gelagert werden und die maximale Wartezeit zwischen der Vulkanisation und der Zugprüfung liegt bei 4 Wochen, das gilt auch für alle Proben der Materialprüfverfahren (ISO 37, 2017).

Der einachsige Zugversuch zeigt das Materialverhalten unter einachsigem Spannungszustand, für den dreiachsigen Spannungszustand reicht dies nicht aus, daher wird der biaxiale Zugversuch benötigt.

#### 4.2.2 Biaxialer Zugversuch

Im biaxialen Zugversuch werden die Silikonkautschukproben in zwei Richtungen belastet und entlastet, um die biaxialen Spannungs-Dehnungs-Diagramme des vulkanisierten Silikonkautschuks zu bestimmen (BS 903-5, 2004; ISO 16842, 2014; Nasdala & Husni, 2020). Die in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Materialprüfmaschine kann die Proben nur in vertikaler Richtung ziehen, daher wurde vom Autor ein spezieller Prüfstand (siehe Abbildung 4-3) entwickelt, der die Prüfung des Silikonkautschuks unter biaxialer Zugspannung ermöglicht.

Der Prüfstand wurde nach dem British Standard BS 903-5 (2004) konstruiert und er besteht aus einem oberen und einem unteren Rahmen und vier Gleit-Spannbacken. Die Messung erfolgt bei den in Abschnitt 4.3 definierten Bedingungen, indem die biaxialen Zugkräfte und Dehnungskomponenten, die auf die Messfläche einer kreuzförmigen Probe einwirken, gleichzeitig und kontinuierlich gemessen werden. Die Proben wurden mit Gleit-Spannbacken an jeder Seite der Probe eingespannt. Die Gleit-Spannbacken können sich während des Tests frei entlang der Länge des Rahmens bewegen, dadurch wird eine nahezu gleichmäßige biaxiale Dehnung der Proben gewährleistet. Zur Reduzierung der Reibung sind die Gleit-Spannbacken mit kleinen Lagern am Rahmen gelagert. Die Versuche werden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min mit einer Vertikalverschiebung von 30 mm durchgeführt, wodurch eine Dehnung von 25 % in den Streckrichtungen erreicht wird. Jede Probe wird dreimal stufenweise belastet und entlastet, um die Wiederholbarkeit zu prüfen. Die Wiederholbarkeit ist die Streuung aufgrund des Prüfstands (Jungh et al., 2017). Diese Streuung wird beobachtet, wenn derselbe Prüfer dieselbe Probe mehrmals mit demselben Prüfstand und unter denselben Bedingungen (Lagerung der Probe für mindestens 16 Stunden vor der Messung bei einer Raumtemperatur und einer Luftfeuchtigkeit von 50 %) misst.

Mit dem Videoextensometer werden die biaxialen Dehnungen ( $\varepsilon_X$ ,  $\varepsilon_Y$ ) bestimmt. Abbildung 4-4 zeigt die Dehnungen in X und Y Richtungen, bestimmt mit dem Videoextensometer, aufgetragen über den Frames (je 50 Frames entsprechen hier einer Sekunde). Die erste Piola-Kirchhoff Spannungen  $\sigma_b$  werden aus den biaxialen Kräften  $F_X = \frac{F}{\sqrt{2}}$  und  $F_Y = \frac{F}{\sqrt{2}}$  berechnet. In diesem Fall haben die Zugkräfte in beiden Richtungen den gleichen Wert, deshalb wird dieser Versuch auch als äquibiaxialer Zugversuch bezeichnet. Hier ist  $\sigma_b = \frac{\sqrt{2}F_X}{e.L}$ , dabei e die Dicke der biaxialen Zugprobe (beträgt in diesem Fall 2 mm  $\pm$  0,2 mm) ist und L die Länge zwischen A und B in Abbildung 4-3c (Chevalier and Marco, 2002).

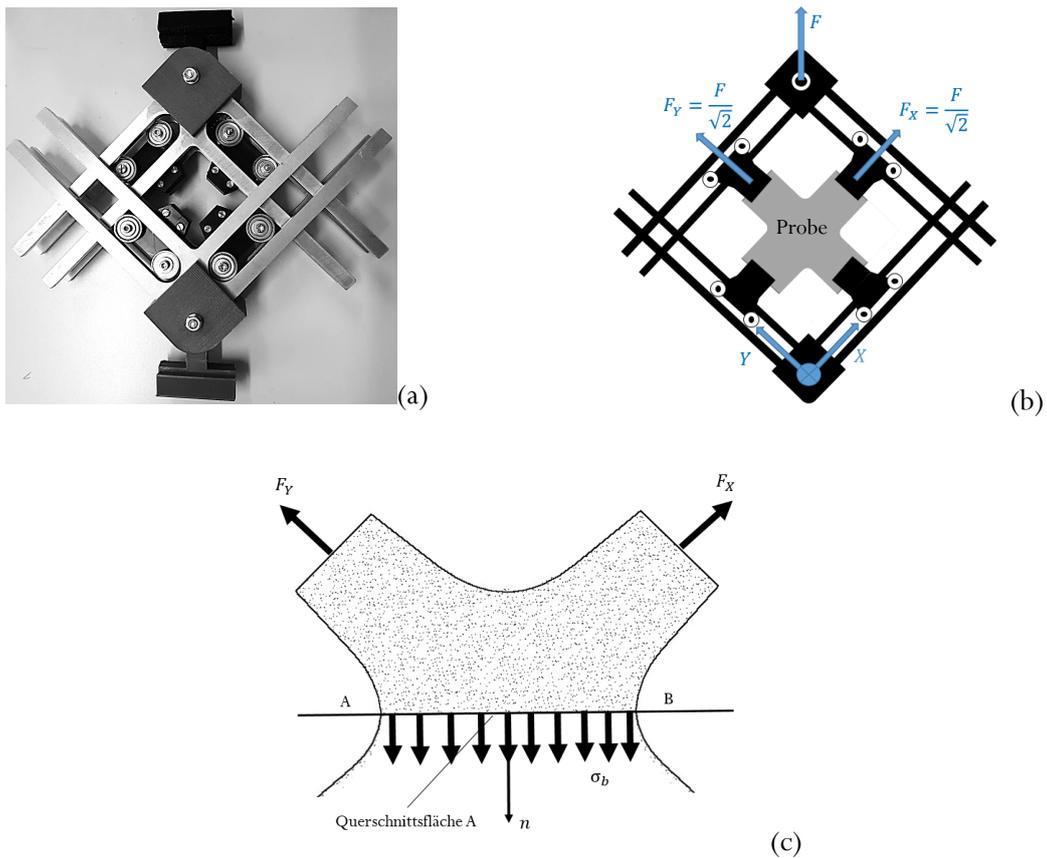


Abbildung 4-3: Der Prüfstand für den biaxialen Zugversuch (a). Die auf die biaxiale Zugprobe wirkenden Kräfte nach der Belastung (b). Die biaxiale Zugspannung mit den einwirkenden Kräften auf die obere Hälfte der biaxialen Zugprobe nach Chevalier und Marco (Chevalier and Marco, 2002) ist in (c) dargestellt.

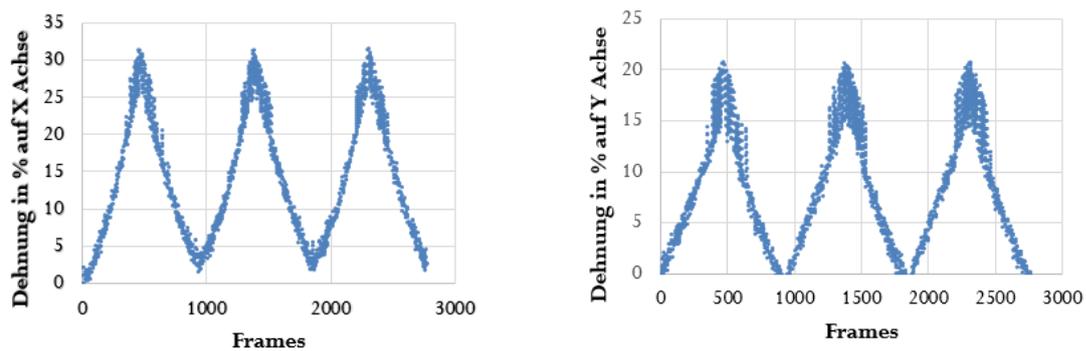
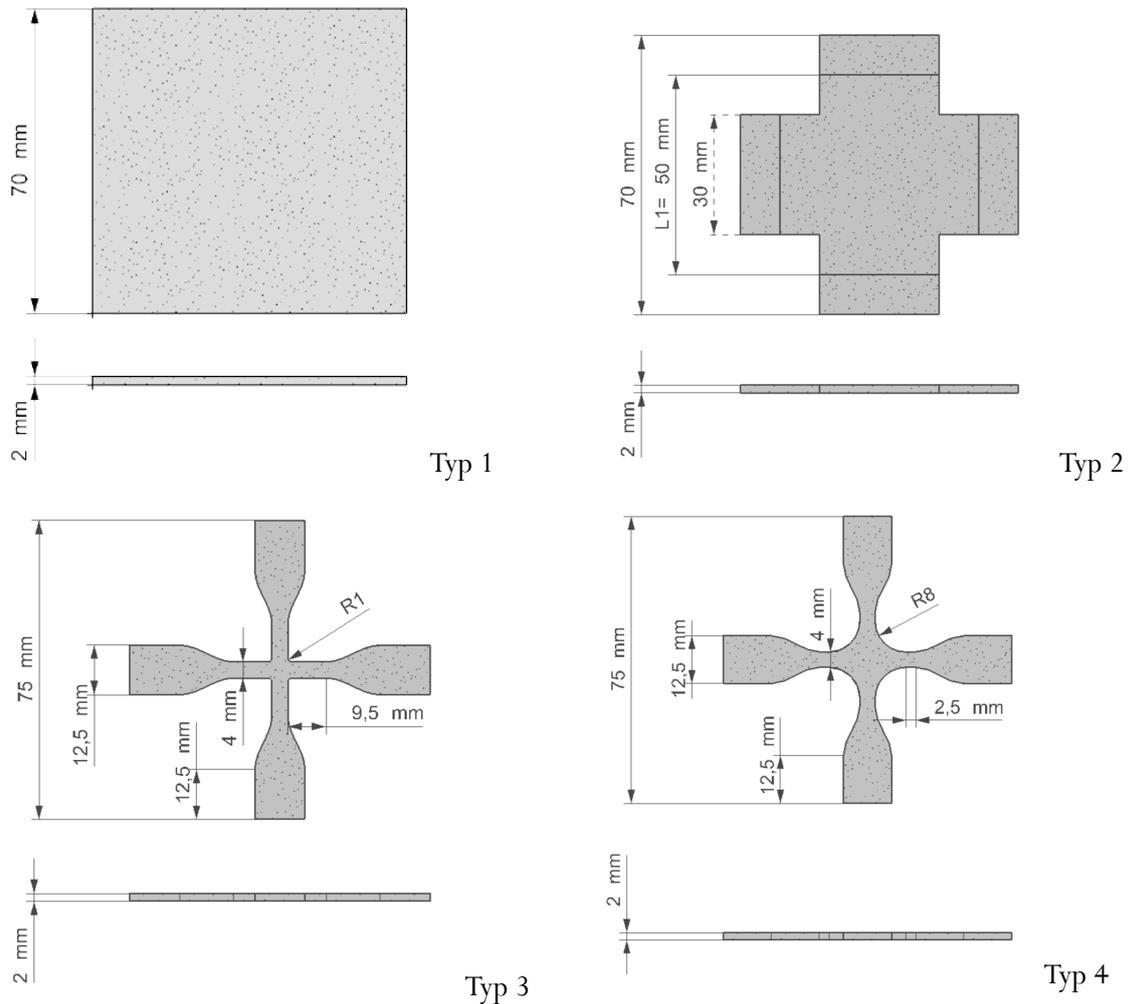


Abbildung 4-4: Dehnungen, bestimmt mit dem Videoextensometer, in % auf X und Y-Achsen. Jede Probe wird dreimal stufenweise belastet und entlastet. 50 Frames entsprechen einer Sekunde.

Die Formen der biaxialen Zugproben Typ (1), (2), (3) und (4) wurden nach Schubert und Harrison (2015) und nach Seibert et al. (2014) ausgewählt. Die Formen der biaxialen Zugprobe und ihre Dimensionen werden in Abbildung 4-5 beschrieben.



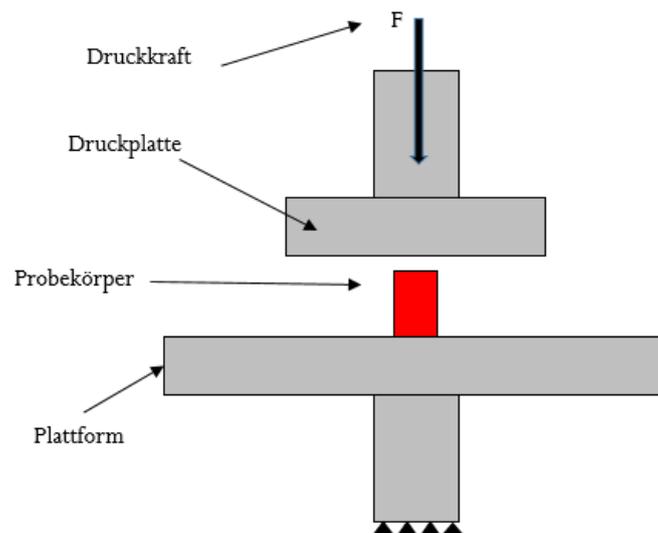
**Abbildung 4-5: Formen der biaxialen Zugproben: Typ 1 und Typ 2 sind nach Schubert und Harrison (2015) und Typ 3 und 4 nach Seibert et al. (2014) dargestellt. Die Dimensionen der Proben sind grafisch dargestellt.**

Die Methode mit dem Probekörper Typ 1 wurde für den biaxialen Zugversuch ausgewählt, weil die andern drei Typen reißen schnell ab, bevor die maximale Belastung erreicht wird. Bei dieser Methode ist auch der Einfluss des Eigengewichts der Gleit-Spannbacken sehr gering. Die Materialkonstanten werden in Abaqus aus den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen aus allen Materialprüfverfahren bestimmt. Das wird ausführlich in Abschnitt 5.3.2 beschrieben. Wie vorher am Ende von Abschnitt 4.2 erwähnt wurde, ist die äquibiaxiale Zugspannung identisch mit der einachsigen Kompression, deshalb kann statt des äquibiaxialen

Zugversuchs der Druckversuch durchgeführt werden. In dieser Dissertation werden beide Tests durchgeführt, um den Einfluss auf die Bestimmung der Materialkonstanten zu untersuchen.

#### 4.2.3 Einachsiger Druckversuch

Bei dem einachsigen Druckversuch wird eine Silikonkautschuk-Zylinderprobe auf der unteren Platte (Plattform) platziert, während die obere Druckplatte die Probe bis zu einer Dehnung (Druckbelastung) von 55% der Probenhöhe belastet und wieder entlastet (Abbildung 4-6). Der einachsige Druckversuch wird nach ISO 7743 (2017) und ASTM D575-91 (2012) durchgeführt. Die Formen der Proben werden nach ISO 7743 hergestellt. Der Probekörper vom Typ 1 ist ein Zylinder mit einem Durchmesser von  $29 \pm 0,5$  mm bei einer Höhe von  $12,5 \pm 0,5$  mm und der Probekörper vom Typ 2 hat einen Durchmesser von  $17,8 \pm 0,15$  mm bei einer Höhe von  $25 \pm 0,25$  mm.



**Abbildung 4-6: Der einachsige Druckversuch. Hier sind die Platten und der Probekörper dargestellt. Die untere Platte wird als Plattform bezeichnet.**

Die Durchführung der Prüfmethode mit dem Probekörper Typ 1 und 2 ist gleich, aber die Vorbereitung des Probekörpers ist unterschiedlich. Für beiden Typen muss der Probekörper mittig in der Materialprüfmaschine platziert werden (ISO 7743, 2017). Die Reibungskräfte bei Typ 1 sind nicht vernachlässigbar und hindern die radiale Dehnung des Probenkörpers, deshalb muss die Unterseite der Druckplatte in diesem Fall geschmiert werden (ISO 7743, 2017). Das Schmiermittel darf keine

Schrumpfung des Probekörpers verursachen, deshalb soll ein silikonkautschukkompatibles Schmiermittel verwendet werden. Dies ist sehr aufwändig, deshalb wird hier Typ 2 für die Druckführung des einachsigen Druckversuchs ausgewählt. In diesem Fall wird nach ISO 7743 (2017) kein Schmiermittel gebraucht.

Der Druckversuch wird auch an der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Materialprüfmaschine durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 10 mm/min bei der Belastung und Entlastung (ISO 7743, 2017). Wie in allen andern Prüfverfahren müssen auch hier drei Probekörper geprüft werden und jeder Probekörper wird stufenweise mit drei Zyklen bis eine maximale Dehnung von 55% der Probenhöhe be- und entlastet.

Die Ergebnisse des Druckversuchs sind Druckspannungs-Dehnungs-Diagramme (siehe Abschnitt 4.4.2), die später in Abschnitt 5.3.2 zur Bestimmung der Materialkonstanten verwendet werden. Druckspannung: Spannung, die so aufgebracht wird, dass sie eine Verformung des Probekörpers in Richtung der aufgebrachten Spannung bewirkt. Die Druckspannung wird berechnet, als die Kraft geteilt durch die ursprüngliche Querschnittsfläche des Probekörpers. Die Dehnung wird als die Verformung des Probekörpers in Richtung der aufgebrachten Spannung durch die ursprüngliche Höhe in diese Richtung berechnet (ISO 7743, 2017). Neben den bisherigen mechanischen Materialprüfverfahren ist der planare Zugversuch zur Bestimmung der Materialkonstanten erforderlich. Im nächsten Abschnitt wird der planare Zugversuch erläutert.

#### **4.2.4 Planarer Zugversuch**

Der planare Zugversuch ist so konzipiert, dass die Probe in einem ebenen Deformationszustand geprüft wird (Brown, 2006). Die Planar-Zugprobe ist eine dünne Probe mit einer Breite, die deutlich größer ist als die Länge in Zugrichtung (siehe Abbildung 4-7a). Die Geometrie der Planar-Zugproben Typ 1 wurde nach Palmieri et al (2009) hergestellt. Die zweite Form der Planar-Zugprobe wurde nach Moreira und Nunes (2013) konstruiert. Abbildung 4-7 zeigt die Formen der Planar-Zugproben Typ 1 und 2 mit ihren Hauptmaßen. Für den planaren Zugversuch wurde die Probe Typ 1 ausgewählt, weil sie von der Breite her an den Probenhalter der Materialprüfmaschine passt (siehe Abschnitt 4.3.1). Die Planar-Zugprobe wird an den Spannbacken eingeklemmt und von der Unterseite gezogen (siehe Abbildung 4-7a).

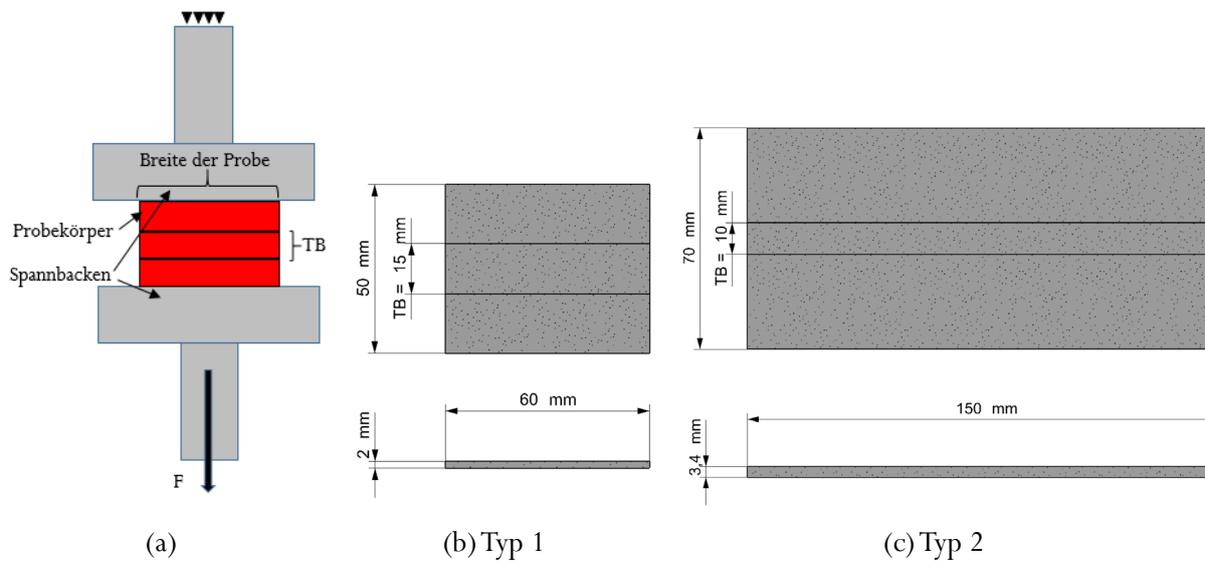


Abbildung 4-7: Der planare Zugversuch (a). Formen der Planar-Zugproben Typ 1 (a) nach Palmieri et al (2009) und Typ 2 (c) nach Moreira und Nunes (2013). Die Dimensionen der Proben und die Prüfbreite sind grafisch dargestellt.

Da die Planar-Zugproben bei einer Spannkraft von 1000 N aus den metallischen Spannbacken herausrutschen, wurden geeignete verzahnte Spannbacken aus PLA entwickelt, die in Abschnitt 4.3.1 ausführlich beschrieben werden (Abbildung 4-12). Die Testbreite TB in Typ 1 beträgt  $15 \pm 0.5 \text{ mm}$ . An der Materialprüfmaschine wurde Prüfgeschwindigkeit während der Be- und Entlastung auf 10 mm/min eingestellt. Wie bei den anderen Materialprüfverfahren wurden auch hier drei Proben für jede Shore A Härte getestet und daraus wurde das durchschnittliche Messergebnis berechnet.

Aus den letzten vier dargestellten mechanischen Materialprüfverfahren ist es möglich, die Materialkonstanten für die FEM-Simulation in Abaqus zu berechnen, wenn davon ausgegangen wird, dass der Silikonkautschuk inkompressibel ist und die Poisson-Zahl 0,5 beträgt (Simulia, 2014). Um festzustellen, ob das Material inkompressibel ist, wurde der volumetrische Test durchgeführt. Im nächsten Abschnitt wird der volumetrische Druckversuch erläutert.

#### 4.2.5 Volumetrischer Druckversuch

In vielen FEM-Simulationen der Silikonkautschuke (hyperelastische Materialien) wird davon ausgegangen, dass Silikonkautschukmaterialien nahezu inkompressibel sind. Das Kompressionsmodul (Bulkmodul) wird dann als ein konstanter Wert angegeben. In der Realität ist diese Annahme nicht ganz richtig (Gehrmann et al, 2017). In dieser Dissertation wird der volumetrische Druckversuch an dem Silikonkautschukmaterial durchgeführt, um das Bulkmodul zu bestimmen. Das Bulkmodul eines Materials beschreibt das volumetrische Deformationsverhalten eines Materials und ist wichtig, wenn hohe hydrostatische Drücke vorhanden sind. Die Messung der Poisson-Zahl von nahezu inkompressiblen Materialien ist schwierig und das Bulkmodul liefert die gleichen Daten (Brown, 2006; Gehrmann et al, 2017). Um diesen Test an der Materialprüfmaschine zu ermöglichen, wurde ein Zylinder mit einem passenden Kolben konstruiert. Abbildung 4-8 zeigt den Prüfstand für den volumetrischen Druckversuch. Die Probe ist ein Zylinder aus Silikonkautschuk mit einem Durchmesser von  $17,8 \pm 0,15$  mm und einer Höhe von  $25 \pm 0,25$  mm. Die Proben wurden nach ISO 7743 (2017) hergestellt. In diesem Versuch drückt der Kolben die zylindrische Probe in einem steifen Zylinder zusammen. Der Stahlzylinder verhindert die freie radiale Ausdehnung der Probe, die bei einem einachsigen Druckversuch auftritt. Der Kolben drückt die zylindrische Probe mit einer Geschwindigkeit von 0,05 mm/s in den Stahlzylinder, bis eine maximale Kraft von 5,3 kN erreicht wird. Das Bulkmodul  $B$  wird anhand der angewandten Belastungen und der gemessenen Dehnungen berechnet (siehe Gleichung 4-2) (Gehrmann et al, 2017; Mott et al, 2008).

$$B = -V \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (4-2)$$

$\Delta P$  ist die Druckdifferenz (vor und nach der Belastung) in MPa,  $V$  ist das ursprüngliche Volumen und  $\Delta V$  ist die Volumenänderung in  $\text{mm}^3$ .

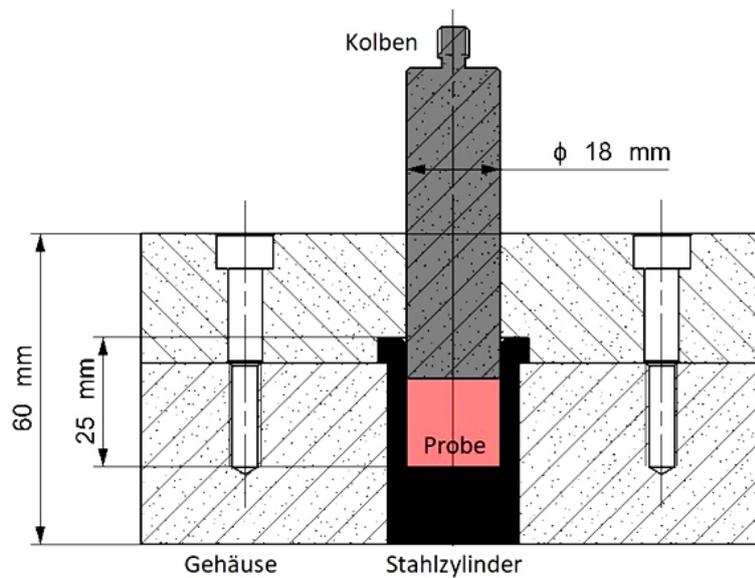


Abbildung 4-8: Prüfstand des volumetrischen Druckversuchs. Die wichtigsten Dimensionen des Prüfstands sind in der Abbildung grafisch dargestellt.

#### 4.2.6 Zugversuch zur Bestimmung der Querkontraktionszahl

Die Poisson-Zahl kann über den Zugversuch an der Materialprüfmaschine ermittelt werden. Sie ist der absolute Wert des Verhältnisses der Querdehnung zur entsprechenden axialen Dehnung, die aus einer gleichmäßig verteilten axialen Zugspannung resultiert (ASTM D638, 2014). Die Zugprobe wurde nach ASTM D638 (2014) hergestellt und ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Sie wird am Probenhalter eingespannt und gleichmäßig gezogen, so dass sie während der Prüfung nicht verrutschen kann. Sie wird mit einer geringen Vorlast von 5 N belastet. Der Test wird mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min durchgeführt, dabei werden gleichzeitig die Dehnungswerte in Quer- und Längsrichtung mit einem Videoextensometer aufgezeichnet. Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Poisson-Zahl hängt von der Anzahl der gemessenen Datenpunkte ab. Es wird empfohlen, dass die Datenerfassungsrate für die Prüfung mindestens 20 Punkte pro Sekunde ist (ASTM D638, 2014).

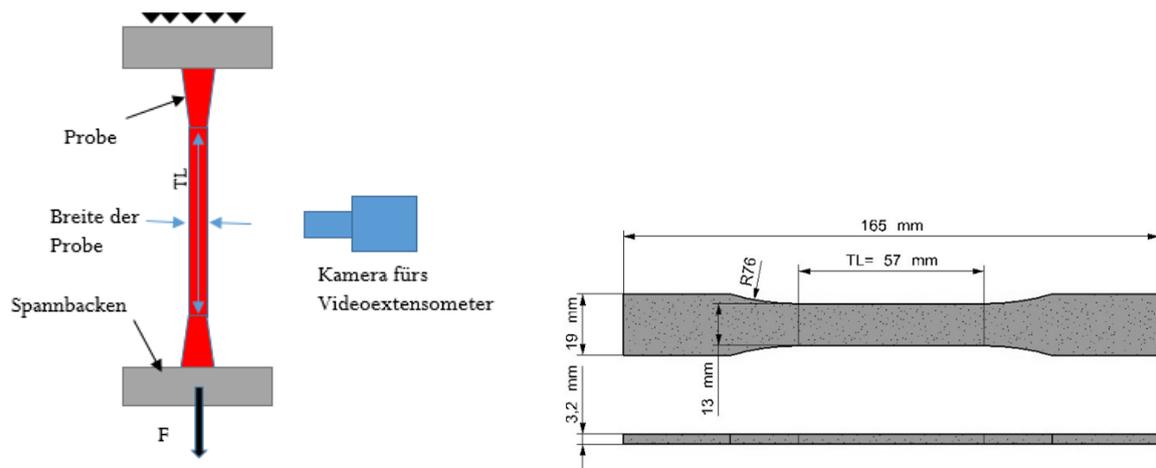


Abbildung 4-9: Auf der linken Seite ist der Zugversuch mit dem Zubehör skizziert. Auf der rechten Seite ist die Geometrie der Zugprobe zur Bestimmung der Poisson-Zahl nach ASTM D638 (2014). Die Dimensionen der Zugprobe sind grafisch dargestellt.

Das Verhältnis zwischen dem Bulk- und dem Schermodul  $B/G$  wird unendlich, wenn die Poisson-Zahl den Wert  $\nu = 0,5$  erreicht und es wird oft angenommen, dass das Bulkmodul sehr groß wird, wenn ein Material nahezu inkompressibel ist. Das Verhältnis zwischen dem Schermodul und dem Bulkmodul wird in der folgenden Gleichung angegeben (Mott et al, 2008).

$$\frac{G}{B} = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \quad (4-3)$$

Hier ist  $G$  das Schermodul,  $B$  ist das Bulkmodul und  $\nu$  ist die Poisson-Zahl.

Für ein inkompressibles Silikonkautschukmaterial ist das Schermodul mit den Mooney-Rivlin-Konstanten in Gleichung (4-4) gegeben (Jerrams & Bowen, 1970).

$$G = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (4-4)$$

$C_{10}$  und  $C_{01}$  sind die ersten zwei Mooney-Rivlin-Konstanten (siehe Abschnitt 2.4.2 und Gleichung 2-22).

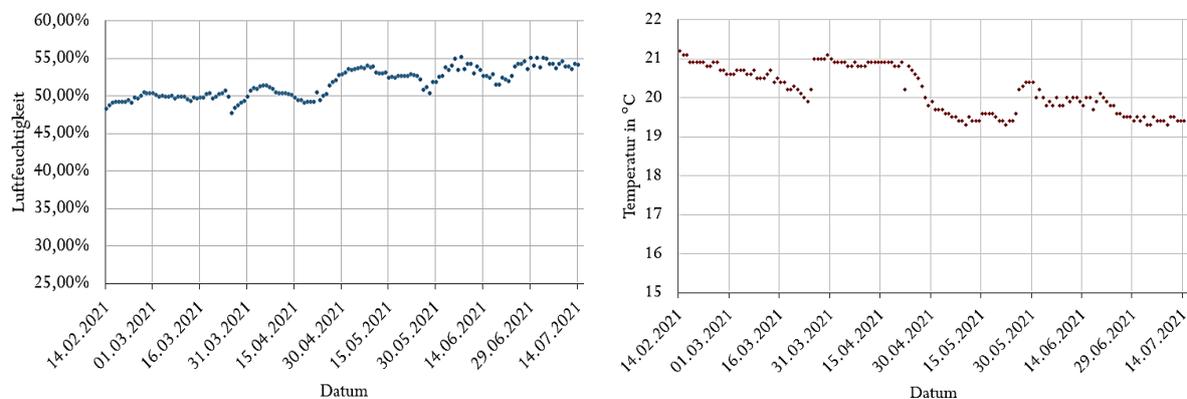
Wird Gleichung (4-4) in Gleichung (4-3) eingesetzt, ergibt sich das Bulkmodul in Abhängigkeit von den Mooney-Rivlin-Konstanten.

$$B = \frac{4(C_{10} + C_{01})(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} \quad (4-5)$$

Für die FEM-Simulationen in Salome-Meca und Abaqus wird zusätzlich zu den vorangegangenen mechanischen Materialprüfverfahren entweder die Poisson-Zahl oder das Bulkmodul benötigt. Zunächst wird der Messaufbau für alle in Kapitel 4.2 erläuterten Materialprüfverfahren erklärt.

### 4.3 Messaufbau

In diesem Teil werden die Prüfumgebung, die Prüfmaschine mit ihrem Zubehör und die Vorbereitung der Silikonkautschukproben beschrieben. Alle mechanischen Prüfungen wurden in einem klimatisierten Raum im Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren bei einer Temperatur von  $21 \pm 2 \text{ °C}$  und einer Luftfeuchtigkeit von  $50 \pm 5 \text{ %}$  nach ISO ASTM D1349 (2014), BSI 903-5 (2004) und ASTM D624 (2012) durchgeführt. Abbildung 4-10 zeigt die aufgezeichneten Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten von Februar bis Juli 2021, in diesem Zeitraum erfolgten alle mechanischen Materialprüfungen für diese Dissertation.



**Abbildung 4-10: Mittlere Messwerte pro Tag der Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Klimabilabor. Die Messwerte zeigen, dass die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit während der Versuche im Normbereich liegen.**

#### 4.3.1 Materialprüfmaschine

Alle mechanischen Versuche wurden mit der Universalprüfmaschine Zwick Z050 durchgeführt, die eine maximale Last von 50 kN aufbringen kann (Zwick, o.D.). Die Traversengeschwindigkeit kann zwischen 0,0005 und 2000 mm/min eingestellt werden, mit einer Positionier- und Wiederholgenauigkeit von weniger als  $2 \text{ }\mu\text{m}$  (Zwick, o.D.). Die Materialprüfmaschine ist mit drei verschiedenen Kraftaufnehmern (Kraftsensoren) mit unterschiedlichen Messbereichen (50 N, 1 kN und 30 kN) und einem Wegaufnehmer von Heidenhain mit einer Messgenauigkeit bis  $\pm 0,2 \text{ }\mu\text{m}$  ausgestattet. Abbildung 4-11 zeigt die Materialprüfmaschine Zwick Z050 mit ihrem Zubehör (Kamera für das Videoextensometer 1, 30 kN Kraftsensor 2, 1 kN Kraftsensor 3, Wegaufnehmer 4, 50 N Kraftsensor 5, Druckplatte mit dem Plattform

6, Stahlzylinder mit einem Kolben für den volumetrischen Durchversuch 7, Probenhalter mit metallischen Spannbacken für den planaren und einachsigen Zugversuch 8 und Härtemessgerät 9). Für den volumetrischen Druckversuch wird der Kraftsensor mit einer maximal messbaren Kraft von 30 kN verwendet, da eine Kraft bis 5,3 kN aufgebracht wird. Bei den Zugversuchen wird eine Zugkraft bis 400 N erreicht, daher wird der Kraftsensor mit einer maximal messbaren Kraft von 1 kN verwendet. Die hochpräzisen Kraftsensoren von Zwick sind nicht empfindlich gegenüber störenden Einflüssen wie Querkräfte, Biegemomente, Drehmoment und Temperaturschwankungen, sie sind für Zug-Druck- und Biegeversuche und für zyklische Versuche geeignet (Zwick, 2020). Alle Kraftsensoren von Zwick basieren auf einem rotationssymmetrischen bzw. achsensymmetrischen Konstruktionsprinzip, so dass sie eine hohe Robustheit gegen Querkräfte aufweisen. Die Kalibrierung dieser Kraftsensoren erfolgt nach DIN EN ISO 7500-1 (Zwick, 2020). Der zusätzlich verwendete Wegaufnehmer Heidenhain-Metro MT 2581 verfügt über eine hohe Wiederholgenauigkeit, eine sehr hohe Messgenauigkeit von bis zu  $\pm 0,2 \mu\text{m}$  und eine Ausführung mit reduzierter Messkraft (Zwick, o.D.).

Die von Zwick hergestellten Probenhalter können die metallischen Spannbacken mit bis zu 1 kN zusammenpressen, sie werden für den einachsigen und den planaren Zugversuch verwendet, aber die metallischen Spannbacken beschädigen die dünnen Silikonkautschuk-Proben, deshalb wurden spezielle verzahnte Spannbacken konstruiert und aus Polylactide (PLA) additiv gefertigt (Abbildung 4-12). Die Zahnhöhe der neuen Spannbacken beträgt 2 mm und der Abstand zwischen den Zähnen ist 4 mm. Die neuen Spannbacken konnten die Zugprobe im eingespannten Zustand ohne Beschädigung oder Abrutschen halten (Abbildung 4-12).

Alle Zugversuche werden mit der Videokamera (DAVID HP SLS und Stereo Kamera) in Abbildung 4-11 aufgezeichnet und die Videos anschließend in LabVIEW 2016 eingelesen. Die Testbereiche wurden vorher auf den Zugversuchsproben markiert. LabVIEW führt eine Bilderkennung durch und berechnet den Abstand zwischen den Markierungen in X- und Y-Richtung in Pixeln und verwendet sie zur Berechnung der Dehnungen (Fertig et al., 2017). So werden die Dehnungen berührungslos gemessen. TestXpert ist die Steuerungs- und Prüfsoftware für die Materialprüfmaschine. Alle Prüfeinstellungen (Prüfgeschwindigkeiten, Fahrtrichtung der Traverse bei Zug- und Druckversuchen, Anzahl der Zyklen und Vorspannkraft) werden in TestXpert vorgenommen.

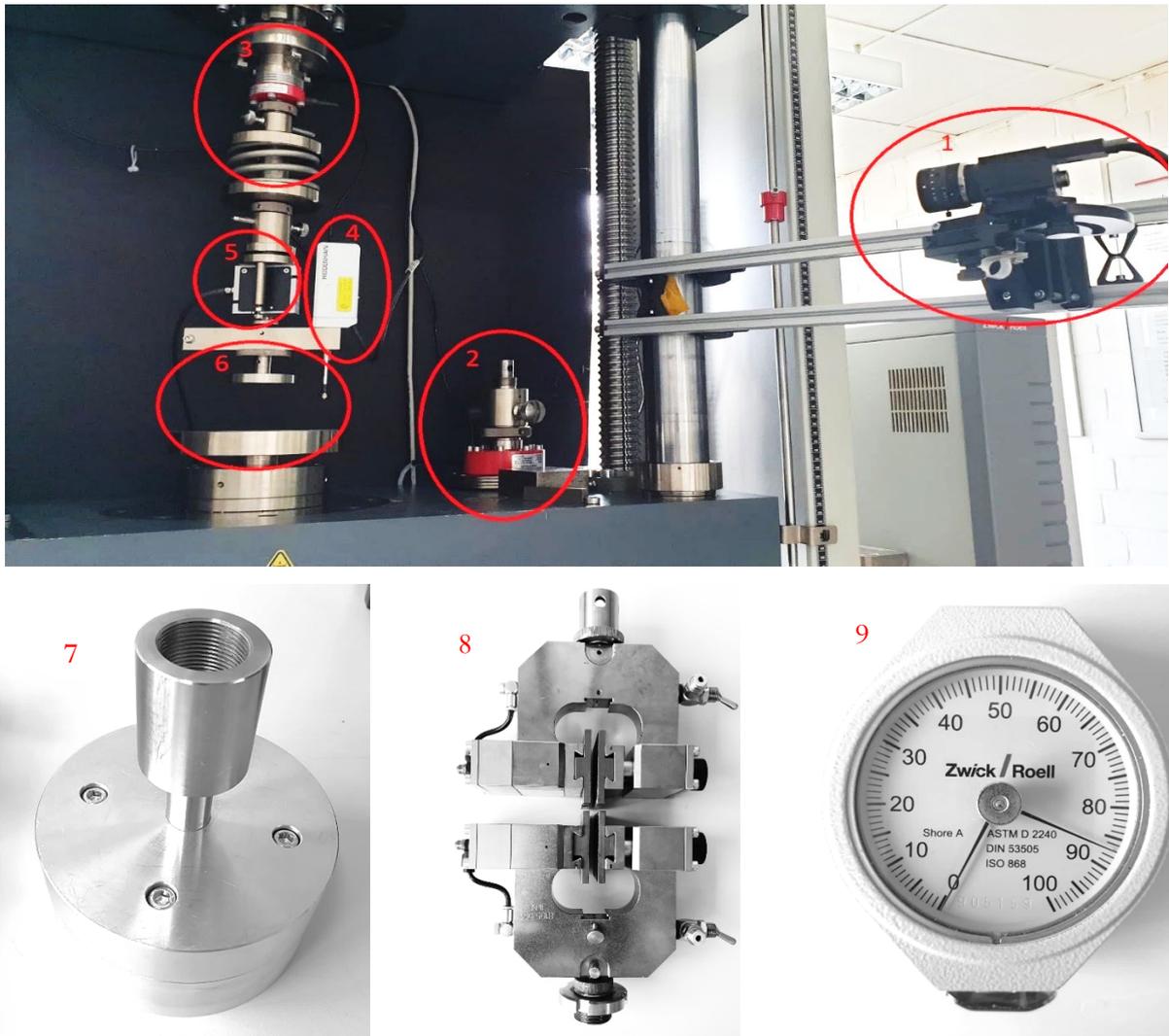


Abbildung 4-11: Zwick-Materialprüfmaschine mit Ihrem Zubehör. (1) Kamera für das Videoextensometer, (2) 30 kN Kraftsensor, (3) 1 kN Kraftsensor, (4) Wegaufnehmer, (5) Kraftsensor mit 50 N maximaler Kraft, (6) Kompressionsplatten, (7) Stahlzylinder mit dem Kolben für den Volumetrischen Druckversuch, (8) Zug-Probenhalter mit metallischen Spannbacken, (9) das Härtemessgerät (Durometer) Typ A.



Abbildung 4-12: Additiv gefertigte verzahnte PLA-Spannbacken für einachsige und planare Zugversuche. Auf der rechten Seite sind die wichtigsten Hauptmaße der Spannbacken dargestellt. Zahnhöhe ist 2 mm.

### 4.3.2 Herstellung der Silikonkautschuk-Proben

Die Probekörper werden durch Gießen von einer Mischung aus Silikonkautschuk und Silikonöl in Negativformen hergestellt. Dies ist ähnlich wie bei der Herstellung des Drucktampons. Die Negativformen wurden mit Siemens NX 12 konstruiert und mit Polyjet- und Stereolithographie-3D-Druckern produziert. Abbildung 4-13 zeigt die CAD-Modelle der Negativformen der Probekörper. Die eingravierten Zahlen bezeichnen die Shore A Härte und die Buchstaben sind für die zugehörige Materialprüfung (P steht für den planaren Zugversuch, U für den einachsigen Zugversuch, K für den Druckversuch und den volumetrischen Druckversuch, B für den biaxialen Zugversuch und Po für den Zugversuch zur Bestimmung der Poisson-Zahl). Neben den flachen Probekörper befindet sich ein kleiner Würfel zur Messung der Shore A Härte nach der Vulkanisation der Probekörper. Die Herstellung der Probekörper wird im Rahmen des ZIM Projektes HASI von der Firma Tampo-Technik durchgeführt, um die Probekörper aus demselben Material und unter den gleichen Bedingungen wie den fertigen Drucktampon herzustellen. Die Probekörper wurden mit Härten von 3 bis 30 Shore A hergestellt, um die Materialkonstanten der Formänderungsenergie-Funktion zu bestimmen.

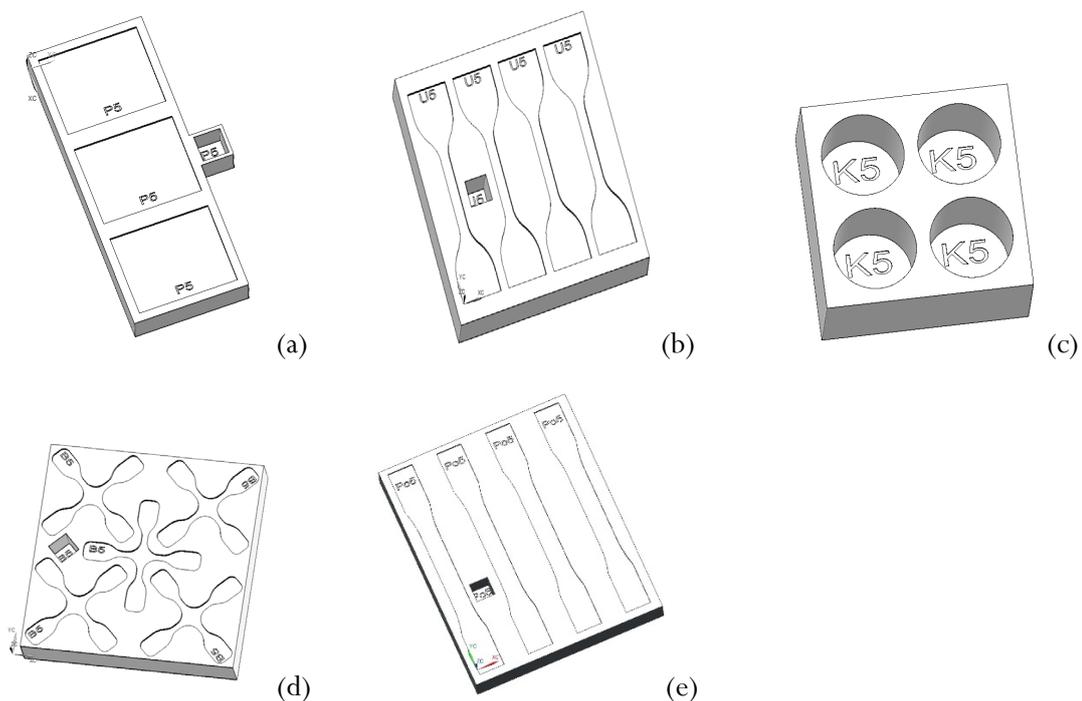


Abbildung 4-13: Darstellung der CAD-Modelle der Negativformen für den planaren Zugversuch (a), den einachsigen Zugversuch (b), den einachsigen Druckversuch und den volumetrischen Druckversuch (c), den biaxialen Zugversuch (d) und den Zugversuch zur Bestimmung der Poisson-Zahl (e).

## 4.4 Ergebnisse der mechanischen Materialprüfverfahren für Silikonkautschuk

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der mechanischen Materialprüfungen vorgestellt.

### 4.4.1 Ergebnisse des Härtemessgeräts zur Verifizierung der Shore A Härte aller Proben

Die Härte der Probekörper wurde nach ASTM D2240 (2015) gemessen, um den Zusammenhang zwischen den Materialkonstanten der Formänderungsenergie-Funktion und der Härte des Materials zu ermitteln und eine Materialtabelle und Kennlinien für die FEM-Simulation erstellen zu können. Das Härtemessverfahren wurde in Abschnitt 2.2.2 beschrieben. Um die Härte eines Probekörpers messen zu können, sollte er eine Dicke von mindestens 6 mm haben (ASTM D2240, 2015). Deshalb wurde ein kleiner Würfel mit einer Kantenlänge von 15 mm zusammen mit den Zugproben gegossen, siehe Abbildung 4-13. Das Härtemessgerät wird an der Materialprüfmaschine befestigt und drückt mit einer geringen Kraft von 10 N auf die Probe (Siehe Abbildung 4-14). Die Shore A Härte der Drucktampons wird auf ähnliche Weise gemessen. Zum Lesen des Härtewerts wird eine Haltezeit von  $2 \pm 0,2$  s benötigt und mit einer Videokamera an der Materialprüfmaschine werden die Messwerte aufgezeichnet.

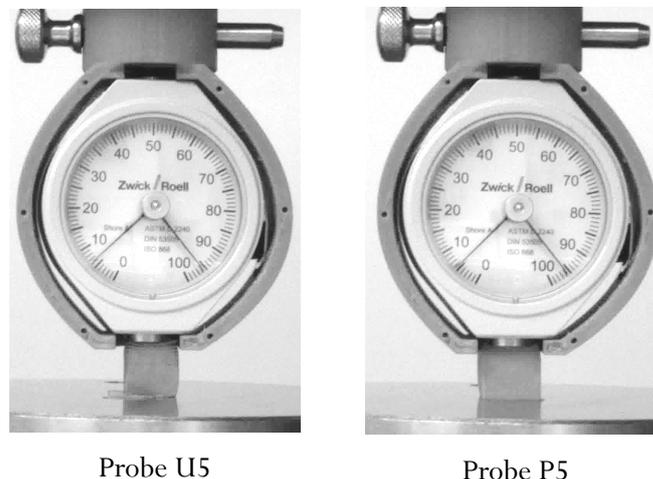


Abbildung4-14: Messen der Shore A Härte. Auf der linken Seite ist die Messung der Shore A Härte für das Material der einachsigen Zugprobe U5 und auf der rechten Seite für das Material der planaren Zugprobe P5.

Zur Verifizierung der Shore A Härte von Probekörpern wird die Härte von allen Probekörpern für jeden gewünschten Härtegrad gemessen. Tabelle 4-2 zeigt den Vergleich zwischen den gewünschten und den gemessenen Shore A Härten. Die gewünschte Härte ist der Härtewert, der für die Herstellung bei der Firma Tampo-Technik bestellt wurde. Die gemessene Härte ist der an der Materialprüfmaschine gemessene Wert.

**Tabelle 4-2: Verifizierung der Shore A Härte von allen Probekörpern aus dem Abguss mit den Prüfkörpern für das jeweils angegebene Verfahren**

Gewünschte Shore A Härte	Einachsiger Zugversuch	Planarer Zugversuch	Einachsige Druckversuch	biaxialer Zugversuch
3	$3,25 \pm 0,75$	$3 \pm 0,5$	$3,25 \pm 0,25$	$3 \pm 0,5$
5	$5,25 \pm 0,75$	$5 \pm 0,5$	$5,5 \pm 0,5$	$5 \pm 0,5$
6	$6 \pm 1$	$6,5 \pm 0,5$	$6,25 \pm 0,75$	$6,25 \pm 0,75$
8	$7,75 \pm 1$	$8 \pm 0,5$	$7,75 \pm 0,25$	$7,75 \pm 0,25$
12	$12,5 \pm 0,5$	$12,75 \pm 0,25$	$13 \pm 0,5$	$12,25 \pm 0,5$
18	$17,75 \pm 0,5$	$17,75 \pm 0,75$	$17,5 \pm 0,5$	$18,25 \pm 0,75$
20	$20,25 \pm 0,75$	$21 \pm 0,5$	$20 \pm 0,5$	$20,25 \pm 0,75$
30	$29,25 \pm 0,75$	$29,25 \pm 0,75$	$29,25 \pm 1$	$29,5 \pm 1$

Die Abweichungen zwischen den gewünschten und den gemessenen Shore A Härten sind im akzeptablen Bereich  $\pm 1$  Shore A (siehe Tabelle 4-2).

#### 4.4.2 Ergebnisse des einachsigen Zugversuchs

In Abschnitt 4.2.1. wird die Durchführung des einachsigen Zugversuchs beschrieben. Wie vorher erwähnt, wurde der Probentyp 1 für den einachsigen Zugversuch verwendet. Die Testlänge von 25 mm wird entsprechend den Normen ISO 37, DIN 53504 und ASTM 412 auf dem Probekörper markiert (ASTM D412, 2016; ISO 37, 2017; DIN 53504, 2017). Hier wird ein zyklischer einachsiger Zugversuch durchgeführt. Bei jedem Zyklus wird die Probe auf eine bestimmte Dehnung belastet und entlastet. Jede Probe wird auf 25 %, 50 % und 75 % Dehnung belastet und entlastet. Drei Proben von jeder Shore A Härte aus Tabelle 4-2 wurden mit dem Zugversuch an der Materialprüfmaschine gemessen, um die Wiederholbarkeit zu prüfen und eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Aus den ermittelten Kraft-Weg-

Diagrammen können die Materialkonstanten für die Formänderungsenergie-Funktion nicht berechnet werden; hierzu sind die Spannungs-Dehnungs-Diagramme erforderlich. Zur Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Diagramme müssen die Zugspannungswerte aus den Kraftwerten berechnet und die Dehnungen mit Hilfe des Videoextensometers bestimmt werden. Die Zugspannungswerte  $\sigma$  werden mit Gleichung 4-6 berechnet. Hierbei ist  $S_0$  die Querschnittsfläche der Zugprobe in der Mitte der Testlänge im unbelasteten Zustand und  $F$  ist der Kraftwert.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (4-6)$$

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme sind in Abbildung 4-15 für die minimale und maximale (drei und 30) Shore A Härte aus Tabelle 4-2 dargestellt. Die übrigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme des einachsigen Zugversuchs sind in Anhang A.3 dargestellt. Auf der X-Achse sind die Dehnungswerte in mm/mm und auf der Y-Achse die Zugspannungswerte in MPa eingetragen. Die Dehnungswerte müssen mit 100 multipliziert werden, um die Dehnungen in Prozentwerte umzurechnen. In jedem Diagramm sind drei Kurven in drei Farben. Die rote Kurve ist für die erste Probe, die grüne für die zweite und die blaue für die dritte Probe. Auf der Legende sind die Bezeichnungen U3 und U30 zu sehen, die für die Testart (den einachsigen Zugversuch in diesem Fall) und die Shore A Härte stehen, z. B. U3 sind die Ergebnisse des einachsigen Zugversuchs für die Proben mit 3 Shore A. Aus den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen der drei Proben wird ein mittleres Spannungs-Dehnungs-Diagramm berechnet und in Abbildung 4-16 dargestellt. Diese werden für die FEM-Simulation verwendet, um die Materialkonstante in Abschnitt 5.3.2 zu bestimmen. Der Hysterese-Effekt wird vernachlässigt, da die Belastungs-/Entlastungskurven nahezu aufeinanderliegen. Es gibt keinen Mullins-Effekt, da die Proben bei verschiedenen Dehnungsstufen das gleiche Verformungsverhalten aufweisen. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem einachsigen Zugversuch zeigen ein nichtlineares Verhalten. Dies bestätigt das nichtlineare Verhalten des Silikonkautschuks. Der Vergleich dieser Messungen verdeutlicht einige Materialeigenschaften. Eine Erhöhung der Härte des Silikonkautschuks führt zu einem erhöhten Spannungswert für denselben Dehnungswert.

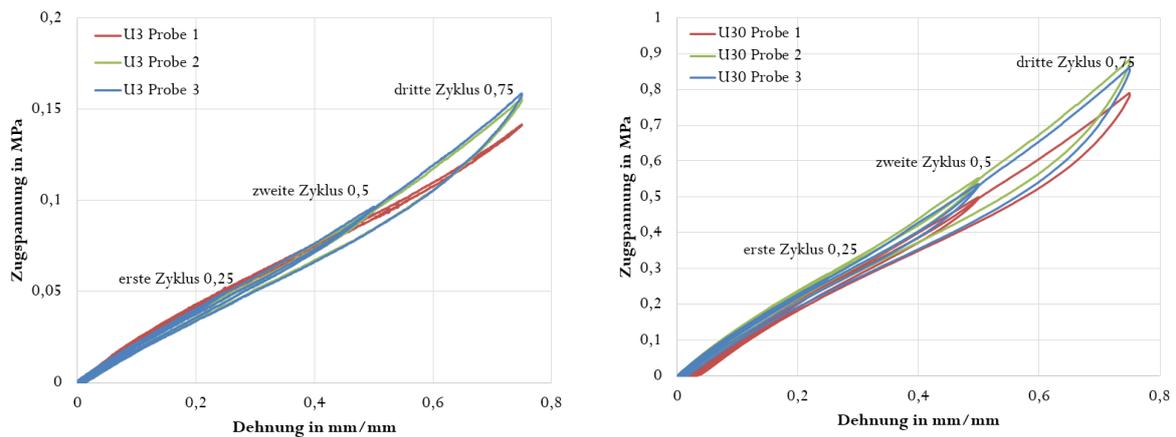


Abbildung 4-15: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 3 (links) und 30 (rechts) aus Tabelle 4-2 für den einachsigen Zugversuch. Die unterschiedlichen Skalen für die Zugspannung sind zu beachten. Die Diagramme für die Proben mit anderen Shore A Härten sind in Anhang A.3 dargestellt. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Dehnungsstufen (25, 50 und 75%) getestet (die Messergebnisse der geringeren Dehnungen decken sich mit denen der 75% Dehnung und sind daher meist nicht zu erkennen).

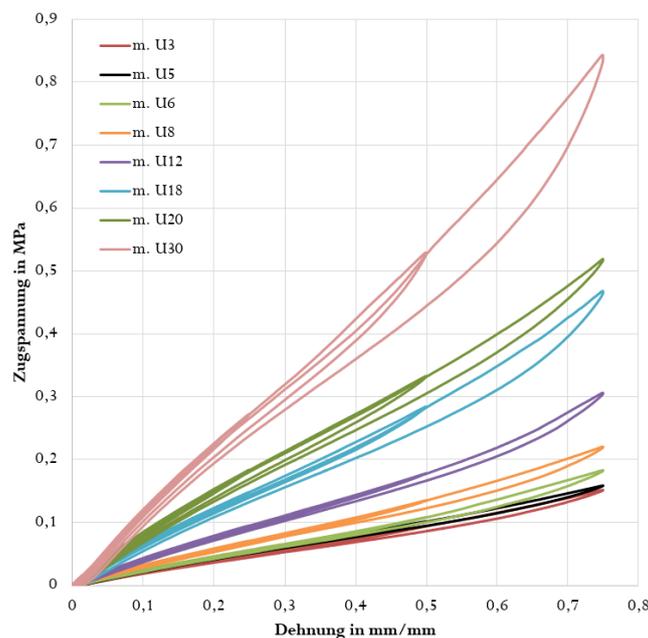


Abbildung 4-16: Das einachsige Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Silikonkautschuks für die Härten 3, 5, 6, 8, 12, 18, 20, und 30 Shore A. Die Abbildung zeigt die gemittelten Daten verschiedener Prüfkörper für jede Shore A Härte aus Tabelle 4-2. Der Buchstabe m. bezeichnet das mittlere Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

### 4.4.3 Ergebnisse des planaren Zugversuchs

In Abschnitt 4.2.4. wird die Durchführung des planaren Zugversuchs beschrieben. Hier werden die Ergebnisse vorgestellt. Für den planaren Zugversuch wird der Probenotyp 1 verwendet. Diese Probe passt von der Größe her zum Probenhalter (siehe Abbildung 4-7). Der planare Zugversuch ist ähnlich wie der einachsigen Zugspannung mit einem Unterschied in die Probenform und Testlänge. Die Planar-Zugprobe hat einer Prüfbreite von 60 mm, eine Testlänge von 15 mm und eine Dicke von 2 mm (Abbildung 4-7). Beim planaren Zugversuch wird auch eine zyklische Prüfung durchgeführt. Jede Probe wird auf 35 %, 45 % und 55 % Dehnung belastet und entlastet. Die Probe wird bis zu einer maximalen Dehnung von 55 % belastet, da sehr große Zugkräfte dazu führen, dass die Probe aus den Klemmen rutscht und dann die nötigen sehr großen Klemmkräfte die Probe beschädigen. Drei Proben von jeder Shore A Härte aus Tabelle 4-2 werden mit dem planaren Zugversuch gemessen, um die Wiederholbarkeit der Ergebnisse zu prüfen. Die planaren Zugspannungen werden aus den gemessenen Kraftwerten mit Gleichung (4-6) berechnet und die Dehnungen mit Hilfe des Videoextensometers ermittelt. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem planaren Zugversuch sind in Abbildung 4-17 dargestellt. In jedem Diagramm sind drei Kurven mit drei Farben. Die rote Kurve ist für die erste, die grüne für die zweite und die blaue für die dritte Planar-Zugprobe. Der Buchstabe P neben dem Shore A Wert steht für die Testart (den planaren Zugversuch in diesem Fall).

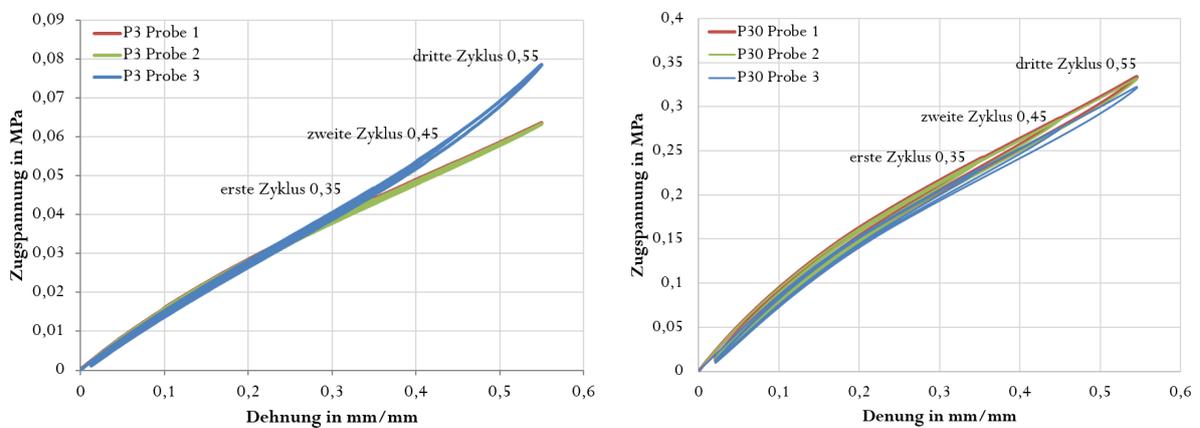


Abbildung 4-17: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 3 (links) und 30 (rechts) aus Tabelle 4-2 für den planaren Zugversuch. Die unterschiedlichen Skalen für die Zugspannung sind zu beachten. Die Diagramme für die Proben mit anderen Shore A Härten sind in Anhang A.4 dargestellt. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Dehnungsstufen (35, 45 und 55%) getestet.

Abbildung 4-17 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Diagramme für zwei Shore A Härten, die übrigen Diagramme des planaren Zugversuchs sind in Anhang A.4 dargestellt. Aus den Spannungs-Dehnungs-Diagramme der drei Proben jeder Härte wird jeweils ein mittleres Spannungs-Dehnungs-Diagramm berechnet und in Abbildung 4-18 dargestellt. Diese werden für die FEM-Simulation verwendet, um die Materialkonstante in Abschnitt 5.3.2 zu bestimmen. Hier wird auch der Hysterese-Effekt vernachlässigt, da die Belastungs-/Entlastungskurven nahezu aufeinanderliegen. Es gibt auch keinen Mullins-Effekt, da die Kurven bei verschiedenen Dehnungsstufen das gleiche Verhalten zeigen. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem planaren Zugversuch zeigen ebenfalls ein nichtlineares Verhalten.

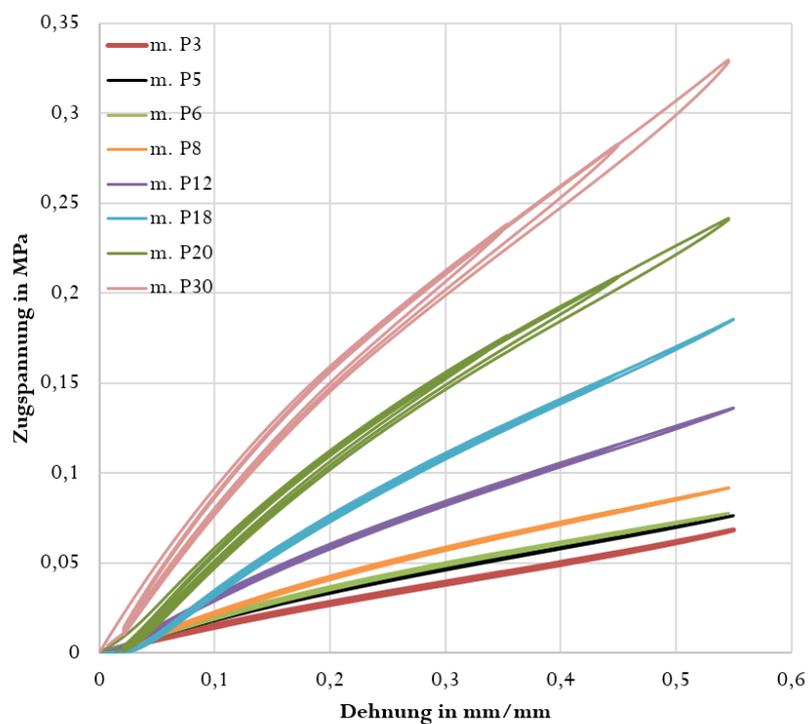


Abbildung 4-18: Das planare Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Silikonkautschuks für die Härten 3, 5, 6, 8, 12, 18, 20, und 30 Shore A. Die Abbildung zeigt die gemittelten Daten verschiedener Planar-Zugproben für Shore A Härte aus Tabelle 4-2. Der Buchstabe m. bezeichnet das mittlere Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

#### 4.4.4 Ergebnisse des biaxialen Zugversuchs

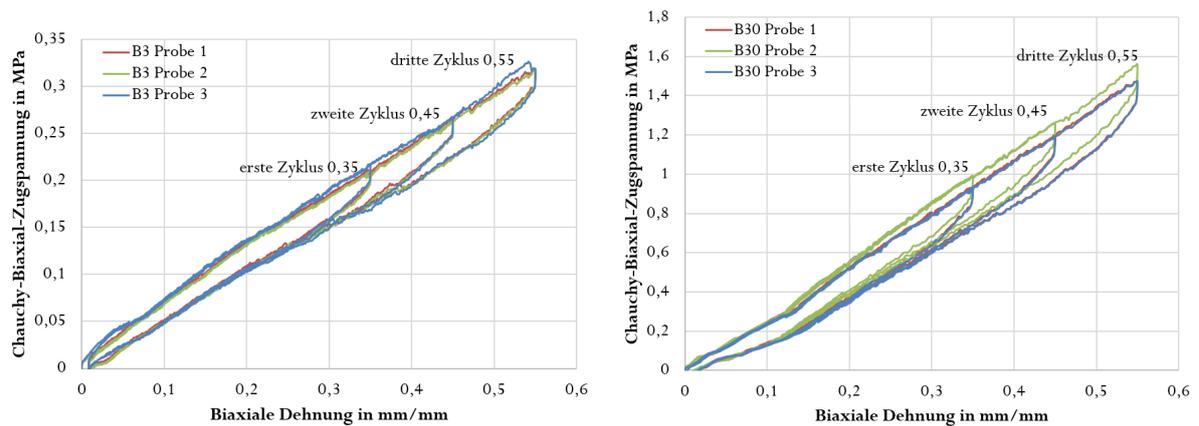
In Abschnitt 4.2.2 wird die Durchführung des biaxialen Zugversuchs beschrieben. Der Probenotyp 1 in Abbildung 4-4 wurde für die biaxialen Zugproben mit niedrigen Shore A Härten (3 und 6 Shore A) verwendet. Denn die kreuzförmigen Proben verbiegen sich bei niedrigen Shore A aufgrund des Eigengewichts der Spannbacken. Um dieses Problem zu reduzieren, werden leichte Polymerkugellagern (Nettogewicht pro Einheit 3,76 g) statt den metallischen Kugellagern (23 g pro Stück) verwendet. Der Probenotyp 4 wurde für die biaxialen Zugproben mit höheren Shore A Härten (8 bis 30 Shore A) verwendet. Eine Testlänge von 30 mm wurde an die Probe in beiden Richtungen (X- und Y-Richtung) entsprechend der Norm ISO 16842 (2014) markiert. Danach wurde die biaxiale Zugprobe in den Spannbacken eingeklemmt und in zwei Richtungen gezogen. Hier wurde ein zyklischer biaxialer Zugversuch durchgeführt. Bei jedem Zyklus wurde die Probe auf eine Dehnung von 35, 45 und 55 % stufenweise belastet und wieder entlastet. Drei Proben für jede Shore A Härte in Tabelle 4-2 wurden hergestellt und an der Materialprüfmaschine getestet.

Die Gesamtkraft  $F$  wird durch den Kraftsensor gemessen und die Kraftkomponenten  $F_X$  und  $F_Y$  werden aus der Gesamtkraft berechnet ( $F_X = F_Y = F/\sqrt{2}$ ). Zur Bestimmung der Dehnungen  $\epsilon_{xx}$  und  $\epsilon_{yy}$  wurde das Videoextensometer verwendet. Hier werden die Änderungen der Testlängen in Pixeln gemessen und daraus die Dehnungen berechnet. Der biaxialen Zugversuch ist komplizierter als der einachsige und der planare Zugversuch, hier wird die Biaxial-Zugspannung  $\sigma_b$  berechnet. Beim äquibiaxialen Zugversuch wird  $\sigma_b$  in Gleichung (4-7) berechnet und die Dehnungen  $\epsilon_b = \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy}$  (Andar et al, 2010; Hashmi, 2014; (Chevalier and Marco, 2002)).

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{2}F_X}{e * L} = \frac{F}{e * L} \quad (4-7)$$

Dabei sind  $e = 2$  mm die Dicke und  $L = 30$  mm die Testlänge der Probe.

Abbildung 4-19 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Diagramme für den biaxialen Zugversuch. Auf der X-Achse sind die Dehnungswerte und auf der Y-Achse die Biaxial-Zugspannungswerte aus dem biaxialen Zugversuch aufgetragen. In jedem Diagramm sind drei Kurven mit drei Farbe. Die rote Kurve ist für die erste, die grüne für die zweite und die blaue für die dritte biaxiale Zugprobe. Der Buchstabe B neben dem Shore A Wert steht für die Testart (den biaxialen Zugversuch in diesem Fall).



**Abbildung 4-19:** Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 3 (links) und 30 (rechts) aus Tabelle 4-2 für den biaxialen Zugversuch. Die unterschiedlichen Skalen für die Zugspannung sind zu beachten. Die Diagramme für die Proben mit anderen Shore A Härten sind in Anhang A.5 dargestellt. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Dehnungsstufen (35, 45 und 55%) getestet.

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem biaxialen Zugversuch zeigen ebenfalls ein nichtlineares Verhalten. Dies bestätigt das nichtlineare Verhalten des Silikonkautschuks. Der Hysterese-Effekt kann hier nicht vernachlässigt werden, da die Belastungs-/Entlastungskurven nicht aufeinanderliegen. Es gibt keinen Mullins-Effekt, da die Proben bei verschiedenen Dehnungsstufen das gleiche Verformungsverhalten aufweisen. Aus den Messergebnissen der drei Proben in Abbildung 4-19 wird ein durchschnittliches Spannungs-Dehnungs-Diagramm ermittelt. Die mittleren Spannungs-Dehnungs-Diagramme für den biaxialen Zugversuch sind in Abbildung 4-20 dargestellt. Diese werden für die FEM-Simulation verwendet, um die Materialkonstanten in Abschnitt 5.3.2 zu berechnen.

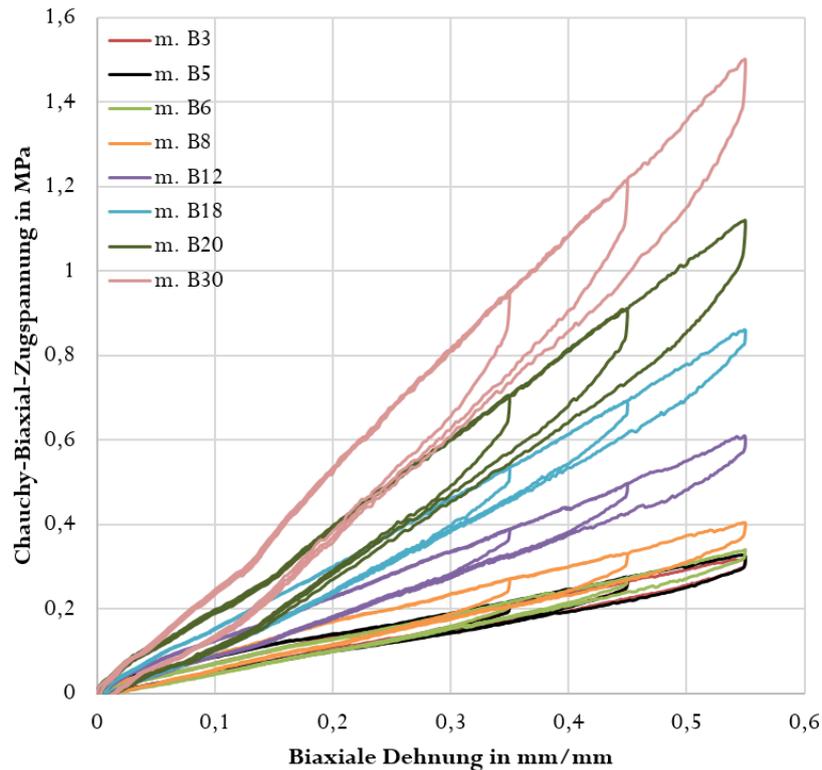


Abbildung 4-20: Das biaxialen Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Silikonkautschuks für die Härten 3, 5, 6, 8, 12, 18, 20, und 30 Shore A. Die Abbildung zeigt die gemittelten Daten verschiedener biaxialer Zugproben für jeden Härtegrad. Der Buchstabe m. bezeichnet das mittlere Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

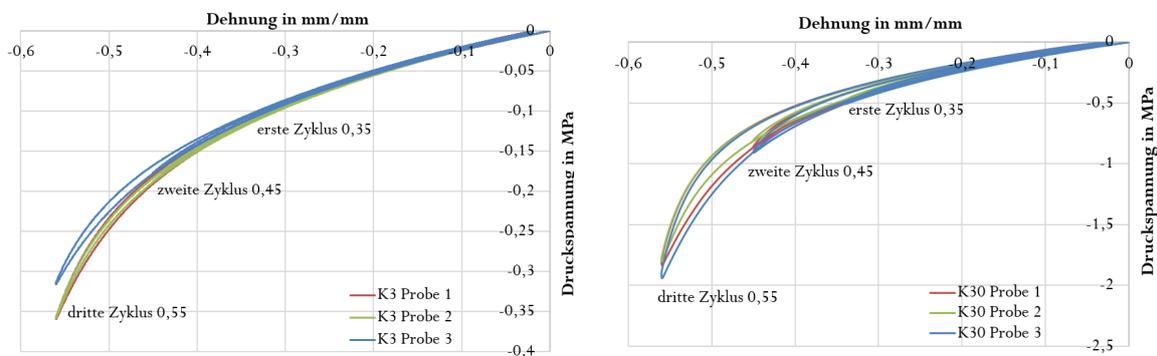
Im nächsten Teil werden die Ergebnisse des einachsigen Druckversuchs dargestellt.

#### 4.4.5 Ergebnisse des einachsigen Druckversuchs

In Abschnitt 4.2.3 wird der einachsige Druckversuch beschrieben. Wie vorher erwähnt, sind die Reibungskräfte bei der Probe vom Typ 1 in Abschnitt 4.2.2 nicht vernachlässigbar und hindern die radiale Dehnung des Probenkörpers, deshalb wird hier Typ 2 für die Druckführung des einachsigen Druckversuchs ausgewählt. In diesem Fall wird nach ISO 7743 (2017) kein Schmiermittel gebraucht. Drei Proben für jede Shore A Härte in Tabelle 4-2 wurden hergestellt und an der Materialprüfmaschine getestet. Jede Probe wird auf 35 %, 45 % und 55 % der Probenhöhe mit einem einachsigen Druck belastet und entlastet. Hier werden auch drei Proben für jede Shore A Härte aus Tabelle 4-2 an der Materialprüfmaschine geprüft. Abbildung 4-21 zeigt die Ergebnisse des einachsigen Druckversuchs für die

minimale und maximale Shore A Härte aus der Tabelle 4-2. Die übrigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme des einachsigen Druckversuchs sind in Anhang A.6 dargestellt.

Die nominelle Druckspannung  $\sigma_k$  wird ermittelt, indem die gemessene Presskraft  $F$  durch die Querschnittsfläche der zylindrischen Probe dividiert wird. Die Dehnungen werden aus den gemessenen Werten des Wegaufnehmers bestimmt. Auf der X-Achse sind die Dehnungswerte und auf der Y-Achse die Druckspannungswerte aus dem einachsigen Druckversuch aufgetragen. um die Dehnungen in Prozentwerte umzurechnen, müssen sie mit 100 multipliziert werden.



**Abbildung 4-21: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 3 (links) und 30 (rechts) aus Tabelle 4-2 für den einachsigen Druckversuch. Die unterschiedlichen Skalen für die Druckspannung sind zu beachten. Die Diagramme für die Proben mit anderen Shore A Härten sind in Anhang A.6 dargestellt. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Dehnungsstufen (35, 45 und 55%) getestet.**

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem einachsigen Druckversuch zeigen ebenfalls ein nichtlineares Verhalten. Dies bestätigt das nichtlineare Verhalten des Silikonkautschuks. Der Hystereseeffekt wird hier vernachlässigt, da die Belastungs-/Entlastungskurven nahezu aufeinanderliegen. Es gibt keinen Mullins-Effekt, da die Proben bei verschiedenen Dehnungsstufen das gleiche Verformungsverhalten aufweisen. Aus den Messergebnissen der drei Proben in Abbildung 4-21 wird ein durchschnittliches Spannungs-Dehnungs-Diagramm berechnet und in Abbildung 4-22 dargestellt. Diese werden für die FEM-Simulation verwendet, um die Materialkonstanten in Abschnitt 5.3.2 zu berechnen.

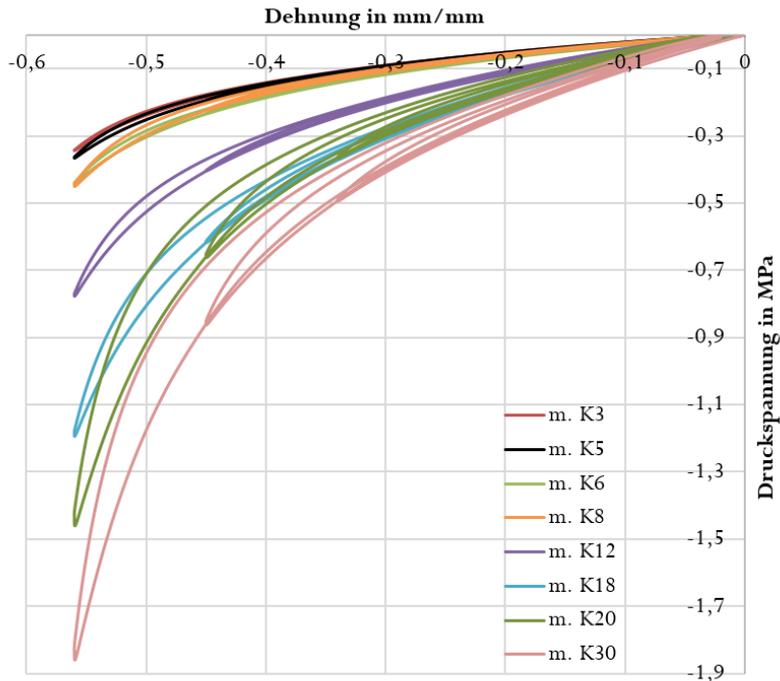


Abbildung 4-22: Mittlere Spannungs-Dehnungs-Diagramme für die Härten 3, 5, 6, 8, 12, 18, 20, und 30 Shore A aus dem einachsigen Druckversuch. Der Buchstabe m. bezeichnet das mittlere Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

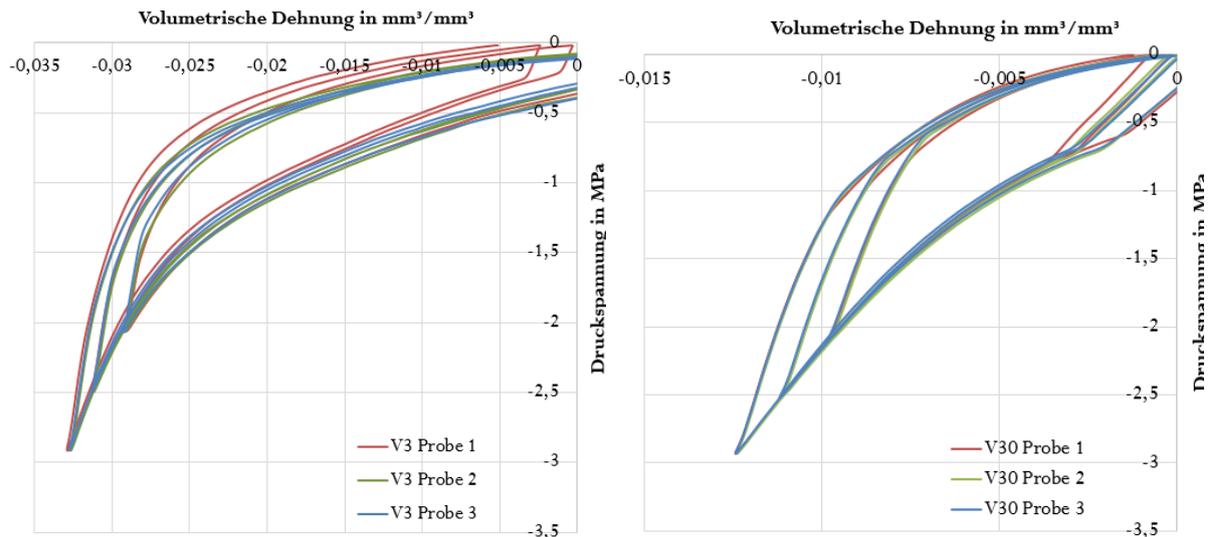
#### 4.4.6 Ergebnisse des volumetrischen Druckversuchs

In Abschnitt 4.2.5 wird der volumetrische Druckversuch erklärt. Wie vorher erwähnt, wird die Probe nach ISO 7743 (2017) hergestellt. Sie ist ein Zylinder aus Silikonkautschuk mit einem Durchmesser von  $17,8 \pm 0,15$  mm und einer Höhe von  $25 \pm 0,25$  mm. Der Versuch wird nach Gehrman et al (2017) durchgeführt. Hier wird eine zyklische Belastung von -2, -2,5 und -2,9 MPa Druckspannungen mit einer Geschwindigkeit von 0,05 mm/s durchgeführt (Gehrman et al, 2017). An der Materialprüfmaschine wird der Deformationsweg gemessen, der in diesem Fall die Änderung der Probenhöhe  $\Delta H$  ist. Daraus wird die Volumenänderung der Probe berechnet. Die volumetrische Dehnung wird aus der Volumenänderung in Gleichung (4-8) berechnet.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} \quad (4-8)$$

Hier ist  $\varepsilon_v$  die volumetrische Dehnung. Dabei ist V das ursprüngliche Volumen der zylindrischen Probe und  $\Delta V$  ist die Volumenänderung in  $\text{mm}^3$ . Die Druckspannungen werden aus den Messwerten der Druckkräfte berechnet.

Abbildung 4-23 zeigt die Ergebnisse des volumetrischen Druckversuchs für die minimale und maximale Shore A Härte aus der Tabelle 4-2. Die übrigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme des volumetrischen Druckversuchs sind in Anhang A.7 dargestellt. Auf der X-Achse sind die volumetrischen Dehnungswerte und auf der Y-Achse die Druckspannungswerte aus dem volumetrischen Druckversuch aufgetragen.



**Abbildung 4-23: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 3 (links) und 30 (rechts) aus Tabelle 4-2 für den volumetrischen Druckversuch. Die Diagramme für die übrigen Proben mit anderen Shore A Härten sind in Anhang A.7 dargestellt. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Druckspannung (-2, -2,5 und -2,7 MPa) getestet.**

Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem volumetrischen Druckversuch zeigen ebenfalls ein nichtlineares Verhalten. Der Hysterese-Effekt kann hier nicht vernachlässigt werden, da die Belastungs-/Entlastungskurven nicht aufeinanderliegen. Es gibt keinen Mullins-Effekt, da die Proben bei verschiedenen Dehnungsstufen das gleiche Verformungsverhalten aufweisen. Aus den Messergebnissen der drei Proben in Abbildung 4-23 wird ein durchschnittliches Spannungs-Dehnungs-Diagramm berechnet und in Abbildung 4-24 dargestellt. Diese werden für die FEM-Simulation verwendet, um die Materialkonstanten in Abschnitt 5.3.2 zu berechnen. Bei einer Druckspannung von 2,9 MPa ändert sich die Höhe der Probe mit 30 Shore A Härte um 0,3 mm ( $0,012 \cdot 25$ ) und die Höhe der Probe mit drei Shore A Härte um 0,85 mm ( $0,034 \cdot 25$ ). Je weicher die Probe ist, desto größer ist die Volumenänderung unter gleichem Druck.

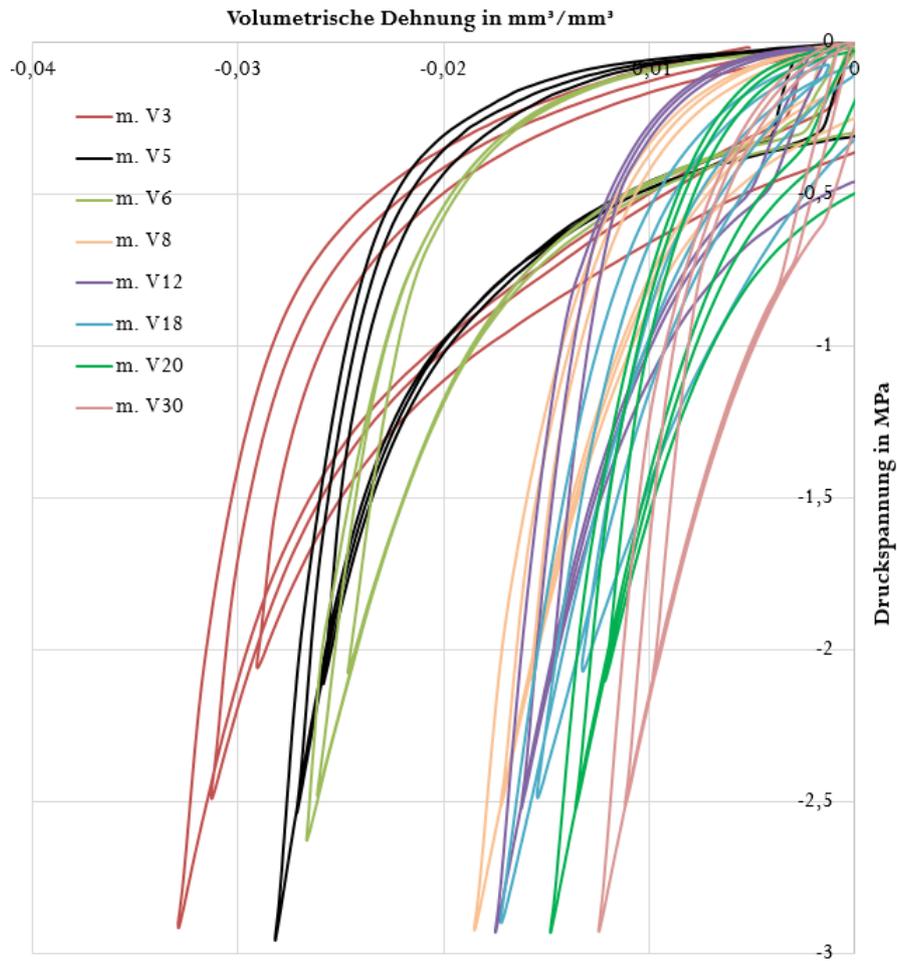


Abbildung 4-24: Mittlere Spannungs-Dehnungs-Diagramme des Silikonkautschuks für die Härten 3, 5, 6, 8, 12, 18, 20, und 30 Shore A aus dem volumetrischen Druckversuch. Der Buchstabe m. bezeichnet das mittlere Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

#### 4.4.7 Ergebnisse des Zugversuchs zur Bestimmung der Querkontraktionszahl

In Abschnitt 4.2.6 wird die Querkontraktionszahl erklärt. Die Probenform in Abbildung 4-7 wird zur Messung der axialen und transversalen Dehnungen nach ASTM D638 (2014) verwendet. Die Testlängen in axialer und transversaler Richtung sind auf der Zugprobe nach ASTM D638 (2014) markiert. Die Zugprobe wird dreimal auf eine maximale Dehnung von 55 % be- und entlastet (Nach ASTM D638 (2014) soll die maximale Dehnung  $50 \pm 10$  % sein). Die Quer- und Axialdehnungen werden mit dem Videoextensometer für jede Shore A Härte aus der Tabelle 4-2 bestimmt. Die Diagramme in Abbildung 4-25 zeigen den Zusammenhang zwischen den Quer- und Axialdehnungen für die Proben mit der minimalen und maximalen Shore A Härte aus der Tabelle 4-2, der die Poisson-Zahl oder Querkontraktionszahl ausdrückt. Die übrigen Spannungs-Dehnungs-Diagramme des Zugversuchs zur Bestimmung der Querkontraktionszahl sind in Anhang A.8 dargestellt. Um eine genaue Berechnung der Querkontraktionszahl zu erreichen, wird eine Kurvenanpassung mit einer Polynomfunktion durchgeführt. Die Polynomfunktionen für jeden Härtegrad werden in Abbildung 4-25 unter den Kurven dargestellt. Zur Beschreibung der Güte der Anpassung wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  berechnet. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  liegt um 0,98, was zeigt, dass die Polynomfunktionen sehr gut mit den Testergebnissen übereinstimmen. Die Querkontraktionszahl für alle Proben mit unterschiedlichen Shore-Härten auf einer mittleren Dehnung von 30 % werden ermittelt und in Tabelle 4-3 dargestellt. Hier sind  $\epsilon_q$  und  $\epsilon_a$  die Quer- und Axialdehnung.

**Tabelle 4-3: Querkontraktionszahlen bei einer mittleren Dehnung von 30 % für die verschiedenen Shore A Härten, sowie die dafür benötigten die Anpassungsfunktionen mit Bestimmtheitsmaß.**

Shore A Härte	Querkontraktionszahl	Polynom-Interpolation	$R^2$
3	0,42857	$\epsilon_q = 0,0027\epsilon_a^2 - 0,4878\epsilon_a - 0,6531$	0,9965
5	0,419546667	$\epsilon_q = 0,0027\epsilon_a^2 - 0,4884\epsilon_a - 0,3644$	0,9962
6	0,43009	$\epsilon_q = 0,002\epsilon_a^2 - 0,4684\epsilon_a - 0,6507$	0,9977
8	0,417316667	$\epsilon_q = 0,0019\epsilon_a^2 - 0,4641\epsilon_a - 0,3065$	0,9961
12	0,44242	$\epsilon_q = 0,0028\epsilon_a^2 - 0,5106\epsilon_a - 0,4746$	0,9969
18	0,43182	$\epsilon_q = 0,0028\epsilon_a^2 - 0,5117\epsilon_a - 0,1236$	0,9962
20	0,474476667	$\epsilon_q = 0,0026\epsilon_a^2 - 0,5721\epsilon_a + 0,5887$	0,988
30	0,4985	$\epsilon_q = 0,0027\epsilon_a^2 - 0,5703\epsilon_a - 0,276$	0,9884

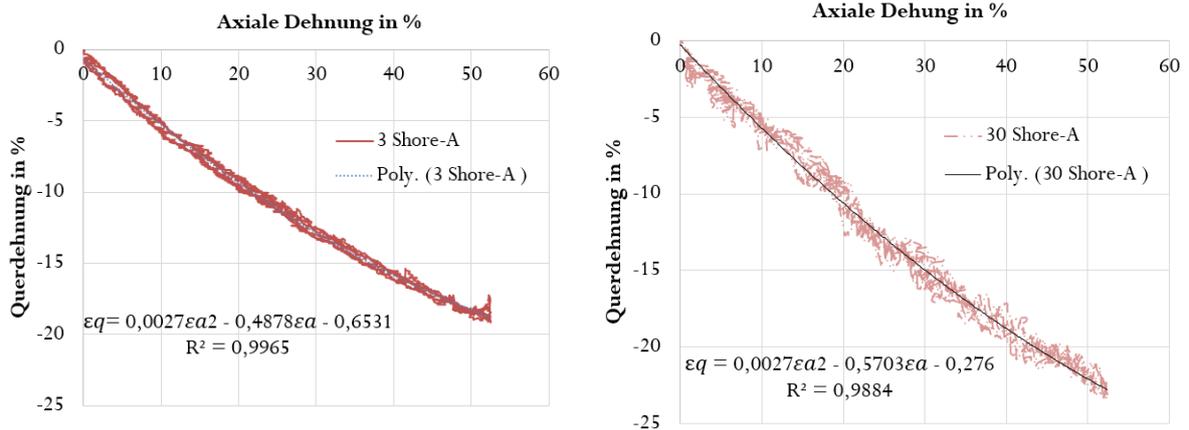


Abbildung 4-25: Die Querdehnung gegenüber der axialen Dehnung für die Härten 3 (links) und 30 (rechts) Shore A. Eine Polynom-Anpassungsfunktion für jeden Härtegrad und ihr Bestimmtheitsmaß ist unter der Kurve dargestellt. Die Diagramme für die übrigen Proben mit anderen Shore A Härten sind in Anhang A.8 dargestellt.

Die ermittelten Querkontraktionszahlen für Silikonkautschuk mit unterschiedlichen Härten liegen zwischen 0,42 und 0,5. Dies zeigt, dass Silikonkautschuk ein relativ inkompressibles Material ist. In Abbildung 4-26 sind die Kurven aller Proben mit unterschiedlichen Härten in einem Diagramm dargestellt und sie zeigt, dass der Silikonkautschuk mit steigender Härte immer inkompressibler wird. Die berechneten Querkontraktionszahlen werden in Kapitel 5 als Inputparameter für die FEM-Simulationen verwendet.

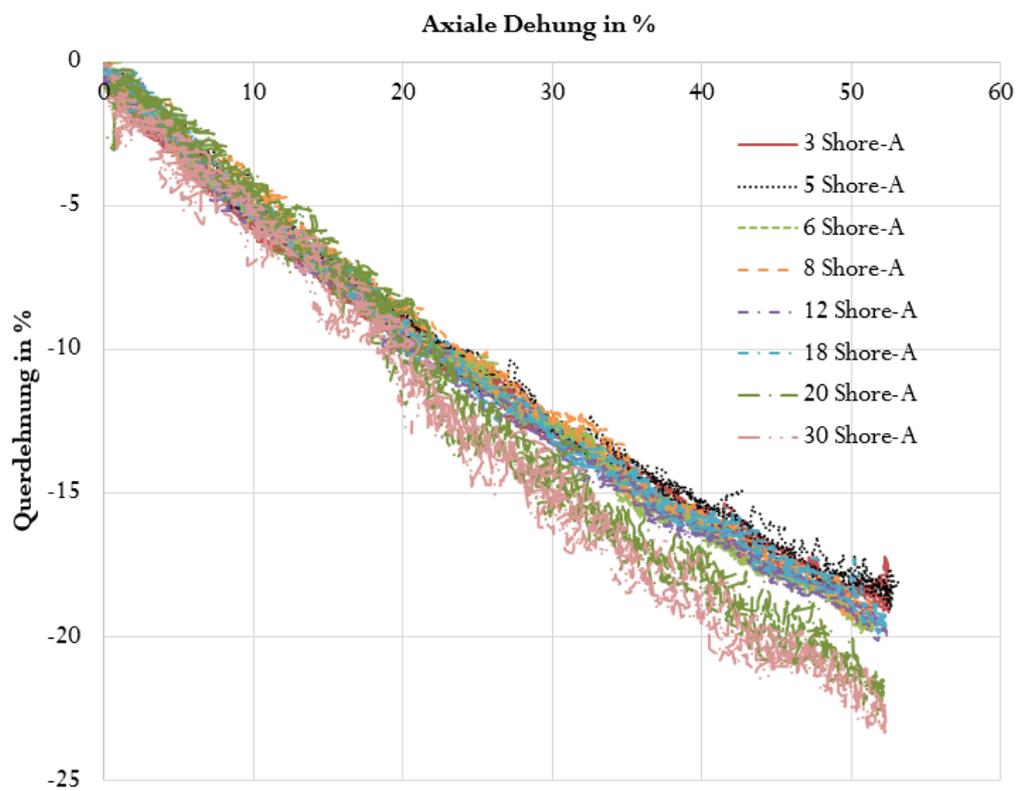


Abbildung 4-26: Das Verhältnis zwischen Quer- und Axialdehnungen für alle Shore A Härten aus Tabelle (4-2). Das Verhältnis nähert sich für kleine Dehnungen dem Wert 0,5 an, Silikonkautschuk wird damit als inkompressibel charakterisiert.

Im nächsten Kapitel wird die Simulation der Drucktampons beschrieben.

## 5. Simulation der Drucktampons

In diesem Kapitel wird eine Simulationsmethode zur Bewertung des Spannungs-Dehnungs-Verhältnisses des Drucktamponmaterials während des Druckvorgangs vorgestellt. Abschnitt 5.1 fasst die bisherige Literatur zur Simulation vom Silikonkautschuk zusammen. Anschließend wird der Simulationsprozess in Abaqus und Salome-Meca in Abschnitt 5.2 kurz vorgestellt, indem einige Theorien zur Erstellung des Modells in Abaqus erläutert werden. Die Inputparameter der FEM-Simulation werden in Abschnitt 5.3 beschrieben und in Abschnitt 5.4 werden die Ergebnisse der FEM-Simulationen diskutiert. In Abschnitt 5.5 werden die Ergebnisse von Abaqus und Salome-Meca verglichen. Anschließend werden zwei Methoden zur Validierung der FEM-Simulation in Abschnitt 5.6 vorgestellt. In Abschnitt 5.7 wird eine Sensitivitätsanalyse der FEM-Simulation durchgeführt. Ein Teil dieser Arbeit in diesem Kapitel wurde in Al Aboud et al (2020) veröffentlicht.

### 5.1 Studien zur Simulation von Silikonkautschuk

Wegen der Komplexität der Silikonkautschukmaterialien gibt es nur wenige Simulationen für diese Materialien. In einer Studie wurde der einachsige Druckversuch statt des biaxialen Zugversuchs verwendet, um die Materialeigenschaften von Silikonkautschuk in Abaqus zu definieren (Hakimi Tehrani, 2019). Ein einfacher Druckversuch muss frei von Scher- oder Zugspannungen sein. Um dies zu erreichen, muss der Probekörper zwischen zwei Platten zusammengedrückt werden, ohne dass es zu Reibungseffekten zwischen den Platten und dem Probekörper kommt. Das ist natürlich nicht möglich. Um dies besser zu verstehen, untersuchten Day und Miller (2000) die Auswirkungen der Reibung auf den Standard-Probekörper, der in ASTM 575-91 (2012) „Standard-Prüfverfahren für Gummieigenschaften unter Druck“ verwendet wird. Der Reibungskoeffizient wurde geändert, um die Auswirkung der Reibung auf die resultierenden Spannungs-Dehnungs-Messwerte zu ermitteln. Aus dieser Studie lässt sich schließen, dass selbst sehr geringe Reibungswerte die gemessene Spannungs-Dehnungs-Messwerte des Materials beeinflussen (Day & Miller, 2000). Darüber hinaus kann dieser Effekt sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Belastungen beobachtet werden (Day & Miller, 2000). Dies ist besonders problematisch, da die Reibungswerte hier nicht vernachlässigt werden können. Daher können die experimentellen Messwerte aus dem einachsigen Druckversuch nicht in einem hohen Maß korrigiert werden (Day & Miller, 2000). Es ist auch kein industrielles Programm oder ein Code bekannt, das den

Drucktamponhersteller bei der Auslegung des Drucktampons unterstützt. Ein Workflow zur Digitalisierung der Herstellung des Drucktampons ist auch nicht bekannt. Digitalisierung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die dreidimensionale Form eines realen Bedruckstoffes mittels eines 3D-Scanners oder eines CAD-Programms aufgenommen und eine FEM-Simulation durchgeführt wird, um die Verformung des Drucktampons während des Druckvorgangs abzuschätzen. Im nächsten Abschnitt werden die Simulationsmodelle mit Abaqus und Salome-Meca erklärt.

## 5.2 Simulation der Drucktampons in Abaqus und Salome-Meca

In Abschnitt 2.4 wird das Drucktamponmaterial als hyperelastisches Material beschrieben, das durch verschiedene Materialmodelle wie Polynomial, Ogden, Mooney-Rivlin usw. definiert werden kann. Daher sollte ein Simulationsprogramm ausgewählt werden, das solche hyperelastischen Materialmodelle unterstützen kann. Viele kommerzielle FEM-Programme unterstützen die Berechnung der hyperelastischen Materialmodelle, wie z. B. Abaqus, Ansys und SolidWorks (Klein, 2013). Im Rahmen dieser Dissertation wird Abaqus/CAE 6.13-3 verwendet, um die Materialkonstanten für Salome-Meca 9.3.0 zu bestimmen und die Simulationen an den Drucktampons durchzuführen. Die Inputparameter für die Simulation in Abaqus sind die Spannungs-Dehnungs-Messwerte aus den mechanischen Materialprüfverfahren (siehe Abschnitt 4.4). Die Inputparameter für die Simulation in Salome-Meca sind die in Abaqus aus den Spannungs-Dehnungs-Messwerten berechneten Materialkonstanten. In Abschnitt 5.3.2 wird die Berechnung der Materialkonstanten in Abaqus beschrieben.

Zur Ermittlung des mechanischen Verhaltens des Drucktampons während des Druckvorgangs auf Basis des Workflows in Kapitel 3 wird die Form des Drucktampons in einem CAD-Programm (Siemens NX) entworfen und die Härte des Silikonkautschuks aus Tabelle 4-2 ausgewählt. Anschließend werden die Messwerte aller mechanischen Prüfverfahren aus Abschnitt 4.4 für die ausgewählte Shore A Härte gesammelt und in Abaqus CAE Material-Modul importiert. Abaqus CAE ist in Funktionseinheiten unterteilt, die Module genannt werden. Jedes Modul enthält nur die Werkzeuge, die für einen bestimmten Teil der Modellierungsaufgabe relevant sind (Simulia, 2014). Die folgende Liste der in Abaqus CAE verfügbaren Module beschreibt kurz die Modellierungsaufgaben, die in jedem Modul durchgeführt werden können und welche Werkzeuge und Einstellungen im Rahmen dieser Arbeit darin nötig sind (Simulia, 2014):

**Part-Modul:** Im Part-Modul werden einzelne Teile durch Skizzieren oder Importieren ihrer Geometrie erstellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird dies für den Drucktampon und den Bedruckstoff verwendet.

**Property-Modul:** Im Property-Modul wird ein neues Material mit dem Namen „Rubber“ erzeugt und dem Drucktampon zugewiesen. In diesem Modul werden Spannungs-Dehnungs-Messwerte importiert und daraus die Materialkonstanten der Formänderungsenergie-Funktion des Silikonkautschuks für unterschiedliche Materialmodelle (Polynomial, Ogden, Mooney-Rivlin usw.) berechnet. Das wird in Abschnitt 5.3.2 beschrieben. Die in diesem Modul berechneten Materialkonstanten werden in Salome-Meca verwendet.

**Assembly-Modul:** Wenn ein Teil erstellt wird, existiert es in seinem eigenen Koordinatensystem, unabhängig von anderen Teilen. Im Assembly-Modul können die Teile relativ zueinander in einem globalen Koordinatensystem ausgerichtet werden. Abbildung 5-1a zeigt den Drucktampon mit dem Bedruckstoff im Assembly-Modell. Der Abstand zwischen dem Drucktampon und dem Bedruckstoff beträgt 154,5 mm, das entspricht dem tatsächlichen Abstand an der für diese Dissertation verwendeten Tampondruckmaschine.

**Step-Modul:** Mit dem Step-Modul lassen sich Zeitschritte für jede Iteration und die zugehörigen Ausgabeanforderungen (Ausgabeergebnisse) erstellen und konfigurieren.

**Interaktion-Modul:** Im Interaktion-Modul werden mechanische und thermische Wechselwirkungen zwischen den Teilen eines Modells oder zwischen einem Teil eines Modells und seiner Umgebung definiert. Ein Beispiel für eine Wechselwirkung ist der Kontakt zwischen zwei Oberflächen. Hier werden die Kontaktflächen zwischen dem Drucktampon und dem Bedruckstoff ausgewählt.

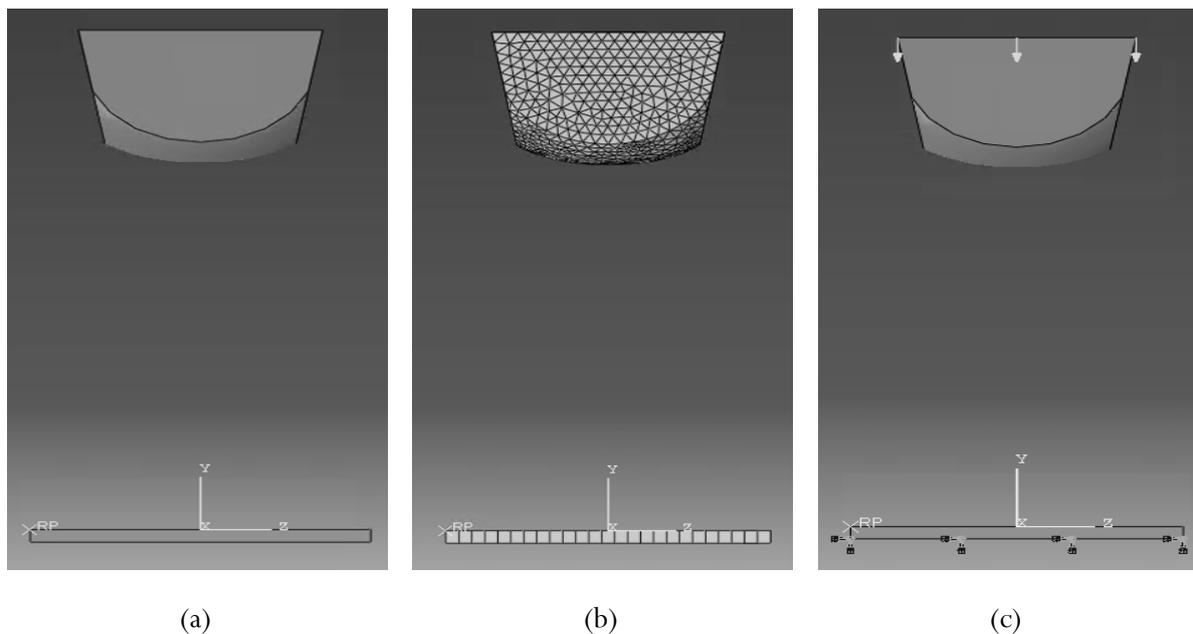
**Netz-Modul:** Das Netz-Modul enthält die notwendigen Funktionen und Algorithmen, um ein Netz-Modell für die Baugruppe zu erzeugen. Das Netz-Modell ist in Abbildung 5-1b dargestellt. Für die Drucktampons aus Silikonkautschuk werden in dieser Simulation die Netzelementtypen C3D10MH und C3D10H verwendet. Dies sind Hybrid-Tetraeder mit 10 Knoten. Die Netzelementgrößen liegen zwischen 3 und 4 mm. Bei Netzelementgrößen kleiner als 3 mm wird die Anzahl der Netz-Elemente größer als 200000 Elemente, was die Rechenzeit erhöht und bei Netzelementgrößen größer als 4 mm wird das Netz sehr grob, was die Simulationsergebnisse beeinflusst.

**Last-Modul:** Mit dem Last-Modul werden Lasten und Randbedingungen definiert. Hier wird der Bedruckstoff an der Unterseite fixiert und der Drucktampon fährt eine Strecke von 163,5 mm mit einer

Geschwindigkeit von 100 mm/min zum Bedruckstoff. Dies entspricht einem Deformationsweg von 20 mm am Drucktampon, der Deformationsweg wird in Abschnitt 5.4 detailliert beschrieben. Abbildung 5-1c zeigt die Randbedingungen auf dem Bedruckstoff und dem Drucktampon.

**Job-Modul:** Im Job-Modul können die Simulationen gestartet und ihren Fortschritt überwacht werden. Mehrere parallele Simulationen können gleichzeitig eingereicht werden.

**Visualisierungsmodul:** Das Visualisierungsmodul ermöglicht die grafische Darstellung der Ergebnisse. Hier können die Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg des Drucktampons in einem Diagramm dargestellt werden. Die Verschiebungen, die Spannungen und das Abrollverhalten können ebenfalls in diesem Modul angezeigt werden.



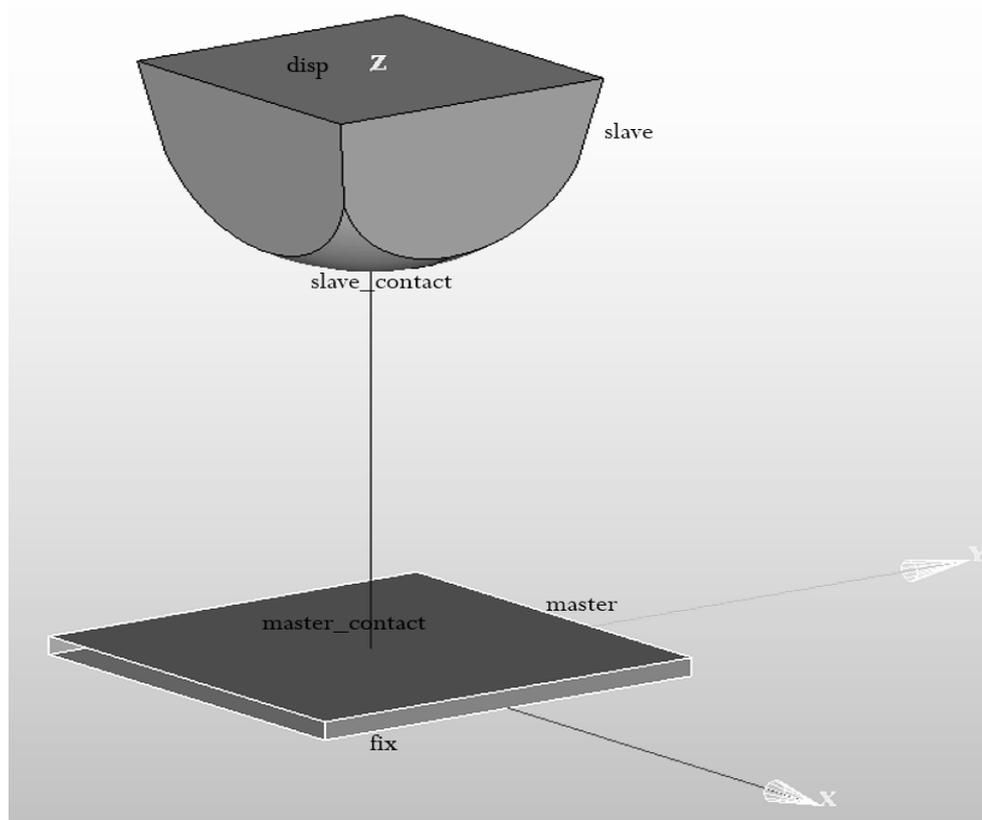
**Abbildung 5-1:** Ein Drucktampon und ein flacher Bedruckstoff im Assembly-Modul von Abaqus (a), das Netz-Modul (b) und die Randbedingungen im Last-Modul sind grafisch dargestellt.

Drucktamponhersteller sind oft kleine Unternehmen und können sich daher die hohen Lizenzgebühren von Abaqus nicht leisten. Deshalb wird zunächst geprüft, ob das Open-Source FEM-Programm Salome-Meca auch für eine Simulation von Drucktampons geeignet ist. Salome-Meca kann auch hyperelastische Materialien anhand der Mooney-Rivlin-Gleichungen berechnen (Al Aboud et al, 2020). Salome-Meca ist auch in Module unterteilt, die folgende Liste beschreibt die Aufgaben jedes Moduls:

**Shaper-Modul:** Im Shaper-Modul werden die einzelnen Geometrien von Drucktampons und Bedruckstoffen durch Skizzieren erstellt.

**Geometrie-Modul:** Im Geometrie-Modul werden die einzelnen Geometrien von Drucktampons und Bedruckstoffen in Salome-Meca importiert. Hier können die Teile relativ zueinander in einem globalen Koordinatensystem ausgerichtet werden. Linienelemente, Flächenelemente und Volumenelemente für den Code im Aster-Study-Modul werden auch hier definiert. Der Drucktampon wird hier als „slave“ bezeichnet und der Bedruckstoff als „master“, die Kontaktflächen werden als „salve\_contact“ und „master\_contact“ benannt. Die befestigte Fläche des Bedruckstoffs wird als „fix“ definiert. Die obere bewegliche Fläche des Drucktampons wird als „disp“ bezeichnet. Abbildung 5-2 zeigt die Geometrien in Salome-Meca mit ihren Bezeichnungen für den Code im Code-Aster-Modul.

**Netz-Modul:** Das Netz-Modul in Salome-Meca enthält die notwendigen Funktionen und Algorithmen zur Berechnung eines Netz-Modells für den Drucktampon und Bedruckstoff. Hier wird der Netgen 1D-2D-3D Algorithmus für die beiden Teile verwendet. Die Netz-Elementgrößen werden zwischen 3 und 4 mm gewählt. Bei Netzelementgrößen kleiner als 3 mm wird die Anzahl der Netz-Elemente größer als 200000 Elemente, was die Rechenzeit erhöht und bei Netzelementgrößen größer als 4 mm wird das Netz sehr grob, was die Simulationsergebnisse beeinflusst. In einer früheren Studie von Al Aboud et al (2018) wurde festgestellt, dass der Netzelementtyp C3D10MH in Abaqus für Drucktamponmaterialien mit der Netz-Elementgröße zwischen 2 und 4 mm geeignet ist und zu brauchbaren Ergebnissen führt. Ein ähnlicher Netzelementtyp in Salome-Meca ist Netgen-Netz 1D-2D-3D mit quadratischen Elementen. Für das hyperelastische Material (Drucktampons) wird mit dem Netgen-Algorithmus ein quadratisches Netz erzeugt. Mit anderen Netz-Algorithmen konnte keine fehlerfreie Approximation der Drucktampongeometrie erzeugt werden.



**Abbildung 5-2:** Drucktampon und Bedruckstoff mit allen Bezeichnungen an den Geometrien in Salome-Meca. Slave und master sind Volumenelemente. Disp, fix, slave\_contact und master\_contact sind Flächenelemente. An diesen Flächenelementen werden die Randbedingungen definiert.

**Code-Aster-Modul:** Im Code-Aster-Modul werden die Inputparameter der FEM-Simulation (Netzmodell und Materialkonstanten) definiert und ein Code in Python geschrieben. Hier werden mechanische Randbedingungen zwischen den Teilen eines Modells definiert. In diesem Modul wird auch der Reibungskoeffizient zwischen den Kontaktflächen des Drucktampons und des Bedruckstoffs definiert und hier können die Simulationen gestartet und ihr Fortschritt überwacht werden. In Code-Aster können auch mehrere parallele Simulationen gleichzeitig durchgeführt werden.

**ParaVis-Modul:** Das ParaVis-Modul ermöglicht die grafische Darstellung der Ergebnisse. Hier können die Verschiebungen, die Spannungen und das Abrollverhalten angezeigt werden.

Die Simulation des Tampondruckvorgangs wird mit beiden FEM-Programmen ABAQUS/CAE 6.13-3 und Salome-Meca 9.3.0 durchgeführt. Für die Simulationen wird der Drucktampon Nr.81 ( $66 \times 66 \times 66 \text{ mm}^3$  mit einer quadratischen Form und einer abgerundeten Spitze) aus dem Katalog der Firma Tampon-Technik

mit 6 Shore A Härte (eine mittlere Shore A Härte) ausgewählt, um eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Anschließend wurden drei verschiedene Drucktampons (runde, längliche und quadratische Grundform) mit unterschiedlichen Shore A Härten hergestellt und simuliert, um eine möglichst große Bandbreite abzudecken und die Validierung der FEM-Simulationen zu prüfen. Die FEM-Simulation dieses hyperelastischen Materials erfordert verschiedene Input-Parameter wie das Materialmodell, spezielle Materialparameter sowie Netzarten und -größen. Im nächsten Teil werden die Inputparameter für die FEM-Simulationen beschrieben.

### **5.3 Inputparameter der FEM-Simulation**

Die Inputparameter der FEM-Simulation in Abaqus sind die Materialkonstanten aus den Kurvenanpassungen zwischen den Materialmodellen und den Spannungs-Dehnungs-Messungen aus den Materialprüfverfahren in Abschnitt 4.4 und die Geometrien von Drucktampons und Bedruckstoffen. Bei der FEM-Simulation in Salome-Meca sind die Inputparameter die in Abaqus berechneten Materialkonstanten, die Querkontraktionszahl oder Materialkonstanten aus dem volumetrischen Druckversuch sowie die Geometrien (Drucktampons und Bedruckstoffe). Im Property-Modul in Abaqus werden die Materialkonstanten für unterschiedliche Materialmodelle (Polynomial, Mooney-Rivlin, Ogden usw.) aus den Spannungs-Dehnungs-Messwerten berechnet (siehe Abschnitt 5.3.2). Die mathematischen Modelle in Abschnitt 2.4.2 sind in Abaqus vorhanden. Sie werden zur Bestimmung des Drucktamponmaterials in den Simulationen gebraucht. Salome-Meca verfügt über drei hyperelastische Materialmodelle, nämlich Polynomial, Neo-Hookean und Mooney-Rivlin (Maurice et al., 2009).

#### **5.3.1 Berechnung der Materialkonstanten**

Zur Berechnung der Materialkonstanten müssen zunächst die Spannungsgleichungen aus der Formänderungsenergie-Funktion für die drei Hauptdeformationszustände (einachsige, planare und biaxiale Spannungszustände) hergeleitet werden (Simulia, 2014). Diese Konstanten werden mit Hilfe einer Kurvenanpassung zwischen den in Abschnitt 4.4 ermittelten experimentellen Kurven (Spannungs-Dehnungs-Diagrammen) und den abgeleiteten Kurven der Spannungsgleichungen aus der Formänderungsenergie-Funktion berechnet. In dieser Dissertation werden verschiedene hyperelastische Materialmodelle aus Abschnitt 2.4.2 zur Simulation des Drucktampons verwendet, um ein passendes Materialmodell für das Drucktamponmaterial auszuwählen. Im Folgenden werden die Spannungs-Dehnungs-Verhältnisse eines polynomialen Modells hergeleitet. Die Formänderungsenergie-Funktion  $W$

für ein polynomiales 5-Parameter-Modell wird aus Gleichung (2-21) hergeleitet und in Gleichung (5-1) angegeben (Ansys, 2011).

$$\begin{aligned}
 W = & C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \\
 & + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{02}(I_2 - 3)^2 + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \\
 & + \frac{1}{D_2}(J - 1)^4
 \end{aligned} \tag{5-1}$$

Die Invarianten  $I_1$ ,  $I_2$  und  $I_3$  werden in Abschnitt 2.4.1 in Gleichungen (2-8), (2-9) und (2-10) angegeben.

Die Streckung  $\lambda_i$  ist in Gleichung (2-11) beschrieben. Für ein inkompressibles hyperelastisches Material gilt: Das Volumenverhältnis (das aktuelle Volumen der Probe vom volumetrischen Druckversuch durch ihr ursprüngliches Volumen vor der Deformation)  $J = I_3 = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1$ .

Jede Cauchy-Hauptspannung wird mit der Ableitung der Formänderungsenergie-Funktion (5-1) nach der entsprechenden Streckung  $\lambda$  berechnet (Simulia, 2014; (Altenbach, 2012)).

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} &= \lambda_1 \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial W}{\partial J} \frac{\partial J}{\partial \lambda_1} \right) \\
 \sigma_2 = \lambda_2 \frac{\partial W}{\partial \lambda_2} &= \lambda_2 \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda_2} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda_2} + \frac{\partial W}{\partial J} \frac{\partial J}{\partial \lambda_2} \right) \\
 \sigma_3 = \lambda_3 \frac{\partial W}{\partial \lambda_3} &= \lambda_3 \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda_3} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda_3} + \frac{\partial W}{\partial J} \frac{\partial J}{\partial \lambda_3} \right)
 \end{aligned} \tag{5-2}$$

Für ein inkompressibles hyperelastisches Material werden die Cauchy-Hauptspannungen ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ) aus der Mooney-Rivlin-Gleichung (Gleichung (2-22)) berechnet:

$$\begin{aligned}
 W = & C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \\
 \sigma_1 = & 2C_{10}\lambda_1^2 - 2C_{01}\frac{1}{\lambda_1^2} \\
 \sigma_2 = & 2C_{10}\lambda_2^2 - 2C_{01}\frac{1}{\lambda_2^2} \\
 \sigma_3 = & 2C_{10}\lambda_3^2 - 2C_{01}\frac{1}{\lambda_3^2}
 \end{aligned} \tag{5-3}$$

Die Cauchy-Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  werden voneinander subtrahiert, um Gleichung (5-4) zu erhalten:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2C_{10}\lambda_1 - 2C_{10}\lambda_3 - 2C_{01}\frac{1}{\lambda_1^2} + 2C_{01}\frac{1}{\lambda_3^2} \quad (5-4)$$

Mit der Berücksichtigung, dass  $\sigma_3$  für die drei Hauptdeformationszustände Null ist (die Zugkräfte treten nur in X- und Y-Richtungen auf) und einer Division von Gleichung (5-4) durch  $\lambda_1$ , wird Gleichung (5-4) wie folgt umgeschrieben:

$$\sigma_e = 2C_{10}\left(\lambda_1 - \frac{\lambda_3^2}{\lambda_1}\right) + 2C_{01}\left(\frac{1}{\lambda_3^2\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_1^3}\right) \quad (5-5)$$

Dabei ist  $\sigma_e$  die Cauchysche Spannungsdifferenz. Beim einachsigen Spannungszustand gelten (Boulbes, 2020):  $\lambda_1 = \lambda$  und  $\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$

Mit dem Einsetzen von  $\lambda_1$  und  $\lambda_3$  in Gleichung (5-5) ergibt sich die einachsige Zugspannung  $\sigma_e^u$ , siehe Gleichung (5-6).

$$\sigma_e^u = 2C_{10}\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right) + 2C_{01}\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right) \quad (5-6)$$

Beim planaren Spannungszustand gelten (Boulbes, 2020):  $\lambda_1 = \lambda$ ,  $\lambda_2 = 1$  und  $\lambda_3 = \frac{1}{\lambda}$  und die planare Zugspannung wird aus Gleichung (5-5) berechnet:

$$\sigma_e^p = 2C_{10}\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^3}\right) + 2C_{01}\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^3}\right) \quad (5-7)$$

Beim biaxialen Spannungszustand gelten (Boulbes, 2020):  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$  und  $\lambda_3 = \frac{1}{\lambda^2}$  und die biaxiale Zugspannung  $\sigma_e^b$  wird aus Gleichung (5-5) berechnet:

$$\sigma_e^b = 2C_{10}\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^5}\right) + 2C_{01}\left(\lambda^3 - \frac{1}{\lambda^3}\right) \quad (5-8)$$

Die Streckung in die Belastungsrichtung  $\lambda$  wird durch die Dehnung wie folgt berechnet (Boulbes, 2020):

$$\lambda = 1 + \varepsilon \quad (5-9)$$

Für ein polynomisches 5-Parameter-Modell werden die Cauchy-Hauptspannungen in Abaqus aus der Formänderungsenergie-Funktion  $W$  berechnet. In diesem Fall lassen sich die Materialkonstanten für ein polynomisches 5-Parameter-Modell in Abaqus durch die Kurvenanpassung berechnen. Sie können aus drei Materialprüfungen ermittelt werden (aus dem einachsigen und dem planaren Zugversuch und aus einer der beiden Prüfungen, dem biaxialen Zugversuch oder dem einachsigen Druckversuch) (Simulia, 2014). Abbildung 5-3 zeigt eine Kurvenanpassung zwischen dem polynomialen Materialmodell und den

Ergebnissen des einachsigen, planaren und biaxialen Zugversuchs. Die Kurvenanpassung zwischen dem polynomialen Materialmodell und den Ergebnissen des einachsigen Druckversuchs sind im Anhang A.9 in Abbildung A-9-4 dargestellt.

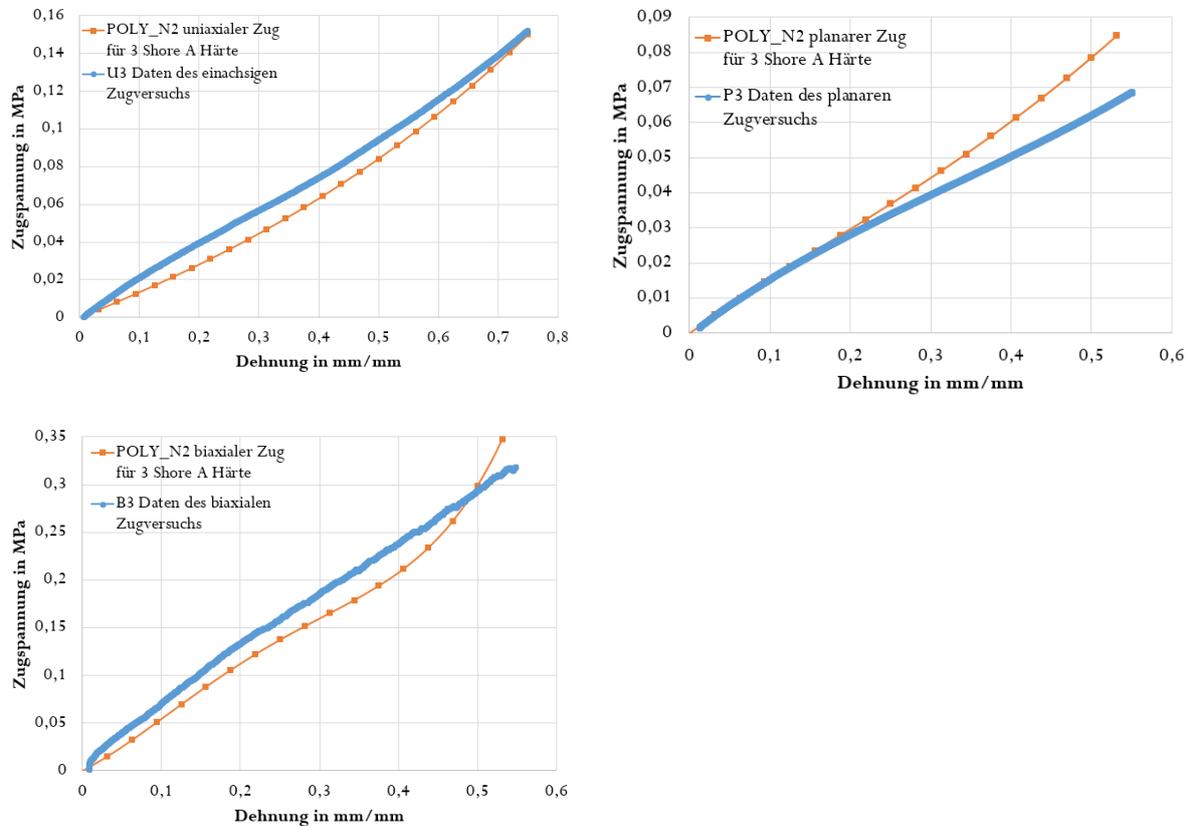


Abbildung 5-3: Kurvenanpassung zwischen dem Polynomial-Materialmodell und den Ergebnissen des einachsigen, planaren und biaxialen Zugversuchs für die Proben mit 3 Shore A Härte. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Die unterschiedlichen Skalen für die Zugspannung sind zu beachten. Die Kurvenanpassungen für die übrigen Proben mit anderen Shore A Härten sind in Anhang A.9 dargestellt.

Die blauen Kurven in Abbildung 5-3 stehen für die Messwerte aus dem einachsigen, planaren und biaxialen Zugversuch des Silikonkautschuks mit 3 Shore A Härte. Die orangenen Kurven sind die entsprechenden Cauchy-Spannungs-Dehnungs-Kurven aus dem in Abaqus berechneten polynomialen 5-Parameter-Modell. Die Differenz zwischen den Messungen und der Berechnung in Abbildung 5-3 ist akzeptabel und dieses Modell zeigt eine gute Annäherung an die Messdaten. Das zeigen auch die Bestimmtheitsmaße in Tabelle 5-2. Die anderen Modelle (Ogden- und Neo-Hookean-Modelle) zeigen größere Abweichung zwischen den Messungen und der Berechnung (siehe Tabelle 5-4).

Aus den letzten drei Diagrammen können die Materialkonstanten für den Silikonkautschuk mit 3 Shore A Härte bestimmt werden. Mit dieser Methode werden die Materialkonstanten des polynomialen Materialmodells für alle Shore A Härten aus Tabelle 4-2 in Abaqus berechnet und in Tabelle 5-1 dargestellt.

**Tabelle 5-1: Materialkonstanten des polynomialen 5-Parameter-Materialmodells in Abaqus für alle Shore A Härten.**

Materialkonstanten des polynomialen 5-Parameter-Materialmodells in Pa					
Shore A	$C_{10}$	$C_{01}$	$C_{11}$	$C_{20}$	$C_{02}$
3	13973,233	12931,312	-58792,991	44347,495	18686,113
5	67951,209	-39657,665	13017,456	-3806,685	-2360,437
6	59576,020	-35037,669	-2431,135	10230,627	1830,836
8	42280,197	-2101,217	-58986,257	45322,243	19817,289
12	105948,490	-64085,632	15995,997	4438,592	-3293,240
18	140191,129	-90005,074	4543,132	28734,172	-553,569
20	233229,978	-155276,081	107520,971	-43953,422	-29012,178
30	265263,846	-145260,290	-19351,584	54107,436	12282,854

Um die Güte der Kurvenanpassung mit dem polynomialen Modell zu ermitteln, werden die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  berechnet und in Tabelle 5-2 dargestellt. Ein  $R^2$ -Wert zwischen 0,7 und 0,9 bedeutet eine hohe Korrelation zwischen den Ergebnissen und ein Wert zwischen 0,4 und 0,699 zeigt ein mittelmäßiges Verhältnis (Backhaus et al, 2015).

**Tabelle 5-2: Bestimmtheitsmaße zwischen den experimentellen Spannungs-Dehnungs-Werten für die drei Hauptdeformationszustände und denen aus dem polynomialen 5-Parameter-Materialmodell.**

Shore A	$R^2$ einachsiger Zugversuch	$R^2$ planarer Zugversuch	$R^2$ biaxialer Zugversuch
3	0,992	0,984	0,843
5	0,998	0,980	0,923
6	0,987	0,962	0,858
8	0,997	0,966	0,878
12	0,995	0,965	0,950
18	0,989	0,947	0,944
20	0,989	0,947	0,944
30	0,993	0,965	0,851

Die Bestimmtheitsmaße liegen zwischen 84 % und 99 %, was zeigt, dass das polynomiale Materialmodell sehr gut geeignet ist, um die Drucktamponmaterialien bei den FEM-Simulationen zu definieren. Die Materialkonstanten in Tabelle 5-1 sind Inputvariablen für die FEM-Simulationen, die in Code-Aster und Abaqus je nach Härtegrad eingegeben werden. Um die Kompressibilität des Drucktamponmaterials zu berücksichtigen, müssen die Konstanten  $D_i$  in Gleichung (5-1) für das polynomiale Materialmodell berechnet werden. Sie werden aus dem volumetrischen Druckversuch in Abaqus aus Gleichung 5-10 berechnet und in Tabelle 5-3 angegeben. Im volumetrischen Druckversuch sind  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_V$  und das Volumenverhältnis  $J = \lambda_V^3 = \frac{V}{V_0}$ . Die gesamte Druckspannung  $P$  auf die Probe beim volumetrischen Druckversuch wird durch Gleichung 5-10 berechnet (Simulia, 2014).

$$P = - \sum_{i=1}^N 2i \frac{1}{D_i} (\lambda_V^3 - 1)^{2i-1} \quad (5-10)$$

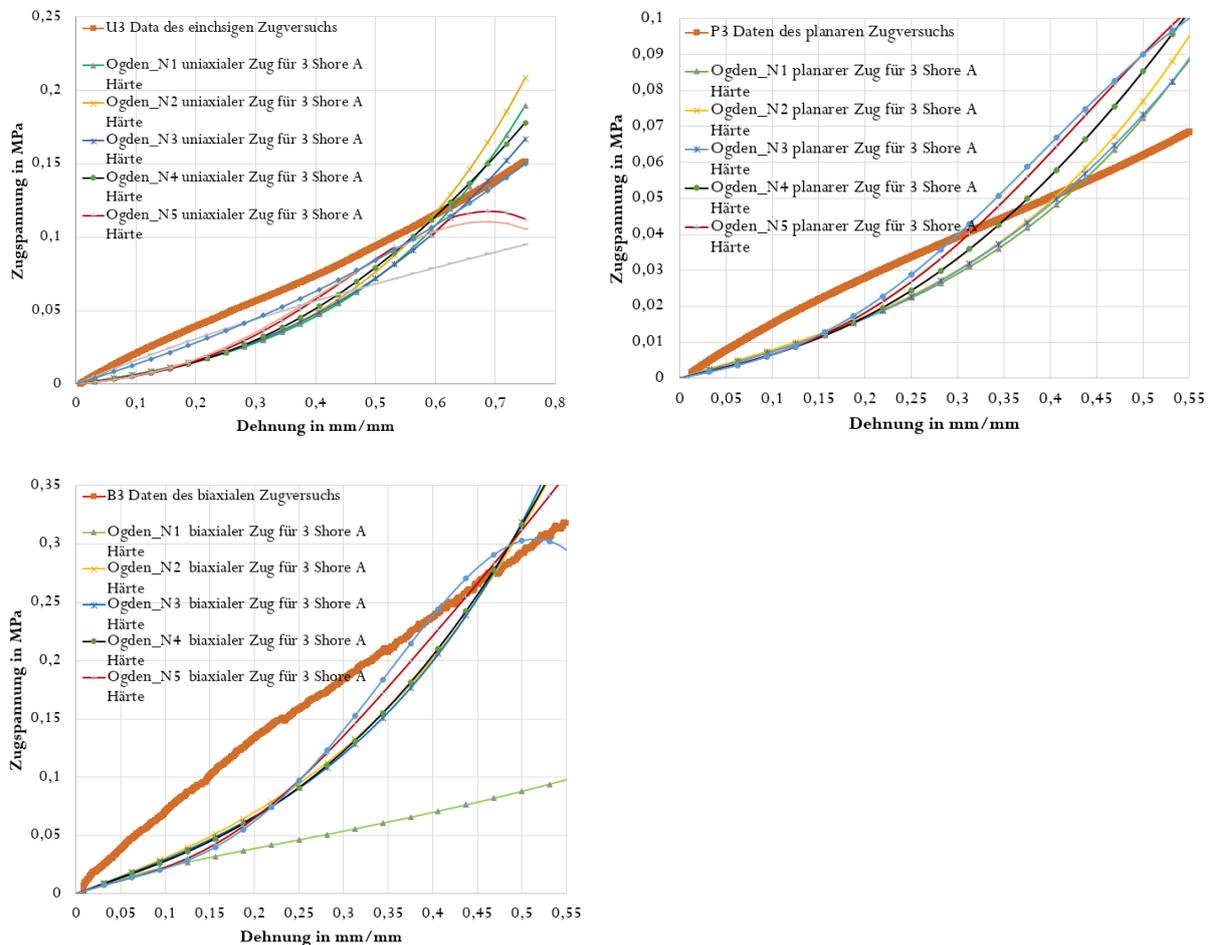
Für ein polynomisches 5-Parameter-Modell (ein polynomisches Modell zweiter Ordnung) werden mindestens zwei Punkte aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm in Abbildung 4-24 für jede Shore A Härte gebraucht, um die Konstanten  $D_1$  und  $D_2$  zu berechnen.

**Tabelle 5-3: Die Kompressibilität des Drucktamponmaterials für das Polynomial-N2-Materialmodelle wird durch  $D_1$ ,  $D_2$  gegeben.**

	Polynomial-N2 Materialmodell	
Shore A	$D_1$ in MPa <sup>-1</sup>	$D_2$ in MPa <sup>-1</sup>
3	2,9716E-02	-5,9272E-02
5	1,3561E-02	-2,6857E-02
6	1,7508E-02	-3,4951E-02
8	2,6402E-02	-5,2781E-02
12	3,3500E-02	-6,6785E-02
18	6,3530E-02	-0.12696
20	6,0192E-02	-0.11985
30	6,1955E-02	-0.123449

In Kapitel 2.4.2 wird das Ogden-Modell beschrieben und die Formänderungsenergie-Funktion wird in Gleichung (2-19) angegeben. In dieser Dissertation wird die Kurvenanpassung auch für das Ogden-Modell in Abaqus durchgeführt. Hier werden die Materialkonstanten für das Ogden-Modell von der Ordnung N2 anhand der Kurvenanpassung in Abaqus berechnet. Abbildung 5-4 zeigt eine Kurvenanpassung zwischen

dem Ogden Materialmodell der Ordnungen N1, N2, N3, N4 und N5 und den experimentellen Daten aus den Zugversuchen für den Silikonkautschuk mit 3 Shore A Härte. Die Abbildung der Kurvenanpassungen für anderen Materialien mit anderen Shore A Härten sind in Anhang A.9 zu finden.



**Abbildung 5-4: Kurvenanpassung zwischen den Ogden-Materialmodellen und den Ergebnissen des einachsigen, planaren und biaxialen Zugversuchs für die Proben mit 3 Shore A Härte. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Die unterschiedlichen Skalen für die Zugspannung sind zu beachten. Die Kurvenanpassungen für die übrigen Proben mit anderen Shore A Härten sind in Anhang A.9 dargestellt.**

Die orangen Kurven in Abbildung 5-4 sind die Messwerte aus dem einachsigen, planaren und biaxialen Zugversuch des Silikonkautschuks mit 3 Shore A Härte. Aus den letzten Diagrammen werden die Materialkonstanten für den Silikonkautschuk mit 3 Shore A in Abaqus bestimmt. Mit dieser Methode werden die Materialkonstanten des Ogden Materialmodells für alle Shore A Härten aus Tabelle 4-2 berechnet und in Tabelle 5-4 dargestellt.

Tabelle 5-4: Materialkonstanten des Ogden-N2-Materialmodells.

Shore A	Materialkonstanten des Ogden-N2 Materialmodells			
	$\mu_1$ in Pa	$\mu_2$ in Pa	$\alpha_1$	$\alpha_2$
3	21013,105	-1,338	7,4556	-14,463
5	1182316,640	-1131416,08	1,716	1,432
6	-244399,859	251646,749	-1,292	-1,562
8	-265067,630	271452,927	-1,541	-1,814
12	33709,210	-2,450	8,134	-14,625
18	-373385,318	401148,805	-1,521	-1,794
20	39310,191	2384,500	9,0793	-4,059
30	94422,736	11519,775	7,876	-3,792

Um die Güte der Kurvenanpassung mit dem Ogden-N2-Modell zu bestimmen, werden die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  berechnet und in Tabelle 5-5 dargestellt.

Tabelle 5-5: Bestimmtheitsmaße zwischen den experimentellen Spannungs-Dehnungs-Werten der drei Hauptdeformationszustände und denen aus dem Ogden-N2 Materialmodells

Shore A Härte	$R^2$ für den einachsigen Zugversuch	$R^2$ für den planaren Zugversuch	$R^2$ für den äquibiaxialen Zugversuch
3	0,919	0,886	0,843
5	0,995	0,976	0,9744
6	0,759	0,735	0,957
8	0,876	0,950	0,920
12	0,911	0,877	0,952
18	0,899	0,689	0,9782
20	0,880	0,796	0,853
30	0,914	0,841	0,6782

Die Bestimmtheitsmaße zwischen den Spannungs-Dehnungs-Werten der einachsigen, planaren und biaxialen Versuche und denen aus dem Ogden-N2-Modell liegen zwischen 67% und 97%. Bei den weichen Drucktamponmaterialien (3 und 5 Shore A Härte) nehmen die Bestimmtheitsmaße die Werte zwischen 84 % und 99 % an, deshalb ist das Ogden-Modell-N2 für die Definition der weichen Drucktamponmaterialien für die FEM-Simulationen geeignet.

Um die Kompressibilität des Drucktamponmaterials zu berücksichtigen, müssen die Konstanten  $D_i$  in Gleichung (5-10) für das Ogden-Materialmodell berechnet werden. Sie werden, wie das Polynomial-Materialmodell, aus dem volumetrischen Druckversuch in Abaqus berechnet und in Tabelle 5-6 angegeben. Der Zusammenhang zwischen dem Bulkmodul  $B$  und der Konstante  $D_1$  und zwischen dem Schermodul  $\mu$  und den Mooney-Rivlin-Materialkonstanten  $C_{01}$ ,  $C_{10}$  ist in Gleichung (5-11) angegeben (Simulia, 2014).

$$B = \frac{2}{D_1}; \mu = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (5-11)$$

**Tabelle 5-6: Die Kompressibilität des Drucktamponmaterials für das Polynomial-N2 und das Ogden-N2 Materialmodell wird durch  $D_1, D_2$  gegeben.**

Shore A	Ogden-Materialmodell-N2	
	$D_1$ in MPa <sup>-1</sup>	$D_2$ in MPa <sup>-1</sup>
3	2,97169E-02	-5,9272E-02
5	1,3561E-02	-2,6857E-02
6	1,7508E-02	-3,4951E-02
8	2,6402E-02	-5,2781E-02
12	3,3500E-02	-6,6785E-02
18	6,3530E-02	-0.12696
20	6,0192E-02	-0.11985
30	6,1955E-02	-0.123449

In beiden Materialmodellen Polynomial-N2 und Ogden-Materialmodell-N2 sind die Konstanten  $D_i$  gleich, sie werden aus dem volumetrischen Druckversuch in Gleichung (5-10) berechnet. Für das Drucktamponmaterial muss ein Materialmodell ausgewählt werden, dies wird in Abschnitt 5.3.2 beschrieben. Die Auswahl des mathematischen Materialmodells erfolgt durch die Kurvenanpassungsgüte (Bestimmtheitsmaße) zwischen den experimentellen Ergebnissen der Materialprüfungen und den Materialmodellen.

Ein Spezialfall des Polynomial-Materialmodells ist das Mooney-Rivlin-Modell (ein polynomisches Materialmodell erster Ordnung). Dieses Modell hat nur drei Konstanten ( $C_{01}$ ,  $C_{10}$ ,  $D_1$ ), um das hyperelastische Material zu bestimmen. Die Formänderungsenergie-Funktion  $W$  für das Mooney-Rivlin-Modell wird aus Gleichung (5-1) hergeleitet. In diesem Fall nehmen die Konstanten  $C_{11}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{02}$  den Null-Wert an (Simulia, 2014). Die Mooney-Rivlin-Konstanten werden in Abaqus mit der Anpassungsfunktion berechnet und in Tabelle 5-7 dargestellt.

**Tabelle 5-7: Materialkonstanten des polynomialen Materialmodells erster Ordnung (Mooney-Rivlin-Modell) werden in Abaqus aus den Ergebnissen der mechanischen Materialprüfungen berechnet.**

Materialkonstanten des polynomialen Materialmodells erster Ordnung			
Shore A	$C_{10}$ in Pa	$C_{01}$ in Pa	$D_1$ in Pa <sup>-1</sup>
3	30272,54033	3053,231741	5,30108217E-6
5	42441,73895	3302,97550	5,2493693E-6
6	51554,11510	4648,62176	7,6354870E-6
8	54621,60065	4760,011731	7,44708340E-6
12	62757,14535	5229,409708	7,06558154E-6
18	84680,47249	5852,153728	7,01620526E-6
20	128907,929	5915,535596	7,00991242E-6
30	156783,110	39438,90073	7,72722020E-6

Um die Güte der Kurvenanpassung mit dem Mooney-Rivlin-Modell zu bestimmen, werden die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  berechnet und in Tabelle 5-8 dargestellt.

**Tabelle 5-8: Bestimmtheitsmaße zwischen den experimentellen Spannungs-Dehnungs-Werten der drei Hauptdeformationszustände und denen aus dem Mooney-Rivlin-Materialmodell**

Shore A Härte	$R^2$ für den einachsigen Zugversuch	$R^2$ für den planaren Zugversuch	$R^2$ für den biaxialen Zugversuch
3	0,97	0,87	0,98
5	0,98	0,91	0,84
6	0,98	0,91	0,90
8	0,98	0,91	0,84
12	0,97	0,90	0,91
18	0,97	0,90	0,96
20	0,97	0,90	0,87
30	0,95	0,91	0,85

Die Bestimmtheitsmaße liegen zwischen 84 % und 99 %, was zeigt, dass das Mooney-Rivlin-Materialmodell sehr gut geeignet ist, um die Drucktamponmaterialien bei den FEM-Simulationen zu definieren. Die Materialkonstanten in Tabelle 5-7 sind Inputvariablen für die FEM-Simulationen, die in

Code-Aster und Abaqus je nach Härtegrad eingegeben werden. Im nächsten Abschnitt wird die Auswahl der mathematischen Modelle für den Silikonkautschuk erklärt.

### 5.3.2 Auswahl der mathematischen Modelle für den Silikonkautschuk

Im letzten Abschnitt wurde festgestellt, dass die Polynomial-Materialmodelle erster ( $n = 1$ ) und zweiter Ordnung ( $n = 2$ ) sehr gut geeignet sind, um das Verhalten der isotropen hyperelastischen Materialien zu beschreiben. Die Bestimmtheitsmaße zwischen den experimentellen Spannungs-Dehnungs-Werten und diesen Materialmodellen liegen zwischen 84 % und 98 %. Wie in Abschnitt 5.3.1 erwähnt, wird das Polynomial-Materialmodell erster Ordnung als Mooney-Rivlin-Materialmodell bezeichnet. In dieser Dissertation werden die polynomialen Gleichungen erster und zweiter Ordnung für alle Simulationen in Abaqus und Salome-Meca benutzt. Die Kurvenanpassungen zwischen den experimentellen Spannungs-Dehnungs-Werten und dem Yeoh-Modell werden auch in Abaqus berechnet. Ihre Bestimmtheitsmaße sind in Tabelle 5-9 dargestellt.

**Tabelle 5-9: Bestimmtheitsmaße zwischen den experimentellen Spannungs-Dehnungs-Werten der drei Hauptdeformationszustände und denen aus dem Youh-Materialmodell in Abaqus.**

Shore A Härte	R <sup>2</sup> für den einachsigen Zugversuch	R <sup>2</sup> für den planaren Zugversuch	R <sup>2</sup> für den biaxialen Zugversuch
3	0,71	0,54	0,30
5	0,78	0,65	0,29
6	0,6	0,70	0,22
8	0,66	0,68	0,004
12	0,69	0,62	0,30
18	0,57	0,65	0,19
20	0,60	0,69	0,21
30	0,67	0,78	0,22

Die Bestimmtheitsmaße zwischen den Spannungs-Dehnungs-Werten und dem Youh-Modell liegen zwischen 0,4 % und 78 %, deshalb kann das Youh-Modell zur Definition des Drucktamponmaterials in die FEM-Simulation nicht verwendet werden. In dieser Dissertation wird das Polynomial-Materialmodell verwendet.

## 5.4 Durchführung der FEM-Simulation

Eine FEM-Simulation zeigt, wie ein Bauteil oder ein Werkstoff auf bestimmte Einflüsse reagiert. Sie basiert auf der Finite-Elemente-Methode (FEM), die in Kapitel 2 beschrieben wird. Das Bauteil ist hier ein Drucktampon aus einem hyperelastischen Material (Silikonkautschuk). Bei dieser numerischen Berechnungsmethode wird die ganze Baugruppe (Drucktampon und Bedruckstoff) in eine endliche Anzahl von Elementen (Netz-Modell) unterteilt. Dadurch ist es möglich, das mechanische Verhalten der einzelnen Teilbereiche und schließlich der gesamten Baugruppe zu berechnen. Zwecke der FEM-Simulation sind die Optimierung der Geometrie des Drucktampons, die Prüfung der Bedruckbarkeit und die Bestimmung der passenden Härte des Silikonkautschukmaterials. Die FEM-Simulation basiert auf speziellen Algorithmen, die durch eine komplexe Kombination von Differentialgleichungen Approximationswerte von Spannungen, Dehnungen und Reaktionskräften an Baugruppen berechnen (Jungh et al., 2017). Für die FEM-Simulation ist ein leistungsfähiger Rechner mit hoher Rechenleistung erforderlich. Dafür wird im IDD-Labor ein Remote-PC mit einem Hochleistungsprozessor (Intel Core I7-8700K CPU 6\*3,7 GHz) verwendet. Wie vorher erwähnt, wurden drei verschiedene Drucktampons (runde, längliche und quadratische Grundform) mit unterschiedlichen Shore A Härten hergestellt und simuliert, um eine möglichst große Bandbreite abzudecken und die Validierung der FEM-Simulationen zu prüfen. Die Drucktamponformen werden aus dem Tampon-Technik-Katalog genommen und in FreeCAD konstruiert. Hier werden drei Drucktampons nämlich **N29** (140 mm × 65 mm × 65 mm), **N81** (74 mm × 74 mm × 52 mm) und **N135** (∅ 94 mm × 70 mm) aus dem Katalog ausgewählt (Lück, o.D.b).



**Abbildung 5-5: Die hergestellten Silikonkautschuk-Drucktampons. Sie werden mit verschiedenen Härten von 3, 6, 12 und 18 Shore A hergestellt. Insgesamt werden 12 Drucktampons hergestellt.**

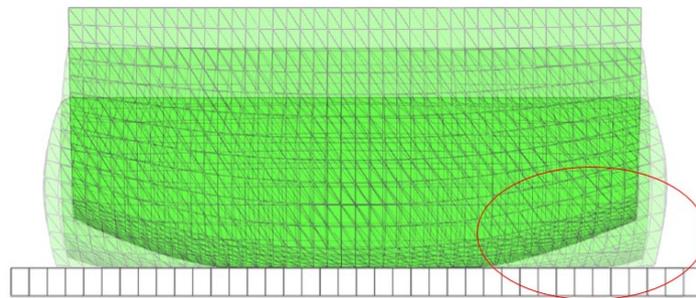
Zunächst wird eine FEM-Simulation mit Abaqus für den Drucktampon N29 durchgeführt. Dieser Drucktampon ist spiegelsymmetrisch im Bezug auf die Y-Z und X-Y Ebenen. Die Materialparameter für

das polynomiale Materialmodell werden aus Tabelle 5-7 genommen, hier wird eine mittlere Shore A Härte (6 Shore A) ausgewählt. Der Bedruckstoff ist eine flache Platte aus Aluminium EN AW-5083 mit einer Dichte von  $2,7 \text{ g/cm}^3$  und einem Elastizitätsmodul von 70 GPa sowie einer Poisson-Zahl von 0,34 (Kováčik et al, 2018). In der FEM-Simulation werden diese Materialkennwerte der Platte sowie die Randbedingungen ähnlich wie bei der Tampondruckmaschine im IDD-Labor (von Morlock mit der Nummer GFG100) eingestellt. Die Druckgeschwindigkeit beträgt hier 100 mm/s. Der Drucktampon befindet sich in einem Abstand von 154,5 mm von der Oberseite des Bedruckstoffes und fährt eine Strecke von 134,5 mm zum Bedruckstoff. Das Silikonkautschukmaterial wird mit dem Netzelementtyp C3D10H simuliert. In diesem Fall stimmen die Versuchsergebnisse und die Simulationsergebnisse mit einem maximalen Fehler von weniger als 10 % gut überein. Der Netzelementtyp C3D10H beschreibt ein tetraedrisches Element mit zehn Knoten. Außerdem wird in diesem Fall eine Netzelementgröße von 3 mm gewählt, um die Dichte des Netzes zu definieren. Die Materialien des Drucktampons und des Bedruckstoffes sind isotrop. Das bedeutet, dass ihre Materialeigenschaften in allen Richtungen identisch sind. Das Material des Drucktampons ist Silikonkautschuk, ein hyperelastisches Material. Hier wurde Silikonkautschuk mit Härten von 3, 6, 12 und 18 Shore A verwendet. Die Materialeigenschaften von Silikonkautschuk mit diesen Härtegraden wurden in Kapitel 4 beschrieben. Die Drucktampons mit sehr hohen Härtegraden (20 bis 30 Shore A) sind schwierig herzustellen und werden nur sehr selten für Spezialfälle verwendet (Lück, o.D.a). Abbildung 5-6 zeigt die Ergebnisse der FEM-Simulation des Drucktampons N29 für 6 Shore A Härte.

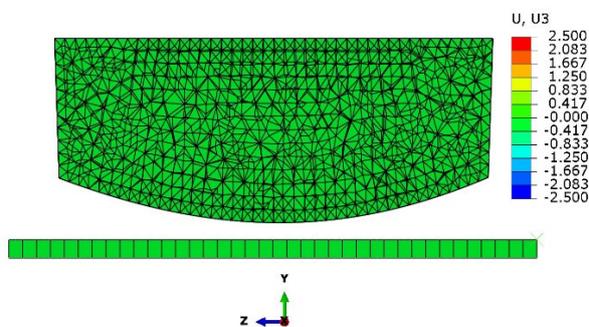
Das Abrollverhalten des Drucktampons auf dem Bedruckstoff spielt eine entscheidende Rolle für die Bedruckbarkeit, was in den Videos und den Bildern aus der Simulation gut beobachtet werden kann. Ein Abrollwinkel kann in Abaqus oder Salome-Meca nicht berechnet werden. Hier wird nur darauf geachtet, dass es keine Lufteinschlüsse oder direkte Flächenkontakte ohne Abrollen zwischen den Oberflächen auftritt. Nach den Erfahrungen der Drucktamponhersteller soll das Abrollverhalten ohne Bildung von Lufteinschlüssen oder einem direkten Flächenkontakt zwischen den Oberflächen erfolgen (Lück, o.D.a).

Der Drucktampon bewegt sich in negativer Y-Richtung. Die Verschiebungen in X- und Z-Richtung entstehen, wenn die Punkte der Drucktamponoberfläche mit dem Bedruckstoff in Kontakt kommen. Wie vorher erwähnt, ist dieser Drucktampon spiegelsymmetrisch und nicht achsensymmetrisch, deshalb werden hier die Verschiebungen im kartesischen Koordinatensystem (X-Y-Z) berechnet. Die Verschiebungen in U3 oder Z-Richtung aller Knoten des Netz-Modells sind in Abbildung 5-6 vor und nach der Deformation in (b) und (c) dargestellt. Die Verschiebungswerte werden in Farbenskalen von dunkelrot

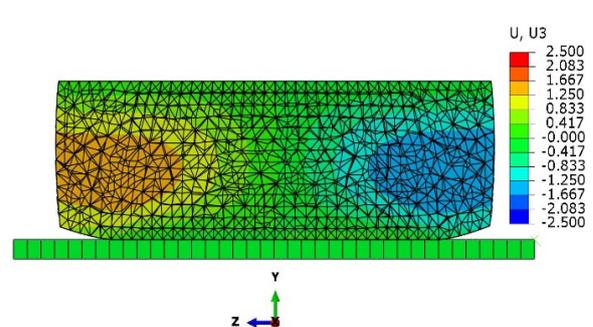
(positive Z-Richtung) bis dunkelblau (negative Z-Richtung) dargestellt und die Legende gibt den entsprechenden Verschiebungswert für jede Farbenskala in mm an.



(a) Abrollverhalten



(b) Verschiebungen auf die Z-Achse vor der Deformation in mm



(c) Verschiebungen auf die Z-Achse nach der Deformation in mm

**Abbildung 5-6: Abaqus-Simulationsergebnisse des Drucktampons N29 (6 Shore A Härte) auf einem flachen Bedruckstoff. Oben wird das Abrollen des Drucktampons auf dem Bedruckstoff dargestellt (a). Unten sind die Verschiebung  $U_3$  (in Z-Richtung) vor (b) und nach (c) der Deformation grafisch in Farben dargestellt. Der blaue Bereich stellt die Verschiebungen in die negative Richtung der Z-Achse dar.**

Um die Verschiebungen auf der Drucktamponoberfläche zu bestimmen, werden Punkte auf dem Drucktampon ausgewählt, die auf der Z-Achse und der X-Achse liegen (siehe Abbildung 5-7). Die Z-Linie liegt auf der Z-Achse, beginnt in der Mitte des Drucktampons und endet an seinem Rand, sechs Punkte sind auf dieser Linie markiert. Die X-Linie liegt auf der X-Achse, beginnt in der Mitte des Drucktampons und endet an seinem Rand, vier Punkte sind auf dieser Linie markiert. Die Positionen dieser Punkte vor der Deformation sind in Tabelle 5-10 angegeben.

**Tabelle 5-10: Position der Punkte auf der X- und Z-Linie in (X-Z) Koordinatensystem in mm.**

Punkte auf der Z-Linie	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
Position	(0; 11,94)	(0; 23,84)	(0; 32,75)	(0; 41,63)	(0; 50,51)	(0; 59,38)
Punkte auf der X-Linie	X1	X2	X3	X4		
Position	(12,4; 0)	(18,58; 0)	(24,71; 0)	(30,79; 0)		

Die Verschiebungen der Punkte werden in Abaqus während der Belastung berechnet, sie sind in Abbildung 5-7 in (c) und (d) dargestellt. Abbildung 5-7 zeigt die Verschiebungswerte nach der Belastung auf U3 (Z-Achse) und U1 (X-Achse). Auf der Abszisse in den Diagrammen (c) und (d) in Abbildung 5-7 ist die Zeitspanne angegeben, die der Drucktampon für einen halben Hub benötigt. Auf der Ordinate in Diagramm (c) ist die Verschiebung U3 in Z-Richtung und in Diagramm (d) ist die Verschiebung U1 in X-Richtung aufgetragen. Die hellblauen Kurven mit der quadratischen Markierung sind die Verschiebungen der Randpunkte (Punkte Z6 in (a) und X4 in (b)). Bei einem Deformationsweg von 20 mm und einer Zeitspanne von 1,34 Sekunden erreicht die Verschiebung des Punkts Z6 in Z-Richtung einen maximalen Wert von 2,38 mm und die Verschiebung des Punkts X4 in X-Richtung einen Wert von 1,2 mm. Die roten Kurven sind die Verschiebungen der mittleren Punkte (Punkt Z1 in (a) und X1 in (b)), sie nehmen die Werte zwischen  $\pm 0,2$  mm an. Der Drucktampon nimmt die Farbe aus Druckformnöpfchen auf und überträgt sie dann auf den Bedruckstoff. Das Druckbild im indirekten Tiefdruckverfahren besteht aus kleinen nebeneinander angeordneten Druckpunkten (Lück, o.D.a). Die Verschiebung der Drucktamponoberfläche in X- und Z-Richtung beeinflusst die Verschiebung und Verformung des Rahmens der gedruckten Punkte, was zu einer Verringerung der Qualität der Druckergebnisse führen kann. In diesem Fall muss das Druckbild zwischen den Punkten Z1 und Z4 auf der Z-Achse und zwischen den Punkten X1 und X3 auf der X-Achse liegen. Eine Positionierung des Druckbildes in der Mitte der Drucktamponoberfläche ist hier nicht zu empfehlen, da ein direkter Kontakt zwischen den Oberflächen ohne Abrollen stattfindet.

Wenn die Verschiebung während des Druckvorgangs aus der Simulation bekannt ist, lassen sich weitere Erkenntnisse über die Verformung des Druckbildes in jeder Richtung ermitteln. Bei der Anwendung des Tampondrucks in der gedruckten Elektronik ist die große Dehnung (Verschiebung) der Oberfläche des Drucktampons ein Nachteil. Dabei ist die Druckgenauigkeit bei scharfen Kanten im Tampondruck aufgrund der Dehnbarkeit der Drucktamponoberfläche ein Problem. Dies erschwert das Drucken von Mikroelektronik (Bodenstein et al, 2019). Die Form des Drucktampons kann so entwickelt werden, dass eine sehr geringe Verformung der Oberfläche des Drucktampons erreicht wird. Deshalb werden die Simulationen zur Optimierung eines geeigneten Drucktampons verwendet. Diese Optimierungsprozesse

fürten zur Entwicklung von neuen Arten der Drucktampons (Hohl-Drucktampons und Bi-Material-Drucktampons), die in Kapitel 6 ausführlich beschrieben werden.

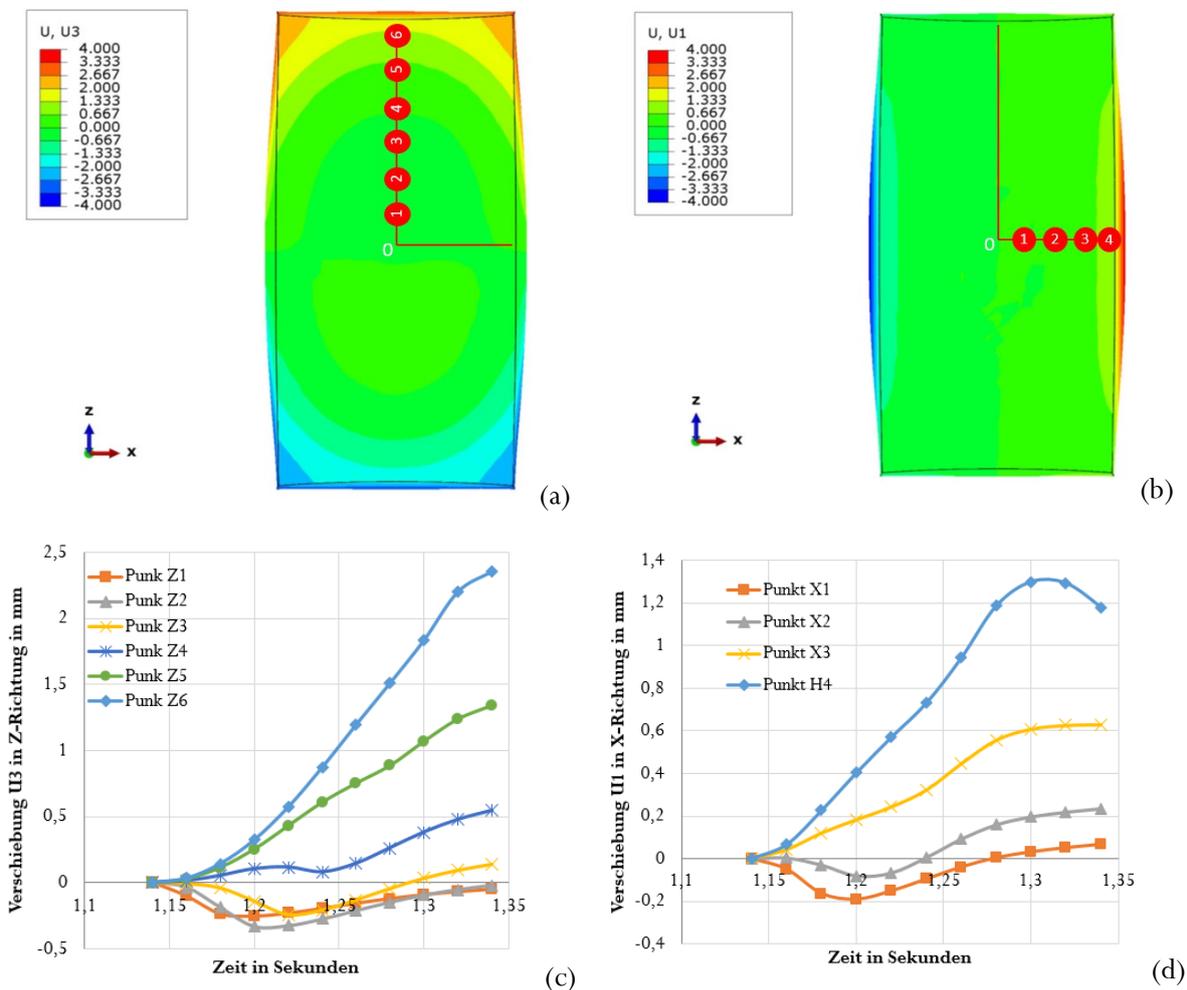
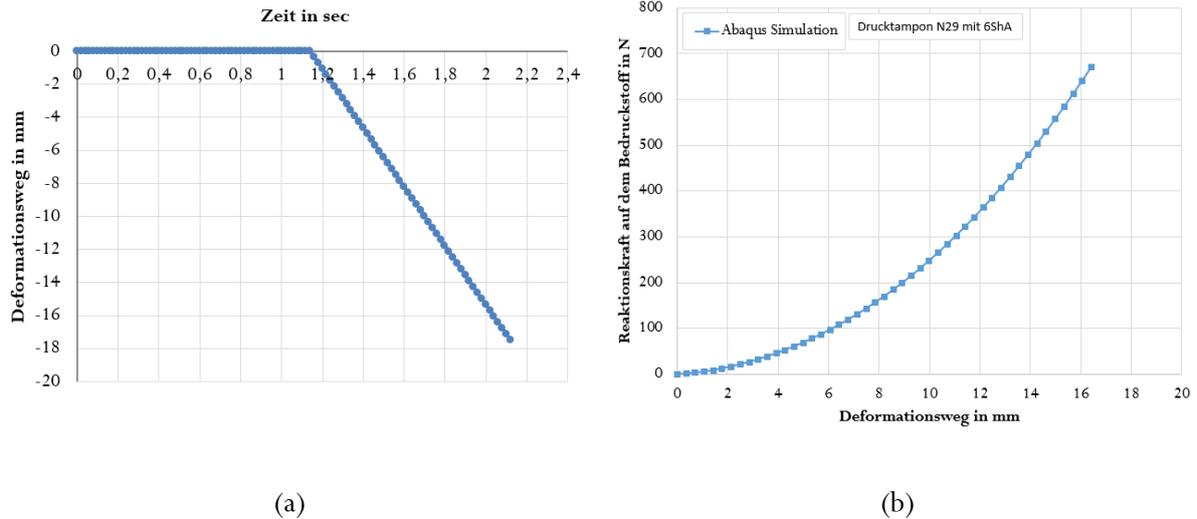


Abbildung 5-7: Verschiebung der Punkte auf der Z-Linie in Z-Richtung (a), und auf der X-Linie in X-Richtung (b). Verschiebung der Punkte auf der Z-Linie in Z-Richtung mit der Zeit (c), und auf der X-Linie in X-Richtung (d).

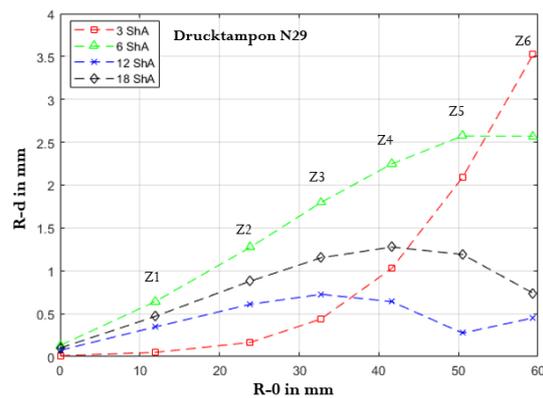
In einer Zeitspanne von 1,34 Sekunden wird der Drucktampon bis 20 mm Deformationsweg belastet. Der Deformationsweg mit der Zeit und die resultierende Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff mit dem Deformationsweg werden in Abbildung 5-7 gezeigt. Der Drucktampon berührt den Bedruckstoff nach 1,14 Sekunden und ab diesem Zeitpunkt beginnt der Deformationsweg, so dass die Reaktionskraft mit dem Deformationsweg ansteigt.



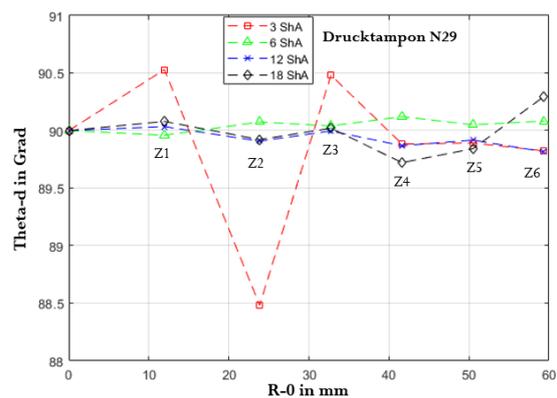
**Abbildung 5-7: Deformationsweg des Drucktampons N29 (6 Shore A Härte) mit der Zeit (a) und die Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff mit dem Deformationsweg (b). ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.**

Die Verschiebungen der Punkte in Tabelle 5-10 werden ebenfalls im Polarkoordinatensystem berechnet, sie sind in Abbildung 5-8 dargestellt. In einem Polarkoordinatensystem werden die Ergebnisse mit einem Radius (R) als Abstand zu einem Referenzpunkt und einem Winkel (Theta) als Winkel zur Referenzrichtung dargestellt. In diesem Fall ist der Referenzpunkt die Drucktamponspitze in der Mitte der Druckfläche eines Drucktampons. Die Referenzrichtung ist die X-Richtung. Jeder Punkt auf der Oberfläche des Drucktampons wird durch R und Theta definiert. R-0 ist der ursprüngliche Abstand zwischen dem Punkt und dem Referenzpunkt vor der Deformation. Theta-0 ist der Winkel von einer Linie zwischen dem Punkt und dem Bezugspunkt zur X-Achse vor der Deformation. Theta-0 beträgt 90 Grad für alle Punkte auf der Z-Linie und Null Grad für die Punkte auf X-Linie. Nach der Deformation des Drucktampons mit einer Belastung vom 20 mm Deformationsweg bekommt jeder Punkt eine Verschiebungsamplitude von R-d und einen Verschiebungswinkel (Drehung) von Theta-d.

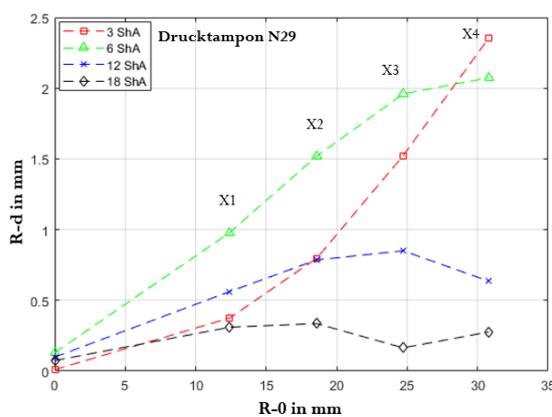
Abbildungen 5-8(a) und 5-8(c) zeigen eine Verschiebungssteigerung mit zunehmender Entfernung von der Drucktamponspitze. Die Zunahme der Drucktamponhärte reduziert die Verschiebung und führt zu einer geringeren Verformung der Druckergebnisse. Abbildungen 5-8(b) und (d) zeigen geringe Drehungen der Punkte an der Oberfläche des Drucktampons. Aus den Kurven der Verschiebungen für verschiedene Härtegrade lässt sich schließen, dass die Drucktampons mit 12 und 18 Shore A Härten weniger Verformungen im Druckergebnis aufweisen.



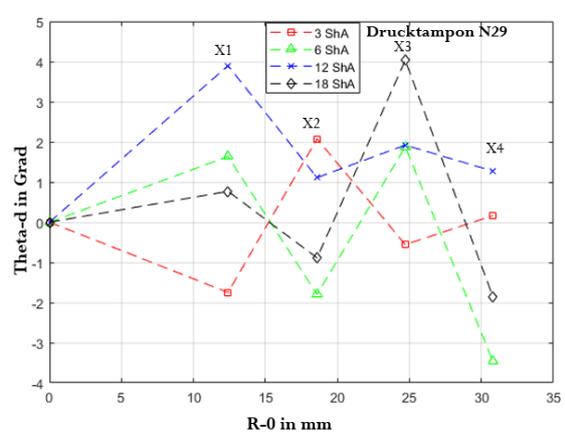
(a)



(b)



(c)

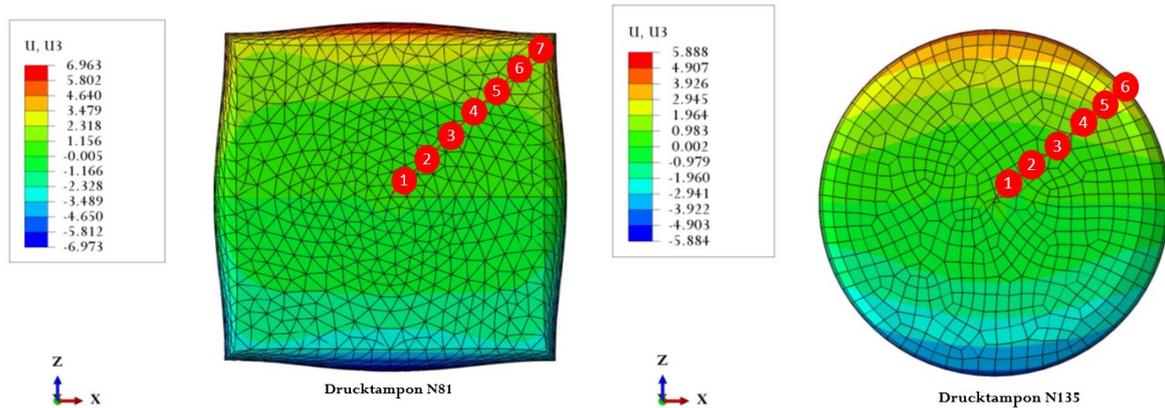


(d)

Abbildung 5-8: Verschiebungsamplitude der Punkte auf der Z-Linie im Polarkoordinatensystem (a) und auf der X-Linie (c). Verschiebungswinkel der Punkte auf der Z-Linie (b) und auf der X-Linie (d). R-0 ist hier die ursprüngliche Position der Punkte. R-d ist die Verschiebungsamplitude nach der Deformation und Theta-d die Verschiebungswinkel. Z1 bis Z6 sind die Punkte auf der Z-Linie und X1 bis X4 die Punkte auf X-Linie. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

Um die Verschiebungen bei den anderen Drucktamponformen zu untersuchen, werden Abaqus-Simulationen für die Drucktampons N81 und N135 mit vier unterschiedlichen Shore A Härten durchgeführt. Diese Drucktampons sind achsensymmetrisch, deshalb werden hier die Verschiebungen an der Oberfläche der Drucktampons im Polarkoordinatensystem berechnet. Abbildung 5-9 zeigt einige Zellen und Punkte auf der Drucktamponoberfläche, die in den Simulationsergebnissen als Elemente und Knoten bezeichnet werden. Sie werden nach der Vernetzung des Drucktampons im Simulationsprozess erzeugt. Jeder Punkt auf der Drucktamponoberfläche hat eine Verschiebung in einem 3D-Koordinatensystem, wenn der Drucktampon auf den Bedruckstoff drückt. Die Verschiebung kann im kartesischen Koordinatensystem X-Y-Z auch berechnet werden. Der Drucktampon bewegt sich in Y-

Richtung. Eine Verschiebung in X- und Z-Richtung entsteht, wenn die Punkte der Drucktamponoberfläche mit dem Bedruckstoff in Kontakt kommen. Während des Druckvorgangs überträgt die Drucktamponoberfläche ein 2D-Bild auf die XZ-Ebene der Bedruckstoffoberfläche. Eine Verschiebung der Drucktamponoberflächenpunkte in X- und Z-Richtung hat daher einen Einfluss auf die Verzerrung der Druckergebnisse. Abbildung 5-9 zeigt die Verschiebungskomponente  $U_3$  in Z-Richtung in Farbskalen für beiden Drucktampons.

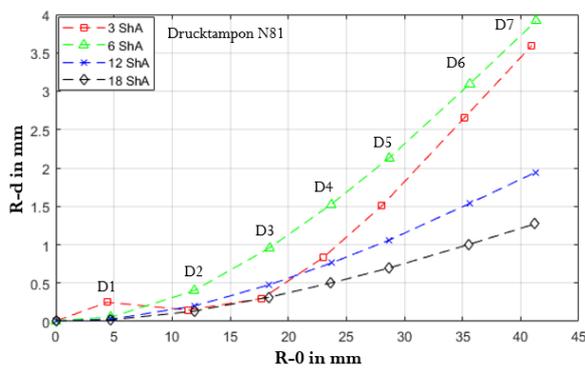


**Abbildung 5-9: Verschiebungskomponente  $U_3$  auf die Z-Achse nach der Deformation in mm. Links ist der Drucktampon N81 nach der Deformation mit einigen markierten Punkten auf einer diagonalen Linie dargestellt. Rechts ist der Drucktampon N135 nach der Deformation mit den markierten Punkten auf dargestellt.**

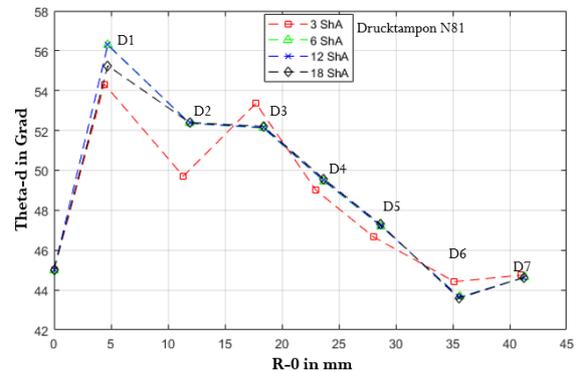
Um die Verschiebungen auf den Drucktamponoberflächen im Polarkoordinatensystem zu bestimmen, werden Punkte auf einer diagonalen Linie (mit 45 Grad zur X-Achse) markiert und ihre Position vor und nach der Deformation berechnet. Die Verschiebungen der Punkte an der Drucktamponoberfläche werden im Polarkoordinatensystem berechnet, sie sind in Abbildung 5-10 dargestellt. Abbildungen 5-10(a) und 5-10(c) zeigen eine Verschiebungssteigerung mit zunehmender Entfernung von der Drucktamponspitze. Die Zunahme der Drucktamponhärte bei allen Drucktampons reduziert die Verschiebungsamplitude und führt zu einer geringeren Verformung der Druckergebnisse.

Der Drucktampon N81 ist der schärfste der beschriebenen Drucktampons. Einerseits gibt es mehr Änderungen des Verschiebungswinkels von Drucktampon N81 im Vergleich zu den anderen Drucktampons, andererseits zeigt die Verschiebungsamplitude  $R_d$  bei gleichen  $R_0$  Werten nur geringe Veränderungen. Dies wird als eine größere Winkelverschiebung im Vergleich zur Radialverschiebung interpretiert (siehe Abbildung 5-10(b)). Abbildung 5-10(d) zeigen einen geringen Verschiebungswinkel (Drehung) der Punkte an der Oberfläche des Drucktampons. Aus den Kurven der Verschiebungen für

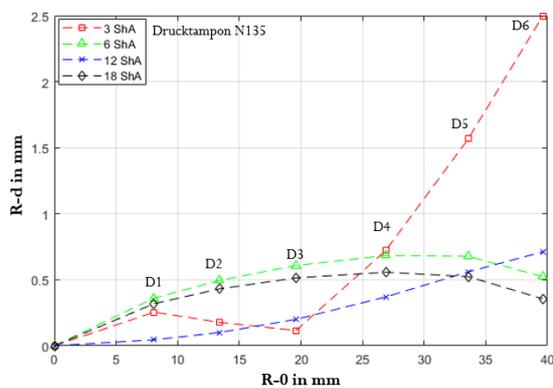
verschiedene Drucktampons mit verschiedenen Härtegraden lässt sich schließen, dass die Drucktampons N135 mit 12 und 18 Shore A Härten weniger Verformungen im Druckergebnis aufweisen.



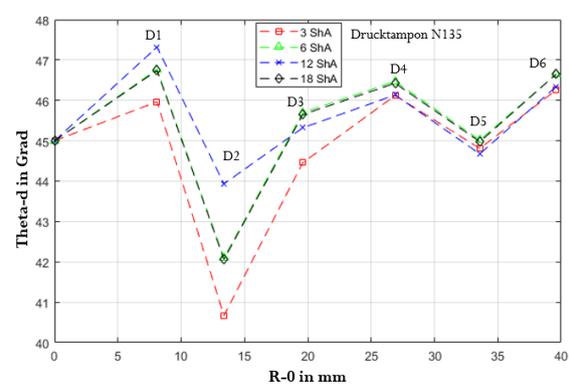
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 5-10: Verschiebungsamplitude der Punkte auf der Diagonale auf der Oberfläche des Drucktampons N81 im Polarkoordinatensystem (a) und auf der Oberfläche des Drucktampons N135 (c). Verschiebungswinkel der Punkte auf der Oberfläche des Drucktampons N81 (b) und auf der Oberfläche des Drucktampons N135 (d). R-0 bezieht sich auf die ursprüngliche Position der Punkte. R-d bezeichnet die Verschiebungsamplitude nach der Deformation und Theta-d bezeichnet die Verschiebungswinkel. D1 bis D7 stellen die Punkte auf der Diagonale dar. ShA in der Kurvenbezeichnung bezeichnet die Abkürzung für Shore A Härte.

Aus den Simulationsergebnissen lässt sich auch schließen, dass die Verschiebung der Drucktampons in einem Bereich nahe der Drucktamponspitze kleiner ist als in anderen Bereichen. Im Allgemeinen ist die Verschiebung bei harten Drucktampons geringer als bei weichen. Die Simulationsergebnisse helfen dabei, den geeigneten Druckbereich in verschiedenen Drucktampons zu finden, um die gedruckten Punkte mit weniger Verformung und Verschiebung zu drucken.

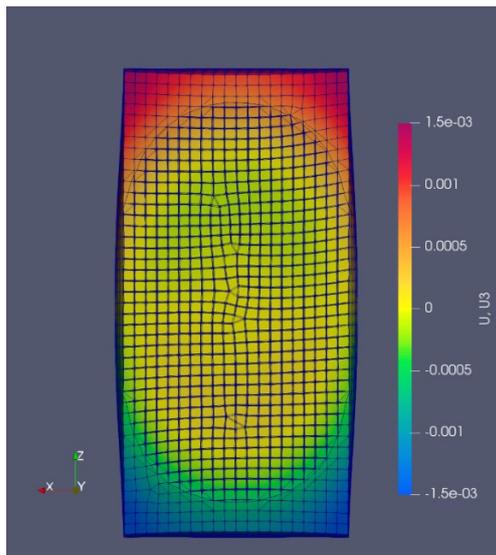
## 5.5 Vergleich zwischen den Ergebnissen von Abaqus und Salome-Meca

Wie bereits erwähnt, sind die Hersteller von Drucktampons oft kleine Unternehmen und können sich daher die hohen Lizenzgebühren von Abaqus nicht leisten. Deshalb wird zunächst eine Studie durchgeführt, um zu prüfen, ob das Open-Source FEM-Programm Salome-Meca auch für die Simulation von Drucktampons geeignet ist. Das FEM-Programm Salome-Meca kann auch hyperelastische Materialien mittels Mooney-Rivlin-Gleichungen simulieren. Die anderen Materialmodelle können aus den Mfront-Code-Aster-Bibliotheken in Salome-Meca importiert werden.

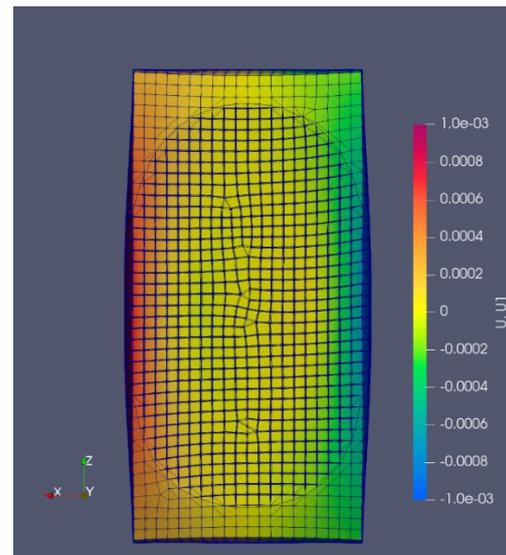
Um die Programme Abaqus und Salome-Meca miteinander zu vergleichen, werden die in Abschnitt 5.4 beispielhaft gezeigten Simulationen auch in Salome-Meca durchgeführt. Die Materialparameter für das Mooney-Rivlin Materialmodell werden aus Tabelle 5-7 genommen. Aus den Abaqus- und Salome-Meca-Simulationen kann die Verschiebung in X-Richtung und Z-Richtung der Oberfläche des Drucktampons N29 mit 6 Shore A Härte grafisch dargestellt werden. Abbildung 5-11 zeigt die Verschiebungen U3 in Z-Richtung und U1 in X-Richtung aus den beiden Programmen. Sie zeigt, dass die Ergebnisse von beiden Programmen sehr ähnlich sind und die Verschiebung in der Mitte des Drucktampons am geringsten ist. Aus den Simulationsergebnissen lässt sich schließen, dass das Druckbild so nah wie möglich in der Mitte des Drucktampons platziert werden muss. Um die Verschiebungen von beiden Programmen zu vergleichen, werden Verschiebungsamplitude und Verschiebungswinkel an der Oberfläche der Drucktampons N29 mit unterschiedlichen Shore A Härten im Polarkoordinatensystem berechnet.

Die Verschiebungen der Punkte in Tabelle 5-10 werden in Abaqus und Salome-Meca im Polarkoordinatensystem berechnet, sie sind in Abbildung 5-12 dargestellt. Nach der Deformation des Drucktampons mit 20 mm Deformationsweg bekommt jeder Punkt eine Verschiebungsamplitude von  $R-d$  und einen Verschiebungswinkel (Drehung) von  $\Theta-d$ .

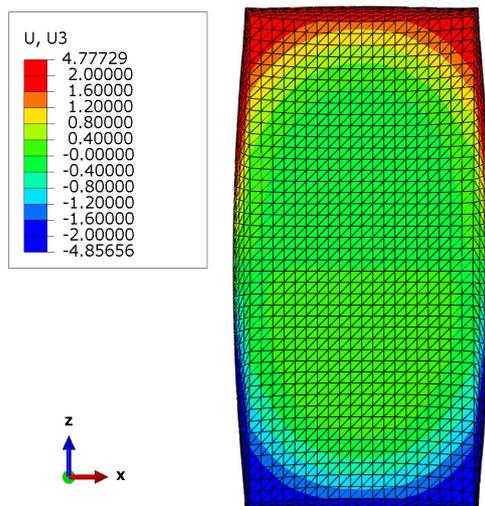
Abbildungen 5-12(a) und 5-12(c) zeigen eine Verschiebungssteigerung mit zunehmender Entfernung von der Drucktamponspitze in beiden Programmen (Abaqus und Salome-Meca). In beiden Programmen reduziert die Zunahme der Drucktamponhärte die Verschiebungsamplitude. Abbildungen 5-12(b) und (d) zeigen geringe Verschiebungswinkel (Drehungen) der Punkte an der Oberfläche des Drucktampons in beiden Programmen.



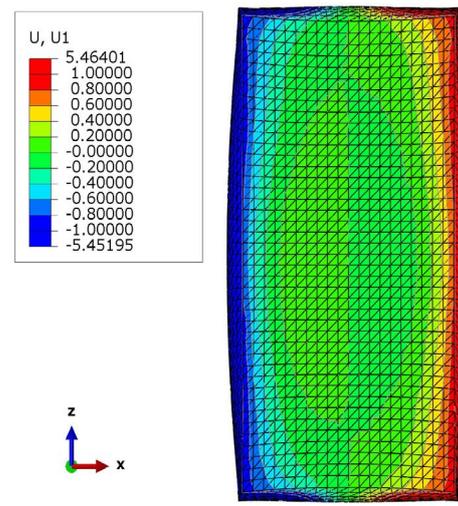
Verschiebungsfeld in Z-Richtung in m von  
Salome-Meca



Verschiebungsfeld in X-Richtung in m von  
Salome-Meca



Verschiebungsfeld in Z-Richtung in mm aus  
Abaqus



Verschiebungsfeld in X-Richtung in mm aus  
Abaqus

Abbildung 5-11: Vergleich zwischen Simulationsergebnissen von Abaqus und Salome-Meca für den Drucktampon N29 (140 mm × 65 mm × 65 mm) auf einer ebenen Aluminiumplatte bei einem Deformationsweg von 20 mm, in beiden Fällen beträgt die Netz-Elementgröße 3 mm und der Netzelementtyp ist C3D10MH. Die Ergebnisse von Abaqus sind in mm und die von Salome-Meca in m.

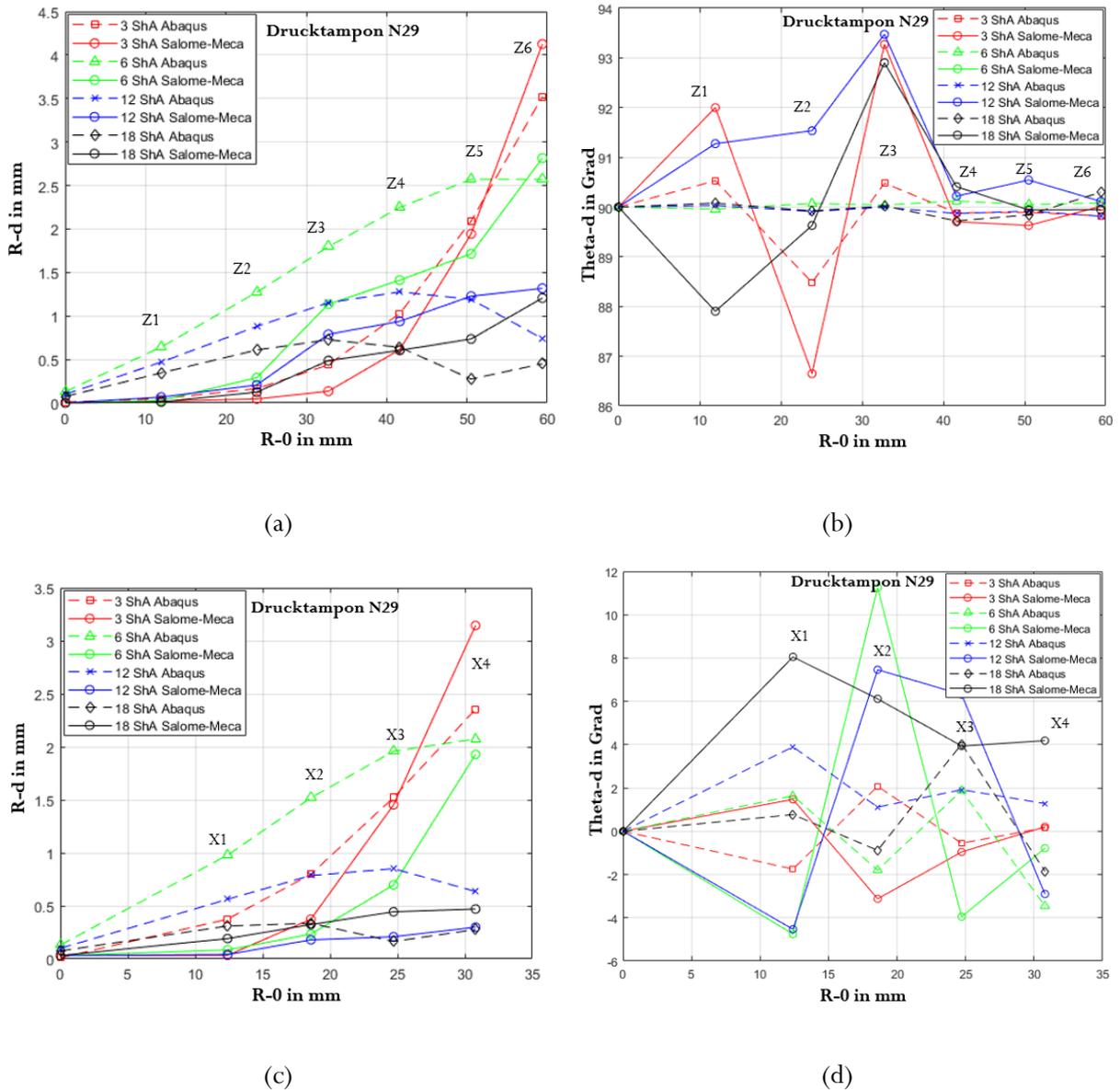
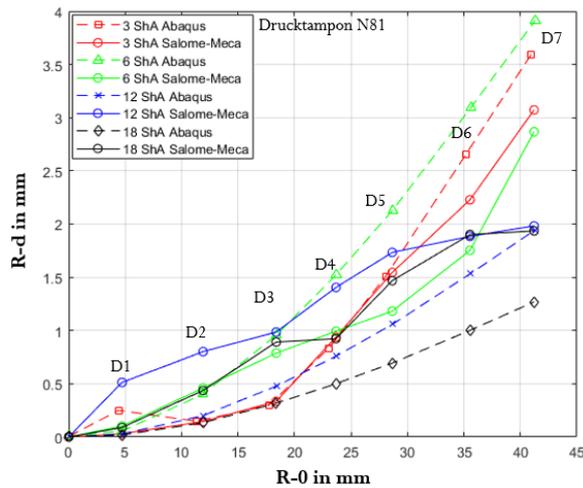
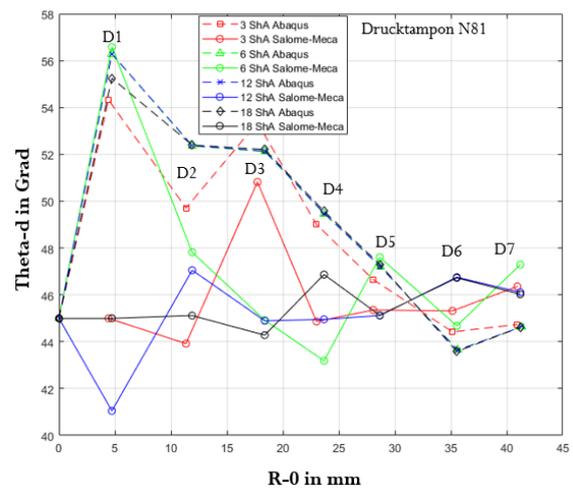


Abbildung 5-12: Vergleich zwischen berechneten Verschiebungen von Abaqus und Salome-Meca im Polarkoordinatensystem für den Drucktampon N29 mit vier unterschiedlichen Shore A Härten bei einem Deformationsweg von 20 mm. Verschiebungsamplitude der Punkte auf der Z-Linie in Abaqus und Salome-Meca im Polarkoordinatensystem (a) und auf der X-Linie (c). Verschiebungswinkel der Punkte auf der Z-Linie (b) und auf der X-Linie (d). R-0 sind hier die ursprüngliche Position der Punkte. R-d ist die Verschiebungsamplitude nach der Deformation und Theta-d die Verschiebungswinkel. Z1 bis Z6 sind die Punkte auf der Z-Linie und X1 bis X4 die Punkte auf X-Linie. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

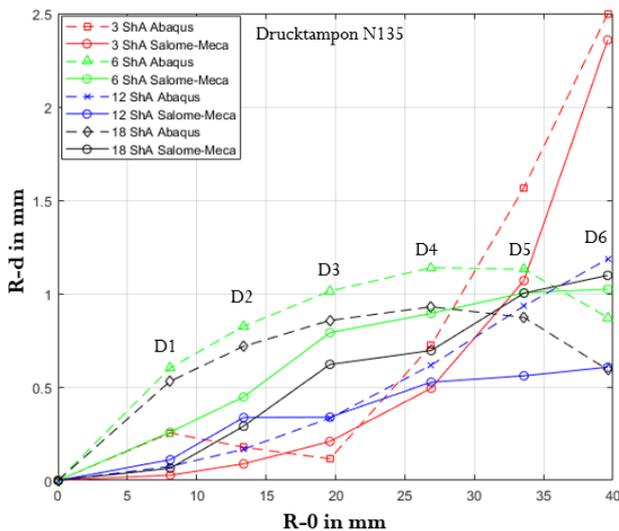
Abbildung 5-13 zeigt Verschiebungsamplituden und Verschiebungswinkel für die anderen Drucktamponformen (N81 und N135).



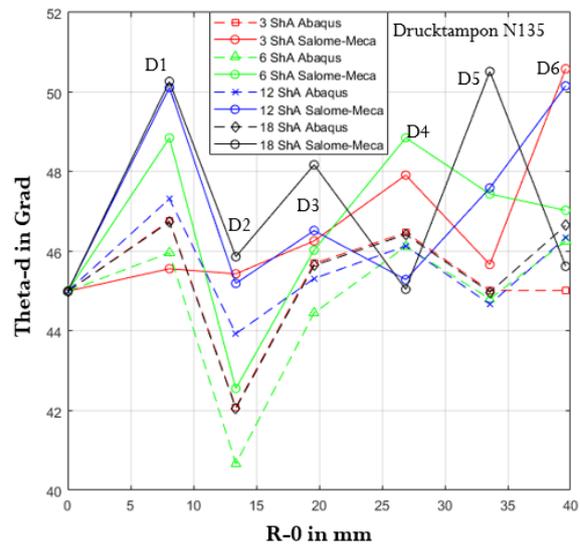
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 5-13: Vergleich zwischen berechneten Verschiebungen von Abaqus und Salome-Meca im Polarkoordinatensystem für die Drucktampons N81 und N135 bei einem Deformationsweg von 20 mm. Verschiebungsamplitude der Punkte auf der D-Linie des Drucktampons N81 (a). Verschiebungswinkel der Punkte auf der D-Linie (b). Verschiebungsamplitude der Punkte auf der D-Linie des Drucktampons N135 (c). Verschiebungswinkel der Punkte auf der D-Linie (d). D1 bis D7 sind die Punkte auf der D-Linie. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

Um die Verschiebungsamplituden in Abbildungen 5-12 und 5-13 aus den beiden Programmen zu vergleichen, werden die Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ -Wert) berechnet und in Tabelle 5-11 dargestellt. In Tabelle 5-11 beschreibt der  $R^2$ -Wert, wie gut die Simulationsergebnisse in Abaqus mit den Ergebnissen in

Salome-Meca in jedem Fall übereinstimmen. Ein Wert, der näher bei eins liegt, zeigt eine bessere Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen. Zum Beispiel beträgt  $R^2$  0,974 im Fall des Drucktampon N29 mit einer Härte von 3 Shore A. In diesem Fall sind die Simulationsergebnisse aus beiden Programmen gut vergleichbar. Ein  $R^2$ -Wert zwischen 0,7 und 0,9 bedeutet eine hohe Korrelation zwischen den Ergebnissen und ein Wert zwischen 0,4 und 0,699 zeigt ein mittelmäßiges Verhältnis (Backhaus et al, 2015).

**Tabelle 5-11: Bestimmtheitsmaße  $R^2$  zwischen den Simulationsergebnissen (Verschiebungsamplituden) aus den beiden Programmen (Abaqus und Salome-Meca).**

$R^2$	3 Shore A	6 Shore A	12 Shore A	18Shore A
Drucktampon N29	0,974	0,815	0,750	0,814
Drucktampon N81	0,969	0,971	0,888	0,971
Drucktampon N135	0,962	0,883	0,822	0,701

Die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse aus den beiden Programmen (Abaqus und Salome-Meca) wurde mittels Abbildung 5-12 und 5-13 sowie Tabelle 5-11 bewertet. Die Simulationsergebnisse der beiden Drucktampons N29 mit 12 Shore A und N135 mit 18 Shore A sind in diesem Fall nicht so genau wie die anderen und ihr  $R^2$  ist kleiner als 0,8. In anderen Fällen besteht eine hohe Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen. Beim Drucktampon N29 mit einer Härte von 3 Shore A ist der  $R^2$ -Wert mit 0,97 am höchsten. Im nächsten Abschnitt wird eine Sensitivitätsanalyse beschrieben.

## 5.6 Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss der Simulationsparameter auf die Simulationsergebnisse zu ermitteln. Die Sensitivitätsanalyse ist eine Methode zur Abschätzung der Abweichung der Ergebnisse durch eine Variation der Eingangsgrößen der Simulation. In dieser Dissertation sind die Eingangsgrößen die mechanischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials und die mathematischen Modelle des hyperelastischen Materials. Die Sensitivitätsanalyse beschäftigt sich mit der Frage, ob die Simulationsergebnisse auch bei veränderten Eingangsgrößen stabil bleiben, wie sich der Wert der berechneten Variablen (Reaktionskraft auf den Bedruckstoff und Verschiebung während des Druckprozesses) bei der Variation der Eingangsgrößen verändert und welche Eingangsgrößen welchen Einfluss auf die resultierende Reaktionskraft haben (Schwenk, 2007).

Die Sensitivitätsanalyse wird hier durch die Änderung der Simulationsparameter durchgeführt, um die Validierung der FEM-Simulation zu verbessern. Ist die Sensitivität der einzelnen Parameter auf das Ergebnis der FEM-Simulation bekannt, kann die Qualität der Simulationsergebnisse verbessert werden.

Im Folgenden wird die Sensitivität der Eingangsgrößen auf die Ergebnisse der FEM-Simulation in Abaqus anhand der in Kapitel 4 durchgeführten Versuchen betrachtet. Schließlich wird der Einfluss des gewählten mathematischen Modells auf die Genauigkeit der Abaqus-Simulation untersucht. Ein Teil dieser Untersuchungen wurde in Aboud et al (2020) veröffentlicht.

### 5.6.1 Einfluss des Fehlers beim einachsigen und dem planaren Zugversuch

Der einachsige und der planare Zugversuch werden in dieser Studie zur Untersuchung des Fehlereinflusses bei der Bestimmung der Materialkennwerte betrachtet. Der Zugversuch wurde an drei Zugproben mit unterschiedlichen Shore A Härten durchgeführt und führte zu drei verschiedenen Datensätzen (siehe Abbildungen A-3 und A-4 in Anhang). Abbildung 5-12 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die erste, zweite und dritte Probe mit 6 Shore A.

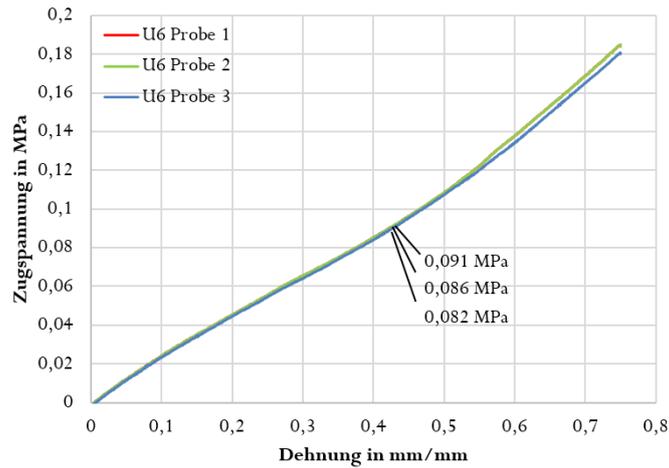


Abbildung 5-12: Der einachsige Zugversuch für drei Zugproben aus Silikonkautschuk mit 6 Shore A. Hier wird nur die Belastung aus jedem Zyklus dargestellt.

Diese Datensätze werden als Eingabeparameter für drei Abaqus FEM-Simulationen für den Drucktampon N81 verwendet und ergeben somit drei unterschiedliche Ergebnisse für die Reaktionskraft. Diese sind in Abbildung 5-13 dargestellt. Es gibt keine Divergenz zwischen den drei Kurven und sie liegen übereinander. Abbildung 5-13 zeigt die steigende Reaktionskraft aufgrund des zunehmenden Deformationswegs des Drucktampons aus den drei Simulationen.

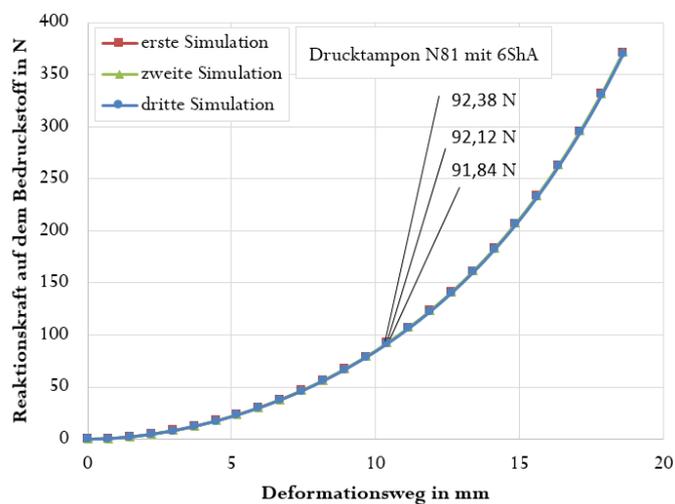


Abbildung 5-13: Abaqus-Simulationsergebnisse (Reaktionskraft mit dem Deformationsweg) für den Drucktampon N81 mit 6 Shore A für drei einachsige Zugversuche an drei Zugproben. Der Netz-Elementtyp ist C3D10H und die Netz-Elementgröße beträgt 3 mm.

Eine Erhöhung der Zugspannung von 0,082 MPa auf 0,091 MPa bei einer Dehnung von 0,46 mm/mm führt zu einer Differenz der Reaktionskräfte von etwa 0,54 N (0,5 % des mittleren Kraftwerts) bei einem Deformationsweg von 10,5 mm. Daher ist der Einfluss des Fehlers beim einachsigen Zugversuch sehr gering (siehe Abbildungen 5-12 und 5-13). Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem einachsigen Zugversuch sind in Abschnitt 4.4.2 und in Anhang A.3 dargestellt. Drei Proben für jeden Härtegrad wurden immer getestet und ihre Spannungs-Dehnungs-Diagramme berechnet. Für jeden Härtegrad wurden drei Datensätze (Spannungs-Dehnungs-Diagramme) berechnet. Analog zu den Simulationen für den Drucktampon N81 in Abbildung 5-13 werden Abaqus-Simulationen auch für die Drucktampons N29 und N135 mit Härten von 3 und 18 Shore A durchgeführt (siehe Abbildung 5-14).

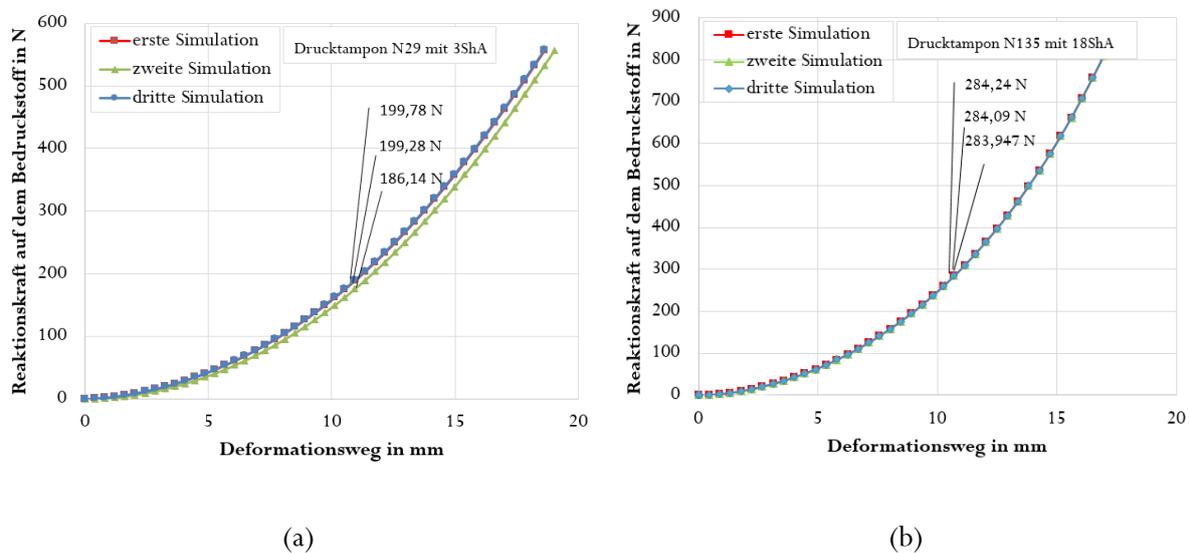


Abbildung 5-14: Abaqus-Simulationsergebnisse für zwei Drucktampons N29 mit 3 Shore A und N135 mit 18 Shore A für drei einachsige Zugversuche, die Kurven in rot, grün und blau sind die Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff mit dem Deformationsweg des Drucktampons. Der Netz-Elementtyp ist C3D10H und die Netz-Elementgröße beträgt 3 mm. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

Eine Erhöhung der Zugspannung von 0,14 MPa auf 0,154 MPa bei einer Dehnung von 0,75 mm/mm in Abbildung 4-15 führt zu einer Differenz der Reaktionskräfte von etwa 13,64 N (4 % des mittleren Kraftwerts) bei einem Deformationsweg von 10,5 mm. Daher ist der Einfluss des Fehlers im einachsigen Zugversuch bei niedrigen, mittelharten und hohen Härten und bei unterschiedlichen Drucktamponformen sehr gering.

In gleicher Weise soll der planare Zugversuch betrachtet werden. Hier werden auch drei Planar-Zugproben für jeden Härtegrad verwendet. Die Schwankungen der Messwerte zwischen den einzelnen Belastungen für die Planar-Zugproben mit 3 Shore A sind größer als bei den anderen Planar-Zugproben

mit sechs und 18 Shore A (siehe Abbildungen 4-17 und A-4). Deshalb werden auch hier neun Abaqus-Simulationen für drei Drucktampons mit drei unterschiedlichen Härten durchgeführt (siehe Abbildung 5-15).

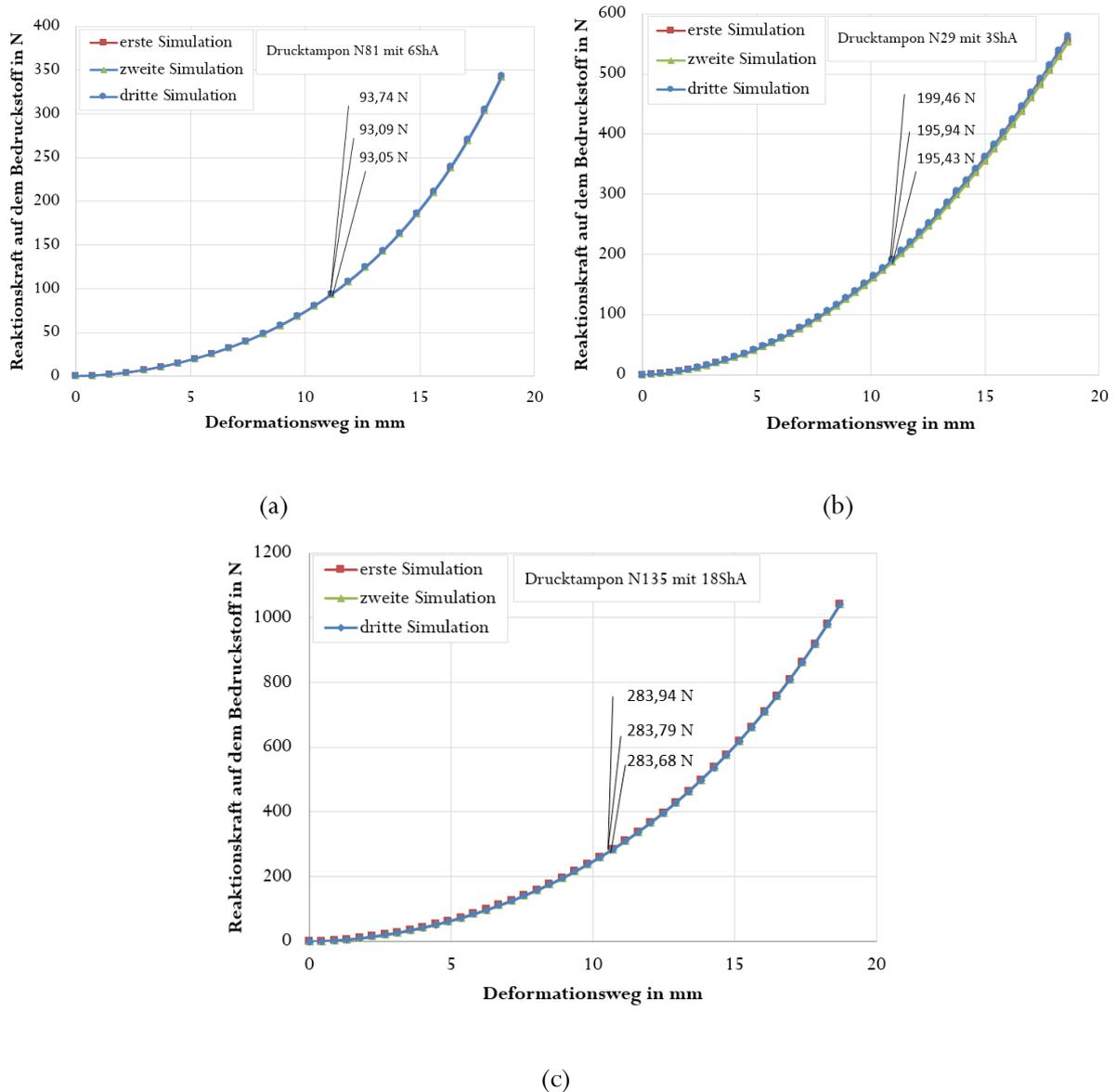


Abbildung 5-15: Abaqus-Simulationsergebnisse für drei Drucktampons für die drei planaren Zugversuchen, die Kurven in rot, grün und blau sind die Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff mit dem Deformationsweg des Drucktampons. Die erste, zweite und dritte Simulation basiert auf dem ersten, zweiten und dritten planaren Zugversuch. Der Netz-Elementtyp ist C3D10H und die Netz-Elementgröße beträgt 3 mm. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

Abbildung 5-15b zeigt überraschenderweise, dass die Schwankungen zwischen den Reaktionskräften nicht so groß sind, wie die Schwankungen in Abbildung 4-17. Eine Erhöhung der planaren Zugspannung von 63,625 kPa auf 78,614 kPa bei einer Dehnung von 0,55 mm/mm führt zu einer Differenz der

Reaktionskräfte von etwa 4 N (2,3 % des mittleren Kraftwerts) bei einem Deformationsweg von 10,5 mm (siehe Abbildung 5-15b). Daher ist der Einfluss des Fehlers beim planaren Zugversuch sehr gering ist. Der Einfluss des Fehlers bei der biaxialen Zugprüfung ist auch gering (siehe Abbildung A-10 in Anhang A.10). Im nächsten Abschnitt wird der Einfluss des volumetrischen Druckversuchs erklärt.

### 5.6.2 Einfluss der Verwendung des volumetrischen Druckversuchs statt Poissonzahl

Wie in Abschnitt 5.3 erwähnt, sind die Inputparameter der FEM-Simulation die in Abaqus berechneten Materialkonstanten aus den einachsigen, planaren und biaxialen Zugversuchen und die Querkontraktionszahl des Silikonkautschuks. Der Silikonkautschuk gilt normalerweise als inkompressibel. Dies entspricht einer Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl) von 0,5 (Al Aboud et al, 2020). Eine Alternative zur Querkontraktionszahl sind die Materialkonstanten aus dem volumetrischen Druckversuch. Um den Einfluss der Verwendung des volumetrischen Druckversuchs statt der Poisson-Zahl auf die Simulationsergebnisse zu untersuchen, werden sechs Abaqus-Simulationen für drei Drucktampons mit drei verschiedenen Shore A Härten durchgeführt. In drei dieser Simulationen werden die in Tabelle 4-3 berechneten Querkontraktionszahlen verwendet. In den anderen drei Simulationen werden die entsprechenden Datensätze der volumetrischen Druckversuche verwendet. Der volumetrische Druckversuch wird in Abschnitt 4.4.6 erklärt. Diese Prüfung unterscheidet sich von dem normalen einachsigen Druckversuch dadurch, dass die Dehnung in dieser Materialprüfung eine volumetrische Dehnung und nicht eine Längsdehnung ist. Der Einfluss des Fehlers beim volumetrischen Druckversuch ist auch sehr gering, wie bei den einachsigen, planaren und biaxialen Zugversuchen (siehe Abbildung A-11 in Anhang A.11). Deshalb wird hier nur der Einfluss der Verwendung des volumetrischen Druckversuchs statt der Poisson-Zahl auf die Simulationsergebnisse untersucht. Abbildung 5-16 zeigt sechs Abaqus-Simulationsergebnisse. Sie zeigen den Unterschied zwischen den resultierenden Reaktionskräften mit dem Deformationsweg bei einer Poisson-Zahl von ca. 0,43 (blaue Kurven) und bei der Verwendung der Datensätze aus dem volumetrischen Druckversuch (rote Kurven). Beim Drucktampon N81 mit 6 Shore A beträgt die Differenz der Reaktionskräfte bei einem Deformationsweg von 11,15 mm ca. 9,74 N (11,8 % des mittleren Kraftwerts) und bei 10,5 mm Deformationsweg 7,47 N (10,8 % des mittleren Kraftwerts) (siehe Abbildung 5-16a). Beim weichen Drucktampon N29 mit 3 Shore A beträgt die Differenz der Reaktionskräfte bei einem Deformationsweg von 10,5 mm 8,59 N (4,9 % des mittleren Kraftwerts) (siehe Abbildung 5-16b). Beim harten Drucktampon N135 mit 18 Shore A beträgt die Differenz der Reaktionskräfte bei einem Deformationsweg von 10,5 mm 11,7 N (4,2 % des mittleren Kraftwerts) (siehe Abbildung 5-16c).

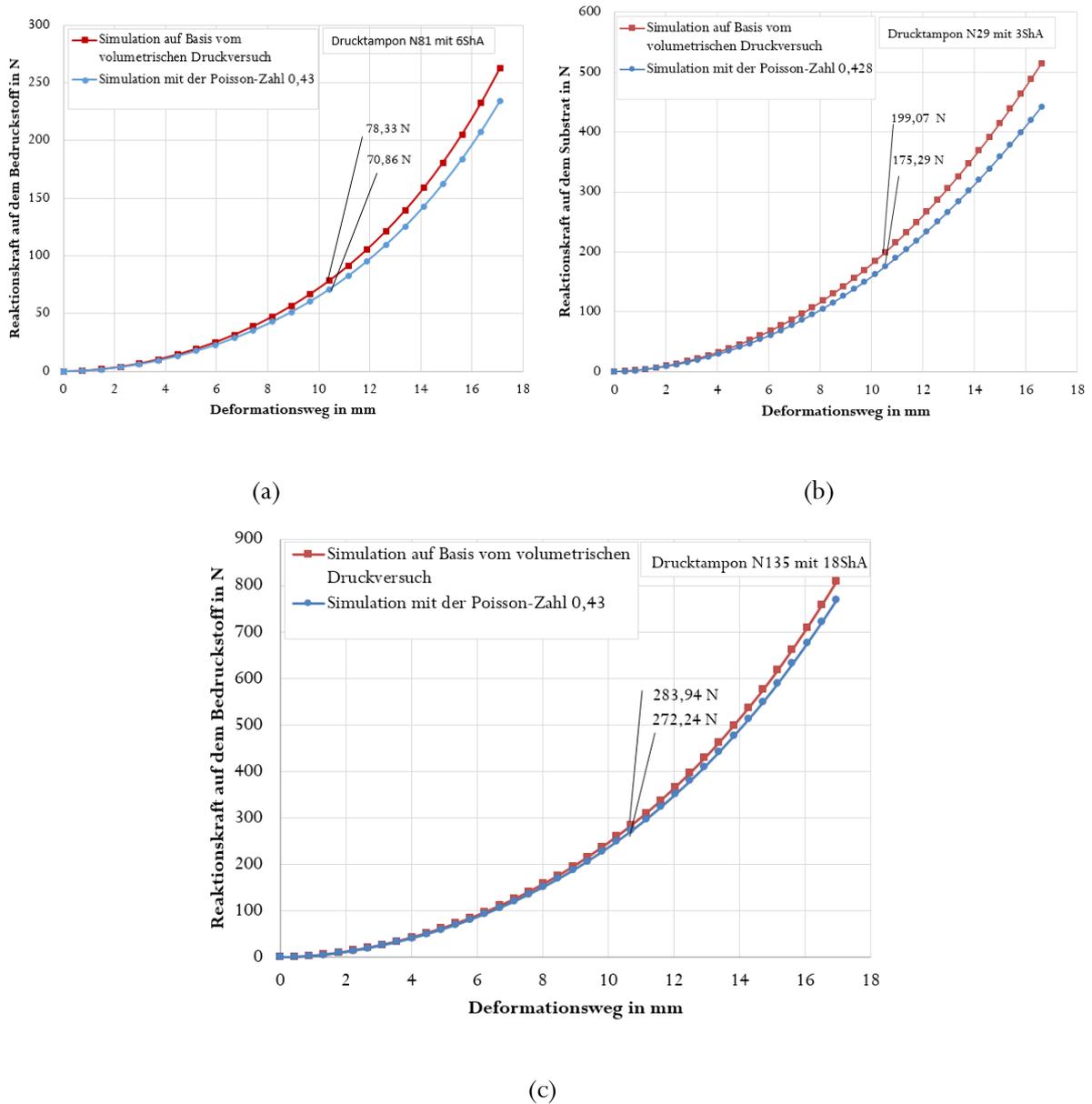


Abbildung 5-16: Vergleich der resultierenden Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg auf einem flachen Bedruckstoff aus der Abaqus-Simulation (Netzelementtyp C3D10H und Netzgröße 3 mm) bei einer Poisson-Zahl von 0,43 (blau) und bei der Verwendung der Datensätze aus dem volumetrischen Druckversuch (rot) für drei Drucktampons mit drei unterschiedlichen Shore A Härten. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

Der Einfluss der Verwendung des volumetrischen Druckversuchs statt der Poisson-Zahl auf die Simulationsergebnisse bei großen Deformationen ist relativ groß (siehe Abbildung 5-16). Um festzustellen, welche Ergebnisse realistischer sind, werden Druckversuche an einer Tampondruckmaschine durchgeführt, um die Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg für jeden Drucktampon zu messen und mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen. Das wird in Abschnitt 5.7.1 beschrieben.

### 5.6.3 Einfluss der Verwendung des einachsigen Druckversuchs statt des biaxialen Zugversuchs

Wie vorher erwähnt, sind die Inputparameter der FEM-Simulation die in Abaqus berechneten Materialkonstanten aus den einachsigen, planaren und biaxialen Zugversuchen und die Querkontraktionszahl des Silikonkautschuks. Eine Alternative zum biaxialen Zugversuch ist der einachsige Druckversuch. Da die äquibiaxiale Zugspannung und die einachsige Kompression identisch sind (Simulia, 2014; Steinmann et al, 2012). Der einachsige Druckversuch ist einfach aufzubauen und kann schnell durchgeführt werden. Der biaxialen Zugversuch ist wesentlich komplexer als der einachsige Druckversuch. Er hat jedoch den Vorteil, dass die erreichbaren Dehnungen größer sind. Um den Einfluss der Verwendung des einachsigen Druckversuchs statt des biaxialen Zugversuchs auf die Simulationsergebnisse zu prüfen, werden Abaqus-Simulationen für die letzten drei Drucktampons N81, N29 und N135 auf Basis von Daten aus dem einachsigen Druckversuch sowie dem biaxialen Zugversuch durchgeführt. Die Abaqus-Simulationsergebnisse aufbauend auf dem einachsigen Druckversuch und dem biaxialen Zugversuch sind in Abbildung 5-17 dargestellt.

Für den Drucktampon N81 mit 6 Shore A beträgt die Differenz der Reaktionskräfte bei einem Deformationsweg von 10,5 mm ca. 13,69 N (21,3 % des Kraftmittelwertes) (siehe Abbildung 5-17a). Für den weichen Drucktampon N29 mit 3 Shore A beträgt die Differenz der Reaktionskräfte bei gleichem Deformationsweg von 10,5 mm 72,85 N (36,6 % des mittleren Kraftwertes) (siehe Abbildung 5-17b). Beim harten Drucktampon N135 mit 18 Shore A beträgt die Differenz der Reaktionskräfte beim gleichen Deformationsweg von 10,5 mm 44,55 N (18,6 % des mittleren Kraftwertes) (siehe Abbildung 5-17c).

Der Einfluss der Verwendung des einachsigen Druckversuchs statt des biaxialen Zugversuchs auf die Simulationsergebnisse ist relativ groß (siehe Abbildung 5-17). Um festzustellen, welche Ergebnisse realistischer sind, werden Druckversuche an der Tampondruckmaschine durchgeführt, um die Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg für jeden Drucktampon zu messen und mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen. Das wird in Abschnitt 5.7.1 beschrieben.

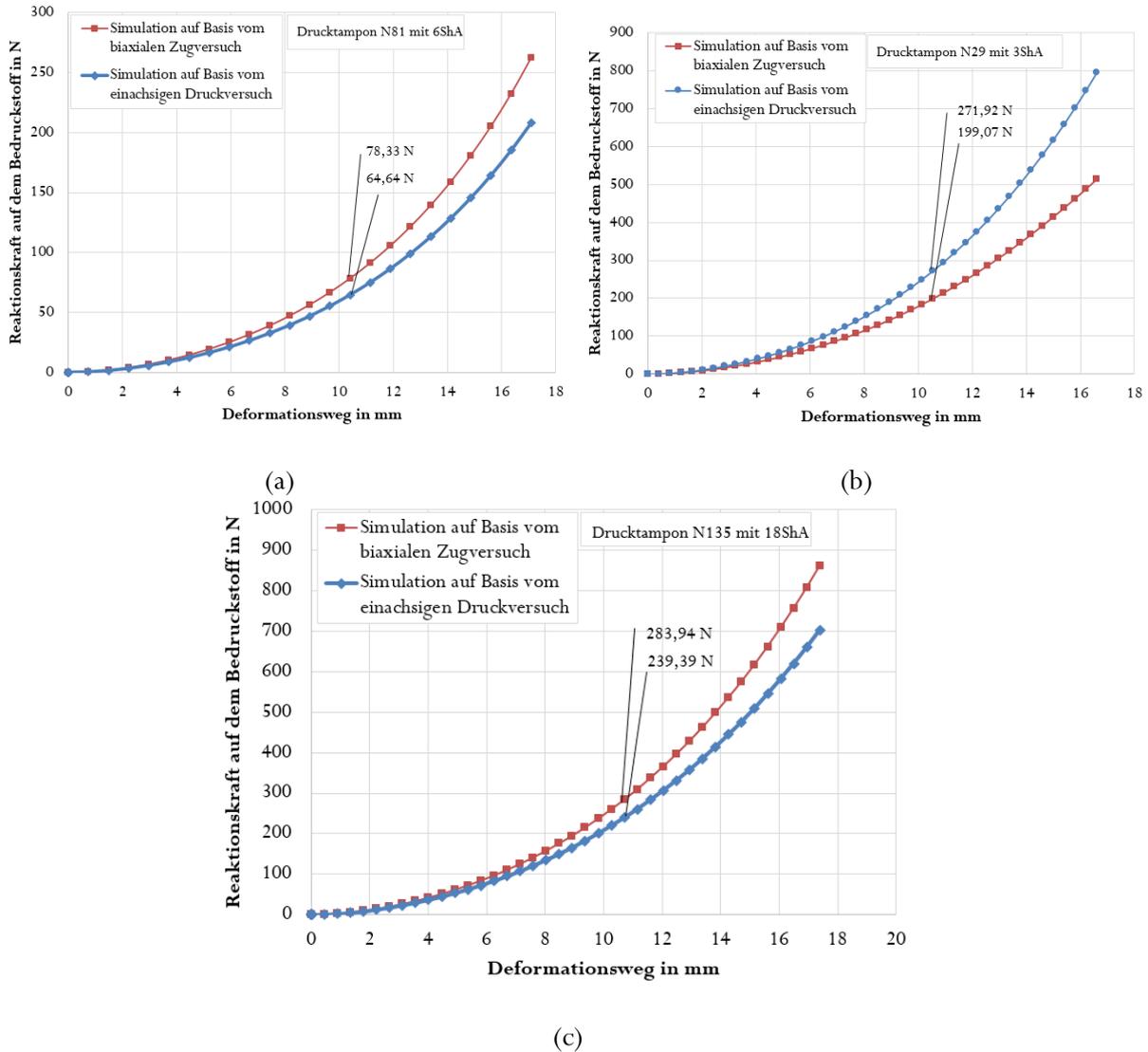


Abbildung 5-17: Abaqus-Simulationsergebnisse (Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg auf einem flachen Bedruckstoff) auf Basis von Daten aus dem einachsigen Druckversuch sowie dem biaxialen Zugversuch im Vergleich (Netz-Elementtyp ist C3D10H und die Netz-Elementgröße ist 3 mm). ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

#### 5.6.4 Einfluss der Auswahl des mathematischen Materialmodells

Die mathematischen Modelle des hyperelastischen Materials sind in Abschnitt 2.4.2 beschrieben. Wie bereits erläutert, werden die polynomiale Gleichung und die Mooney-Rivlin-Gleichung für alle bisherigen Simulationen verwendet, da die Bestimmtheitsmaße zwischen den experimentellen Spannungs-Dehnungswerten und diesen Materialmodellen zwischen 84 % und 99 % liegen (siehe Tabelle 5-2). Im Folgenden werden Abaqus-Simulationen für die in Abbildung 5-5 gezeigten drei Drucktampons mit fünf

verschiedenen mathematischen Modellen durchgeführt. Diese Modelle sind Mooney-Rivlin, Polynomial, Yeoh, Ogden und Neo-Hooke (siehe Abbildung 5-18).

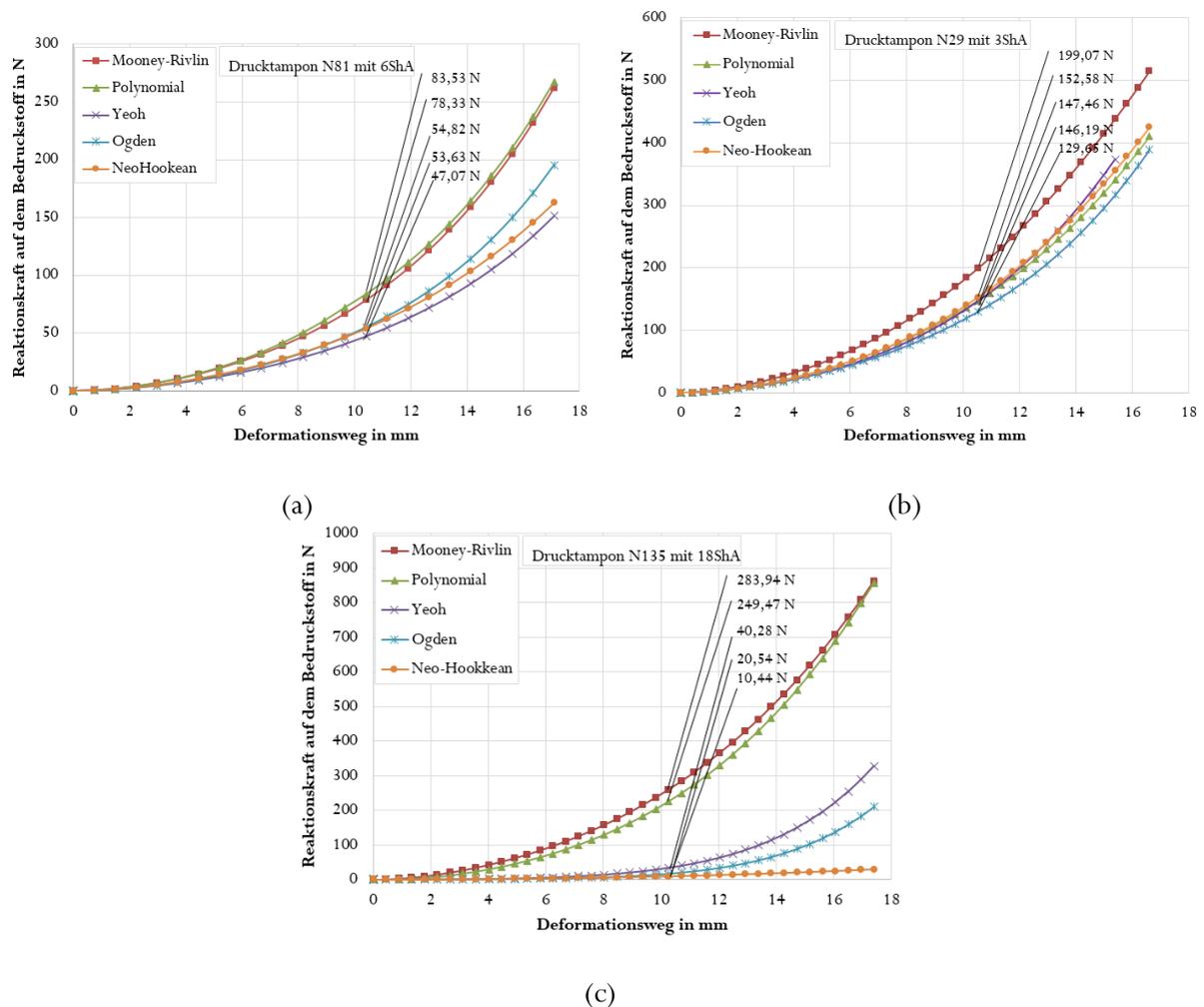


Abbildung 5-18: Abaqus-Simulationsergebnisse (Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg auf einem flachen Bedruckstoff) auf Basis von Mooney- Rivlin-, Polynomial-, Yeoh-, Ogden- und Neo-Hookeanmaterialmodell (Netz-Elementtyp ist C3D10H und die Netz-Elementgröße ist 3 mm). ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

Der Einfluss der Auswahl des mathematischen Materialmodells auf die Simulationsergebnisse ist sehr groß (siehe Abbildung 5-18). Die Simulationsergebnisse auf Basis von Mooney-Rivlin- und Polynomialmaterialmodellen sind für mittelharte und harte Drucktampons (sechs und 18 Shore A) bei kleinen Verformungen annähernd gleichwertig. Um festzustellen, welche Ergebnisse realistischer sind, werden die Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg aus den Simulationen in Abbildung 5-18 mit den Ergebnissen aus den Druckversuchen an der Tampondruckmaschine verglichen. Diese Druckversuche sind in Abschnitt 5-7-1 dargestellt.

## 5.7 Validierung der FEM-Simulation

Durch einen Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Experimenten werden die Simulationsergebnisse validiert. Hier werden mechanische und optische Methoden zur Validierung der FEM-Simulation verwendet.

### 5.7.1 Validierung der FEM-Simulation mittels mechanischer Messungen

Durch einen Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Experimenten werden die Simulationsergebnisse validiert. Aus der FEM-Simulation lässt sich das Verhältnis zwischen der Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff und dem Deformationsweg berechnen (siehe Abschnitt 5.6). In dieser Dissertation wurden Druckversuche an der Tampondruckmaschine (Morlock GFG100) durchgeführt, um die Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg für jeden Drucktampon in Abschnitt 5.6 zu messen und mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen. Dieser Tampondruckmaschine wurde von Tehrani et al. (2016) im IDD-Labor optimiert. Sie wurde mit einer Einzelpunktkraftmessdose mit einer maximalen Belastbarkeit von 100 kg ausgestattet, um Kraftänderungen während des Druckvorgangs zu messen. Diese Kraftmessdose hat eine Messgenauigkeit von  $\pm 0,1961 \text{ N}$  ( $\pm 0,2 \%$  der maximalen Belastung). Die Positionen des Drucktampons und der Druckform werden durch Sensoren erfasst (Tehrani et al, 2016). Um die Kräfte im realen Druckvorgang mit dem Deformationsweg aus dem Kraftsensor zu ermitteln, wurden Druckversuche an der Tampondruckmaschine für die letzten drei Drucktampons (N81, N29 und N135) durchgeführt. Für jeden Drucktampon werden drei Druckversuche durchgeführt und daraus wird die mittlere Messkurve berechnet, um die Wiederholbarkeit zu prüfen. Die Wiederholbarkeit ist hier die Streuung aufgrund der Tampondruckmaschine. Mit der Berücksichtigung, dass alle Messungen an dem Berührungspunkt zwischen der Drucktamponoberfläche und dem Bedruckstoff (der Aluminiumplatte) beginnen. Der Deformationsweg wird aus der Position des Drucktampons ermittelt. Hier fährt der Drucktampon einen Deformationsweg von 17,5 mm. Abbildung 5-19 zeigt die Messergebnisse des Kraftsensors an der Tampondruckmaschine für drei Drucktampons (N81, N29 und N135) mit unterschiedlichen Shore A Härten. Für den Drucktampon N81 (quadratische Grundform) mit 6 Shore A beträgt die durchschnittliche Reaktionskraft bei einem Deformationsweg von 10,5 mm 80,02 N (siehe Abbildung 5-19a). Beim Vergleich der Simulationsergebnisse in den Abbildungen 5-16a, 5-17a und 5-18a mit den experimentellen Ergebnissen in Abbildung 5-19a wird festgestellt, dass die Simulationsergebnisse auf Basis von dem volumetrischen Druckversuch, dem biaxialen Zugversuch und dem Polynomial- oder Mooney-Rivlin-Materialmodell sehr nahe an den realen experimentellen

Ergebnissen liegen. In diesem Fall liegt die Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen und den experimentellen Ergebnissen unter 3,7 %.

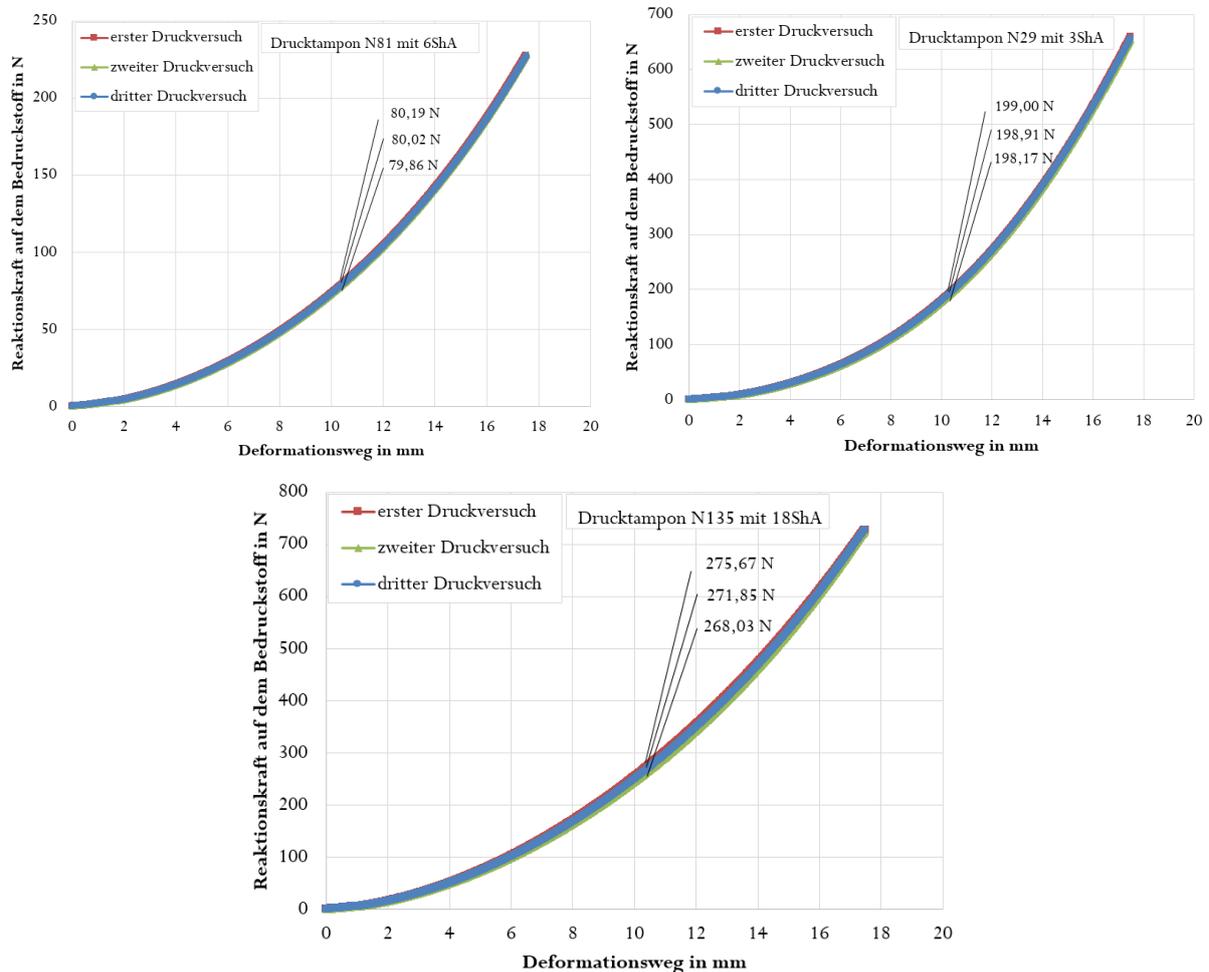


Abbildung 5-19: Messergebnisse (Reaktionskraft mit dem Deformationsweg auf einem flachen Bedruckstoff) des Kraftsensors an der Tampondruckmaschine (Morlock GFG100) für drei Drucktampons (N81, N29 und N135) mit unterschiedlichen Shore A Härten. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

Für den weichen Drucktampon N29 (längliche Grundform) mit 3 Shore A beträgt die durchschnittliche Reaktionskraft bei einem Deformationsweg von 10,5 mm 198,69 N (siehe Abbildung 5-19b). Beim Vergleich der Simulationsergebnisse in den Abbildungen 5-16b, 5-17b und 5-18b mit den experimentellen Ergebnissen in Abbildung 5-19b wird festgestellt, dass die Simulationsergebnisse auf Basis von dem volumetrischen Druckversuch, dem biaxialen Zugversuch und dem Polynomial-Materialmodell sehr nahe an den realen experimentellen Ergebnissen liegen. In diesem Fall liegt die Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen und den experimentellen Ergebnissen unter 1 %. Für den harten Drucktampon N135 (runde Grundform) mit 18 Shore A beträgt die durchschnittliche Reaktionskraft bei einem

Deformationsweg von 10,5 mm 271,85 N (siehe Abbildung 5-19c). Beim Vergleich der Simulationsergebnisse in den Abbildungen 5-16c, 5-17c und 5-18c mit den experimentellen Ergebnissen in Abbildung 5-19c wird festgestellt, dass die Simulationsergebnisse auf Basis von dem volumetrischen Druckversuch, dem biaxialen Zugversuch und dem Poynomial-Materialmodell sehr nahe an den realen experimentellen Ergebnissen liegen. In diesem Fall liegt die Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen und den experimentellen Ergebnissen unter 4,4 %. Abbildung 5-20 zeigt Simulationsergebnisse und Experimente für die drei Drucktampons mit verschiedenen Härten. Sie zeigt die Reaktionskräfte auf dem Bedruckstoff mit dem Deformationsweg während des Druckvorgangs.

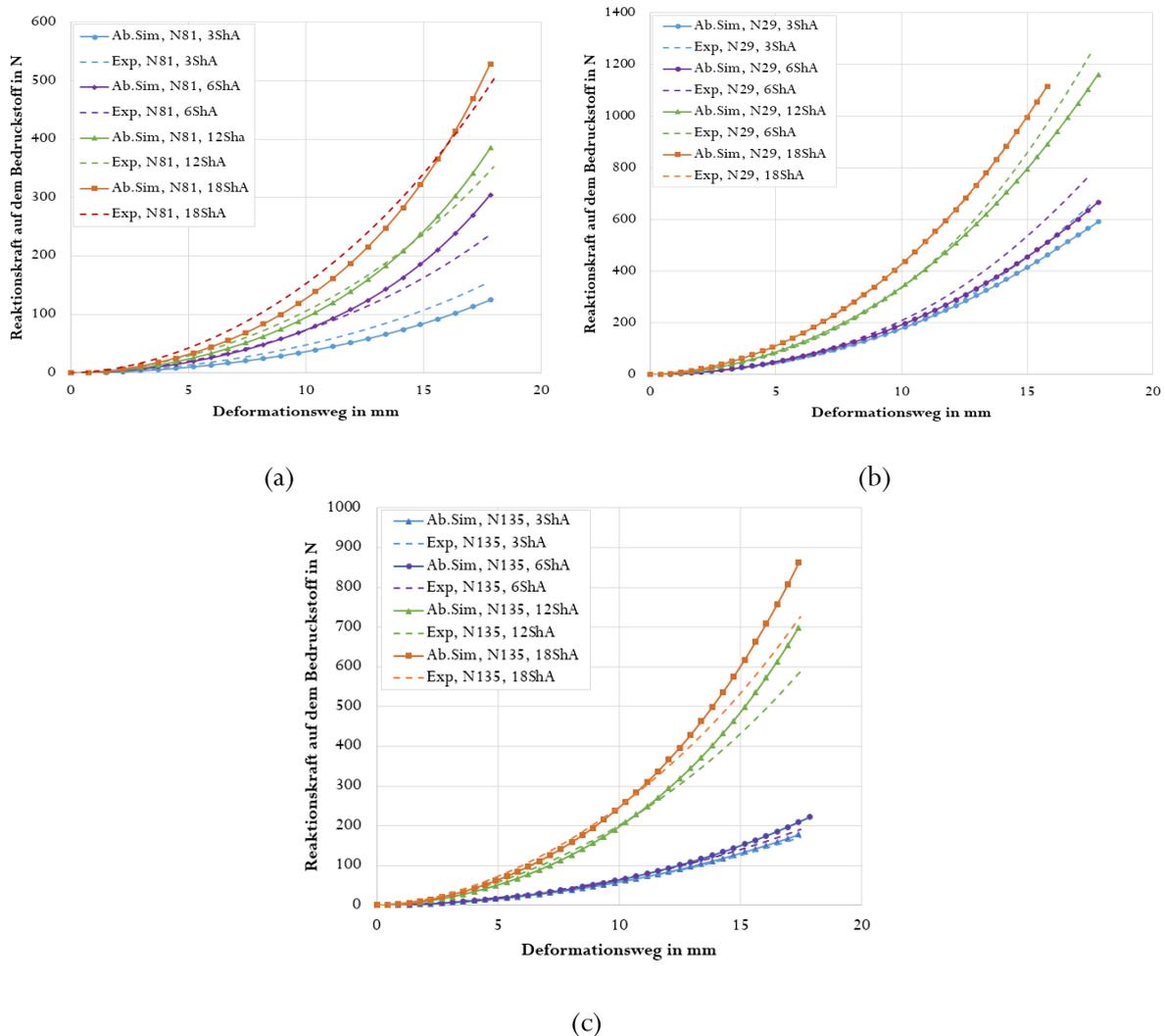


Abbildung 5-20: Simulationsergebnisse und Experimente für die drei Drucktampons (N81, N29 und N135) mit verschiedenen Shore A Härten. Hier werden die Simulationsergebnisse (durchgezogene Linien) mit den Experimenten (gestrichelte Linien) verglichen. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte und Ab.Sim ist eine Abkürzung für Abaqus-Simulation.

Nach Abbildung 5-20 ist die Abweichung zwischen den Kurven der Experimente und den Simulationsergebnissen bei den weichen und mittelharten Drucktampons größer als bei den anderen

härteren Drucktampons. Die Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen und den Experimenten sind bei Drucktampon N29 (längliche Grundform) mit einer Härte von 18 Shore A am geringsten und sie passen zueinander.

Die Güte der Anpassung zwischen den experimentellen und berechneten Daten wird mit dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bewertet. Die Bestimmtheitsmaße zwischen den Ergebnissen werden berechnet und in Tabelle 5-12 angezeigt. Der Vergleich zeigt, dass die Simulationsergebnisse und das Ergebnis der Experimente beim Drucktampon N135 (runde Grundform) mit einer hohen Genauigkeit übereinstimmen.

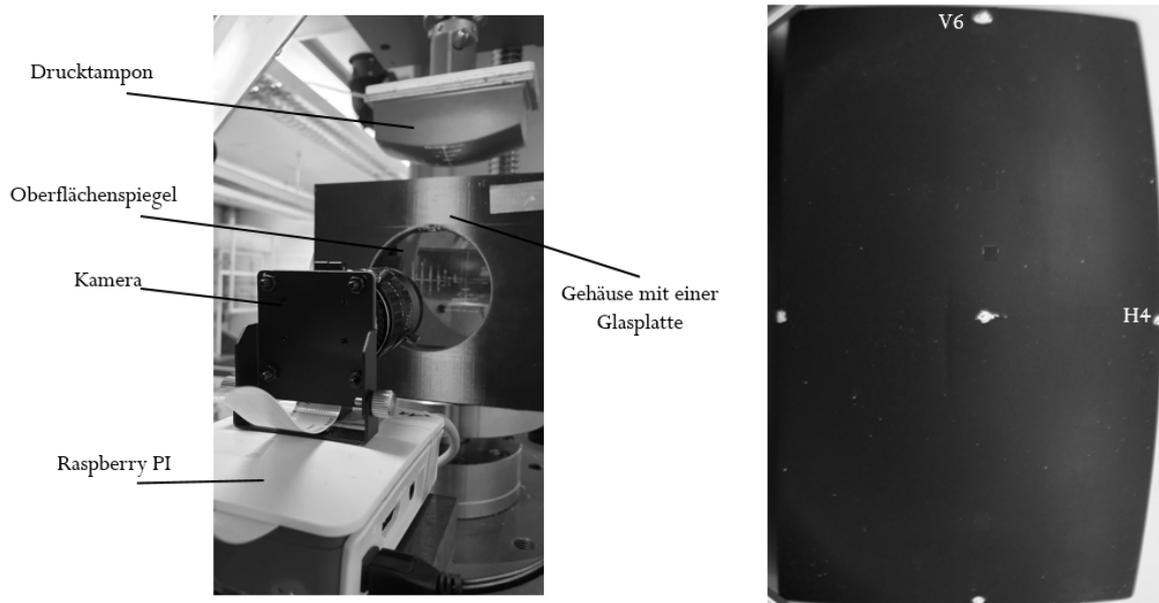
**Tabelle 5-12: Die Genauigkeit der Übereinstimmung von Abaqus-Simulationsergebnissen mit dem Polynomial-Materialmodell mit dem experimentellen Kraft-Weg-Verhalten der Drucktampons N81, N29 und N135.  $R^2$  ist das Bestimmtheitsmaß. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.**

$R^2$	3 Shore A	6 Shore A	12 Shore A	18 Shore A
Drucktampon N81	0,877	0,848	0,952	0,947
Drucktampon N29	0,739	0,732	0,989	0,999
Drucktampon N135	0,932	0,920	0,908	0,910

Tabelle 5-12 stellt die Übereinstimmung zwischen den Abaqus-Simulationsergebnissen und den Experimenten mit den  $R^2$ -Koeffizienten dar.  $R^2$ -Koeffizienten sind die Bestimmtheitsmaße, sie werden mit Hilfe der Software Excel berechnet. Hier beschreibt der  $R^2$ -Wert, wie gut die Simulationsergebnisse mit den jeweiligen Experimenten übereinstimmen. Ein Wert, der näher bei eins liegt, zeigt eine bessere Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Experimenten. Für den Drucktampon N29 mit 18 Shore A Härte nimmt der  $R^2$ -Wert einen Wert von 0,999. In diesem Fall können die Simulationsergebnisse als nahezu identisch mit den Experimenten angesehen werden. Es gibt aber kleine Unterschiede zwischen den experimentellen Daten und den berechneten Daten, die von den Simulationsparametern abhängen. Die Validierung der Salome-Meca Simulationen mittels mechanischer Messungen ist in Anhang A.12 in Abbildung A-12 dargestellt. Im nächsten Abschnitt wird eine optische Methode zur Validierung der FEM-Simulation erklärt.

### 5.7.2 Validierung der FEM-Simulation mittels optischer Messungen

Zur optischen Validierung der FEM-Simulationen aus beiden Programmen (Abaqus und Salome-Meca) werden die Randpunkte auf dem Drucktampon markiert und mit einer Kamera aufgenommen. Mit dieser Methode können die kleinen Verschiebungen in der Mitte des Drucktampons nicht gemessen werden, da die Messgenauigkeit bei  $\pm 0,2$  mm liegt. Hier wird auf eine ebene Glasplatte als Bedruckstoff gedruckt, die Kamera kann die Positionen der Punkte an der Oberfläche des Drucktampons durch einen unter dem Bedruckstoff positionierten Oberflächenspiegel aufnehmen, dieser Spiegel neigt sich in einem Horizontalwinkel von  $45^\circ$ , sodass die markierten Punkte im Spiegel sichtbar sind. Die aufgenommenen Videos werden in Einzelbilder unterteilt und anschließend die Verschiebungen der Punkte im Videoextensometer berechnet. Abbildung 5-21 stellt die optische Methode zur Validierung der FEM-Simulationen dar. Auf der linken Seite wird der Aufbau mit der Kamera, dem Oberflächenspiegel und dem Drucktampon angezeigt. Auf der rechten Seite ist der Drucktampon mit den markierten horizontalen und vertikalen Punkten dargestellt.



**Abbildung 5-21:** Eine optische Methode zur Validierung der FEM-Simulationen. Die Kamera nimmt die Positionen der Punkte während des Druckens auf. Links ist die Kamera mit dem Oberflächenspiegel und dem Drucktampon angezeigt. Rechts sind die markierten Punkte an der Oberfläche des Drucktampons N29 (3 Shore A) dargestellt.

Die Randpunkte (V6 und H4) in die vertikale und horizontale Richtung auf der Oberfläche des Drucktampons werden ausgewertet, die Verschiebung dieser Punkte werden in Abaqus und Salome-Meca berechnet. Anschließend werden die gemessenen Verschiebungen in dem Videoextensometer mit den

berechneten Verschiebungen aus den beiden Programmen verglichen. Abbildung 5-22 zeigt Verschiebungsamplitude der Randpunkte aus dem Videoextensometer und den beiden Programmen während des Druckvorgangs. Auf der Y-Achse sind die Verschiebungsamplituden dargestellt und auf der X-Achse ist der Deformationsweg des Drucktampons aufgetragen.

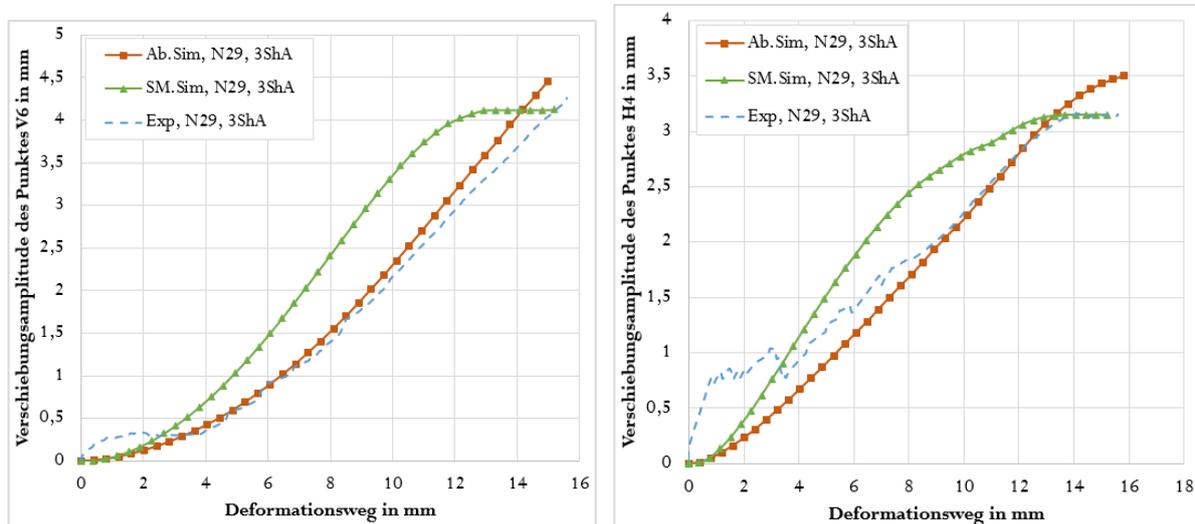


Abbildung 5-22: Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell und Experimente für den Drucktampon N29 mit 3 Shore A Härte. Auf der Y-Achse sind die Verschiebungsamplituden der Randpunkte dargestellt und auf der X-Achse ist der Deformationsweg des Drucktampons aufgetragen. Die grüne Kurve steht für die in Salome-Meca berechneten Verschiebungsamplitude der Punkte H4 (X-Richtung) und V6 (Z-Richtung) während des Druckvorgangs. Die rote Kurve zeigt die Verschiebungsamplitude aus Abaqus, die blaue gestrichelte Kurve zeigt die mit dem Videoextensometer gemessenen Verschiebungsamplitude. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.

Die Güte der Anpassung zwischen den experimentellen und berechneten Daten wird mit dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bewertet. Tabelle 5-13 zeigt die Bestimmtheitsmaße zwischen den Verschiebungsamplituden aus den Simulationen und den Werten aus dem Videoextensometer.

Tabelle 5-13: Die Genauigkeit der Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen und den experimentellen Ergebnissen für den Drucktampon N29.  $R^2$  ist das Bestimmtheitsmaß.

$R^2$	Experiment/Abaqus	Experiment/Salome Meca	Abaqus/Salome-Meca
Punkt H4	0,84	0,73	0,72
Punkt V6	0,98	0,75	0,76

Wie in Abschnitt 5.3.1 erwähnt, bedeutet ein  $R^2$ -Wert zwischen 0,7 und 0,9 eine hohe Korrelation zwischen den Ergebnissen. Bei einem  $R^2$ -Wert von 0,98 werden die Simulationsergebnisse als nahezu

identisch mit den Experimenten angesehen. Abbildung 5-22 zeigt Verschiebungsamplituden der Randpunkte der Drucktampons N81 (6 Shore A) und N135 (18 Shore A) mit dem Deformationsweg. Die Randpunkte sind in Abbildungen 5-9 dargestellt. Wie vorher erwähnt, liegt die Messgenauigkeit bei  $\pm 0,2$  mm, deshalb schwangen die Messwerte bei kleinen Verschiebungsamplitude unter 0,5 mm (siehe die blaue Kurve in Abbildung 5-22).

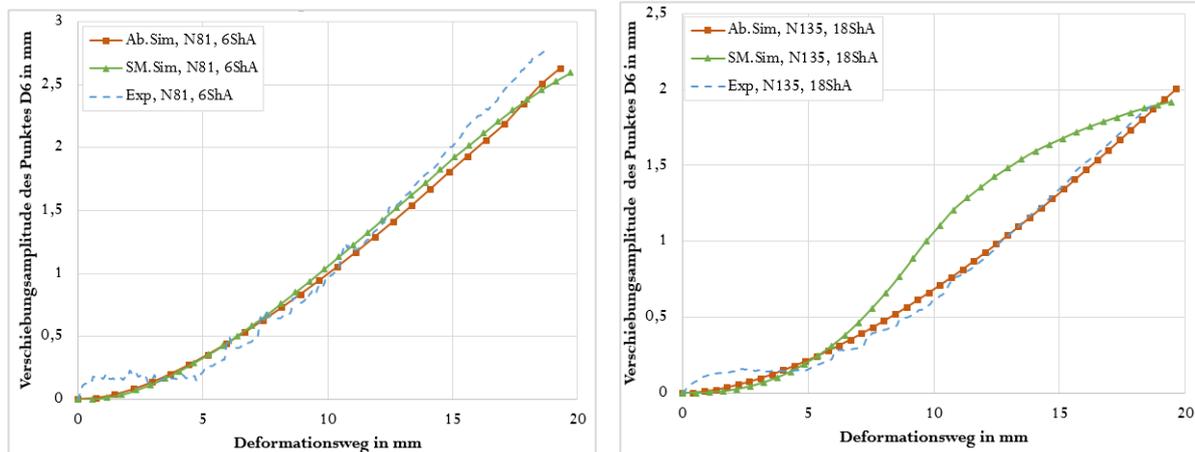


Abbildung 5-22: Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell und Experimente für die Drucktampons N81 (6 Shore A) und N135 (18 Shore A). Auf der Y-Achse sind die Verschiebungsamplituden des Randpunktes D6 dargestellt und auf der X-Achse ist der Deformationsweg des Drucktampons aufgetragen. Die grüne Kurve steht für die in Salome-Meca berechneten Verschiebungsamplitude des Punktes D6 während des Druckvorgangs. Die rote Kurve zeigt die Verschiebungsamplitude aus Abaqus, die blaue gestrichelte Kurve zeigt die mit dem Videoextensometer gemessenen Verschiebungsamplitude. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.

Die Güte der Anpassung zwischen den experimentellen und berechneten Daten wird auch hier mit dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bewertet. Tabelle 5-14 zeigt die Bestimmtheitsmaße zwischen den Verschiebungsamplituden aus den Simulationen und den Werten aus dem Videoextensometer für die Drucktampons N81 und N135.

Tabelle 5-14: Die Genauigkeit der Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen und den experimentellen Ergebnissen für die Drucktampons N81 und N135.

$R^2$	Experiment/Abaqus	Experiment/Salome Meca	Abaqus/Salome-Meca
Drucktampon N81	0,96	0,96	0,98
Drucktampon N135	0,94	0,71	0,72

Für den Drucktampon N81 sind die Simulationsergebnisse beider Programme identisch mit den Ergebnissen des Videoextensometers. In diesem Fall nimmt  $R^2$  einen Wert von 0,96 an. Zusammenfassend

eignen sich Abaqus und Salome-Meca zur Simulation des Drucktampons. Die Abaqus-Simulationsergebnisse sind sehr gut vergleichbar mit den Experimenten. Die Salome-Meca Simulationsergebnisse sind auch gut vergleichbar mit den Experimenten, weil das minimale Bestimmtheitsmaß  $R^2$  0,71 beträgt. Wie vorher erwähnt, bedeutet ein  $R^2$ -Wert zwischen 0,7 und 0,9 eine hohe Korrelation zwischen den Ergebnissen. Die Unterschiede zwischen den Abaqus und Salome-Meca Simulationen sind auf die Vernetzung zurückzuführen. Wie in Abschnitt 5.2 erwähnt, wurde der Netzelementtyp C3D10MH (Hybrid-Tetraeder mit 10 Knoten) in Abaqus verwendet. In Salome-Meca wurde ein ähnlicher Netzelementtyp (Netgen-Netz 1D-2D-3D) mit quadratischen Elementen verwendet. Der Einsatz von Salome-Meca als Open-Source Programm zur Simulation von Drucktampons ist daher möglich und gerechtfertigt.

## 6. Anwendungsbeispiele

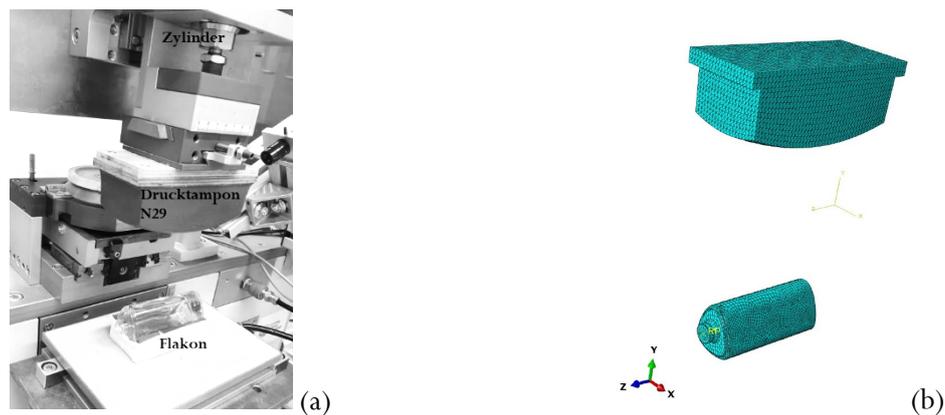
Zur Entwicklung einer neuen Drucktampongeometrie für einen Bedruckstoff mit dem Digitalisierungsworkflow wird die neue Form des Drucktampons in einem CAD-Programm entworfen und die Härte des Silikonkautschuks aus Tabelle 4-2 ausgewählt. Anschließend werden die entsprechenden Messwerte der mechanischen Prüfverfahren aus Abschnitt 4.4 für die ausgewählte Shore A Härte gesammelt und in das Abaqus CAE Material-Modul importiert. Nachfolgend wird eine FEM-Simulation durchgeführt, um die Deformation und das Abrollen des Drucktampons auf dem Bedruckstoff während des Druckens zu bestimmen. Hier ist die digitalisierte Drucktamponherstellung beschrieben:

- Ein Kunde stellt ein 3D-Modell im STEP-Format des Bedruckstoffs zur Verfügung, um den Drucktamponhersteller mit der Entwicklung eines geeigneten Drucktampons zu beauftragen.
- Mit FreeCAD oder Siemens NX wird ein Drucktampon konstruiert.
- Es wird ein Netz-Modell des Drucktampons und der Bedruckstoffoberfläche erstellt, und eine Simulation wird mit Salome-Meca oder Abaqus durchgeführt.
- Nach der Durchführung der FEM-Simulation und Bestimmung der passenden Drucktamponform wird der Drucktampon mit der 3D-Drucktechnik hergestellt.
- Nach dem Polieren der Oberfläche des 3D gedruckten Drucktampons wird eine Negativform mit Abdruckmaterial hergestellt und der Silikonkautschuk Drucktampon abgegossen.

Bisher erfolgte die Konstruktion eines Drucktampons nach den Erfahrungen des Drucktamponherstellers. Mit Hilfe des Digitalisierungsworkflows werden die Abmessungen des Drucktampons geändert und es werden Simulationen durchgeführt, bis ein passender Drucktampon erreicht wird. In dieser Dissertation wird die Variierung der Hohlform eines Drucktampons untersucht, um ein passender Hohl-Drucktampon für einen konvexen Bedruckstoff zu erreichen (siehe Abschnitt 6.2). Der Hohl-Drucktampon wird dann in Abschnitt 6.3 mit weichem Silikonkautschuk gefüllt, um die Druckqualität auf dem konvexen Bedruckstoff zu verbessern. In Abschnitt 6.4 wird der Einfluss der Mischung von Silikonkautschuk mit SWCNT (Carbon-Nanotubes) auf die Härte des Drucktampons erklärt.

### 6.1 Voller Drucktampon

Zum Vergleich wird zuerst den vollen Drucktampon mit dem Digitalisierungsworkflow untersucht. Als Beispiel wird der Drucktampon N29 mit 6 Shore A zum Bedrucken eines dreidimensionalen rundlichen konvexen Flakons verwendet. Abbildung 6-1a zeigt den Drucktampon N29 mit dem Flakon an der Tampondruckmaschine. Abbildung 6-1b zeigt ein Netz-Modell des Drucktampons N29 mit dem Flakon.



**Abbildung 6-1:** Links ist der Drucktampon N29 mit dem Flakon an der Tampondruckmaschine (a). Rechts ist ein Abaqus Netz-Modell (b).

Zunächst wird eine FEM-Simulation in Abaqus am Netz-Modell des N29-Drucktampons mit dem Flakon durchgeführt (Abbildung 6-2). Zu diesem Zweck werden die Anfangs- und Randbedingungen definiert. Der Flakon wird auf dem Tisch der Tampondruckmaschine befestigt. Der Drucktampon ist über ein Kupplungselement mit einem Zylinder (Drucktampon-Linearführung) verbunden. Die Aufgabe des Zylinders ist die Bewegung des Drucktampons (Abbildung 6-1a). Zum Zeitpunkt Null beträgt der Abstand zwischen der Unterseite des Drucktampons und der Oberseite des Flakons 136 mm. Dann bewegt sich der Drucktampon mit einer Geschwindigkeit von 100 mm/min zum Flakon. Er drückt auf den Flakon, sodass ein Deformationsweg von 14 mm entsteht. Abbildung 6-2 zeigt Abaqus-Simulationsergebnisse für den Drucktampon N29 (6 Shore A) auf dem Flakon. Zur Berechnung der Verschiebungsamplitude im Polarkoordinatensystem wurden die Z-Linie in Z-Richtung und die X-Linie in X-Richtung auf der Oberfläche des Drucktampons verwendet (siehe Abbildungen 6-2a und b). Als Bezugspunkt wird hier die Drucktamponspitze in der Mitte der Druckfläche verwendet. R-0 ist die ursprüngliche Position der Punkte auf den Z- und X-Linien vor der Deformation. R-d ist die Verschiebungsamplitude dieser Punkte nach der Deformation (siehe Abbildungen 6-2c und d). Bei einem Abstand von 12 mm vom Referenzpunkt auf der X-Linie nimmt die Verschiebungsamplitude einen Höchstwert von 1,87 mm an und bei 43 mm Abstand vom Referenzpunkt auf der Z-Linie beträgt der Höchstwert der Verschiebungsamplitude 1,2 mm (Abbildung 6-1b und 6-1c). An den roten Ovalen in Abbildung 6-1a verbiegen sich die Gitterlinien (Netzlinsen) des Drucktampons, was zu einer Verformung und Verzerrung des Druckbildes bei der Farbübertragung vom Drucktampon auf den Flakon führt. Die Verformung des Druckbildes wird auch durch das Drucken vom quadratischen Raster auf dem Bedruckstoff bewertet. Eine Verschiebung von bis zu  $\pm 0,6$  mm liegt im akzeptablen Bereich. Zu kleine Drucktampons führen häufig zu einer Verzerrung des Druckbildes (Morlock, o.D.).

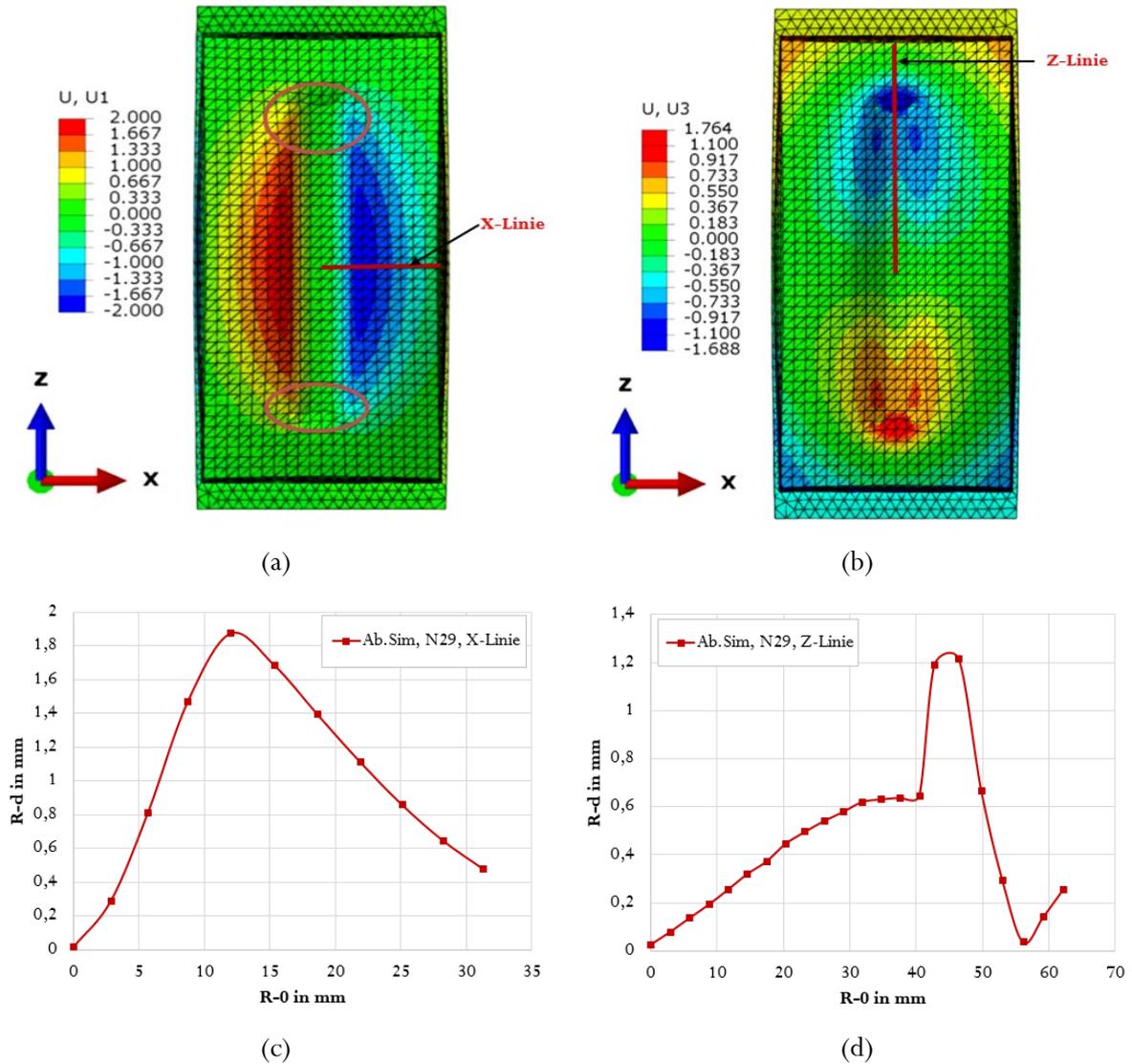


Abbildung 6-2: Abaqus-Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell des Drucktampons N29 (6 Shore A Härte) auf einem Flakon. Hier sind Verschiebung der Punkte auf der gesamten Oberfläche in mm in X-Richtung (a) und in Z-Richtung (b) grafisch in Farben dargestellt. Die Verschiebungsamplitude der Punkte auf der X-Linie im Polarkoordinatensystem ist in (c) und auf der Z-Linie in (d) angezeigt. R-0 ist hier die ursprüngliche Position der Punkte. R-d ist die Verschiebungsamplitude nach der Deformation. Die beiden roten Ovale zeigen die Stellen, an denen die Verschiebungsamplitude der Punkte auf der Z-Linie maximal ist. Der Nullpunkt ist die Mitte des Drucktampons. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.

Die letzte Simulation wird auch mit Salome-Meca durchgeführt, um zu prüfen, ob vergleichbare Ergebnisse errechnet werden (Abbildung 6-3).

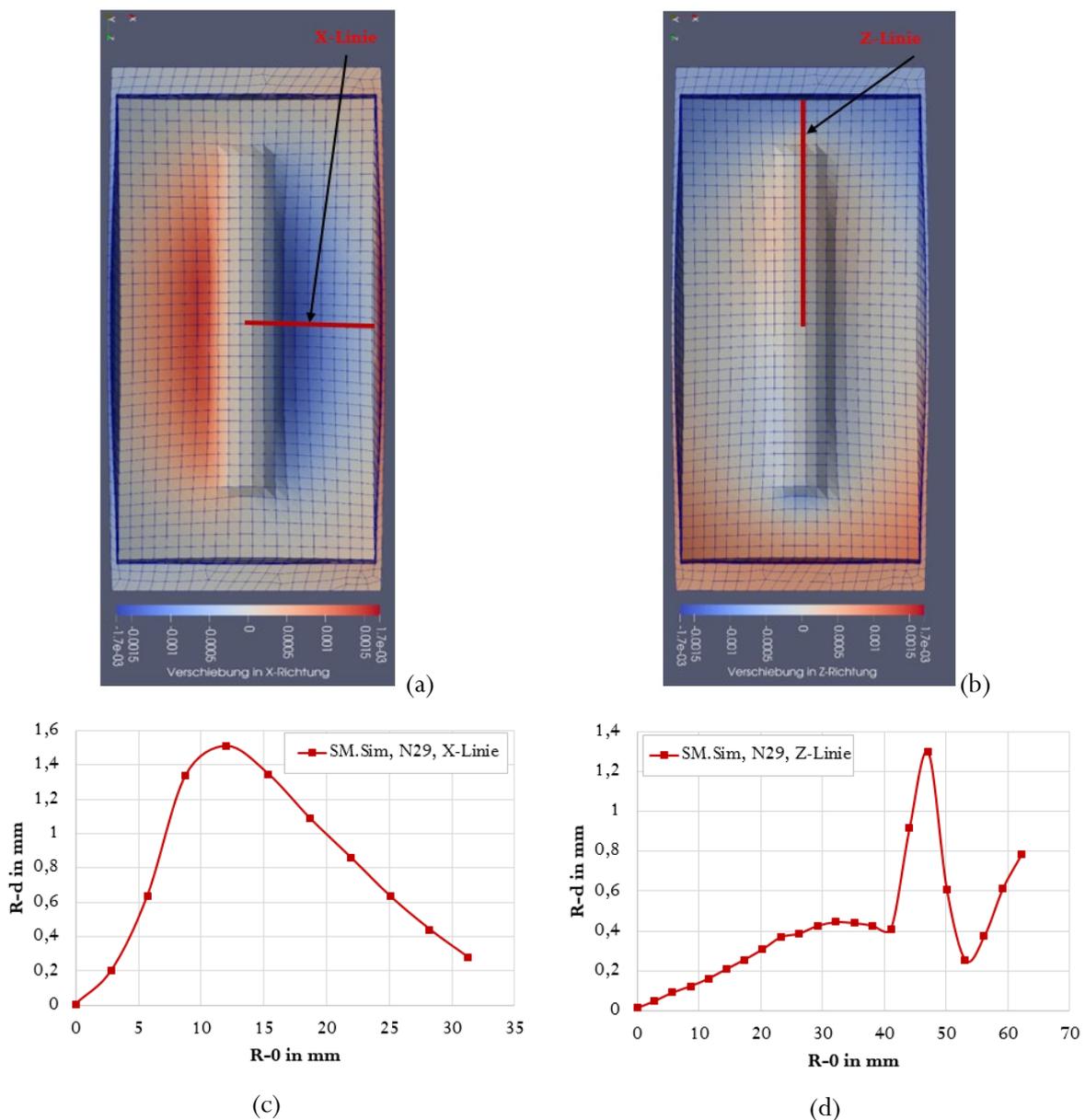


Abbildung 6-3: Salome-Meca Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell des Drucktampons N29 (6 Shore A Härte) auf einem Flakon. Hier sind Verschiebung der Punkte auf der gesamten Oberfläche des Drucktampons in m in X-Richtung (a) und in Z-Richtung (b) grafisch in Farben dargestellt. Die Verschiebungsamplitude der Punkte auf der X-Linie im Polarkoordinatensystem ist in (c) und auf der Z-Linie in (d) angezeigt.  $R-0$  ist hier die ursprüngliche Position der Punkte.  $R-d$  ist die Verschiebungsamplitude nach der Deformation. Der Nullpunkt ist die Mitte des Drucktampons. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.

Die Simulationsergebnisse in Salome-Meca sind gut vergleichbar mit den Ergebnissen in Abaqus. Hier ist die maximale Verschiebung in X-Richtung 1,52 mm und in Z-Richtung 1,3 mm (siehe Abbildung 6-3 c und d). Zur Validierung der letzten zwei Simulationen werden Kurven der Reaktionskraft mit dem Deformationsweg aus beiden Simulationen berechnet und mit den Messwerten des Kraftsensors in der

realen Tampondruckmaschine verglichen. Abbildung 6-4 zeigt den Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den Messergebnissen des Kraftsensors.

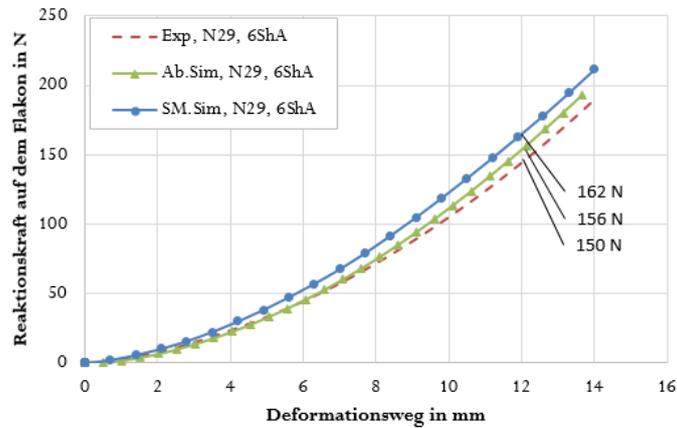


Abbildung 6-4: Simulationsergebnisse (Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg) mit dem Polynomial-Materialmodell und Messergebnisse der Reaktionskraft für den Drucktampon N29 (6 Shore A) auf einem Flakon. Hier werden die Simulationsergebnisse (durchgezogene Linien) mit den Messergebnissen (gestrichelte Linie) verglichen. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte, Ab.Sim steht für Abaqus-Simulation und SM für Salome-Meca. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.

Für einen Deformationsweg von 12 mm beträgt die gemessene Reaktionskraft aus dem Kraftsensor 150 N und aus der Simulation in Abaqus 156 N und in Salome-Meca 162 N, siehe Abbildung 6-4. Die Simulationsergebnisse in Salome-Meca sind bis auf 96 Prozent identisch mit den Ergebnissen in Abaqus. Die Güte der Anpassung zwischen den experimentellen und berechneten Daten wird mit dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bewertet. Die Bestimmtheitsmaße zwischen den Ergebnissen werden berechnet und in Tabelle 6-1 angezeigt.

Tabelle 6-1: Die Genauigkeit der Übereinstimmung von Simulationsergebnissen mit dem experimentellen Kraft-Weg-Verhalten des Drucktampons N29 auf dem Flakon wird hier mittels des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  dargestellt.

$R^2$	Kraftsensor/Simulation in Abaqus	Kraftsensor/Simulation in Salome Meca	Simulation in Abaqus/Simulation in Salome-Meca
Drucktampon N29	0,98	0,96	0,96

Aus den letzten Simulationen wurde festgestellt, dass die Verschiebungswerte an der Oberfläche des Drucktampons N29 zwischen 0 und 1,87 mm liegen und die Gitterlinien des Netz-Modells biegen sich

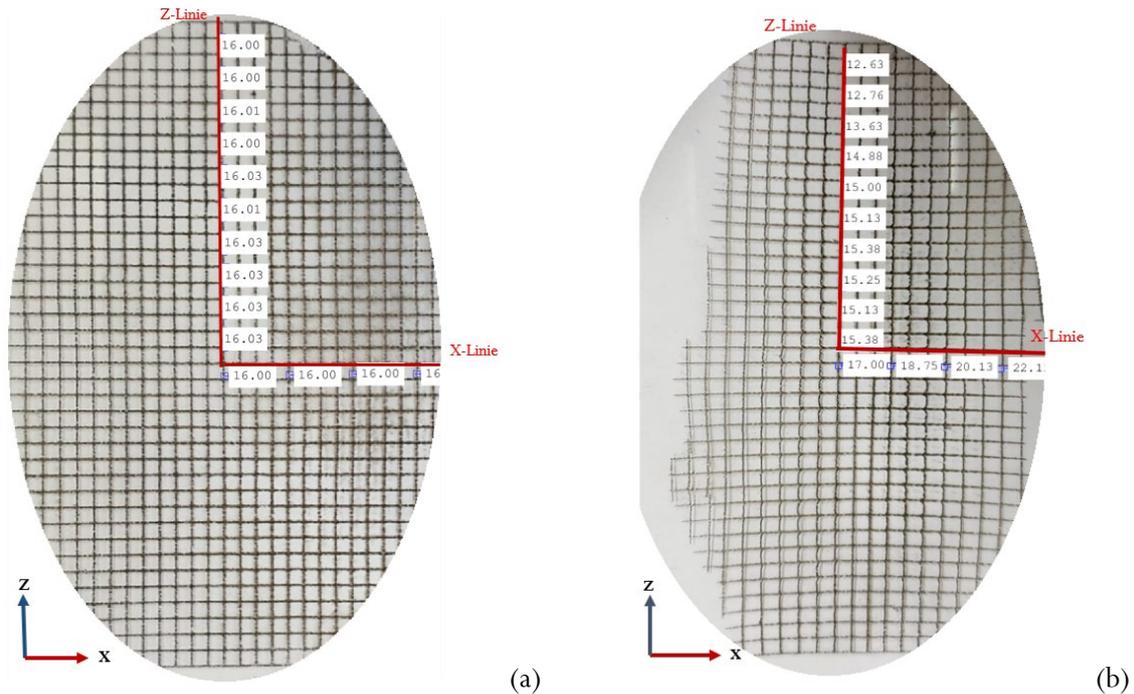
während des Druckvorgangs an den markierten Punkten in Abbildung 6-2a. Hier nimmt die Verschiebungsamplitude einen Wert von 1,3 mm an. Um dieses Problem zu untersuchen, wurde der längliche Drucktampon N29 bei dem Unternehmen Tampo-Technik hergestellt und Druckversuche an der Tampondruckmaschine (Morlock GFG100) im IDD-Labor durchgeführt. Diese wurden zunächst auf einem flachen Bedruckstoff und anschließend ebenfalls auf einem Flakon durchgeführt. Das Druckbild ist ein quadratisches Raster, ähnlich wie das Gitter des Netz-Models des Drucktampons, mit einem Abstand zwischen den Rasterlinien von 2 mm. Die Drucke auf dem flachen Bedruckstoff hatten das Ziel, das Gesamtverhalten des Drucktampons unabhängig von einem geometrisch ausgeformten Bedruckstoff zu ermitteln. Um die Abbildungsgenauigkeit der jeweiligen Variante bewerten zu können, wurde bei jedem Druckversuch ein Raster gedruckt, wodurch Verzerrungen ermittelt werden konnten. Abbildung 6-5 zeigt das Klischee mit dem Raster (a) und den bedruckten Flakon (b).



**Abbildung 6-5:** Links ist eine digitale Abbildung des Klischees mit dem quadratischen Raster (a). Rechts ist ein Foto des bedruckten Flakons (b). Die rote ovale Markierung zeigt eine Verzerrung der gedruckten Rasterlinien am Rand des Flakons, wo die gebogenen Gitternetzlinien des Drucktampons in Abbildung 6-2a sind.

An der markierten Stelle am Rand des Flakons ist die Verzerrung von Rasterlinien erkennbar (Abbildung 6-5b). Um die Abstände zwischen den Rasterlinien in Pixeln mit Matlab zu ermitteln, wurde eine flexible Folie aus PVC während des Druckvorgangs zwischen dem Flakon und dem Drucktampon

und ebenfalls zwischen dem flachen Bedruckstoff und dem Drucktampon angebracht. Diese Folie mit einer Dicke von 0,1 mm kann die Form des Flakons während des Druckvorgangs annehmen. Anschließend wurden Bilder von den Rastern auf den Folien mit der Kamera Sony IMX477 CCD-Sensor aufgenommen und die Pixelzahl zwischen den Rasterlinien in Matlab mit der Funktion (Imtool) bestimmt. Bei CCD-Sensoren können die Bildkoordinaten sehr genau (auf Bruchteile eines Pixels) bestimmt werden (Heckel, 1995). Abbildung 6-6 zeigt das gedruckte Raster auf dem flachen Bedruckstoff (a) und auf dem Flakon (b).



**Abbildung 6-6:** Links ist das mit dem Drucktampon N29 gedruckte Raster auf einer flexiblen Kunststoff-Folie, die zwischen dem Drucktampon und dem flachen Bedruckstoff eingelegt ist (a). Rechts ist das gedruckte Raster auf der Folie, die zwischen dem Drucktampon und dem Flakon eingelegt ist (b). Die Abstände zwischen den Linien wurden auf X- und Z-Linien in Pixel mit Matlab ermittelt. 8 Pixel entsprechen 1 mm.

Acht Pixel entsprechen hier einem Millimeter. Die Rasterlinien an der Ober- und Unterseite des Flakons sind gekrümmt (siehe Abbildungen 6-5b und 6-6b), was dem Simulationsergebnis in Abbildung 6-2 und (6-3) entspricht. Die Rasterlinien auf dem flachen Bedruckstoff sind parallele Linien (siehe Abbildung 6-6a). In Querrichtung zum Flakon (in X-Richtung) dehnen sich die Rasterzellen während des Druckens auf dem Flakon aus (Abbildung 6-6b). Am Ende der X-Linie in Abbildung 6-6b beträgt die Verzerrung der Rasterzelle 6,1 Pixel (0,76 mm bei einem Abstand von 16 mm zur Mitte des Rasters). Am Ende der Z-Linie beträgt die Verzerrung 3,38 Pixel (0,42 mm bei einem Abstand von 36 mm zur Mitte des Rasters). Daher ist der Drucktampon N29 für das verzerrungsfreie Bedrucken des Flakons nicht geeignet. Um den

Fehler bei der Farbübertragung vom Klischee auf den Flakon zu korrigieren, muss entweder die Gravierung des Druckbildes auf dem Klischee angepasst (d.h. verzerrt) oder die Geometrie des Drucktampons verändert werden. Diese Dissertation fokussiert sich auf die Geometrie und Härte des Drucktampons. Wie vorher erwähnt, wird in dieser Dissertation die Hohlungsform des Drucktampons variiert, um die Druckqualität auf dem konvexen Bedruckstoff zu verbessern. Im nächsten Abschnitt wird die Entwicklung eines Hohl-Drucktampons erläutert.

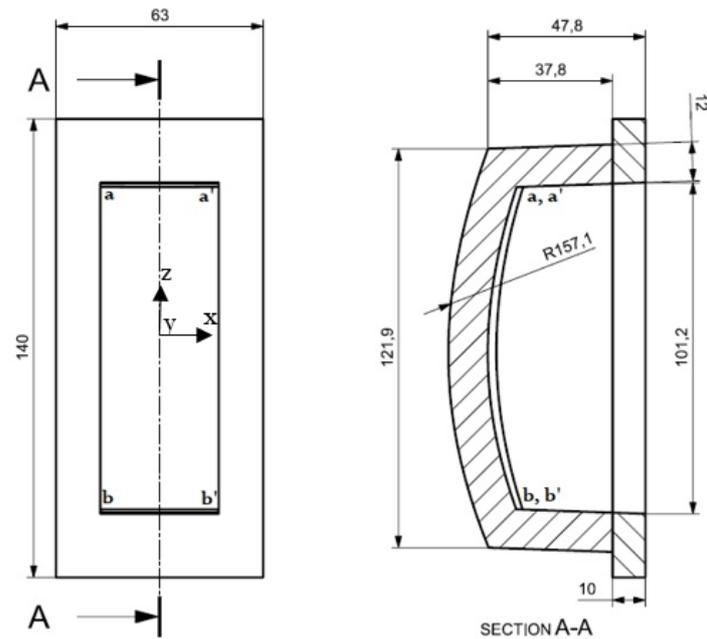
## 6.2 Entwicklung eines Hohl-Drucktampons mit dem digitalen Workflow

Bisher gibt es keine systematische Methode zur Gestaltung eines Hohl-Drucktampons oder Bi-Material-Drucktampons. Wie in Kapitel 2 erwähnt, wird der Entwurfsprozess für einen Hohl-Drucktampon anhand der Erfahrungen von Experten empirisch durchgeführt. Daher wird hier zum ersten Mal eine Methode zur Gestaltung eines Hohl-Drucktampons vorgestellt, die außerdem zu einer Verbesserung der Druckergebnisse auf den gekrümmten Bedruckstoffen und zu einer Senkung der Herstellkosten der Gießformen führt.

Der Drucktampon ist ein wichtiger Teil des indirekten Tiefdruckverfahrens. Die Auswahl der Drucktamponform und seine Shore A Härte ist wichtig, um ein gutes Druckverhalten auf dem Bedruckstoff zu erreichen. Zum Beispiel erfordert der Druck auf einem konvexen Bedruckstoff einen Hohl-Drucktampon mit einer stetigen Krümmung an der Druckfläche. Der Druck auf einer konkaven Oberfläche erfordert hingegen einen spitzförmigen Drucktampon (Morlock, o.D.). Daher wird in diesem Fall zuerst der volle Drucktampon mit Hilfe der Erfahrung des Drucktamponherstellers (als Startpunkt) in einem CAD-Programm konstruiert. Zweitens wird die Hohlform des Drucktampons variiert. Drittens wird eine Simulation an den neuen Hohl-Drucktampongeometrien durchgeführt. Schließlich werden die Formen der Hohl-Drucktampons mittels 3D-Drucker hergestellt.

Zunächst wird ein Hohl-Drucktampon für den Flakon in Abbildung 6-5b entwickelt. Der volle Drucktampon N29 wird aus dem Katalog des Unternehmens Tampo-Technik ausgewählt und in Siemens NX nachkonstruiert. Die Oberfläche des vollen Drucktampons N29 wird in Siemens NX mit einer Dicke von 12 mm gezeichnet, was einen Hohl-Drucktampon mit einer konkaven Innengeometrie ergibt. Die Wanddicke spielt hier eine entscheidende Rolle. Die dünnen Hohl-Drucktampons haben eine geringe Lebensdauer, deshalb soll die Wanddicke des Hohl-Drucktampons größer als 20 % der Breite des Drucktampons bei länglichen Drucktampons sein oder 20 % des Durchmessers des runden

Drucktampons (Lück, 2016). Abbildung 6-7 zeigt Konstruktionszeichnungen eines Hohl-Drucktampons mit einer konkaven Innengeometrie.



**Abbildung 6-7: Konstruktionszeichnungen eines Hohl-Drucktampons mit konkaver Innengeometrie. Die Wanddicke beträgt 12 mm (20 % der Breite des Drucktampons). Die Punkten a, a' und b, b' liegen in eine Ebene.**

In dieser Dissertation wurden Hohl-Drucktampons mit konkaver, flacher und konvexer Innengeometrie untersucht. Beim Hohl-Drucktampon mit flacher Innengeometrie wird die Innenoberfläche an den Punkten (a, a', b, b') in Abbildung 6-7 flach gestaltet und beim Drucktampon mit der konvexen Innengeometrie wird die Innenoberfläche der konkaven Geometrie um die Ebene (a, a', b, b') gespiegelt. Abbildung 6-8 zeigt Konstruktionszeichnungen eines Hohl-Drucktampons mit einer flachen Innengeometrie (a) und mit einer konvexen Innengeometrie (b). Diese Drucktampons sind spiegelsymmetrisch im Bezug auf die Y-Z und X-Y Ebenen.

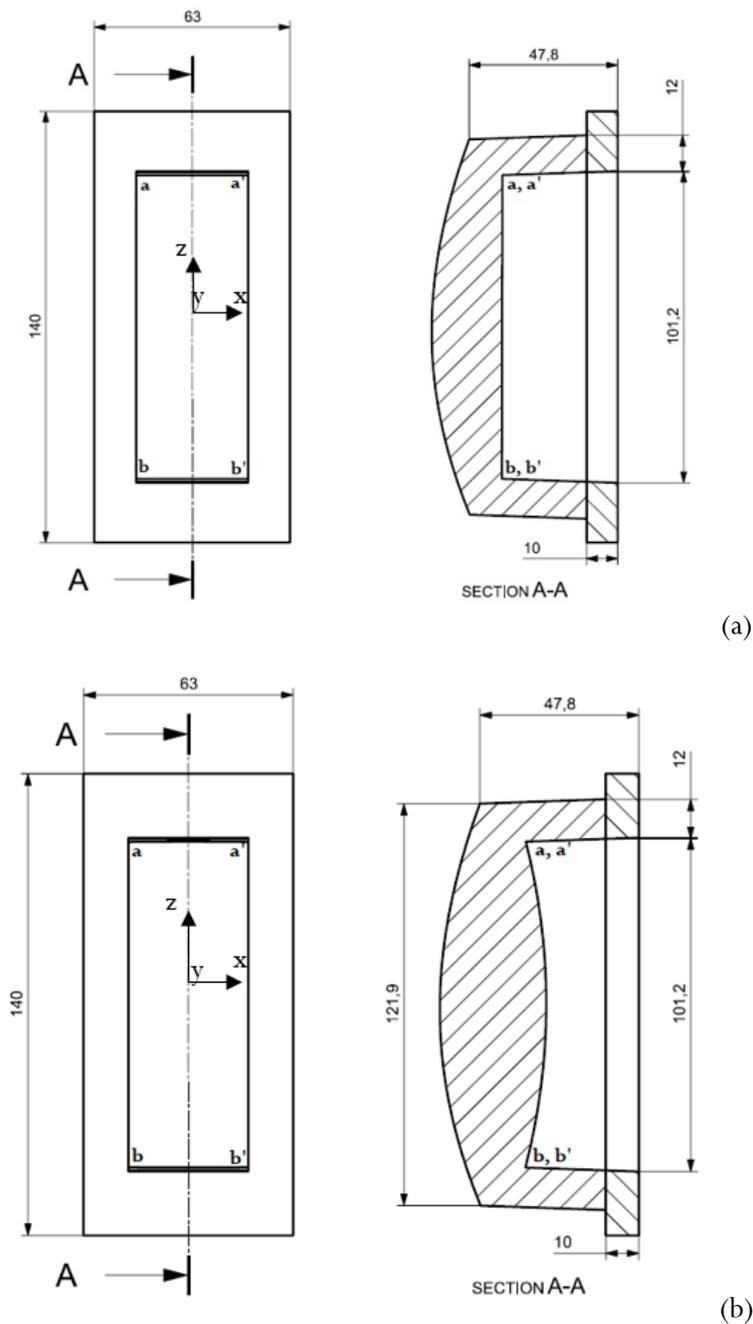


Abbildung 6-8: Konstruktionszeichnungen eines Hohl-Drucktampons mit flacher Innengeometrie (a) und Hohl-Drucktampon mit konvexer Innengeometrie (b).

Um das Druckverhalten der drei Hohl-Drucktampons auf dem Flakon zu bewerten, wurden drei Abaqus-Simulationen durchgeführt. Abbildung 6-9 zeigt die Verschiebungsamplitude der Punkte auf der Z-Linie (Abbildungen 6-9b, d und f) und die Verschiebung der Oberflächenpunkte in Z-Richtung (Abbildungen 6-9a, c und e). Die Z-Linie ist in Abbildung 5-7 dargestellt, sie liegt an der Oberfläche des Drucktampons.

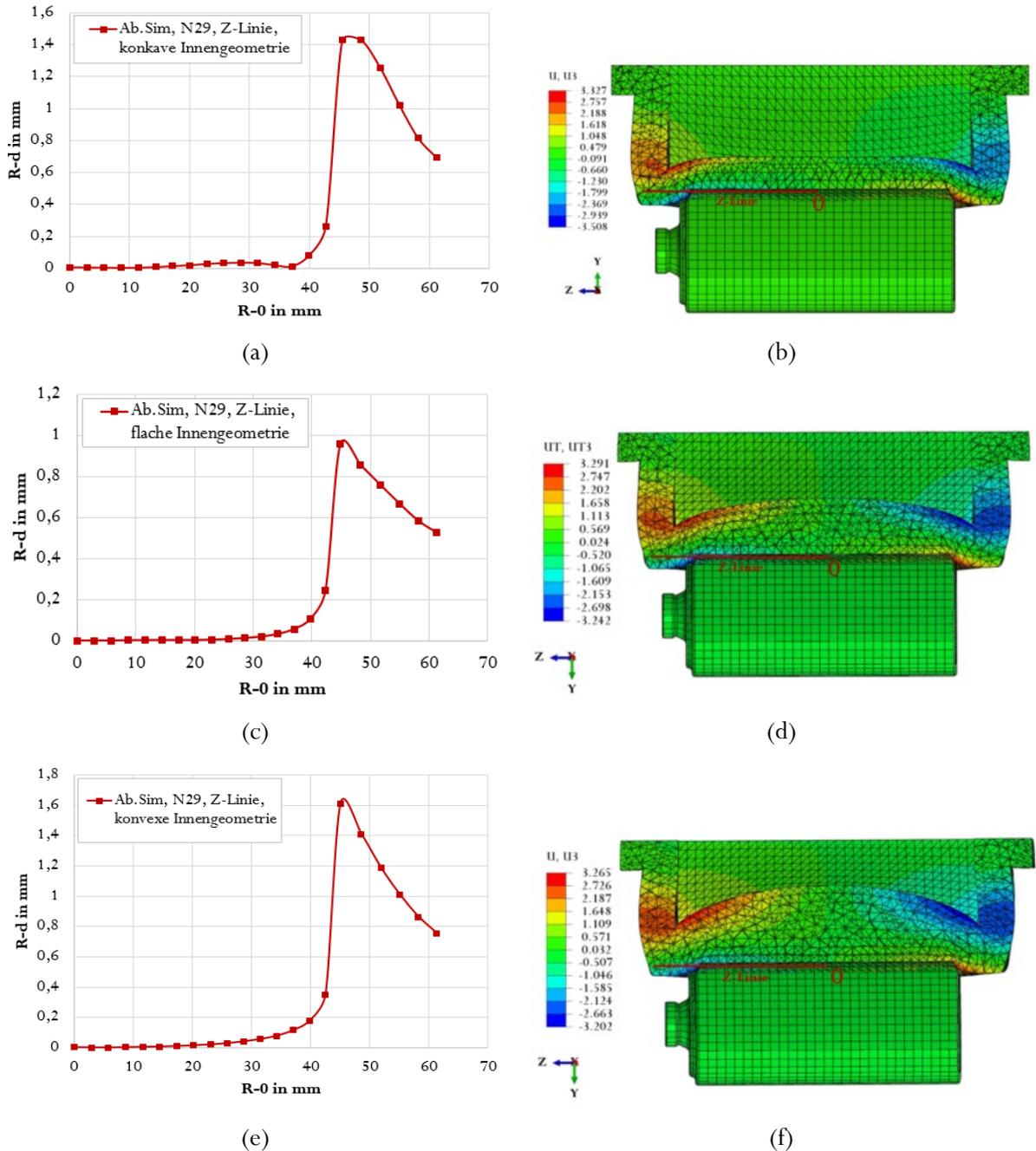
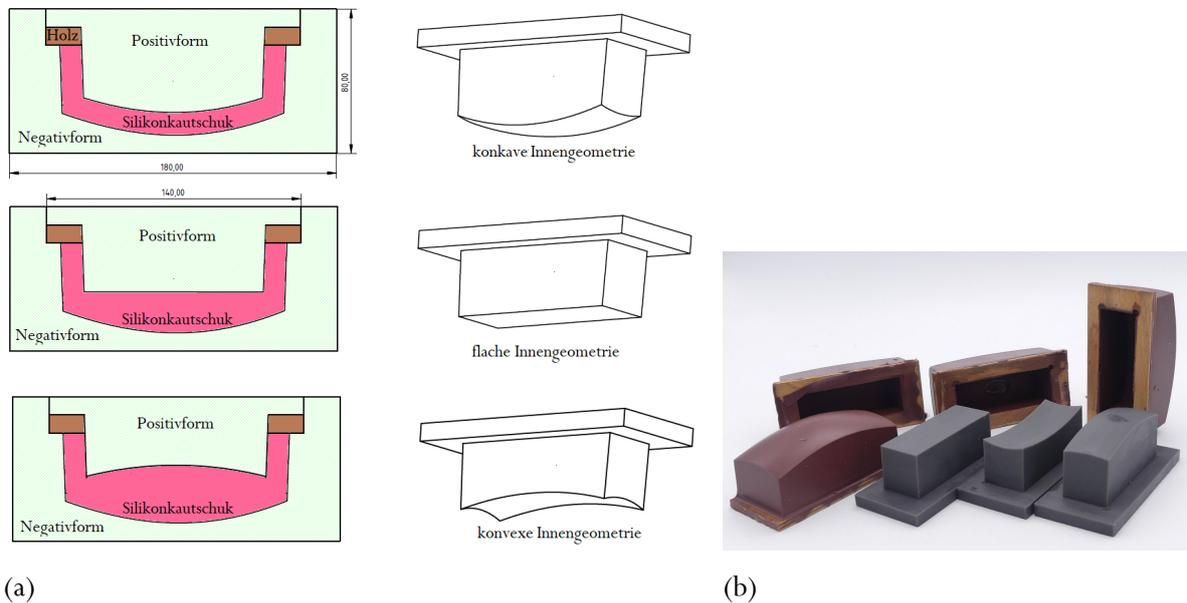


Abbildung 6-9: Abaqus-Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell für die Hohl-Drucktampons mit konkaver, flacher und konvexer Innengeometrie. Auf der linken Seite sind die Verschiebungsamplitude der Punkte auf der Z-Linie dargestellt (a, c und e). Auf der rechten Seite ist die Verschiebung der Hohl-Drucktampons mit konkaver, flacher und konvexer Innengeometrie grafisch in Farben dargestellt (b, d und f). R-0 ist hier die ursprüngliche Position der Punkte. R-d ist die Verschiebungsamplitude nach der Deformation. Diese Drucktampons sind spiegelsymmetrisch im Bezug auf die Y-Z und X-Y Ebenen und der Nullpunkt ist die Mitte des Drucktampons. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.

Bei allen Hohl-Drucktampons nimmt die Verschiebungsamplitude ( $R=0$  mm) der Punkte auf der Z-Linie bis zum Rand des Flakons Werte unter 0,2 mm. Im Vergleich mit den Ergebnissen in Abbildung 6-2d ist die Verschiebungsamplitude des Hohl-Drucktampons kleiner als beim vollen Drucktampon (etwa 0,6 mm). Beim Hohl-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie beträgt die maximale Verschiebungsamplitude am Rand des Flakons 0,98 mm und 1,62 mm beim Hohl-Drucktampon mit konvexer Innengeometrie. Um die Ergebnisse der Simulationen zu validieren, werden die Drucktampons in Abbildungen 6-7 und 6-8 hergestellt und anschließend mit ihnen auf ein Flakon gedruckt. Das Druckbild ist ein quadratisches Raster ähnlich wie das Gitter des Netz-Modells des Drucktampons mit einem Abstand zwischen den Gitterlinien von 2 mm (siehe Abbildung 6-5a). Zur Herstellung des Drucktampons wurden die Positiv- und Negativformen zuerst in den Programmen Siemens NX und als Vergleich in der freien Software FreeCAD konstruiert und mittels der SLA mit dem 3D-Drucker Form3L der Firma Formlabs gedruckt. Anschließend wurden die Formen händisch aufpoliert und zum Gießen des Hohl-Drucktampons mit dem Silikonkautschuk eingesetzt. Aus Kostengründen wird die Gussform für die Hohl-Drucktampons additiv gefertigt. Abbildung 6-10 zeigt eine schematische Darstellung der Gießformen, sowie die mittels des 3D-Druckers hergestellten Positivformen in grau und die abgegossenen Hohl-Drucktampons in dunkelrot.



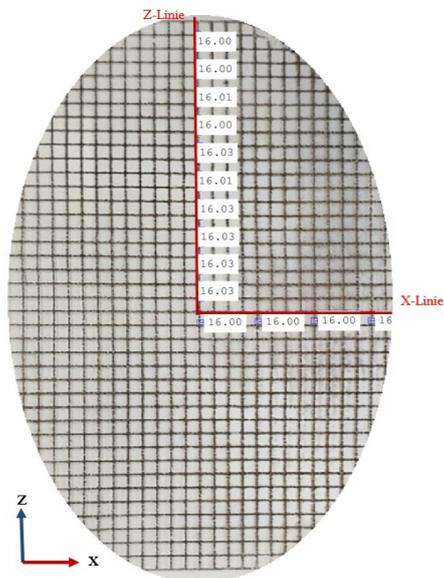
**Abbildung 6-10:** Schematische Darstellung der Positiv- und Negativformen der Hohl-Drucktampons (a). Mittels 3D-Druckers hergestellte Positivformen (grau) und Hohl-Drucktampons (dunkelrot) sind in (b) dargestellt.

Die Gießformen wurden mit einem technischen Kunstharz der Firma Formlabs (Tough 2000 Resin für robuste Prototypen) hergestellt, Tough 2000 Resin ist das stärkste und steifste Material der Kunstharze

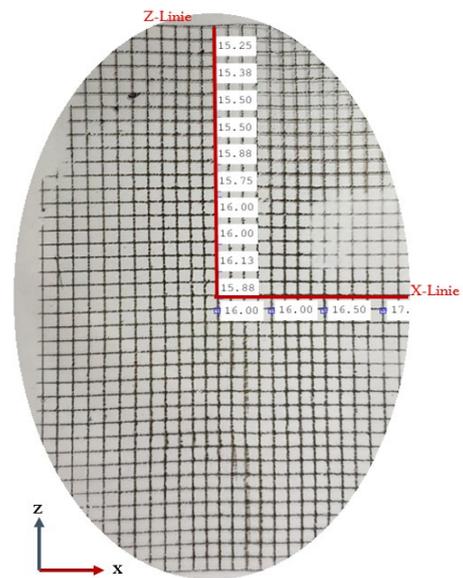
(Formlabs, 2020). Die maximale Zugfestigkeit dieses Materials nach ASTM D 638-14 beträgt 29 MPa (Formlabs, 2020). Dieses Material eignet sich aufgrund seiner Festigkeit für die Herstellung von Gussformen der Drucktampons, da die Gussformen danach poliert und mehrmals verwendet werden. Die Hohl-Drucktampons werden so hergestellt, dass die Luft aus den Drucktampons beim Verformen entweichen kann.

Um das Druckverhalten der Hohl-Drucktampons auf einem Flakon zu untersuchen, wurden ebenfalls Druckversuche an der Tampondruckmaschine durchgeführt. Diese wurden zunächst auf einem flachen Bedruckstoff und anschließend ebenfalls auf einem Flakon durchgeführt. Die Drucke auf dem flachen Bedruckstoff hatten das Ziel, das Gesamtverhalten des Drucktampons unabhängig von einem geometrisch ausgeformten Bedruckstoff zu ermitteln. Um die Abbildungsgenauigkeit der jeweiligen Variante bewerten zu können, wurde bei jedem Druckversuch das in Abschnitt 6.1 vorgestellte Raster gedruckt, wodurch Verzerrungen des Drucks ermittelt werden konnten. Bei den anschließenden Druckversuchen auf dem Flakon wurde das gleiche Raster aufgedruckt. Somit konnten einerseits die Reaktionskräfte beim Bedrucken des Flakons zwischen den unterschiedlichen Varianten von Hohl-Drucktampons verglichen werden. Andererseits ermöglichte dies die Bewertung der Abbildungsgenauigkeit (Verzerrung, Nichtparallelität) eines Druckbildes im Realeinsatz sowie den direkten Vergleich zwischen Referenzdruck (Bedruckung vom flachen Bedruckstoff) und Flakon-Bedruckung. Bei den im Folgenden beschriebenen Druckversuchen mit länglichem Hohl-Drucktampon auf dem Flakon wurde eine flexible PVC-Folie zwischen Drucktampon und Flakon aufgelegt, auf die das Raster zur Bewertung der Abbildungsgenauigkeit gedruckt wurde, um die gedruckten Raster mit den verschiedenen Hohl-Drucktampons einfacher vergleichen zu können. Die eingesetzten Folien sind PVC-Kunststofffolien mit einer Dicke von 0,1 mm, sie sind sehr flexibel und können während des Druckvorgangs die Form des Flakons annehmen. Im Anschluss an den Druckvorgang wurden die Abstände der Gitterlinien mittels der Software Matlab digital auf Pixelebene vermessen und anschließend beurteilt. Eine identifizierte Softwarelösung (Imagej), die aufgrund ihrer freien Verfügbarkeit aus wirtschaftlichen Gründen bevorzugt bei mittelständigen Unternehmen eingesetzt werden kann, bietet diese Möglichkeit der digitalen Vermessung ebenfalls (Abramoff et al., 2004). In Abbildung 6-11 zeigt die Druckergebnisse des Hohl-Drucktampons mit konkaver und flacher Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff (das gedruckte Raster auf der linken Seite) und auf dem Flakon (das gedruckte Raster auf der rechten Seite). Die Druckergebnisse auf dem flachen Bedruckstoff sind bei den drei Hohl-Drucktampons gleich, da der Deformationsweg bei der Farbaufnahme aus dem Klischee (Flachklischee) auch 14 mm beträgt. Deshalb entstehen beim Druck auf dem flachen Bedruckstoff keine Biegungen oder Verzerrungen der Rasterlinien. Beim Druck auf dem Flakon sind die Druckergebnisse unterschiedlich. Beim Hohl-Drucktampon mit flacher und konvexer

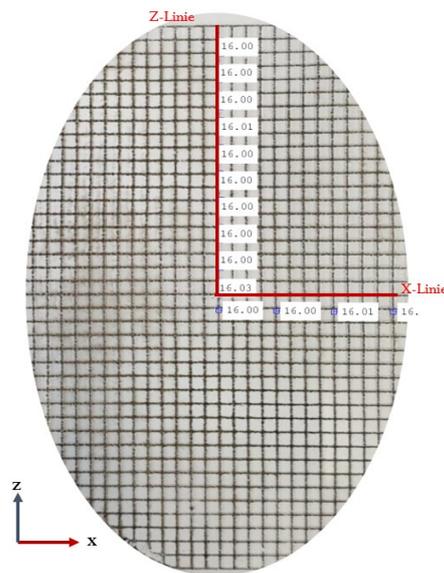
Innengeometrie auf dem Flakon verschmiert die Farbe und es fehlt ein Teil des Druckbildes (Abbildungen 6-11d und 6-12f).



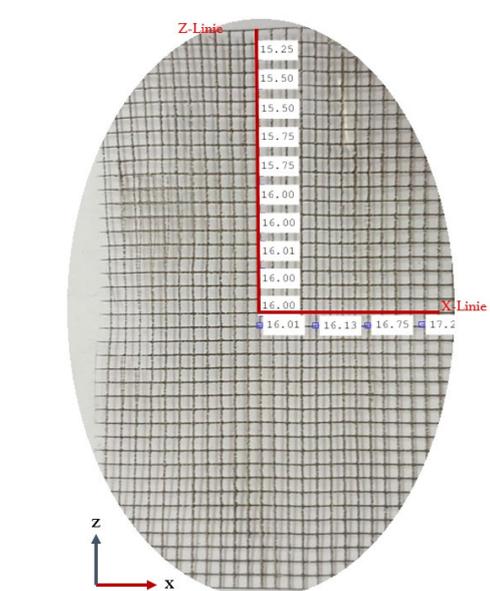
(a) Ergebnisse des Hohl-Drucktampons mit konkaver Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff



(b) Ergebnisse des Hohl-Drucktampons mit konkaver Innengeometrie auf dem Flakon



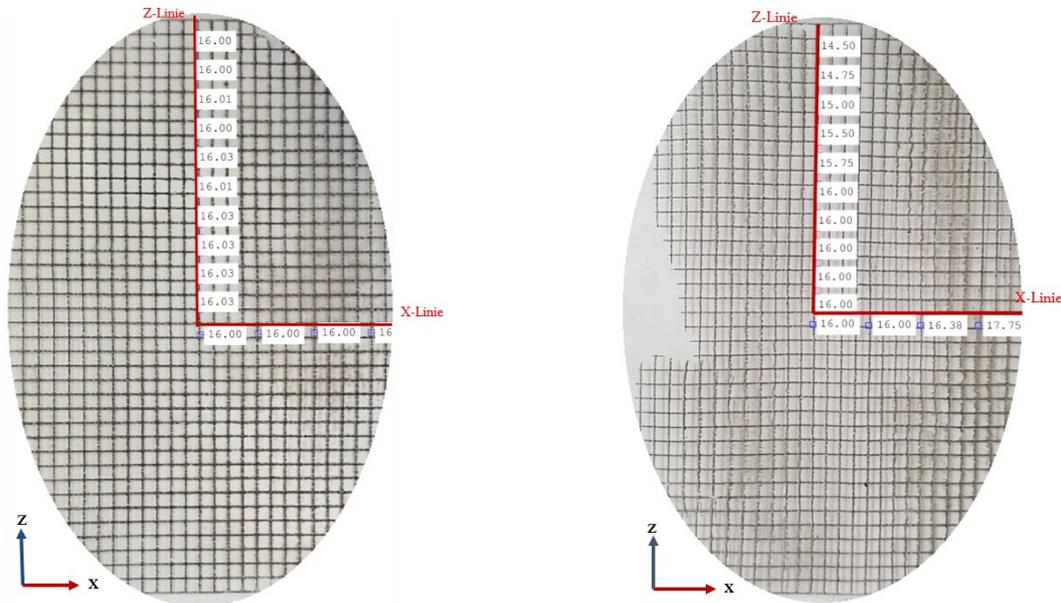
(c) Ergebnisse des Hohl-Drucktampons mit flacher Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff



(d) Ergebnisse des Hohl-Drucktampons mit flacher Innengeometrie auf dem Flakon

**Abbildung 6-11:** Das gedruckte Raster mit dem Hohl-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff (a) und einem Flakon (b) und dem Hohl-Drucktampon mit flacher Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff (c) und einem Flakon (d).

Die Druckergebnisse der Hohl-Drucktampons mit konvexer Innengeometrie sind in Abbildung 6-12 dargestellt.



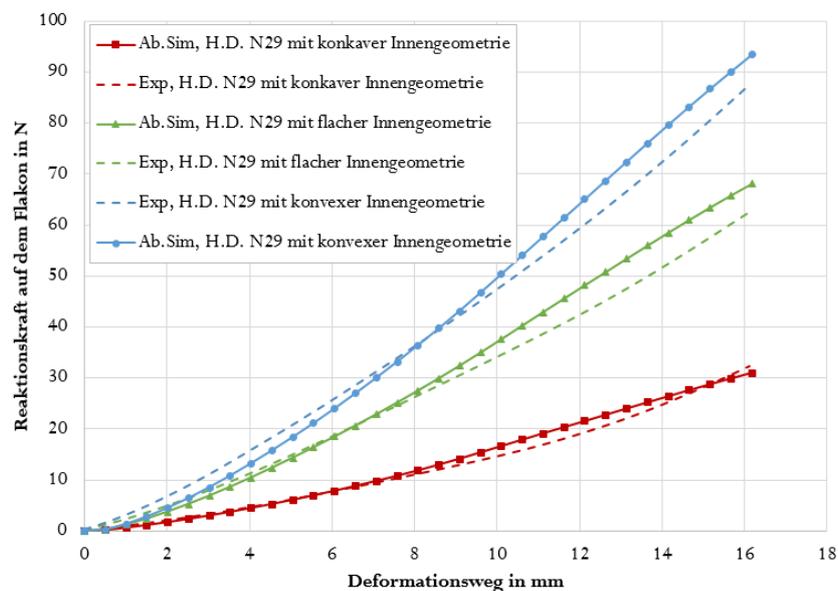
(e) Ergebnisse des Hohl-Drucktampons mit konvexer Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff

(f) Ergebnisse des Hohl-Drucktampons mit konvexer Innengeometrie auf dem Flakon

**Abbildung 6-12: Das gedruckte Raster mit dem Hohl-Drucktampon mit konvexer Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff (e) und einem Flakon (f). Beim Drucken auf dem Flakon mit dem Hohl-Drucktampon mit konvexer Innengeometrie verschmiert die Farbe und es fehlt ein Teil des Druckbildes (f).**

Bei einer konkaven Innengeometrie in Abbildung 6-11b wies der Hohl-Drucktampon eine gute Abbildungsgenauigkeit auf, Verzerrungen traten hier gleichmäßig und in geringem Maße auf ( $\pm 1$  Pixel bei einer Originalmaschenweite von 16 Pixel) und die Reaktionskraft auf dem Flakon bei dieser Variante beträgt 32 N bei einem Deformationsweg von 16 mm (siehe Abbildung 6-13). Die Verzerrung der Rasterzelle in Z-Richtung wird berechnet, indem die Breite der Rasterzelle auf der Z-Linie in Abbildung 6-11b von diesem Wert in Abbildung 6-11a abgezogen wird. Am Ende der Z-Linie in Abbildung 6-11b beträgt die Verzerrung 0,75 Pixel (0,1 mm bei einem Abstand von 40 mm vom Mittelpunkt des Rasters). Im Vergleich mit dem Abaqus-Simulationsergebnis in Abbildung 6-9a beträgt die Verschiebung auf Z-Linie 0,095 mm bei einem Abstand von 40 mm von der Mitte des Rasters. Für den Hohl-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie beträgt die Verzerrung auf der Z-Linie 0,1 mm bei einem Abstand von 40 mm von der Mitte des Rasters (Abbildung 6-11d). Im Vergleich zum Abaqus-Simulationsergebnis in Abbildung 6-9c beträgt die Verzeichnung auf der Z-Linie an dieser Position 0,095 mm. Für den Hohl-Drucktampon mit konvexer Innengeometrie beträgt die Verzerrung auf Z-Linie 0,21 mm (Abbildung 6-12f). Im Vergleich zum Abaqus-Simulationsergebnis in Abbildung 6-9e beträgt die Verzeichnung auf der Z-Linie an

dieser Position 0,18 mm. Im Vergleich zu den Ergebnissen des vollen Drucktampons ist die Krümmung der Rasterlinien so gering, dass die Hohl-Drucktampons mit konkaver Innengeometrie geeignet sind, um den Flakon zu bedrucken. Das Druckergebnis in Abbildung 6-11d zeigt, dass die Krümmungen der Rasterlinien beim Hohl-Drucktampon mit flacher Innengeometrie deutlich sind. Beim Hohl-Drucktampon mit konvexer Innengeometrie sind die Rasterlinien verzerrt. Zur Validierung der letzten drei Simulationen werden die Reaktionskräfte auf dem Flakon in den Simulationen berechnet und mit Messwerten aus den Druckversuchen verglichen (Siehe Abbildung 6-13).



**Abbildung 6-13: Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell und Messungen der Reaktionskraft für die Hohl-Drucktampons (6 Shore A) mit konkaver, flacher und konvexer Innengeometrie. Hier werden die Simulationsergebnisse (durchgezogene Linien) mit den Messungen (gestrichelte Linien) verglichen. H.D. in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Hohl-Drucktampon und Ab.Sim. ist eine Abkürzung für Abaqus-Simulation. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.**

Die Abaqus-Simulationsergebnisse sind gut vergleichbar mit den experimentellen Ergebnissen. Für den Hohl-Drucktampon mit einer konkaven Innengeometrie beträgt die Reaktionskraft 32 N bei einem Deformationsweg von 16 mm, bei der Variante mit der flachen Innengeometrie 62 N (16 mm) und bei der Variante mit der konvexen Innengeometrie 86 N (16 mm). Beim vollen Drucktampon nimmt die Reaktionskraft auf dem Flakon einen Wert von 242 N beim selben Deformationsweg (16 mm). Im Vergleich zum vollen Drucktampon sind die Reaktionskräfte mit den Hohl-Drucktampons wesentlich geringer, daher wird empfohlen, auch auf den zerbrechlichen Bedruckstoffen mit Hohl-Drucktampons zu drucken. Die hohe Flexibilität und die niedrigen Reaktionskräfte auf den Bedruckstoff sind Vorteile von

den Hohl-Drucktampons gegenüber den vollen Drucktampons. Aber sie weisen eine kürzere Lebensdauer auf (Lück, 2016).

Die Güte der Anpassung zwischen den experimentellen und berechneten Daten wird mit dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bewertet. Die Bestimmtheitsmaße zwischen den Ergebnissen werden berechnet und in Tabelle 6-2 dargestellt.

**Tabelle 6-2: Die Genauigkeit der Übereinstimmung von Abaqus-Simulationsergebnissen mit dem experimentellen Kraft-Weg-Verhalten der Hohl-Drucktampons auf dem Flakon wird hier dargestellt. H.D. ist eine Abkürzung für Hohl-Drucktampon.**

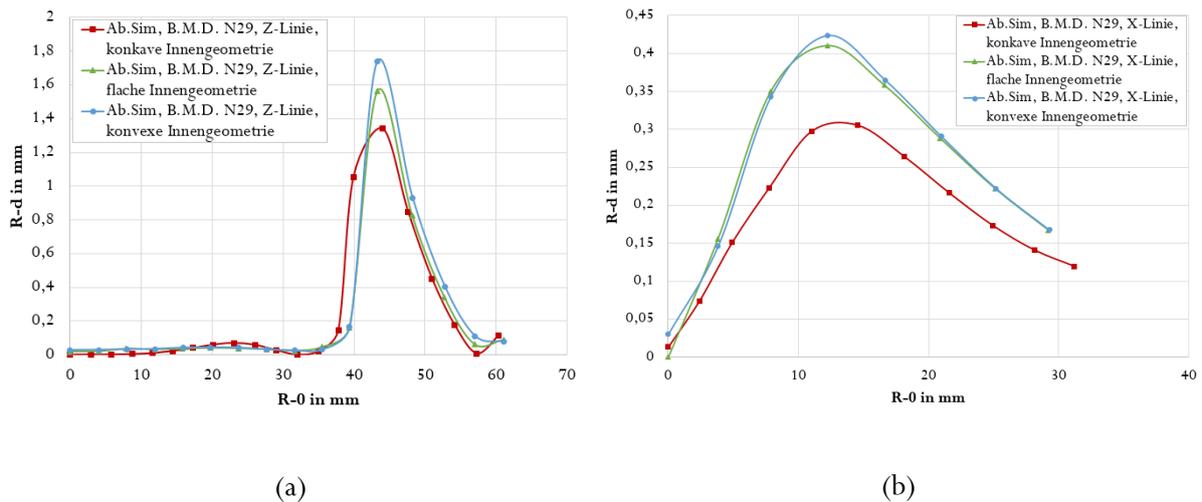
	Simulation/Kraftsensor für den H.D N29 mit konkaver Innengeometrie	Simulation/Kraftsensor für den H.D N29 mit flacher Innengeometrie	Simulation/Kraftsensor für den H.D N29 mit konvexer Innengeometrie
$R^2$	0,99	0,87	0,87

Beim Hohl-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie nimmt der  $R^2$ -Wert einen Wert von 0,99. In diesem Fall können die Simulationsergebnisse als nahezu identisch mit den Messungen angesehen werden. Bei den anderen Hohl-Drucktampons mit flacher und konvexer Innengeometrie beträgt der  $R^2$ -Wert 0,87. Wie in Abschnitt 5.3.1 erwähnt, bedeutet ein  $R^2$ -Wert zwischen 0,7 und 0,9 eine hohe Korrelation zwischen den Ergebnissen. Daher sind hier die Abaqus-Simulationsergebnisse gut vergleichbar mit den Messergebnissen. Im nächsten Abschnitt wird die Entwicklung eines Bi-Material-Drucktampons mit dem digitalen Workflow beschrieben.

### **6.3 Entwicklung eines Bi-Material-Drucktampons mit dem digitalen Workflow**

Der Hohl-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie ohne Füllung liefert eine gute Abbildungsqualität beim Bedrucken von konvexen Bedruckstoffen (siehe Abschnitt 6.2). Der Hohl-Drucktampon weist im Vergleich zum vollen Drucktampon eine kurze Lebensdauer auf (Lück, 2016). Die Hohl-Drucktampons werden nur zum Bedrucken von flachen und konvexen Bedruckstoffen verwendet. Zum Bedrucken von Bedruckstoffen mit Vertiefungen oder konkaven Geometrien werden volle Drucktampons mit einer hohen Druckfläche verwendet (Morlock, o.D.). Um die Vorteile von hohlen und vollen Drucktampons zu gewährleisten, werden Drucktampons entwickelt, die nur an der Oberfläche hart sind und im Inneren aus

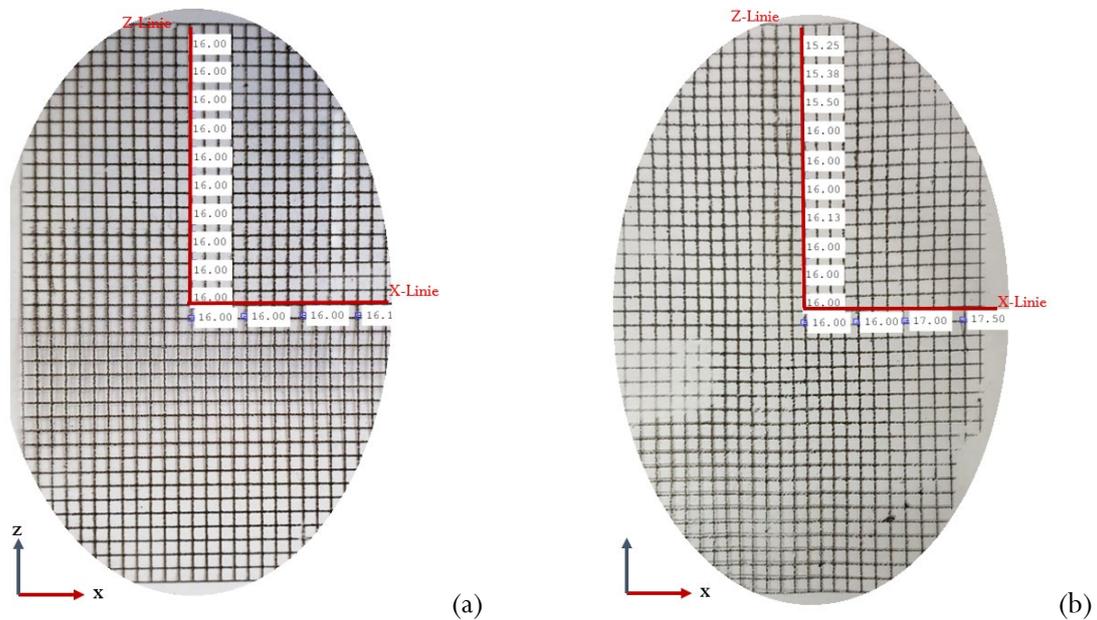
einem weichen Silikonkautschuk bestehen. Diese Drucktampons werden als Bi-Material-Drucktampons (B.M.D.) bezeichnet. Zur Herstellung der Bi-Material-Drucktampons werden die aus Abschnitt 6.2 drei bekannten Hohl-Drucktampons (6 Shore A RTV2-Silikonkautschuk) statt mit Luft mit einem weichen Silikonkautschuk (0 Shore A RTV2-Silikonkautschuk) gefüllt. Analog zum Hohl-Drucktampon werden hier auch Abaqus-Simulationen für die Bi-Material-Drucktampons auf dem Flakon durchgeführt (Abbildung 6-14).



**Abbildung 6-14: Abaqus-Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell für die Bi-Material-Drucktampons mit konkaver, flacher und konvexer Innengeometrie. Auf der linken Seite sind die Verschiebungsamplitude der Punkte auf der Z-Linie dargestellt (a). Auf der rechten Seite sind die Verschiebungsamplitude der Punkte auf der X-Linie dargestellt (b). Die Z- und X-Linien sind in Abbildung 6-3 dargestellt. R-0 ist hier die ursprüngliche Position der Punkte. R-d ist die Verschiebungsamplitude nach der Deformation. Diese Drucktampons sind spiegelsymmetrisch im Bezug auf die Y-Z und X-Y Ebenen und der Nullpunkt ist die Mitte des Drucktampons. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.**

Abbildung 6-14a zeigt geringe Verschiebungsamplitude (unter 0,2 mm) auf der Z-Linie im Druckbereich (unter 40 mm in Z-Richtung). Auf der X-Linie sind die Verschiebungsamplitude beim Bi-Material-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie kleiner als bei den anderen Drucktampons. Um die letzten Simulationsergebnisse zu validieren, wurden ebenfalls Druckversuche durchgeführt. Diese werden zunächst auf einem flachen Bedruckstoff und anschließend ebenfalls auf einem Flakon durchgeführt. Wie in Abschnitt 6.2 wird auch hier die Abbildungsgenauigkeit der Bi-Material-Drucktampons mit konkaver, flacher und konvexer Innengeometrie untersucht. Hier wurde auch bei jedem Druckversuch ein Raster gedruckt, wodurch Verzerrungen des Drucks ermittelt werden konnten. Wie in Abschnitt 6.2 wurde auch hier eine 0,1 mm dicke flexible PVC-Folie zwischen Drucktampon und Flakon aufgelegt, auf die das Raster zur Bewertung der Abbildungsgenauigkeit gedruckt wurde. In Abbildung 6-15 sind (a) und (b) die

Druckergebnisse des Bi-Material-Drucktampons mit konkaver Innengeometrie. (a) ist das gedruckte Raster auf der PVC-Zwischenfolie auf einem flachen Bedruckstoff und (b) ist das gedruckte Raster auf der PVC-Zwischenfolie auf einem Flakon. Für den Bi-Material-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie auf dem Flakon verschmiert die Farbe nicht und das Druckbild wird vollständig übertragen (Abbildung 6-15b).



**Abbildung 6-15:** Das gedruckte Raster mit dem Bi-Material-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff in (a) und auf der PVC-Zwischenfolie auf einem Flakon in (b). Beim Drucken auf dem Flakon mit dem Bi-Material-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie verschmiert die Farbe nicht und das Druckbild wird vollständig übertragen (b).

Abbildung 6-16 zeigt die Druckergebnisse des Bi-Material-Drucktampons mit flacher und konvexer Innengeometrie. (c) zeigt das gedruckte Raster vom Bi-Material-Drucktampon mit flacher Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff und (d) auf der PVC-Zwischenfolie auf einem Flakon. (e) ist das gedruckte Raster vom Bi-Material-Drucktampon mit konvexer Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff und (f) auf den PVC-Zwischenfolien auf einem Flakon. Bei Bi-Material-Drucktampons mit flacher und konvexer Innengeometrie auf dem Flakon verschmiert die Farbe nicht aber es fehlt ein Teil des Druckbildes (Abbildungen 6-16d und 6-16f).

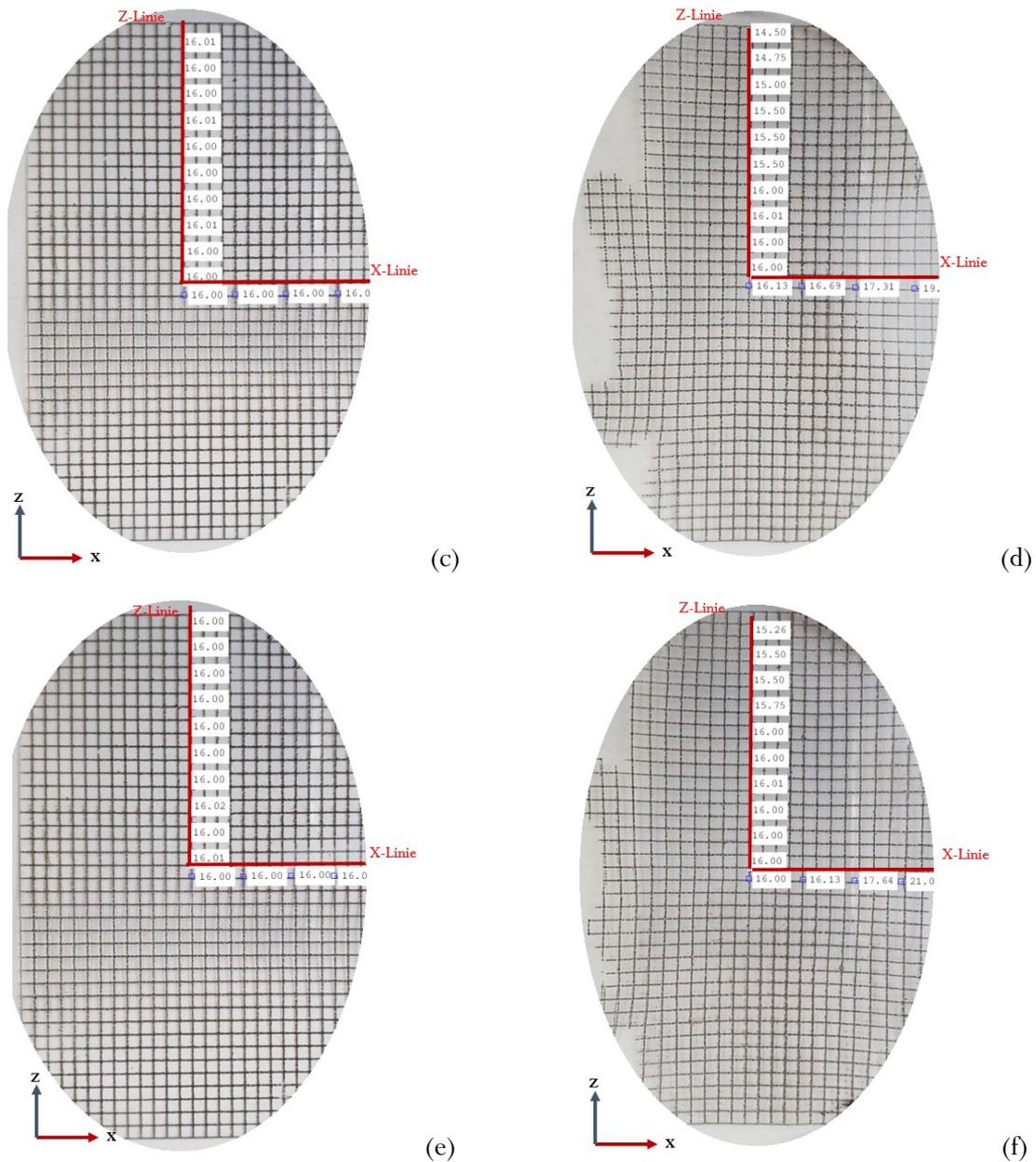


Abbildung 6-16: Die Druckergebnisse des Bi-Material-Drucktampons mit flacher Innengeometrie in (c und d) und mit konvexer Innengeometrie in (e und f), jeweils auf einem flachen Bedruckstoff in (c und e) und auf der PVC-Zwischenfolie auf einem Flakon in (d und f). Beim Drucken auf dem Flakon mit dem Bi-Material-Drucktampon mit flacher und konvexer Innengeometrie verschmiert die Farbe nicht aber das Druckbild wird nicht vollständig übertragen (d und f).

Die Rasterlinien in Abbildung 6-15 b sind parallel. Am Ende der X-Linie beträgt die Verzerrung der Rasterzelle 0,125 mm und am Ende der Z-Linie (auf einer Position 36 mm in Z-Richtung) nimmt die Verzerrung der Rasterzelle einen Wert von 0,01 mm. Wie vorher erwähnt, liegt die akzeptable Verschiebung beim Tampondruck im Bereich von  $\pm 0,6$  mm (Morlock, o.D.). Die Rasterlinien in

Abbildung 6-15d sind gekrümmt und die Verzerrung der Rasterzelle am Ende der Z-Linie (beim B.M.D. mit flacher Innengeometrie) beträgt 0,25 mm und am Ende der X-Linie nimmt die Verzerrung einen Wert von 0,375 mm. Die Rasterlinien in Abbildung 6-15f sind gekrümmt und die Verzerrung der Rasterzelle am Ende der Z-Linie beträgt 0,01 mm und am Ende der X-Linie nimmt die Verzerrung einen Wert von 0,625 mm. Im Vergleich zu den Ergebnissen in Abbildung 6-16 d und f sind die Verzerrungen beim Bi-Material-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie am geringsten. Dies kann auch in den Simulationsergebnissen in Abbildung 6-14 beobachtet werden. Um die Abaqus-Simulationen für die Bi-Material-Drucktampons zu validieren, werden die Reaktionskräfte auf dem Flakon berechnet und mit den Werten aus dem Kraftsensor an der Tampondruckmaschine verglichen (Abbildung 6-17).

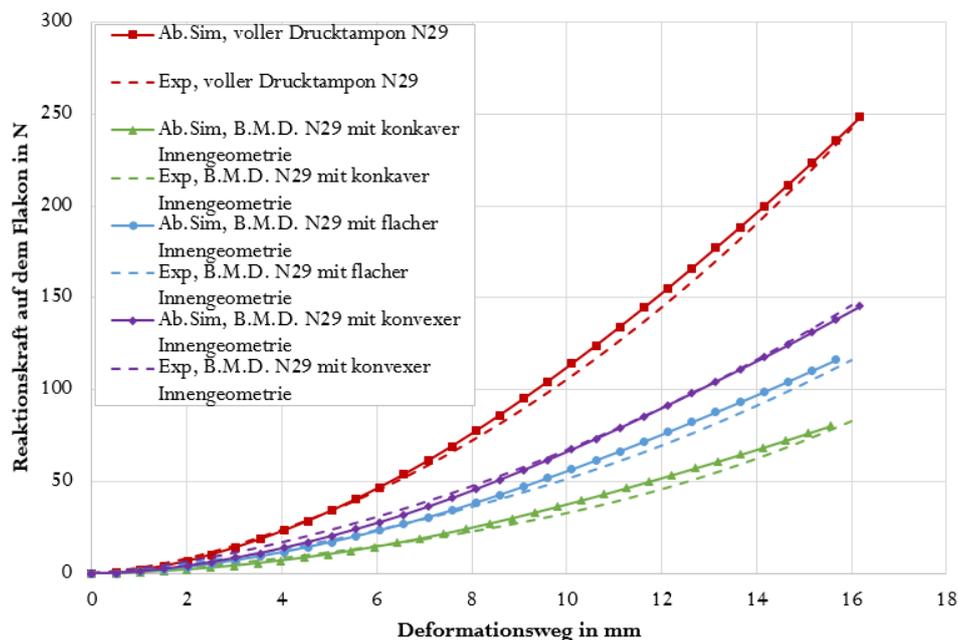


Abbildung 6-16: Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell und Messungen der Reaktionskraft für die Bi-Material-Drucktampons (6 Shore A) mit konkaver, flacher und konvexer Innengeometrie und mit einem weichen Füllmaterial (0 Shore A RTV2-Silikonkautschuk) und des vollen Drucktampons N29. Hier werden die Simulationsergebnisse (durchgezogene Linien) mit den Messungen (gestrichelte Linien) verglichen. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.

Die Reaktionskraft auf dem Flakon bei der Variante mit konkaver Innengeometrie beträgt 80,3 N bei einem Deformationsweg von 16 mm, bei der Variante mit flacher Innengeometrie 116 N und bei der Variante mit konvexer Innengeometrie 145 N (siehe Abbildung 6-16). Die Reaktionskräfte der Bi-Material-Drucktampons sind viel kleiner als die Reaktionskraft beim vollen Drucktampon (242 N) beim selben Deformationsweg. Die Reaktionskraft auf dem Flakon ist hier kleiner als bei den vollen Drucktampons, trotzdem verfügen die Bi-Material-Drucktampons eine sehr gute Nachgiebigkeit, deshalb

können diese Drucktampons auch für die Vertiefungen und konkaven Bedruckstoffe verwendet werden. Deshalb hat diese Drucktampons die Flexibilität des Hohl-Drucktampons und die gute Nachgiebigkeit des vollen Drucktampons. Weitere Simulationen des Bi-Material-Drucktampons auf einem konkaven Bedruckstoff wurde im HASI-Projekt durchgeführt In dieser Dissertation werden nur flache und konkave Substrate betrachtet und die Entwicklung des geeigneten Drucktampons auf Basis des Workflows in Kapitel 3.

Zusammenfassend eignet sich der Bi-Material-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie zum Bedrucken von konkaven Bedruckstoffen, da die Verschiebungsamplitude kleiner als 0,6 mm ist. Offen bleibt, wie hoch die Lebensdauer der Verbindung des Bi-Material-Drucktampons ist.

Die reguläre Belastung eines Drucktampons führt zu Verschiebungen im Innenraum. Die dabei auftretenden Kräfte müssen über die Verklebung abgetragen werden, ohne zu einer Schädigung zu führen. Insbesondere durch die starke Biegewechselbelastung ist die Verklebung stark beansprucht. Zur Abschätzung der Lebensdauer werden für diese Varianten jeweils Probekörper (B.M.D. mit konkaver Innengeometrie) hergestellt und hinsichtlich der Lebensdauer ihrer Verbindung untersucht. Zur Untersuchung der Lebensdauer wurde der Drucktampon in den Druckbetrieb (beim Unternehmen Tampon-Technik) übernommen und 60.000 Lastzyklen ausgesetzt. Der Flakon in Abbildung 6-5b wurde hier als Bedruckstoff verwendet und die maximale Kraft in jedem Zyklus an der Tampondruckmaschine betrug 80 N. Im IDD-Labor wurde dieser Drucktampon an der Universalprüfmaschine Zwick Z050 mit 3.000 Lastzyklen auf dem Flakon geprüft. Eine anschließende Sichtprüfung konnte den äußerlichen Verschleiß als typisch und von konventionellen Drucktampons nicht unterscheidbar identifizieren. Der übliche volle Drucktampon kann beim Tampondruck bis 100.000 Lastzyklen ertragen. Wenn ein zu bedruckendes Objekt sehr scharfe Ecken oder extreme Krümmungen aufweist, kann der Tampon bereits nach 1.000 bis 5.000 Drucken physische Beschädigung bekommen (Pröll, o.D.).

## 6.4 Entwicklung eines antistatischen Hohl-Drucktampons mit dem digitalen Workflow

Wie in Kapitel 2 erwähnt, ist das Drucktamponmaterial ein Isolator. Um die elektrische Leitfähigkeit des Silikonkautschuks zu bestimmen wird die Methode der Zweipunkt-Messung nach DIN EN 61340-2-3 eingesetzt (DIN EN 61340-2-3, 2017). Die Messungen zeigten immer elektrische Widerstände von über  $200 \text{ M}\Omega$  (Überschreiten des Messbereichs des eingesetzten Widerstandmessgerätes Keithley Series 2400 Source Meter). Um elektrostatische Beladung und Farbspritzer während des Bedruckens zu vermeiden, wird das Drucktamponmaterial (Silikonkautschuk) vor dem Gießen mit 0,5 bis 1,5 % Gewichtsanteil an SWCNT (Single-Walled Carbon Nanotubes) vermischt. Die aus dieser Mischung hergestellten Drucktampons werden als antistatische Drucktampons bezeichnet. In Abschnitt 5.4 wurden drei geometrisch unterschiedliche Drucktampons (länglich, rund und quadratisch) ausgewählt, die eine möglichst große Bandbreite abdecken. Für diese Untersuchung wurde der Drucktampon N81 (quadratische Grundform) ausgewählt und in unterschiedlichen Variationen hergestellt:

- Mit/ohne Carbon-Nanotubes (SWCNT)
- Hohl-Drucktampon mit einer konkaven, flachen und konvexen Innengeometrie

Abbildung 6-17 zeigt einen quadratischen Drucktampon ohne SWCNT (nicht antistatisch) und mit 1 % SWCNT (antistatisch). Zunächst wird der Einfluss der Zugabe von SWCNT auf die Härte des Drucktamponmaterials und auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Anschließend wird ein antistatischer Hohl-Drucktampon mit einem elektrisch leitfähigen Textilstreifen zur Ableitung von Ladungen entworfen und mit dem digitalen Workflow entwickelt. Um den Einfluss der Zugabe von SWCNT in den Silikonkautschuk auf seine elektrische Leitfähigkeit zu untersuchen, wurden antistatische Drucktampons (6 Shore A) mit 0,5 %, 1 % und 3 % Gewichtsanteil an SWCNT bei dem Unternehmen Tampon-Technik hergestellt. Die elektrischen Widerstände dieser Drucktampons wurden im IDD-Labor mit der Zweipunkt-Messmethode nach DIN 61340-2-3 (2017) bestimmt. Tabelle 6-3 zeigt die elektrischen Widerstände der hergestellten antistatischen Drucktampons.

**Tabelle 6-3: Messergebnisse der elektrischen Widerstände der antistatischen Drucktampons mit unterschiedlichem Gewichtsanteil an SWCNT.**

Gewichtsanteil an SWCNT in %	0,5	1	3
Der mittlere elektrische Widerstand	$75 \text{ M}\Omega$	$38 \text{ M}\Omega$	$46 \text{ k}\Omega$

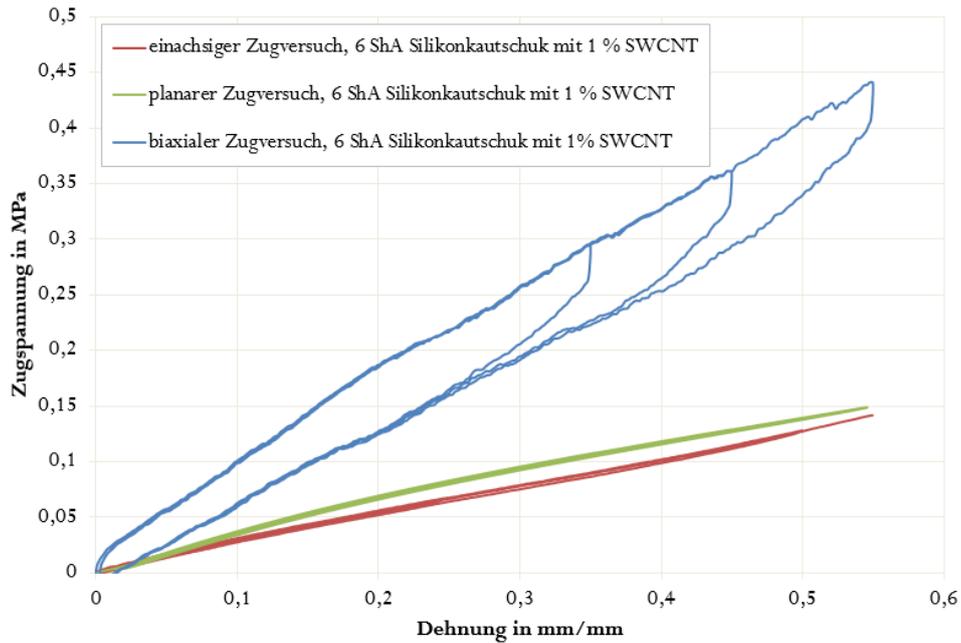
Bis zu einem elektrischen Widerstand des Silikonkautschuks von  $100 \text{ M}\Omega$  kann die elektrostatische Aufladung vermieden werden (DIN 61340-2-3, 2017). Hier wird der Drucktampon N81 mit 1 %

Gewichtanteil an SWCNT ausgewählt und mit dem digitalen Workflow optimiert. Die Härte des Drucktampon N81 mit und ohne SWCNT wurde nach ASTM D2240 (2015) gemessen. Mit SWCNT hat sich die Härte des RTV2-Silikonkautschuks um 2 Shore A erhöht (Die Härte des RTV2-Silikonkautschuks mit 6 Shore A wird 8 Shore A mit 1% SWCNT). Mit der Zugabe von 1% SWCNT konnte die statische Aufladung des Drucktampons verhindert werden.



**Abbildung 6-17:** Ein quadratischer Drucktampon N81 aus 6 Shore RTV2-Silikonkautschuk ohne SWCNT (nicht antistatisch, links) und mit SWCNT (antistatisch, rechts).

Um die mechanischen Eigenschaften dieses neuen Materials zu ermitteln, wurden hier auch planare, einachsige und biaxiale Zugproben aus dem 6 Shore A RTV2-Silikonkautschuk mit 1% SWCNT vorbereitet. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 6-18 dargestellt. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten dieses Materials mit 1% SWCNT ist ähnlich wie beim Silikonkautschuk mit 8 Shore A in Kapitel 4 mit Abweichungen der Spannungswerte um 2,4% bei dem biaxialen Zugversuch. Im biaxialen Zugversuch beträgt der Spannungswert 0,43 MPa bei einer Dehnung von 55% (siehe Abbildung 6-18), dieser Spannungswert liegt bei 0,41 MPa für den 8 Shore Silikonkautschuk ohne SWCNT (siehe Abbildung 4-18), die Abweichung beträgt damit 2,4% und beeinflusst die ermittelten Materialkonstanten nur um 1,8%. Die Materialkonstanten in Tabelle 5-7 können auch für die Simulation des Silikonkautschuks mit 1% SWCNT verwendet werden.



**Abbildung 6-18:** Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus den einachsigen, planaren und biaxialen Zugversuchen für den 6 Shore RTV2-Silikonkautschuk mit SWCNT. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Belastungsstufen getestet.

In Abschnitt 6.2 wurde festgestellt, dass der Hohl-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie eine geringe Verschiebungsamplitude aufweist. Daher wird diese Variante für den antistatischen Drucktampon ausgewählt und im digitalen Workflow optimiert. Hier wurde ein antistatischer Hohl-Drucktampon mit konkaver Innengeometrie mit einem leitfähigen Textilstreifen (zur Vermeidung von elektrostatischen Ladungen) in CAD konstruiert. Hier wurden die Breite des Textilstreifens und seine Entfernung zur Außenwand variiert und in Abaqus simuliert, um den Einfluss des Textilstreifens auf die Verschiebungsamplitude an der Oberfläche des Drucktampons zu untersuchen. Abbildung 6-19 zeigt Konstruktionszeichnungen der antistatischen Hohl-Drucktampons mit 1 % SWCNT. In Abbildung 6-19a ist ein antistatischer Hohl-Drucktampon (a.H.D) mit vier Textilstreifen dargestellt, jeder Textilstreifen hat eine Breite von 10 mm und ist von der Außenwand 4,9 mm entfernt. In Abbildung 6-19b ist derselbe antistatische Hohl-Drucktampon mit breiteren Textilstreifen (20 mm) und mit derselben Entfernung zur Außenwand dargestellt. In Abbildung 6-19c ist derselbe a.H.D. mit Textilstreifen (10 mm Breite und 20 mm Entfernung zur Außenwand) angezeigt. Abbildung 6-19d zeigt einen antistatischen Hohl-Drucktampon ohne Textilstreifen an.

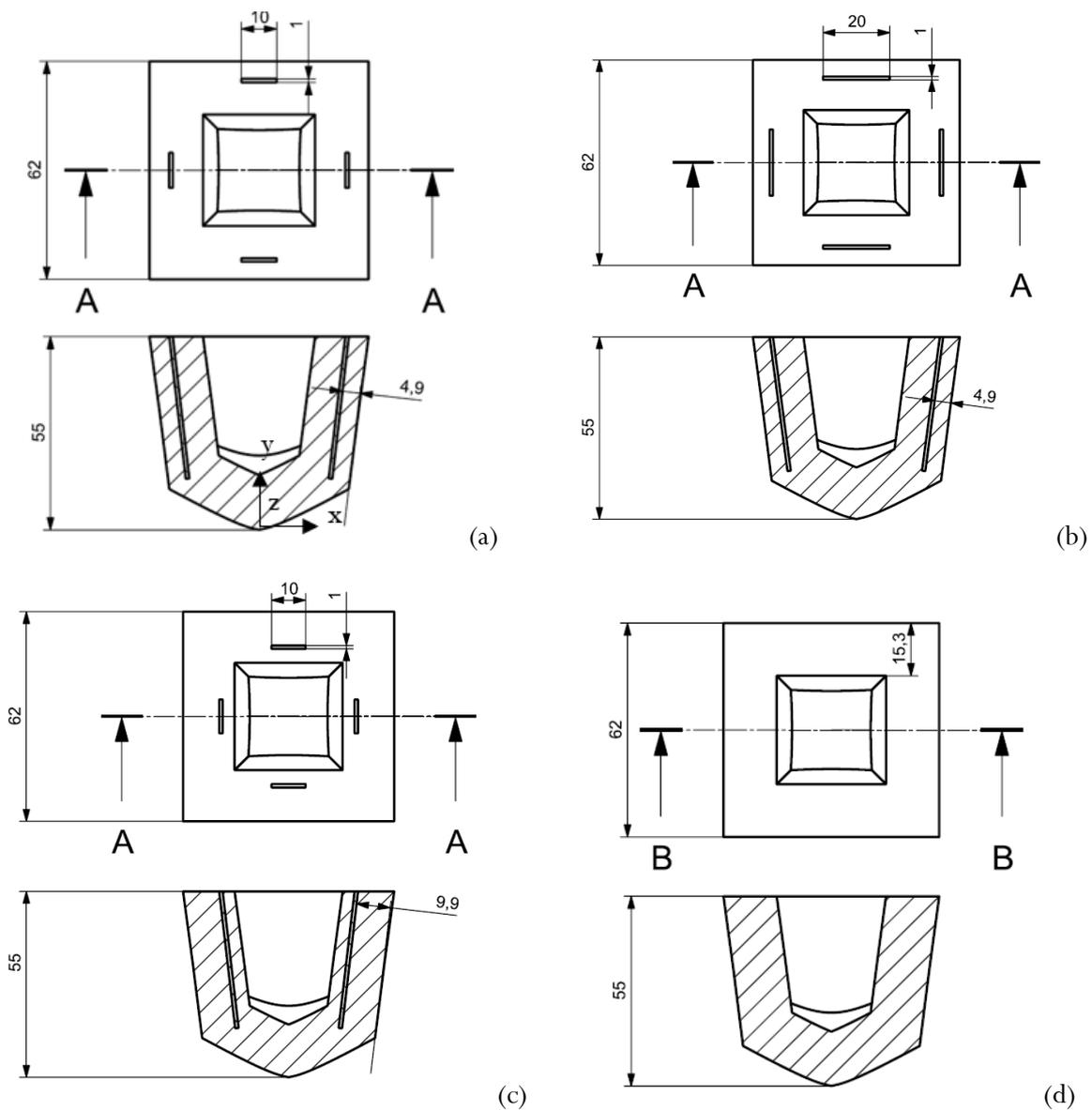
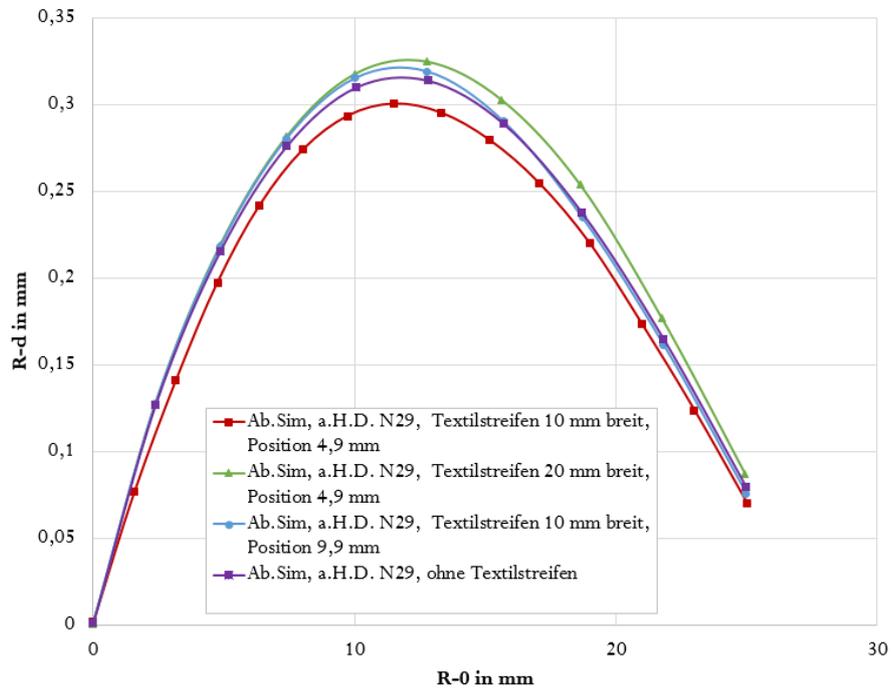


Abbildung 6-19: Konstruktionszeichnungen eines Hohl-Drucktampons mit konkaver Innengeometrie mit und ohne eingebrachtem, elektrisch leitfähigem Textilstreifen. In (a) hat der Textilstreifen eine Breite von 10 mm mit einer Entfernung von 4,9 mm zur Außenwand des Drucktampons, in (b) eine Breite von 20 mm und in (c) eine Breite von 10 mm mit einer Entfernung von 9,9 mm zur Außenwand. In (D) ist ein antistatischer Hohl-Drucktampon ohne Textilstreifen dargestellt. Diese Drucktampons sind spiegelsymmetrisch im Bezug auf die Y-Z und X-Y.

Zunächst werden Simulationen mit den in Abbildung 6-19 gezeigten antistatischen Hohl-Drucktampons beim Drucken auf einem flachen Bedruckstoff durchgeführt. Dabei werden die Verschiebungsamplitude und die Reaktionskräfte mit dem Verformungsweg berechnet und miteinander verglichen. Abbildung 6-20 zeigt Verschiebungsamplitude der Punkte auf einer diagonalen Linie (D-Linie) aus der Oberfläche des

antistatischen Hohl-Drucktampons mit konkaver Innengeometrie. Diese Linie ist in Abbildung 5-9 dargestellt.



**Abbildung 6-20: Abaqus-Simulationsergebnisse für die in Abbildung 6-19 dargestellten antistatischen Hohl-Drucktampons (a.H.D) mit konkaver Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff. Hier sind Verschiebungsamplitude der Punkte auf der D-Linie dargestellt. R-0 ist hier die ursprüngliche Position der Punkte. R-d ist die Verschiebungsamplitude nach der Deformation. Diese Drucktampons sind spiegelsymmetrisch im Bezug auf die Y-Z und X-Y Ebenen und der Nullpunkt ist die Mitte des Drucktampons und befindet sich an seiner Spitze.**

Die Simulationsergebnisse in Abbildung 6-20 zeigen eine kleine Abweichung von 8 % (0,025 mm) zwischen den maximalen berechneten Verschiebungsamplituden. Daher ist der Einfluss des Textilstreifens auf die Verschiebungsamplitude an der Oberfläche des Drucktampons gering. Um den Einfluss des Textilstreifens auf die Reaktionskräfte auf dem flachen Bedruckstoff zu untersuchen, wurden auch die Reaktionskräfte der in Abbildung 6-19 gezeigten antistatischen Hohl-Drucktampons berechnet und in Abbildung 6-21 dargestellt. Bei der Variante mit einem Textilstreifen (Breite 10 mm und 4,9 mm Entfernung zur Außenwand) nimmt die Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff einen Wert von 95,02 N bei einem Deformationsweg von 16 mm und 91,7 N beim antistatischen Hohl-Drucktampon ohne Textilstreifen. Die Abweichung zwischen den Reaktionskräften beträgt nur 5 % der mittleren Reaktionskraft. Daher ist der Einfluss des Textilstreifens auf die Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff sehr gering. Zusammenfassend werden die Textilstreifen die Funktionsfähigkeit (Verschiebung der Drucktamponoberfläche) und die Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff nicht beeinflussen.

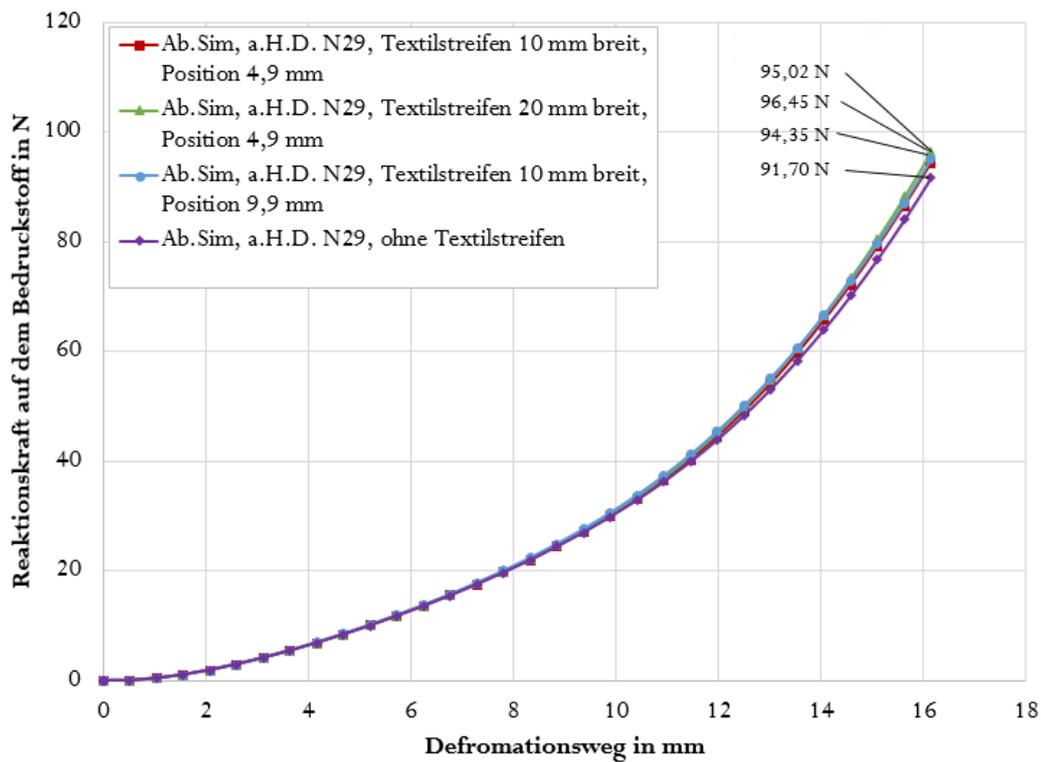


Abbildung 6-22: Abaqus-Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell (Reaktionskräfte mit dem Deformationsweg auf einem flachen Bedruckstoff) für die in Abbildung 6-19 dargestellten antistatischen Hohl-Drucktampons (a.H.D) mit konkaver Innengeometrie auf einem flachen Bedruckstoff. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.

Der antistatische Hohl-Drucktampon mit 0,5 % SWCNT in Abbildung 6-19a wurde bei dem Unternehmen Tampo-Technik hergestellt und unter Druckbelastungen untersucht. Dieser Drucktampon wurde vor der Belastung sowie nach 60.000 Lastzyklen hinsichtlich seines elektrischen Widerstandes untersucht. Vor der Belastung konnten elektrische Widerstände von 97,1 M $\Omega$  seitlich und 126,3 M $\Omega$  auf der Funktionsfläche gemessen werden. Bei der äquivalenten Messung nach 60.000 Hüben ergaben sich elektrische Widerstände von ca. 121,9 M $\Omega$  auf der Seite des Drucktampons und ein elektrischer Widerstand von über 200 M $\Omega$  an unterschiedlichen Stellen der Funktionsfläche. Es wurde sichtbar, dass es zu einer Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit bei zunehmender Zykluszahl kommt. Deshalb wurde der Anteil der SWCNT auf 1% erhöht.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung

Das Hauptziel dieser Dissertation ist die Digitalisierung des Herstellungsprozesses von Drucktampons mit dem Fokus auf die mechanischen Eigenschaften von Silikonkautschuk. Zu diesem Zweck werden in dieser Dissertation vier Punkte behandelt. Diese sind Entwicklung eines Workflows zur Digitalisierung der Drucktamponherstellung, die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials, die Simulation des Druckprozesses und Benutzung dieses digitalen Workflows zur Optimierung und die Entwicklung neuer Drucktampons (Hohl-Drucktampons und Bi-Material-Drucktampons mit oder ohne SWCNT). Im Folgenden wird eine Zusammenfassung dieser Themen dargestellt.

Zuerst wird ein Workflow zur Digitalisierung der Drucktamponherstellung entwickelt. Der Zweck dieses digitalen Workflows ist die Entwicklung, Untersuchung und Auslegung von Silikonkautschuk-Drucktampons, um Kosten zu senken oder technische Verbesserungen einzubringen. Prinzipiell ist es nun möglich, die Geometrie eines Drucktampons mittels FEM-Simulation zu untersuchen und zu optimieren. Zur Konstruktion werden sowohl Siemens NX 12 als auch FreeCAD 0.19 verwendet. Die anschließende FEM-Simulation wird mit Abaqus und Salome-Meca durchgeführt. In dieser Dissertation wurde ein Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen von Abaqus und Salome-Meca durchgeführt. Beide Programme liefern ähnliche Ergebnisse. Daher wurden in dieser Dissertation verschiedene Algorithmen mit passenden Netz-Modellen und Solvern in Salome-Meca verwendet. Damit kann Salome-Meca als Open-Source Software auch für die Entwicklung der Drucktampongeometrien verwendet werden.

Zweitens sind für die Simulation des indirekten Tiefdruckverfahrens das Drucktamponmaterial aus Silikonkautschuk (mit oder ohne SWCNT) und die Geometrie des Drucktampons (Voll oder Hohl-Drucktampon) wichtige Aspekte, die berücksichtigt werden sollten. Das Drucktamponmaterial wurde durch verschiedene mechanische Tests charakterisiert. In dieser Dissertation wurden einfache und komplexe mechanische Materialprüfungen durchgeführt. Alle Materialprüfungen wurden unter Klimabedingungen nach ISO 37 (2017) und ASTM D624 (2012) durchgeführt. Die Messergebnisse der mechanischen Versuche (Spannungs-Dehnungs-Diagramme) werden zur Charakterisierung des Drucktamponmaterials für die FEM-Simulation verwendet.

Es wird eine Methode zur Simulation des Druckprozesses des indirekten Tiefdruckverfahrens in Abaqus und Salome-Meca beschrieben. Außerdem wurden mechanische und optische Methoden zur Validierung

der FEM-Simulation durchgeführt. Anschließend wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss der Simulationsparameter auf die Simulationsergebnisse zu ermitteln.

Anwendungsbeispiele für den digitalen Workflow zur Optimierung und Entwicklung neuer Drucktampons werden beschrieben. Die Form des Drucktampons kann so entwickelt werden, dass eine möglichst geringe Verformung der Drucktamponoberfläche erreicht wird. Es wurde ein antistatischer Hohl-Drucktampon mit 1% SWCNT und einem elektrisch leitfähigen Textilstreifen entwickelt. Anschließend wurde der Einfluss der Zugabe von SWCNT auf die mechanischen Eigenschaften des Drucktampons untersucht.

Anhand der Ergebnisse dieser Dissertation werden die wissenschaftlichen Fragestellungen im Folgenden beantwortet.

Kann die Drucktamponherstellung mit einem Workflow mittels der CAD- und FEM-Programme digitalisiert werden und wie kann der digitale Workflow bei der Gestaltung und Optimierung des Drucktampons helfen? Ja, eine Digitalisierung der Drucktamponherstellung ist mit kommerzieller und Open-Source Programmen möglich. Die ursprüngliche Form eines Drucktampons wird in einem CAD-Programm konstruiert. Diese Geometrie kann dann in einem FEM-Programm simuliert werden, um Verschiebungsamplitude und Reaktionskräfte zu berechnen.

Welche Rolle spielen die komplexen Materialprüfverfahren bei der Charakterisierung des Drucktamponmaterials? Die Charakterisierung des Drucktamponmaterials mit dem biaxialen Zugversuch und dem volumetrischen Druckversuch führte zur Verbesserung der Simulationsergebnisse. Die Simulationsergebnisse sind mit den Experimenten sehr gut vergleichbar.

Kann der digitale Workflow bei der Gestaltung der Innengeometrie des Hohl-Drucktampons helfen? Ja, durch Variation der inneren Geometrieform (konkav, flach und konvex) des Hohl-Drucktampons in dem Simulationsprogramm war es möglich, einen geeigneten Hohl-Drucktampon für das Bedrucken eines konkaven Bedruckstoffs (Flakon) zu erreichen.

Kann der digitale Workflow bei der Gestaltung des Bi-Material-Drucktampons helfen? Ja, durch die Verwendung von CAD und FEM-Programmen wurde ein Bi-Material-Drucktampon digital erstellt und simuliert. Hier wurden die Verschiebungsamplitude und die Reaktionskräfte berechnet und mit den Ergebnissen der realen Druckversuche verglichen.

Führte der durch den digitalen Workflow optimierte Hohl-Drucktampon zu einer Verbesserung der Druckqualität oder Abbildungsgenauigkeit? Ja, es wurden Druckversuche auf einem konkaven Bedruckstoff durchgeführt, um die Druckqualität bei jedem Hohl-Drucktampon zu bewerten. Bei einer konkaven Innengeometrie wies der Hohl-Drucktampon eine gute Abbildungsgenauigkeit auf, Verzerrungen traten hier gleichmäßig und in geringem Maße auf.

Welche Einflüsse hat die Zugabe von SWCNT auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Drucktamponmaterials? Die Zugabe von 1% SWCNT hat die Härte des RTV2-Silikonkautschuks mit 6 Shore A um weitere 2 Shore A erhöht. Das Material bleibt hyperelastisch. Durch die mechanischen Materialprüfungen konnten die Spannungs-Dehnungs-Diagramme dieses Materials ermittelt und in der Simulation des antistatischen Drucktampons verwendet werden.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich kurz wie folgt beschreiben. Die Digitalisierung der Drucktamponherstellung führt zu einer Verbesserung bei der Gestaltung und Entwicklung neuer Drucktampons und damit zu einer Optimierung der Druckqualität des indirekten Tiefdruckverfahrens.

## **Ausblick**

Diese wissenschaftliche Arbeit liefert die Grundlage für die Digitalisierung der Drucktamponherstellung, womit die Abbildungsgenauigkeit beim indirekten Tiefdruckverfahren durch die digitale Gestaltung und Optimierung des Drucktampons verbessert wird. Auf dieser Basis können jetzt weitere Untersuchungen hinsichtlich der Optimierung von Geometrien und Werkstoffen erfolgen.

## 8. Literaturverzeichnis

- (Abràmoff et al., 2004) Abràmoff, M.D., Magalhães, P.J. and Ram, S.J., 2004. Image processing with ImageJ. *Biophotonics international*, 11(7), pp.36-42.
- (Al Aboud et al, 2018) Al Aboud, A., Dörsam, E., Hakimi Tehrani, A. and Spiehl, D., 2018. Using FEM simulation as a tool to develop pad printing. In: P. Gane, ed. *Advances in Printing and Media Technology: Proceedings of the 45th International Research Conference of iarigai*. Warsaw, Poland.
- (Al Aboud et al, 2020) Al Aboud, A., Dörsam, E. and Spiehl, D., 2020. Investigation of printing pad geometry by using FEM simulation. In: *Journal of Print and Media Technology Research*, 9 (2), S. 81-94. Iarigai, ISSN 2223-8905, e-ISSN 2414-6250, DOI: 10.14622/JPMTR-1913
- (Altenbach, 2012) Altenbach, H., 2012. *Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen* 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-24119-2 (eBook).
- (Andar et al, 2010) Andar, M.O., Kuwabara, T., Yonemura, S. and Uenishi, A., 2010. Elastic–plastic and inelastic characteristics of high strength steel sheets under biaxial loading and unloading. *ISIJ international*, 50(4), pp.613-619.
- (Ansys, 2011) Ansys, I., 2011. *ANSYS mechanical APDL element reference*. ANSYS, Inc., USA.
- (Arruda & Boyce, 1993) Arruda, E.M. and Boyce, M.C., 1993. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 41(2), pp.389-412.
- (ASTM D412, 1998) ASTM D412, 1998. *Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic rubbers and thermoplastic Elastomers-Tension*. ASTM International.
- (ASTM D575-91, 2012) ASTM D575-91, 2012. *Standard test methods for rubber properties in compression*. ASTM International.
- (ASTM D624, 2012) ASTM D624, 2012. *Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers*. ASTM International.

- (ASTM D638, 2014) ASTM D638, 2014. Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM international.
- (ASTM D1349, 2014) ASTM D1349, 2014. Standard practice for rubber - standard conditions for testing. ASTM International.
- (ASTM D2240, 2015) ASTM D2240, 2015. Standard test method for rubber property durometer hardness. New York: American National Standards Institute.
- (Aubry, 2013) Aubry, J.P., 2013. Beginning with Code\_Aster. A Practical Introduction to Finite Element Method Using Code\_Aster, Gmsh and Salome Electricité de France Code\_Aster® Analysis of Structures and Thermomechanics for Studies and Research URL: <https://www.code-aster.org>, 2.
- (Backhaus et al, 2015) Backhaus, K., Erichson, B. and Weiber, R., 2015. Fortgeschrittene multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Verlag.
- (Becker & Cross, 2013) Becker, W. and Gross, D., 2013. Mechanik elastischer Körper und Strukturen. Springer-Verlag.
- (Bender & Gerike, 2020) Bender, B. and Gerike, K., 2020. Pahl/Beiz Konstruktionslehre. Springer: Berlin, Germany.
- (Brand, 2013) Brand, M., 2013. FEM-Praxis mit SolidWorks. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- (Brown, 1997) Brown, J., 1997. Characterization of MSC/NASTRAN & MSC/ABAQUS elements for turbine engine blade frequency analysis. Proc. MSC Aerospace Users' Conference.
- (Brown, 2006) Brown, R., 2006. Physical testing of rubber. Springer Science & Business Media.
- (Bortzman & Eichinger, 1982) Brotzman, R. W., Eichinger, B. E., 1982. Volume dependence of the elastic equation of state. 3. Bulk-cured poly (dimethylsiloxane). Macromolecules.
- (Bodenstein et al, 2019) Bodenstein, C., Sauer, H., Fernandes, F., Dörsam, E., 2019. Assessing and improving edge roughness in pad-printing by using outlines in a one-step exposure process for the printing form. In: Journal of Print and Media Technology Research (JPMTR), The

---

International Association of Research Organizations for the Information, Media and Graphic Arts Industries, S. 19-27, 8, (1), ISSN 2414-6250 (Online) 2223-8905 (Print).

- (Bodenstein, 2020)      Bodenstein, C., 2020. Untersuchung des Tampondrucks und dessen Kantengenauigkeit für die Anwendung in der gedruckten Elektronik. Dissertation Technische Universität Darmstadt, Germany. Online verfügbar unter: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/11685/>
- (Boulbes, 2020)      Boulbes, R.J., 2020. Troubleshooting Finite-Element Modeling with Abaqus. Cham, Switzerland: Springer.
- (BSI 903-5, 2004)      BSI 903-5, 2004. Physical testing of rubber Guide to the application finite element analysis. London, United Kingdom.
- (Bühler et al, 2018)      Bühler, P., Schlaich, P. and Sinner, D., 2018. Druck: Druckverfahren – Werkstoffe – Druckverarbeitung, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- (Chevalier and Marco, 2002)      Chevalier, L. and Marco, Y., 2002. Tools for multiaxial validation of behavior laws chosen for modeling hyper-elasticity of rubber-like materials. Polymer Engineering & Science.
- (Day & Miller, 2000)      Day, J. and Miller, K., 2000. Equibiaxial Stretching of Elastomeric Sheets. An Analytical Verification of Experimental Technique, Testing and Analysis, Michigan.
- (Delmas and Aimery, 2011)      Delmas, J. and Assire, A., 2011, May. Salome-Meca: une plate-forme au service de la simulation mécanique. In 10e colloque national en calcul des structures (pp. Clé-USB).
- DIN 35505, 2000)      DIN 35505., 2000. Testing of rubber - Shore A and Shore D hardness test, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- (DIN EN 61340-2-3, 2017)      DIN EN 61340-2-3., 2017. Methods of test for determining the resistance and resistivity of solid materials used to avoid electrostatic charge accumulation, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- (Di Donato & Abita, 2019) Di Donato, D. and Abita, M., 2019. Low-Cost 4d Bim Modelling: a Comparison Between Freecad and Commercial Software. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- (Duhovnik et al, 2014) Duhovnik, J., Demsar, I. and Drešar, P., 2014. Space modeling with solidworks and NX. Springer.
- (Englert-Dudek, 2020) Englert-Dudek, O., 2020. Untersuchung eines LNG-Kompensators im kryogenen Bereich. Technische Universität Hamburg.
- (Fernandes et al, 2017) Fernandes, W.S., Greco, M. and Almeida, V.S., 2017. Application of the smooth evolutionary structural optimization method combined with a multi-criteria decision procedure. Engineering Structures, 143, pp.40-51.
- (Fernández et al., 2018) Fernández, J.R., López-Campos, J.A., Segade, A. and Vilán, J.A., 2018. A genetic algorithm for the characterization of hyperelastic materials. Applied Mathematics and Computation, 329, pp.239-250.
- (Fertig et al., 2017) Fertig, B., Höh-Zaid, D., Müller, M., Silge, S., Weitz, J., Winter, S., 2017. Optimierung einer Zugprüfmaschine mit videobasiertem Extensometer zur Untersuchung von additiven Zugproben. Advanced design project. Technische Universität Darmstadt.
- (Falck et al., 2012) Falck, B., Falck, D. and Collette, B., 2012. Freecad [How-To]. Packt Publishing Ltd.
- (Formlabs, 2020) Formlabs, 2020 Technisches Kunstharz: Tough 2000 Resin für robuste Prototypen (Online). Verfügbar unter: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001340-TDS-DE-0P.pdf>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Gehrmann et al, 2017) Gehrmann, O., Kröger, N.H., Erren, P., Juhre, D., 2017. Estimation of the Compression Modulus of a Technical Rubber via Cyclic Volumetric Compression Tests. Technische Mechanik. vol. 37. no. 1. pp. 28–36.
- (Gross et al., 2009) Gross, D., Hauger, W., Schnell, W., Schröder, J. and Wall, W.A., 2009. Technische Mechanik (Vol. 4). Berlin, Heidelberg: Springer.
- (Hakimi Tehrani et al, 2016) Hakimi Tehrani, A., Dörsam, E., Neumann, J., 2016. Improving Automation and Process Control of an Indirect Gravure (pad) Printing Machine. Acta

- 
- Polytechnica Hungarica, 13 (Online). Verfügbar unter: <https://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/82875/>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Hakimi Tehrani, 2019) Hakimi Tehrani, A., 2018. Automation improvement of indirect gravure printing with a focus on the mechanical characteristics of silicone rubber pads. Dissertation Technische Universität Darmstadt, Germany(Online). Verfügbar unter: [https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8322/1/Thesis\\_Arash\\_Hakimi.pdf](https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/8322/1/Thesis_Arash_Hakimi.pdf), zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Hahne, 2001) Hahne, P., 2001. Innovative Drucktechnologien: Siebdruck - Tampondruck; Photolithographie, InkJet, BubbleJet, Digitaldruck, LFP, Drop-On-Demand, Non-Impact-Verfahren, Dickfilm, Heißprägen, Offsetdruck, Flexodruck, Fodel-Verfahren, Driographie, Verlag der Siebdruck, Lübeck, Deutschland, ISBN: 9783925402944.
- (Hashmi, 2014) Hashmi, S., 2014. Comprehensive materials processing. Newnes. ISBN: 0080965334.
- (Heckel, 1995) Heckel, W., 1995. Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biege winkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).
- (Holzapfel, 2000) Holzapfel, G. A., 2000. Nonlinear Solid Mechanics, A Continuum Approach for Engineering. John Wiley & Sons, Chichester, ISBN: 978-0-471-82319-3.
- (Holzapfel et al, 2000) Holzapfel, G.A., Gasser, T.C. and Ogden, R.W., 2000. A new constitutive framework for arterial wall mechanics and a comparative study of material models. Journal of elasticity and the physical science of solids, 61(1), pp.1-48.
- (Hoss & Marczak, 2010) Hoss, L. and Marczak, R.J., 2010. A new constitutive model for rubber-like materials. Mecánica computacional, 29(28), pp.2759-2773.
- (ISO 16842, 2014) ISO 16842, 2014. Metallic materials - Sheet and strip - Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece. Geneva: International Organization for Standardization.
- (ISO 2781, 2018) ISO 2781, 2018. Rubber, vulcanized or thermoplastic Determination of density. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- (ISO 37, 2017) ISO 37, 2017. Determination of tensile stress-strain properties. International Standards Office, Rubber, vulcanized or thermoplastic. Geneva: International Organization for Standardization.

- (ISO 7619-1, 2010) ISO 7619-1, 2010. Elastomere oder thermoplastische Elastomere – Bestimmung der Eindringhärte, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- (ISO 7743, 2011) ISO 7743, 2011. Determination of Compression Stress-strain Properties, Rubber, vulcanized or thermoplastic. Geneva: International Organization for Standardization.
- (Jerrams & Bowen, 1970) Jerrams, S. J., & Bowen, J., 1970. Modelling the behaviour of rubber-like materials to obtain correlation with rigidity modulus tests. WIT Transactions on Modelling and Simulation.
- (Jungh et al., 2017) Jungh, T. Glasenapp, T., Fraas, M., Schulz, A., Bauer, H., 2017. Durchführung von FEM Simulationen zur Anwendung des Superpositionsprinzips der Filmkühlung. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth.
- (Kaindl, 2015) Kaindl, S., 2015. Simulation der Schwingfestigkeit von Elastomerbauteilen, Dissertation Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, Germany.
- (Kahraman et al, 2010) Kahraman, H., Weinhold, G.W., Haberstroh, E. and Itskov, M., 2010. Anisotroper Mullins-Effekt bei russgefüllten Elastomeren Experimentelle und phänomenologische Beschreibung. KGK. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe.
- (Kipphan, 2001) Kipphan, H., 2001. Handbook of Print Media. Germany: Springer.
- (Klein, 2013) Klein, B., 2013. FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode. Springer-Verlag.
- (Kováčik et al, 2018) Kováčik, J., Marsavina, L. and Linul, E., 2018. Poisson's ratio of closed-cell aluminium foams. Materials, 11(10), p.1904.
- (Kuscharski, 2007) Kuscharski, T., 2007. Tamponauswahl und Druckfarben (Online), PSI online, Nr. 06, S. 70–72. Verfügbar unter: <http://kuscharski.de/media/files/3psi0607070072knowhow..pdf>, zuletzt geprüft am 20.09.2022.
- (Lake, 2016) Lake, M., 2016. Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung: Vorbehandeln, Beschichten, Bedrucken, Funktionalisieren, Prüfen, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

- 
- (Laksari et al, 2012) Laksari, K., Shafieian, M. and Darvish, K., 2012. Constitutive model for brain tissue under finite compression. *Journal of biomechanics*, 45(4), pp.642-646.
- (Logothetis et al., 2018) Logothetis, S., Karachaliou, E., Valari, E. and Stylianidis, E., 2018. Open source cloud-based technologies for BIM. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 42, pp.607-614.
- (Lück, 1999) Lück, J. P., 1999. Drucktampon-Analyse als Entscheidungshilfe für den Anwender, *Technik + Forschung Siebdruck*, Bundesverband Druck E.V., Wiesbaden.
- (Lück, o.D.a) Lück, J. P. (Hg.) (o.D.) Drucktampon-Analyse als Entscheidungshilfe für den Anwender, Kierspe, Deutschland (Online). Verfügbar unter: <http://docplayer.org/52788166-Drucktampon-analyse-als-entscheidungshilfe-fuer-den-anwender-von-jens-peter-lueck-1-einfuehrung.html>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Lück, o.D.b) Lück, J.-P., o.D. Gesamtkatalog der Drucktampons [Online]: [www.tampotechnik.de](http://www.tampotechnik.de).
- (Lück, 2016) Lück, J.-P., 2016. Drucktampons. Open Seminar Innovation Tampondruck, Bietigheim-Bissingen, Deutschland, am 07.11.2016.
- (Magdum et al, 2019) Magdum, Y., Pandey, D., Bankar, A., Harshe, S., Parab, V. and Kadam, M. S., 2019. Process Parameter Optimization for FDM 3D Printer. E-ISSN: 2395-0056. Volume: 06 Issue: 04.
- (Mansouri et al, 2014) Mansouri, M.R. and Darijani, H., 2014. Constitutive modeling of isotropic hyperelastic materials in an exponential framework using a self-contained approach. *International Journal of Solids and Structures*, 51(25-26), pp.4316-4326.
- (Mansouri et al, 2017) Mansouri, M. R., Darijani, H. & Baghani, M., 2017. On the correlation of FEM and experiments for hyperelastic elastomers. *Experimental mechanics*, 57(2), pp. 195-206.
- (McNaught & Wilkinson, 1997) McNaught, A.D. and Wilkinson, A., 1997. Compendium of chemical terminology. IUPAC recommendations.

- (Miehe et al, 2004) Miehe, C., Göktepe, S. and Lulei, F., 2004. A micro-macro approach to rubber-like materials—part I: the non-affine micro-sphere model of rubber elasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52(11), pp.2617-2660.
- (Molls, 2013) Molls, M., 2013. Experimentelle und numerische Untersuchung ein-und mehrachsiger belasteter Elastomerbuchsen unter besonderer Berücksichtigung des Reihenfolgeinflusses (Doctoral dissertation, Duisburg, Essen, 2013).
- (Mooney, 1940) Mooney, M., 1940. A Theory of Large Elastic Deformation. *Journal of Applied Physics* 11(9), 582–592.
- (Moreira & Nunes, 2013) Moreira, D.C. and Nunes, L.C.S., 2013. Comparison of simple and pure shear for an incompressible isotropic hyperelastic material under large deformation. *Polymer Testing*, 32(2), pp.240-248.
- (Morlock, o.D.) Auswahlkriterien des Drucktampons, Deutschland (Online). Verfügbar unter: <https://itwmorlock.com/consumables/drucktampons/?lang=de>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Mott et al, 2008) Mott, P. H., Dorgan, J. R. and Roland, C. M., 2008. The bulk modulus and Poisson's ratio of “incompressible” materials, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 312, 4-5, pp. 572–575.
- (Maurice et al., 2009) Maurice, X., Sandholm, A., Pronost, N., Boulic, R. and Thalmann, D., 2009. A subject-specific software solution for the modeling and the visualization of muscles deformations. *The Visual Computer*, 25(9), pp.835-842.
- (Nasdala & Husni, 2020) Nasdala, L. and Husni, A. H., 2020. Determination of yield surfaces in accordance with ISO 16842 using an optimized cruciform test specimen, *Experimental Mechanics*, vol. 60, pp. 815–832.
- (Ogden, 1972) Ogden, R. W., 1972. Large deformation isotropic elasticity—on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 326(1567), 565-584.
- (Ogden, 1997) Ogden, R. W., 1997. Non-linear elastic deformations. Courier Corporation.

- 
- (Ogden, 2001) Ogden, R.W., 2001. Background on nonlinear elasticity. In Handbook of Materials Behavior Models (pp. 75-83). Academic Press.
- (Palmieri et al, 2009) Palmieri, G., Chiappini, G., Sasso, M. and Papalini, S., 2009, June. Hyperelastic materials characterization by planar tension tests and full-field strain measurement. In Proceedings of the SEM Annual Conference (pp. 1-4). Albuquerque: Society for Experimental Mechanics.
- (Printing-International, o.D.) Printing-International. o.D. Drucktampons (Online). Verfügbar unter: <https://www.printinginternational.de/zubehoer/drucktampons/#brochurepads>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Pietsch, 2001) Pietsch, M., 2001. Entwicklung und Charakterisierung eines Pd-haltigen Sol-Gel-Beschichtungsmaterials mit Eignung zur Strukturierung im Tampondruck sowie zur nachfolgenden stromlosen Kupferabscheidung.
- (Poudel, 2018) Poudel, P., 2018. Entwicklung eines 3D-CAD- und FEM-Software Workflows als Entscheidungshilfe für Tampondruck-Hersteller. Bachelor Thesis. Technische Universität Darmstadt.
- (Pröll, o.D.) (o.D.) Pad Printing - Theory and Practice, Weißenburg in Bayern, Deutschland (Online). Verfügbar unter: <https://www.proell.us/en-us/downloads.html>, zuletzt geprüft am 23.03.2023.
- (Pudas et al., 2004) Pudas, M., Hagberg, J., Leppävuori, S., 2004. Printing parameters and ink components affecting ultra-fine-line gravure-offset printing for electronics applications. Journal of the European ceramic society.
- (Rackl, 2015) Rackl, M., 2015. Curve fitting for Ogden, Yeoh and polynomial models. In ScilabTEC Conference 2015 (Vol. 1, No. 1, pp. 1-11).
- (Ritzi-Industriedrucktechnik, o.D.) Ritzi-Industriedrucktechnik. o.D. Tampondruck für die Industrie (Online). Available at <https://www.ritzi-industriedruck.de/leistungen-ritzi-industriedruck/tampondruck>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

- (Rivlin, 1948a) Rivlin, R. S., 1948a. Large Elastic Deformations of Isotropic Materials. II. Some Uniqueness Theorems for Pure, Homogeneous Deformation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 240(822), 491–508.
- (Rivlin, 1948b) Rivlin, R.S., 1948b. Large elastic deformations of isotropic materials IV. Further developments of the general theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 241(835), pp.379-397.
- (Rivlin, 1949) Rivlin, R.S., 1949. Large elastic deformations of isotropic materials VI. Further results in the theory of torsion, shear and flexure. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 242(845), pp.173-195.
- (Samakosh and Mirzaie, 2019) Samakosh, J.D. and Mirzaie, M., 2019. Flash-over voltage prediction of silicone rubber insulators under longitudinal and fan-shaped non-uniform pollution conditions. *Computers & Electrical Engineering*.
- (Schwenk, 2007) Schwenk, C., 2007. FE-Simulation des Schweißverzugs laserstrahlgeschweißter dünner Bleche Sensitivitätsanalyse durch Variation der Werkstoffkennwerte. Dissertation Technische Universität Berlin, Germany.
- (Seibert et al, 2014) Seibert, H., Scheffer, T., Diebles, S., 2014. Biaxial testing of Elastomers- Experimental setup, measurement and experimental optimisation of specimen's shape. *Technische Mechanik*, 34, 72-89.
- (Shinoda & Bathurst, 2004) Shinoda, M. and Bathurst, R.J., 2004. Strain measurement of geogrids using a video-extensometer technique. *Geotechnical testing journal*, 27(5), pp.456-463.
- (Simulia, 2011) Simulia, D. S., 2011. Abaqus 6.11 theory manual. Providence. RI, USA: DS SIMULIA Corp.
- (Simulia, 2014) Simulia A. V., 2014. Abaqus Documentation. Dassault Systèmes (Online). Verfügbar unter: <https://docs.software.vt.edu/abaqusv2022/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-c-anisohyperelastic.htm>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

- 
- (Steinmann et al, 2012) Steinmann, P., Hossain, M. and Possart, G., 2012. Hyperelastic models for rubber-like materials: consistent tangent operators and suitability for Treloar's data, *Archive of Applied Mechanics*, vol. 82, no. 9, pp. 1183–1217.
- (TampoCanada, 2018) TampoCanada, 2018. Pad printing vs. screen printing- the differences explained. Tampo Canada Inc (Online). Verfügbar unter: <https://www.tampocanada.com/pad-printing-vs-screen-printing>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Tampo-Technik, 2018) Tampo-Technik, 2018. Examples of industrial products printed with pad printing (Online). Verfügbar unter: <https://www.tampotechnik.de/en/home-english/>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Tampo-Technik, 0.D.) Tampo-Technik (o.D.) Introduction pad printing process (Online). Verfügbar unter: <https://www.tampotechnik.de/en/interesting-facts>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Truesdell & Noll, 2004) Truesdell C., Noll W., 2004. The Non-Linear Field Theories of Mechanics. In: Antman S.S. (eds) *The Non-Linear Field Theories of Mechanics*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- (Valizadeh et al, 2021) Valizadeh, I., Al Aboud, A., Dörsam, E. and Weeger, O., 2021. Tailoring of functionally graded hyperelastic materials via grayscale mask stereolithography 3D printing. *Additive Manufacturing*, 47, p.102108 (Online). Verfügbar unter: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/19876/>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.
- (Wada et al, 2018) Wada, S., Zhang, R., Mannava, S.R., Vasudevan, V.K. and Qian, D., 2018. Simulation-based prediction of cyclic failure in rubbery materials using nonlinear space-time finite element method coupled with continuum damage mechanics. *Finite elements in analysis and design*.
- (Wagner, 2017) Wagner, M., 2017. *Lineare und nichtlineare FEM*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- (Wacker Chemie o.D.a) Wacker Chemie. o.D. ELASTOSIL M 4511 Raumtemperaturvernetzender Siliconkautschuk (RTV-2). (Online). Verfügbar unter: <https://www.wacker.com/h/de-de/siliconkautschuk/raumtemperaturvernetzender-siliconkautschuk-rtv-2/elastosil-m-4511/p/000005336>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

(Wacker Chemie o.D.b) Wacker Chemie o.D. Wacker RTV-2 Siliconkautschuk verarbeitung. (Online). Verfügbar unter: [http://www.ezentrumbilder.de/rg/pdf/td\\_de\\_RTV2.pdf](http://www.ezentrumbilder.de/rg/pdf/td_de_RTV2.pdf), zuletzt geprüft am 22.03.2023.

(Wünsch and Pilz, 2019) Wünsch, A. and Pilz, F., 2019. NX 12 für Fortgeschrittene—kurz und bündig. Springer-Verlag.

(Zhang and Katsube, 1995) Zhang, J., Katsube, N., 1995. A hybrid finite element method for heterogeneous materials with randomly dispersed rigid inclusions. International journal for numerical methods in engineering.

(Zwick, o.D.) Zwick, o.D. Z050 AllroundLine gebraucht 50 kN (Online). Verfügbar unter: <https://www.zwickroell.com/de/produkte/gebrauchtmarkt/z050-allroundline-gebraucht-50-kn/#c6069>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

(Zwick, 2020) Zwick, 2020. Xforce Load Cells: Product Information (Online). Verfügbar unter: <https://www.zwickroell.com/accessories/xforce-load-cells/>, zuletzt geprüft am 22.03.2023.

***Betreute Arbeiten***

Pietro-Christian Sposato: CFD Simulation der Druck Volumenstrom Kennlinien von Lochblechen in Saugluftanwendungen, Bachelor Thesis, 2021. Technische Universität Darmstadt.

Berkay, Arslan: FEM Simulation of Printing pads, Internship report, 2019. Technische Universität Darmstadt.

Pramod Poudel: Entwicklung eines 3D-CAD- und FEM-Software Workflows als Entscheidungshilfe für Tampondruck-Hersteller, Bachelor Thesis, 2018. Technische Universität Darmstadt.

### *Eigene Veröffentlichungen*

Valizadeh, Iman; Aboud, Ahmad Al; Dörsam, Edgar; Weeger, Oliver (2021): Tailoring of functionally graded hyperelastic materials via grayscale mask stereolithography 3D printing. In: Additive Manufacturing, 47, S. 102108. Elsevier, ISSN 2214-8604, [Artikel].

Aboud, Ahmad Al; Dörsam, Edgar; Spihl, Dieter (2020): Investigation of printing pad geometry by using FEM simulation. In: Journal of Print and Media Technology Research, 9 (2), S. 81-94. Iarigai, ISSN 2223-8905, e-ISSN 2414-6250, [Artikel].

Aboud, Ahmad Al; Dörsam, Edgar (2019): Simulation des Drucktampons - Wie kann eine FEM-Simulation die Auslegung von Drucktampons unterstützen? Darmstadt, Arbeitskreistreffen Innovation Tampondruck, Technische Universität Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, 5.-6. Nov. 2019, [Konferenzveröffentlichung].

Aboud, Ahmad Al; Dörsam, Edgar; Hakimi Tehrani, Arash; Spihl, Dieter (2018): Using FEM Simulation as a Tool to develop Pad Printing. In: Proceedings of the 45th International Research Conference of Iarigai, Warsaw, Poland, 45th International Research Conference of IARIGAI, Warsaw, Poland, October 03-07, 2018, [Konferenzveröffentlichung].

Masajew, Jan; Gute, Heike; Aboud, Ahmad Al; Dörsam, Edgar (2017): Grenzen der Überdruckbarkeit. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, [Report].

## A. Anhang

### A.1. Salome-Meca-Skript zur Simulation der Voll- und Hohl-Drucktampons

Skript zur Simulation der Voll- und Hohl-Drucktampons

```

DEBUT (LANG='EN')
c01 = -4.760011731e3
c02 = 0
c20 = 0
nu = 0.499
c10 = 5.462160065e4
K = 2 / (7.4470834e-6)
meshM = LIRE_MAILLAGE (UNITE=2)
meshS = LIRE_MAILLAGE (UNITE=3)
mesh1 = ASSE_MAILLAGE (MAILLAGE_1=meshM,
                      MAILLAGE_2=meshS,
                      OPERATION='SUPERPOSE')
mesh1 = MODI_MAILLAGE (reuse=mesh1,
                      MAILLAGE=mesh1,
                      ORIE_PEAU_3D=_F(GROUP_MA=('master_contact',
'slave_contact'))))
model = AFFE_MODELE (AFFE=( _F (MODELISATION=('3D', ),
                              PHENOMENE='MECANIQUE',
                              TOUT='OUI'),
                      _F (GROUP_MA=('czero', ),
                          MODELISATION=('DIS_T', ),
                          PHENOMENE='MECANIQUE')),
                    MAILLAGE=mesh1)
elemprop = AFFE_CARA_ELEM (DISCRET=_F (CARA='K_T_D_N',
                                       GROUP_MA=('czero', ),
                                       REPERE='GLOBAL',
                                       VALE=(10.0, 10.0, 10.0)),
                          MODELE=model)
Steel = DEFI_MATERIAU (ELAS=_F (E=210000000000.0,
                               NU=0.3,
                               RHO=7800.0))
rubber = DEFI_MATERIAU (ELAS_HYPER=_F (C01=c01,
                                       C10=c10,
                                       K=K,
                                       RHO=1000.0))
fieldmat = AFFE_MATERIAU (AFFE=( _F (GROUP_MA=('master', ),
                                       MATER=(Steel, )),
                              _F (GROUP_MA=('slave', ),
                                       MATER=(rubber, )),
                              _F (GROUP_MA=('czero', ),
                                       MATER=(Steel, ))),
                          MAILLAGE=mesh1,
                          MODELE=model)
listr = DEFI_LIST_REEL (DEBUT=0.0,
                       INTERVALLE=_F (JUSQU_A=1.0,
                                       NOMBRE=50))

```



---

```
                                RESULTAT=resnonl))
tableDY = POST_RELEVE_T(ACTION=_F(FORMAT_C='MODULE',
                                GROUP_NO=('cnode', ),
                                INTITULE='DY Displacement',
                                NOM_CHAM='DEPL',
                                NOM_CMP=('DY', ),
                                OPERATION=('EXTRACTION', ),
                                RESULTAT=resnonl))

IMPR_RESU(FORMAT='MED',
          RESU=_F(RESULTAT=resnonl),
          UNITE=4)
IMPR_TABLE(TABLE=reac_mas,
           UNITE=5)
IMPR_TABLE(TABLE=tableDY,
           UNITE=8)
FIN()
```

## A.2. Salome-Meca-Skript zur Simulation der Bi-Material-Drucktampons

Skript zur Simulation der Bi-Material-Drucktampons

```

DEBUT (LANG='EN')
c01a = -2653
nu = 0.499
c10a = 33518
Ka = 2 / 3e-06
c01p = 3053
c10p = 30272
Kp = 2 / 5.30108217e-6
meshM = LIRE_MAILLAGE(identifrier='11:1',
                      UNITE=4)
meshS = LIRE_MAILLAGE(identifrier='12:1',
                      UNITE=2)
mesh1 = ASSE_MAILLAGE(identifrier='13:1',
                      MAILLAGE_1=meshM,
                      MAILLAGE_2=meshS,
                      OPERATION='SUPERPOSE')
mesh1 = MODI_MAILLAGE(identifrier='14:1',
                      reuse=mesh1,
                      MAILLAGE=mesh1,
                      ORIE_PEAU_3D=_F(GROUP_MA=('master_contact',
'slave_contact'))))
model = AFFE_MODELE(identifrier='15:1',
                    AFFE=( _F(MODELISATION=('3D', ),
                              PHENOMENE='MECANIQUE',
                              TOUT='OUI'),
                          _F(GROUP_MA=('czero', ),
                              MODELISATION=('DIS_T', ),
                              PHENOMENE='MECANIQUE')),
                    MAILLAGE=mesh1)
elemprop = AFFE_CARA_ELEM(identifrier='16:1',
                          DISCRET=_F(CARA='K_T_D_N',
                                      GROUP_MA=('czero', ),
                                      REPERE='GLOBAL',
                                      VALE=(10.0, 10.0, 10.0)),
                          MODELE=model)
Steel = DEFI_MATERIAU(identifrier='17:1',
                      ELAS=_F(E=210000000000.0,
                              NU=0.3,
                              RHO=7800.0))
rubberp = DEFI_MATERIAU(identifrier='18:1',
                        ELAS_HYPER=_F(C01=c01p,
                                      C10=c10p,
                                      K=Kp,
                                      RHO=1000.0))
rubbera = DEFI_MATERIAU(identifrier='19:1',
                        ELAS_HYPER=_F(C01=c01a,
                                      C10=c10a,
                                      K=Ka,
                                      RHO=1000.0))
fieldmat = AFFE_MATERIAU(identifrier='20:1',
                          AFFE=( _F(GROUP_MA=('master', ),
                                      MATER=(Steel, )),
                              _F(GROUP_MA=('Solid_1', ),
                                      MATER=(rubbera, )),
                          ))

```

```

        _F(GROUP_MA=('Solid_2', ),
          MATER=(rubberp, )),
        _F(GROUP_MA=('czero', ),
          MATER=(Steel, )),
        MAILLAGE=mesh1,
        MODELE=model)
listr = DEFI_LIST_REEL(identiflier='21:1',
                      DEBUT=0.0,
                      INTERVALLE=_F(JUSQU_A=1.0,
                                    NOMBRE=50))
ramp = DEFI_FONCTION(identiflier='22:1',
                     NOM_PARA='INST',
                     VALE=(0.0, 0.0, 1.0, 1.0))
times = DEFI_LIST_INST(identiflier='23:1',
                       DEFI_LIST=_F(LIST_INST=listr),
                       METHODE='AUTO')
BC = AFFE_CHAR_MECA(identiflier='24:1',
                    DDL_IMPO=_F(DX=0.0,
                                DY=0.0,
                                DZ=0.0,
                                GROUP_MA=('fix', )),
                    MODELE=model)
disp = AFFE_CHAR_MECA(identiflier='25:1',
                      DDL_IMPO=_F(DX=0.0,
                                  DY=0.0135,
                                  DZ=0.0,
                                  GROUP_MA=('czero', )),
                      MODELE=model)
contact1 = AFFE_CHAR_MECA(identiflier='26:1',
                          LIAISON_MAIL=_F(GROUP_MA_MAIT=('Solid_1', ),
                                           GROUP_NO_ESCL=('s_s_cont', ),
                                           TYPE_RACCORD='MASSIF'),
                          MODELE=model)
contact = DEFI_CONTACT(identiflier='27:1',
                       ALGO_RESO_GEOM='POINT_FIXE',
                       FORMULATION='CONTINUE',
                       FROTTEMENT='COULOMB',
                       INFO=2,
                       ITER_GEOM_MAXI=50,
                       MODELE=model,
                       ZONE=_F(COEF_CONT=100.0,
                               COULOMB=0.2,
                               GROUP_MA_ESCL=('slave_contact', ),
                               GROUP_MA_MAIT=('master_contact', )))
resnonl = STAT_NON_LINE(identiflier='28:1',
                        CARA_ELEM=elemprop,
                        CHAM_MATER=fieldmat,
                        COMPORTEMENT=( _F(DEFORMATION='GROT_GDEP',
                                           GROUP_MA=('Solid_1', ),
                                           RELATION='ELAS_HYPER'),
                                       _F(DEFORMATION='GROT_GDEP',
                                           GROUP_MA=('Solid_2', ),
                                           RELATION='ELAS_HYPER'),
                                       _F(DEFORMATION='PETIT',
                                           GROUP_MA=('master', ),
                                           RELATION='ELAS')),
                        CONTACT=contact,
                        CONVERGENCE=_F(ITER_GLOB_MAXI=50,
                                         RESI_GLOB_RELA=0.01),
                        EXCIT=( _F(CHARGE=BC,

```

```
        TYPE_CHARGE='FIXE_CSTE'),
    _F(CHARGE=disp,
        FONC_MULT=ramp),
    _F(CHARGE=contact1,
        TYPE_CHARGE='FIXE_CSTE')),
INCREMENT=_F(INST_FIN=1.0,
              LIST_INST=times),
METHODE='NEWTON',
MODELE=model,
NEWTON=_F(MATRICE='TANGENTE',
           PREDICTION='ELASTIQUE',
           REAC_INCR=1,
           REAC_ITER=1),
SOLVEUR=_F(METHODE='MUMPS',
            NPREC=8,
            RENUM='METIS',
            STOP_SINGULIER='OUI'))
resnonl = CALC_CHAMP(identifieur='29:1',
                    reuse=resnonl,
                    CONTRAINTE=('SIGM_ELNO', 'SIEF_ELNO', 'SIGM_ELGA'),
                    CRITERES=('SIEQ_ELGA', 'SIEQ_ELNO', 'SIEQ_NOEU'),
                    FORCE=('FORC_NODA', 'REAC_NODA'),
                    RESULTAT=resnonl)
reac_sub = POST_RELEVE_T(identifieur='30:1',
                        ACTION=_F(GROUP_NO=('master_contact', ),
                                INTITULE='RESULTANTE',
                                NOM_CHAM='REAC_NODA',
                                OPERATION=('EXTRACTION', ),
                                RESULTANTE=('DX', 'DY', 'DZ'),
                                RESULTAT=resnonl))
tableDY = POST_RELEVE_T(identifieur='31:1',
                        ACTION=_F(FORMAT_C='MODULE',
                                GROUP_NO=('cnode', ),
                                INTITULE='Dispalcement',
                                NOM_CHAM='DEPL',
                                NOM_CMP=('DY', ),
                                OPERATION=('EXTRACTION', ),
                                RESULTAT=resnonl))
IMPR_RESU(identifieur='32:1',
           FORMAT='MED',
           RESU=_F(RESULTAT=resnonl),
           UNITE=7)
IMPR_TABLE(identifieur='33:1',
           TABLE=reac_sub,
           UNITE=8)
IMPR_TABLE(identifieur='34:1',
           TABLE=tableDY,
           UNITE=3)
FIN()
```

### A.3. Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem einachsigen Zugversuch

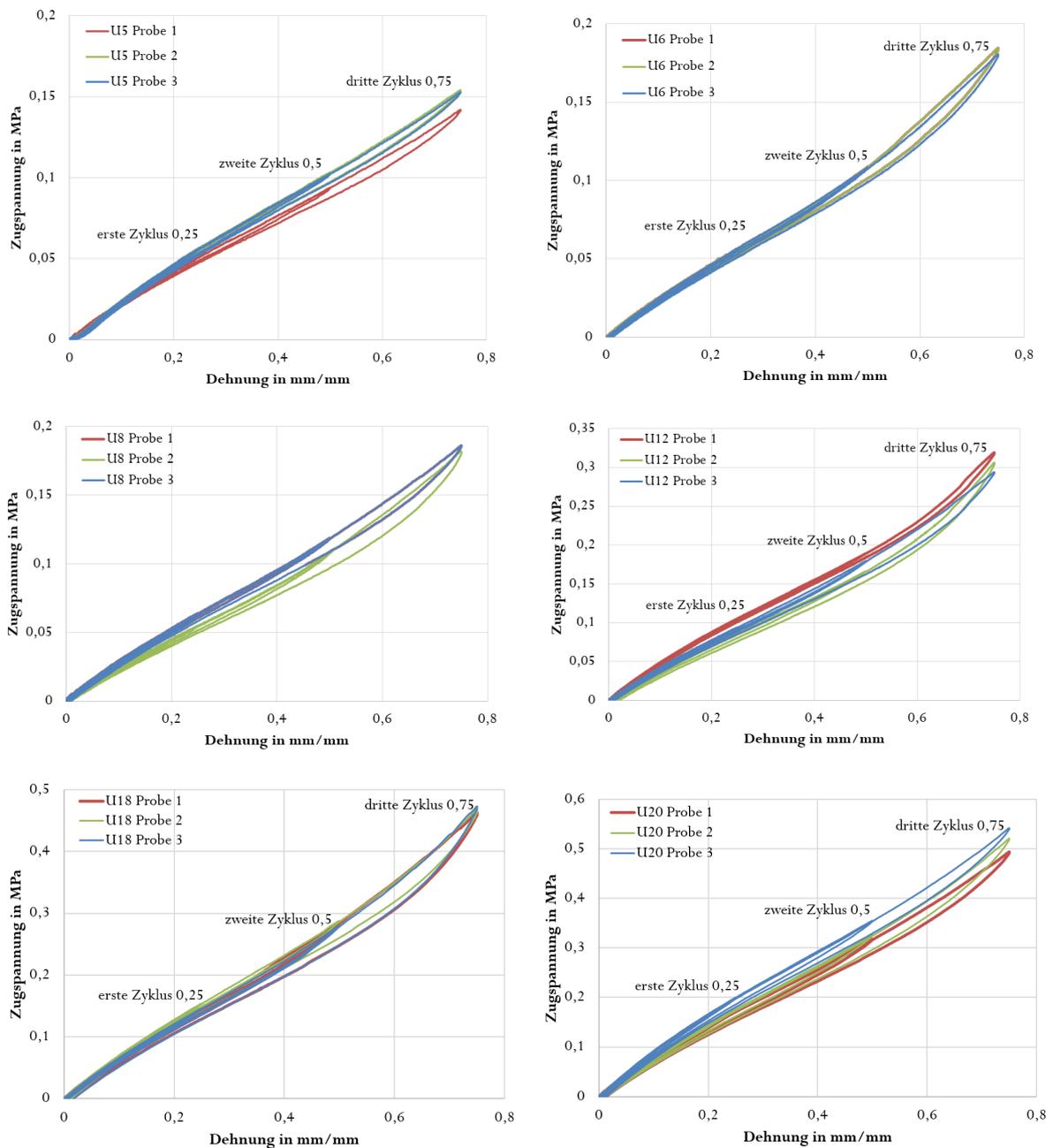


Abbildung A-3: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 5 bis 20 aus Tabelle 4-2 für den einachsigen Zugversuch. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Dehnungsstufen (25, 50 und 75%) getestet (die Messergebnisse der geringeren Dehnungen decken sich mit denen der 75% Dehnung und sind daher meist nicht zu erkennen).

## A.4. Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem planaren Zugversuch

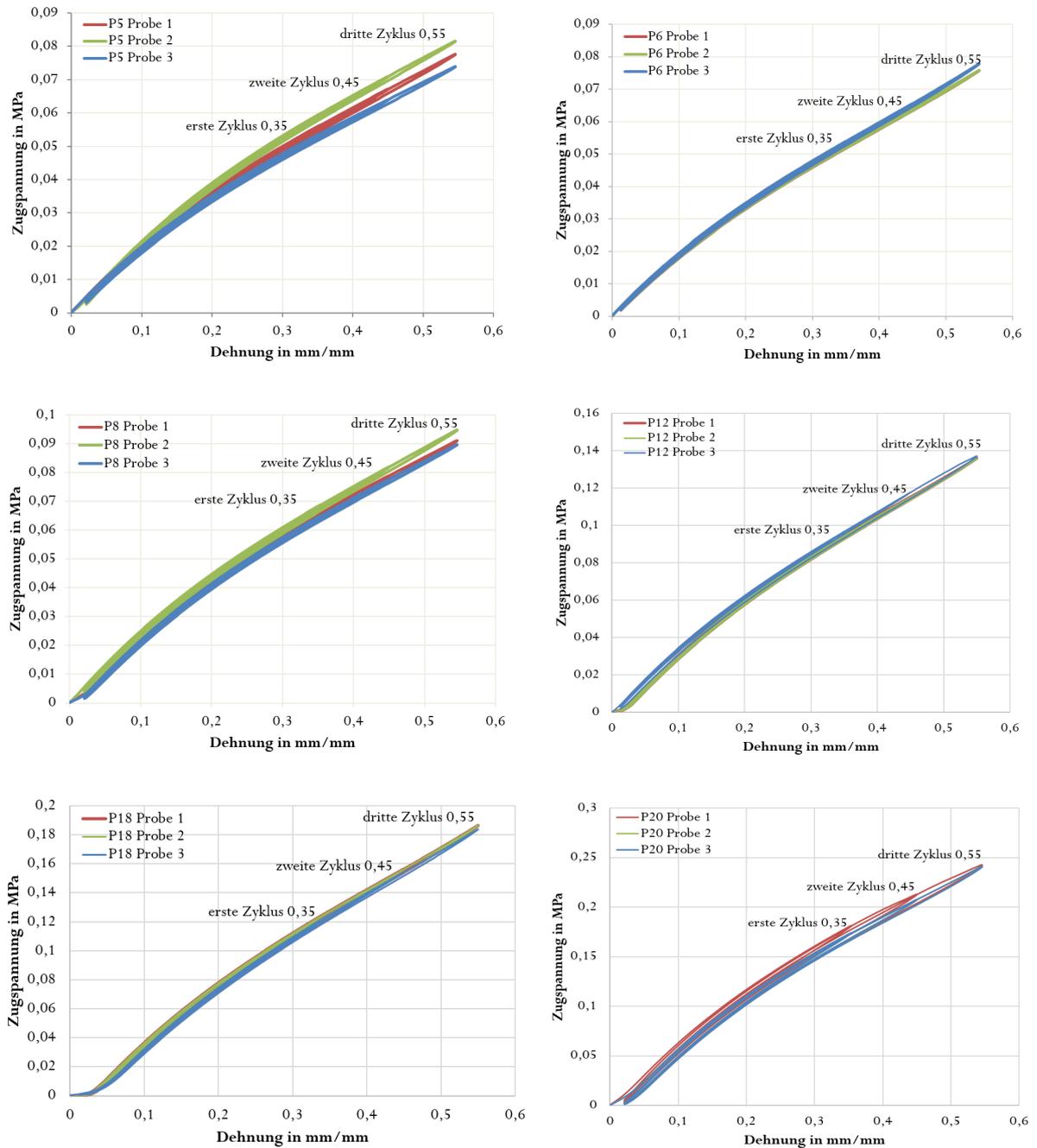


Abbildung A-4: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 5 bis 20 aus Tabelle 4-2 für den planaren Zugversuch. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Dehnungsstufen (35, 45 und 55%) getestet (die Messergebnisse der geringeren Dehnungen decken sich mit denen der 55% Dehnung und sind daher meist nicht zu erkennen).

## A.5. Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem biaxialen Zugversuch

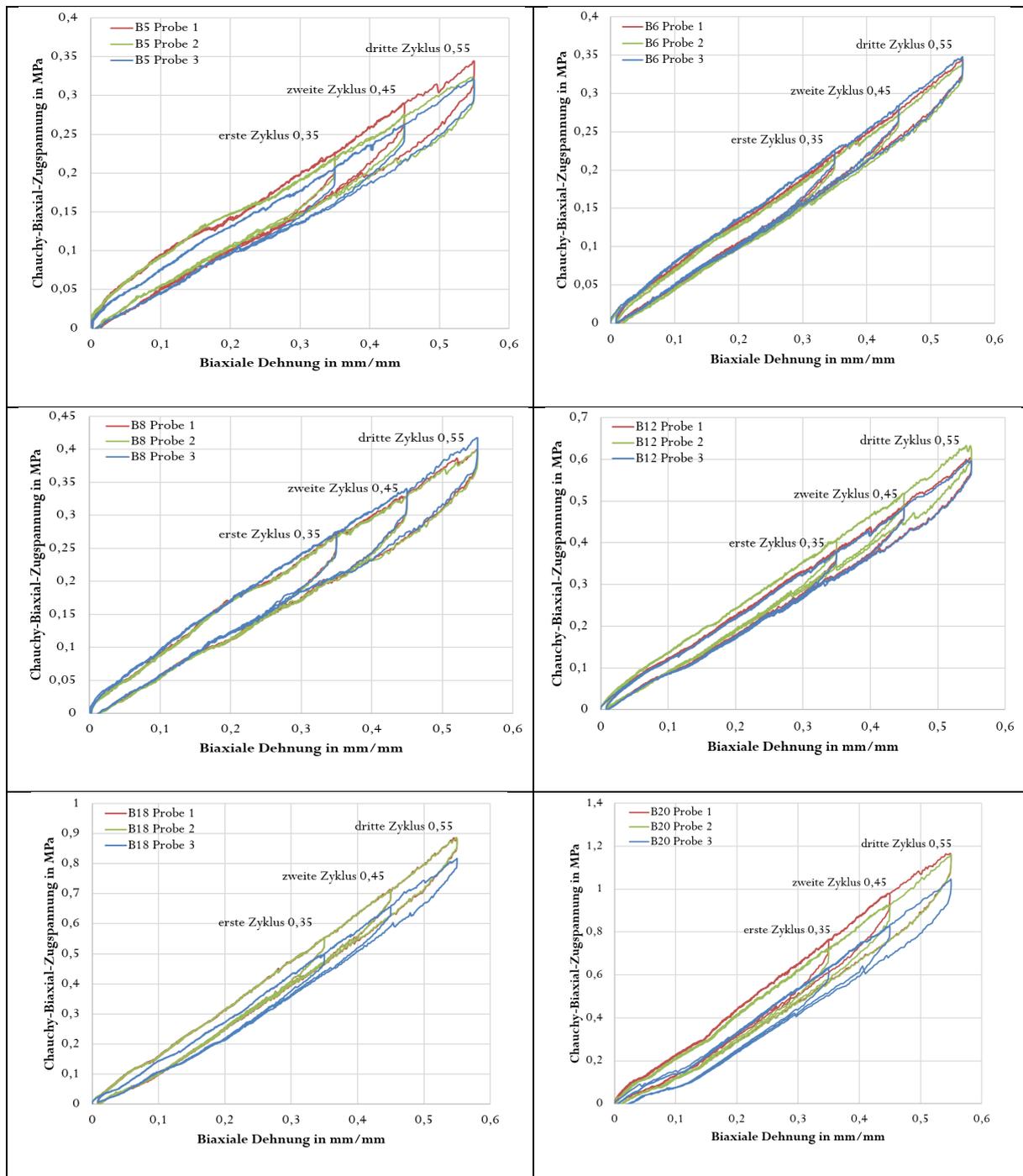


Abbildung A-5: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 5 bis 20 aus Tabelle 4-2 für den biaxialen Zugversuch. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Dehnungsstufen (35, 45 und 55%) getestet.

## A.6. Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem einachsigen Druckversuch

### Druckversuch

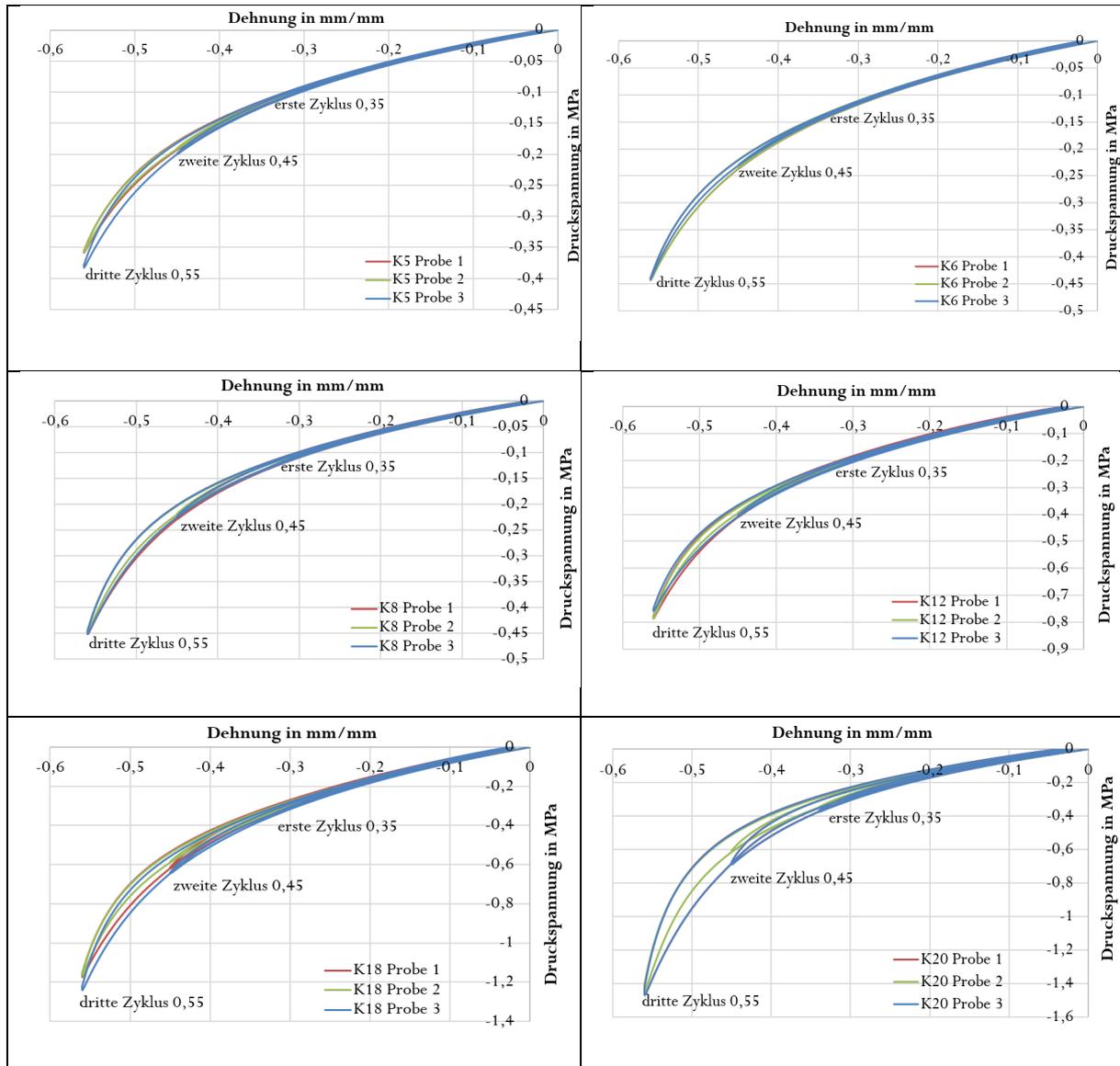


Abbildung A-6: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 5 bis 20 aus Tabelle 4-2 für den einachsigen Druckversuch. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Dehnungsstufen (35, 45 und 55%) getestet.

## A.7. Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem volumetrischen Druckversuch

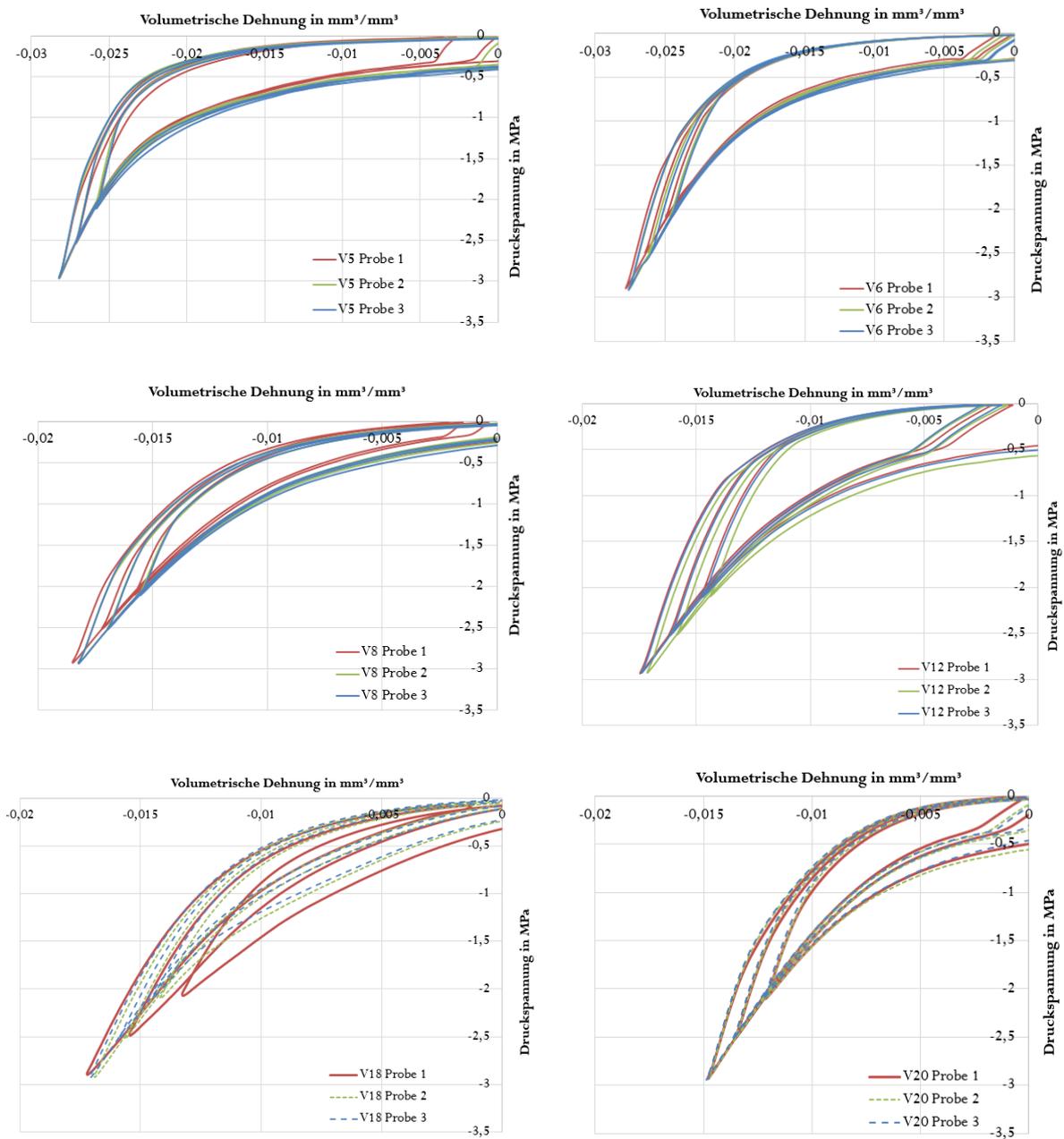


Abbildung A-7: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Proben mit den Shore A Härten 5 bis 20 aus Tabelle 4-2 für den volumetrischen Druckversuch. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an. Jede Probe wird mit drei Zyklen auf drei Dehnungsstufen (35, 45 und 55%) getestet.

## A.8. Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus dem Zugversuch zur Bestimmung der Querkontraktionszahl

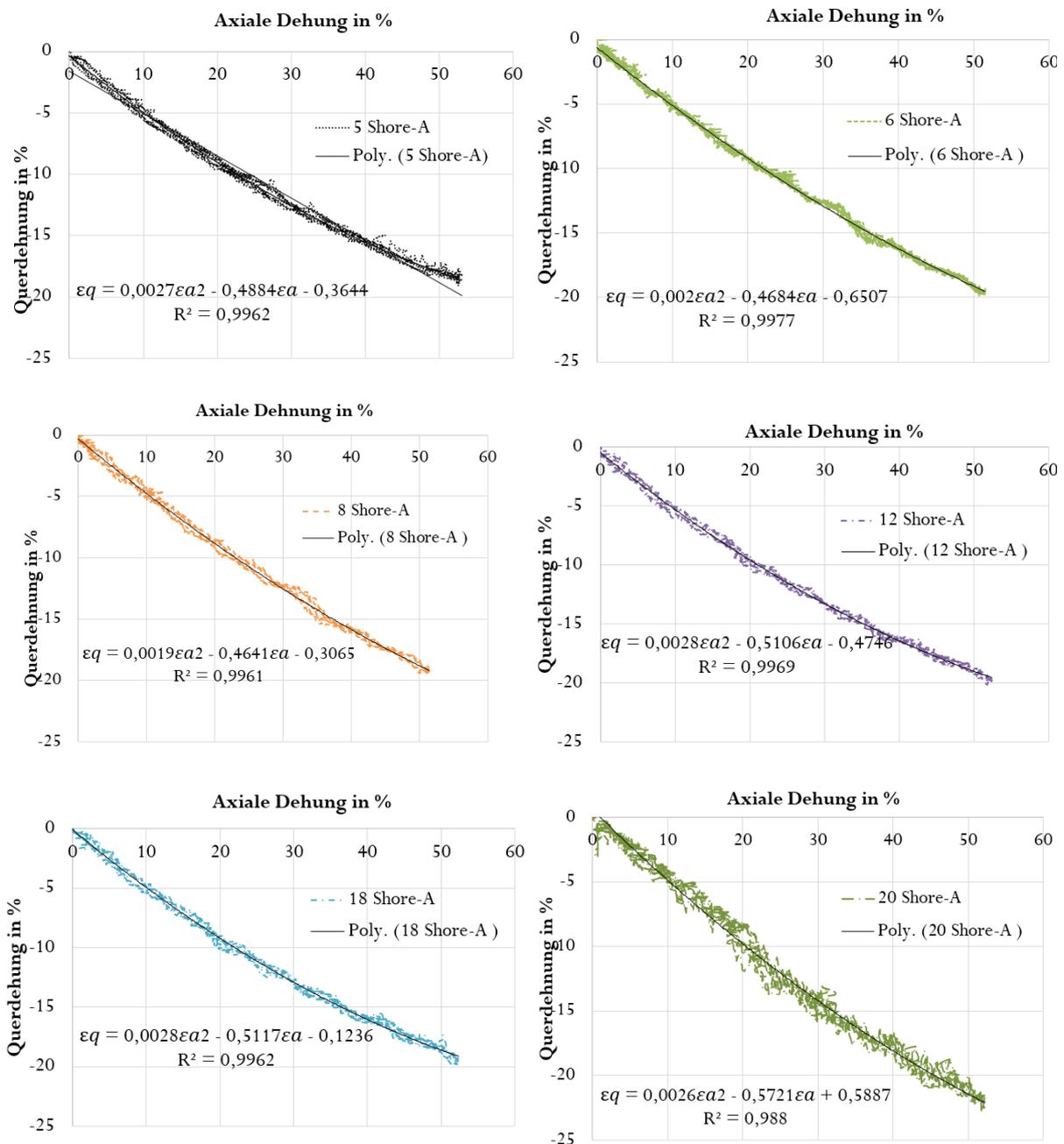


Abbildung A-8: Die Querdehnung gegenüber der axialen Dehnung für die Proben mit 5, 6, 8, 12, 18 und 20 Shore A Härte. Eine Polynom-Anpassungsfunktion für jeden Härtegrad und ihr Bestimmtheitsmaß ist unter der Kurve dargestellt.

### A.9. Kurvenanpassungen für Materialien mit Shore A Härten 5 bis 20

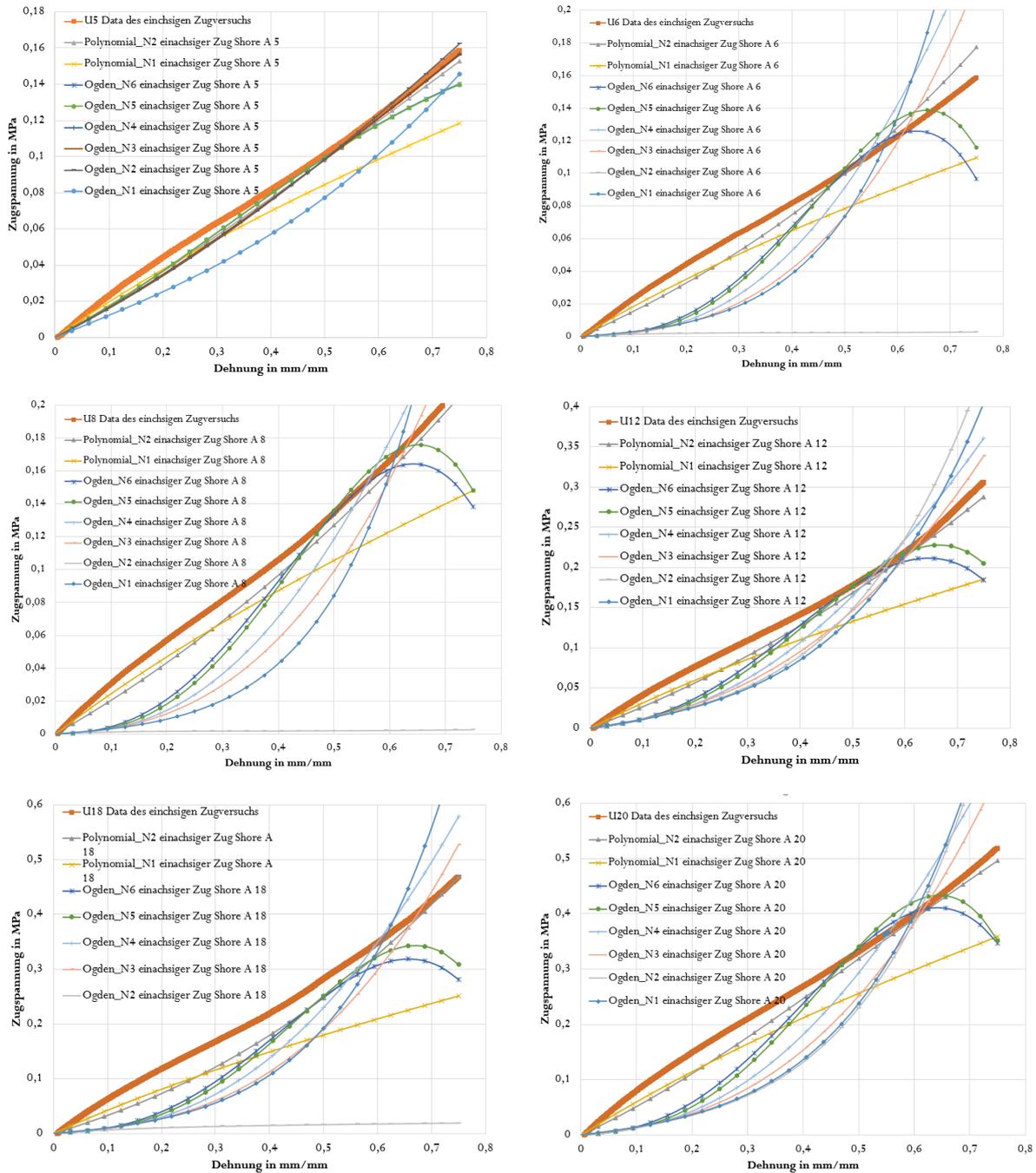


Abbildung A-9-1: Kurvenanpassung zwischen den in Abaqus vorhandenen Polynomial, Ogden Materialmodellen und den Ergebnissen des einachsigen Zugversuchs in Abschnitt 4.4.2 für die Proben mit 5, 6, 8, 12 und 20 Shore A Härte. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an.

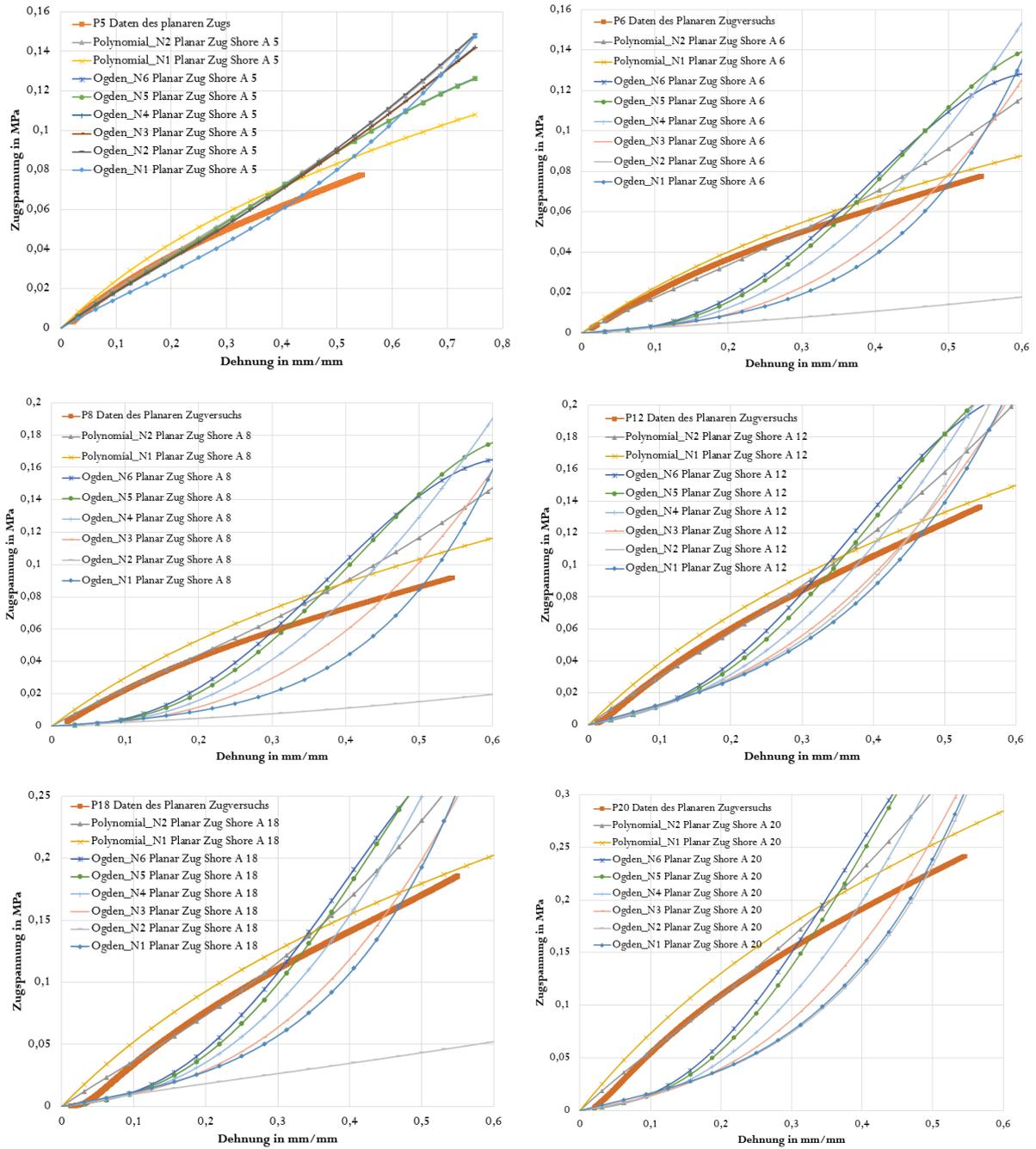


Abbildung A-9-2: Kurvenanpassung zwischen den in Abaqus vorhandenen Polynomial, Ogden Materialmodellen und den Ergebnissen des planaren Zugversuchs in Abschnitt 4.4.3 für die Proben mit 5, 6, 8, 12 und 20 Shore A Härte. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an.

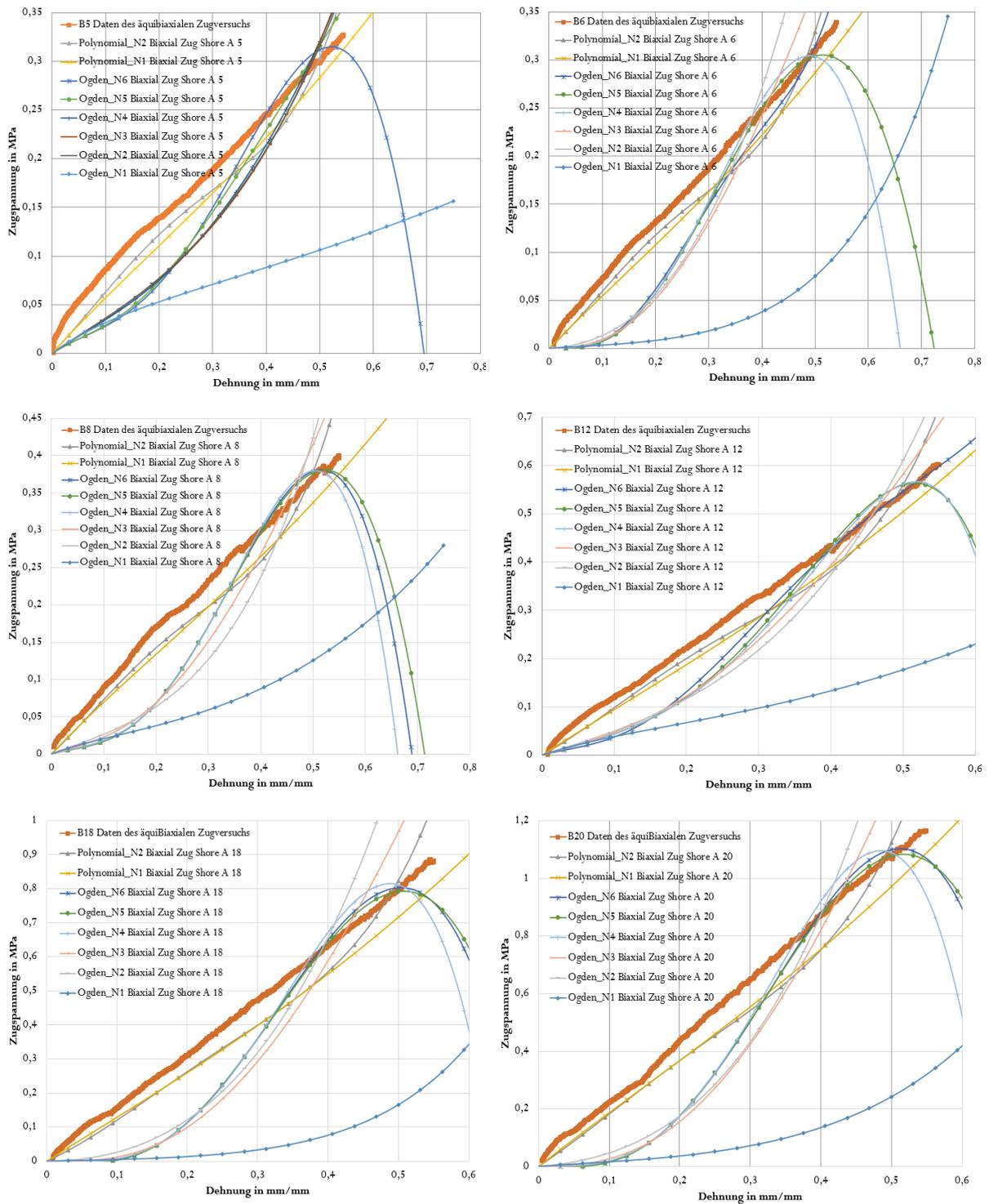


Abbildung A-9-3: Kurvenanpassung zwischen den in Abaqus vorhandenen Polynomial, Ogden Materialmodellen und den Ergebnissen des biaxialen Zugversuchs in Abschnitt 4.4.4 für die Proben mit 5, 6, 8, 12 und 20 Shore A Härte. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an.

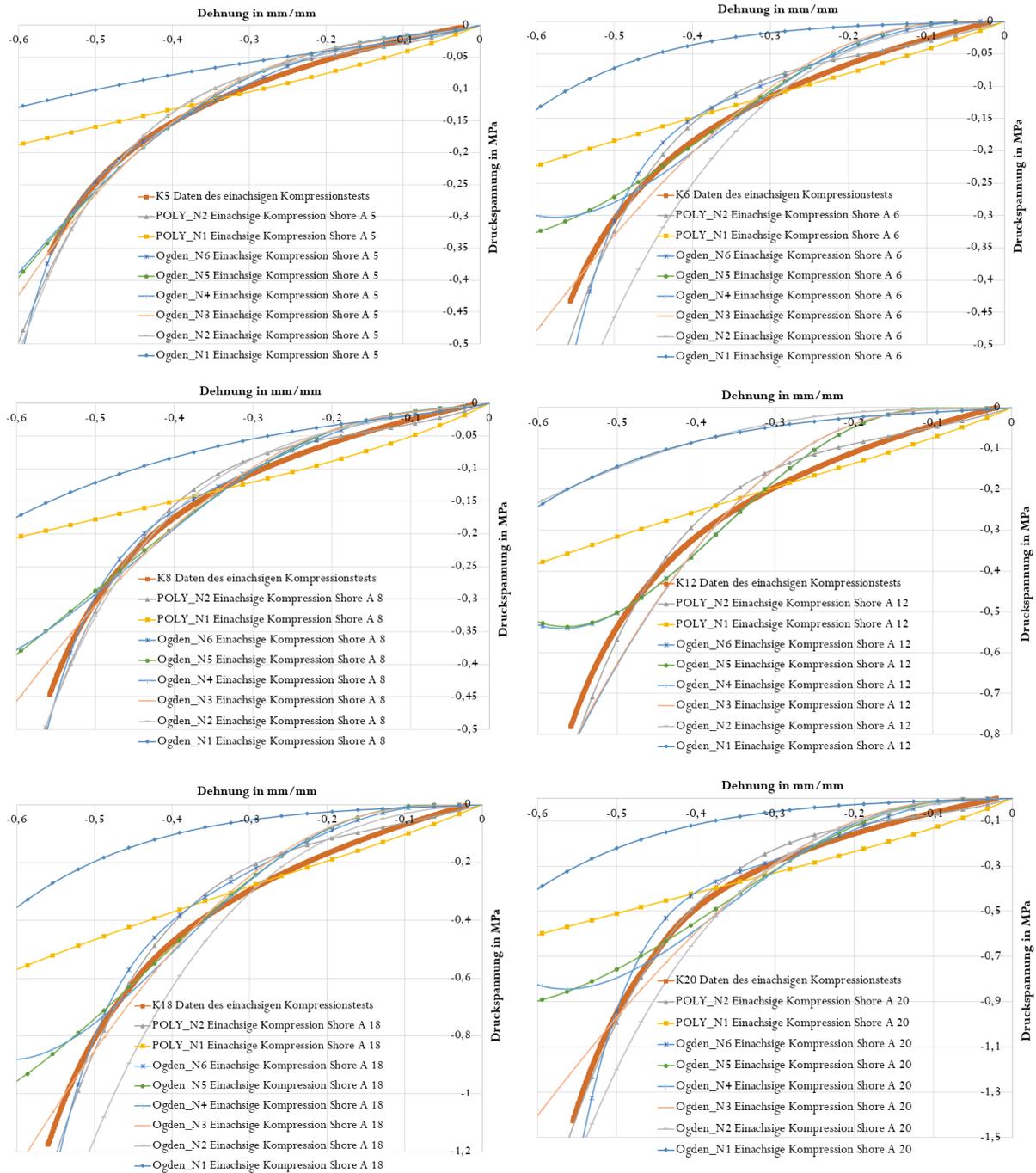


Abbildung A-9-4: Kurvenanpassung zwischen den in Abaqus vorhandenen Polynomial, Ogden Materialmodellen und den Ergebnissen des einachsigen Kompressionstests in Abschnitt 4.4.5 für die Proben mit 5, 6, 8, 12, 18 und 20 Shore A Härte. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an.

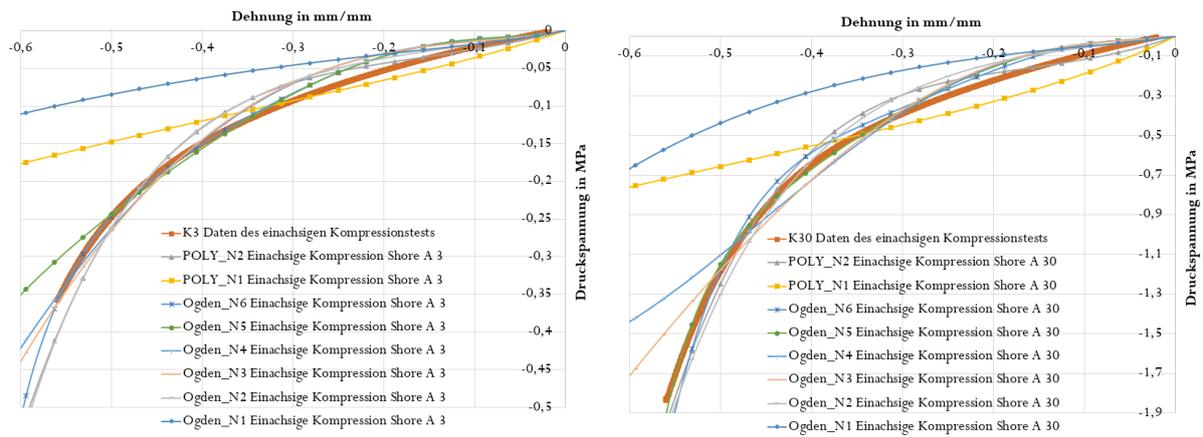
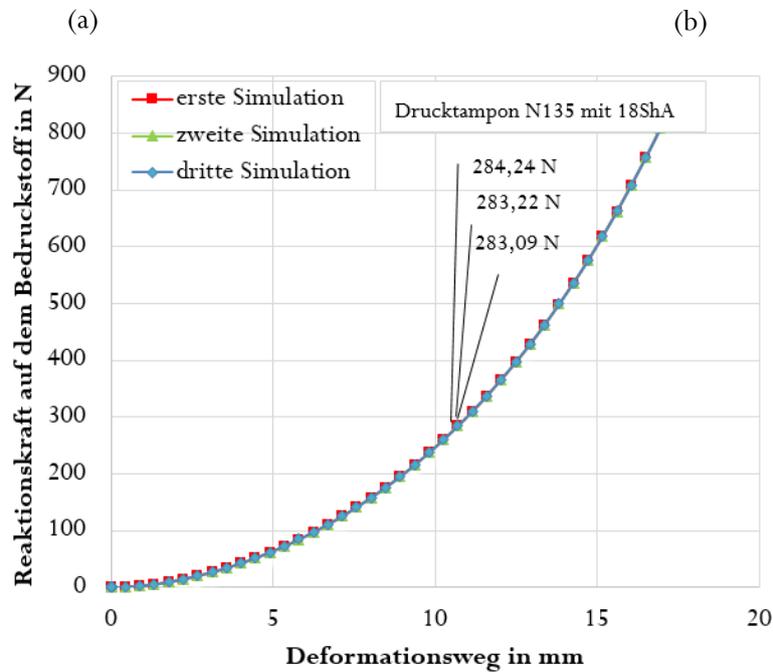
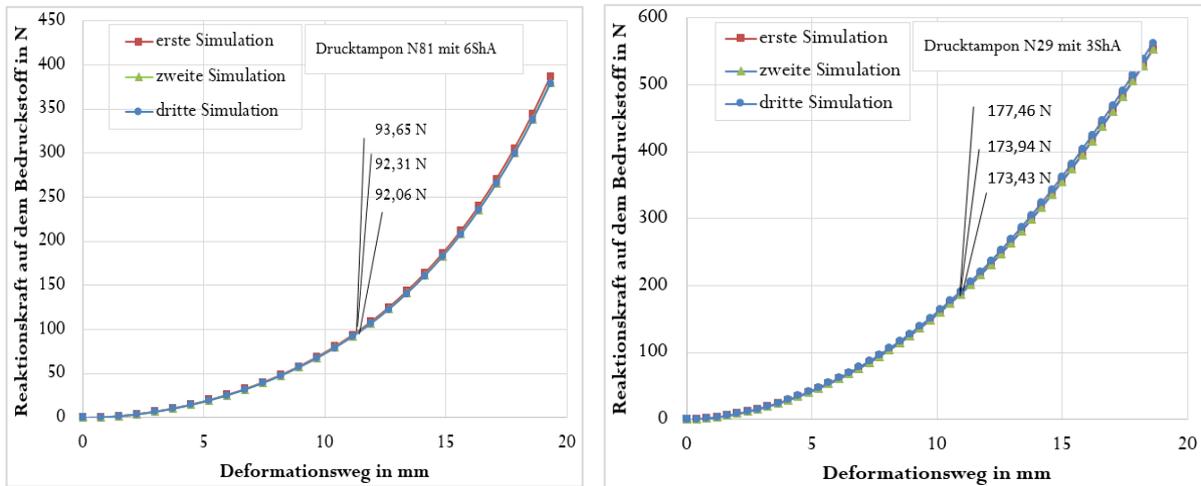


Abbildung A-9-5: Kurvenanpassung zwischen den in Abaqus vorhandenen Polynomial, Ogden Materialmodellen und den Ergebnissen des einachsigen Kompressionstests in Abschnitt 4.4.5 für die Proben mit 3, und 30 Shore A Härte. Die Zahl in der Kurvenbezeichnung gibt die Shore A Härte an.

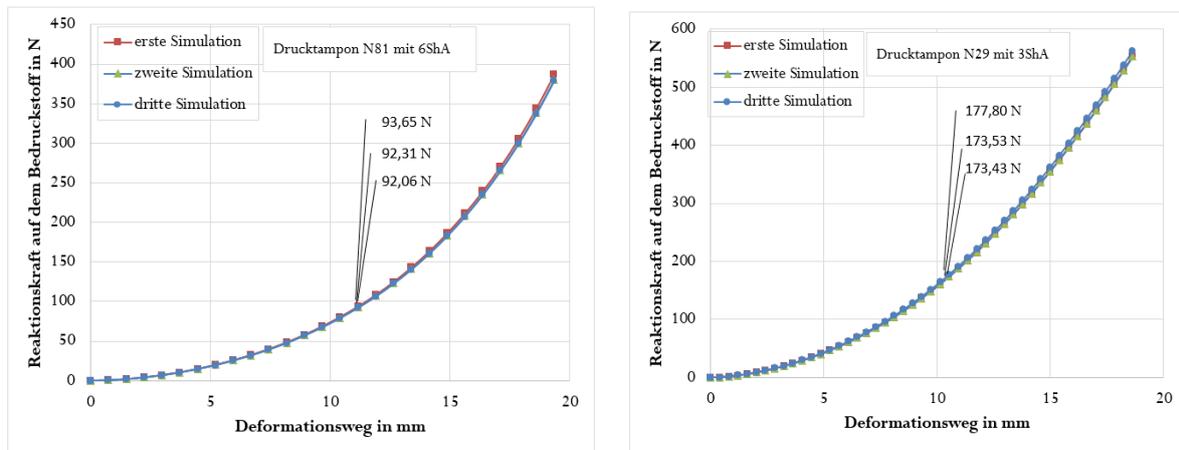
## A.10. Einfluss des Fehlers beim einachsigen und dem planaren Zugversuch



(c)

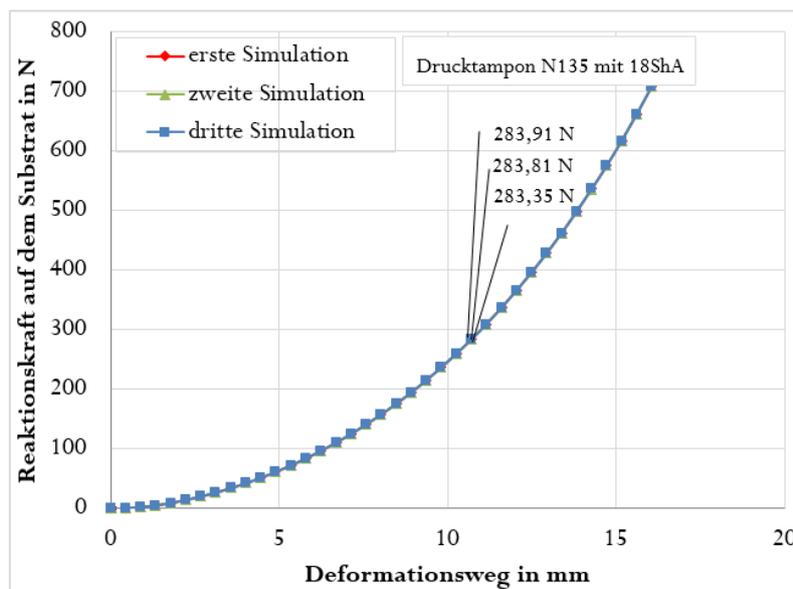
Abbildung A-10: Abaqus-Simulationsergebnisse für drei Drucktampons für die drei biaxialen Zugversuche, die Kurven in rot, grün und blau sind die Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff mit dem Deformationsweg des Drucktampons. Die erste, zweite und dritte Simulation basiert auf dem ersten, zweiten und dritten planaren Zugversuch. Der Netz-Elementtyp ist C3D10H und die Netz-Elementgröße beträgt 3 mm. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

## A.11. Einfluss des Fehlers beim volumetrischen Druckversuch



(a)

(b)



(c)

Abbildung A-11: Abaqus-Simulationsergebnisse für drei Drucktampons für die drei volumetrischen Druckversuche, die Kurven in rot, grün und blau sind die Reaktionskraft auf dem Bedruckstoff mit dem Deformationsweg des Drucktampons. Die erste, zweite und dritte Simulation basiert auf dem ersten, zweiten und dritten volumetrischen Druckversuch. Der Netz-Elementtyp ist C3D10H und die Netz-Elementgröße beträgt 3 mm. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte.

## A.12. Validierung der Salome-Meca Simulationen mittels mechnischer Messungen

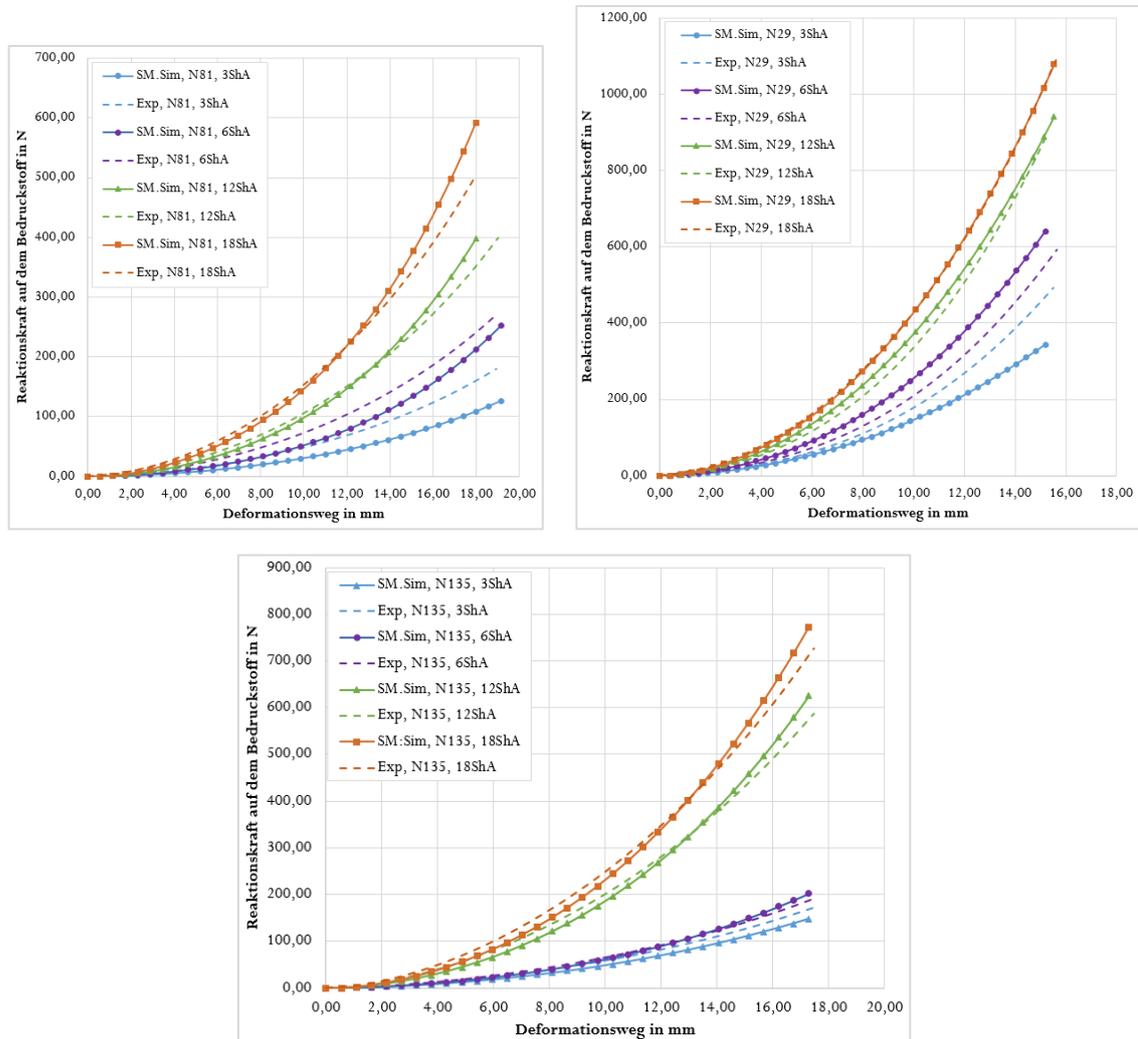


Abbildung A-12: Simulationsergebnisse mit dem Polynomial-Materialmodell und Experimente für die drei Drucktampons (N81, N29 und N135) mit verschiedenen Shore A Härten. Hier werden die Simulationsergebnisse (durchgezogene Linien) mit den Experimenten (gestrichelte Linien) verglichen. ShA in der Kurvenbezeichnung ist eine Abkürzung für Shore A Härte und SM.Sim ist eine Abkürzung für Salome-Meca Simulation. Die Poisson-Zahl ist nach Tabelle 4-3.