

Werner Sobek, Walter Haase
Christian Kelleter, Jens Schneider, Michael Drass

Untersuchungen zum Tragverhalten von kleinteiligen Elastomerlagern im Glasbau

F 3003

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9848-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

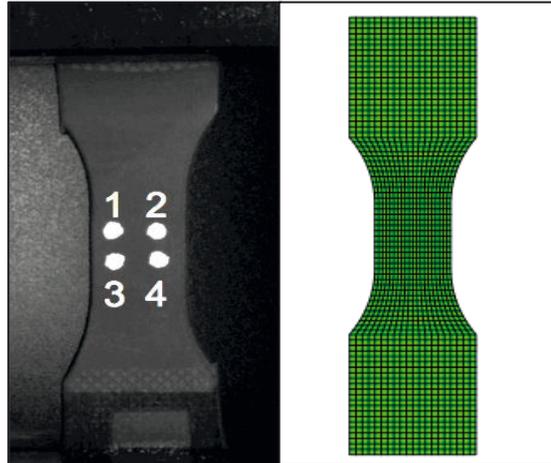
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Untersuchungen zum Tragverhalten von kleinteiligen Elastomerlagern im Glasbau

Endbericht für den Zeitraum vom 01.01.2014 bis 15.01.2016



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák

Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk A. Schwede, PhD



Institut für Statik und Konstruktion

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack

Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

Prof. Dr.-Ing. Johann-D. Wörner

Forschungsprojekt: Untersuchungen zum Tragverhalten von kleinteiligen Elastomerlagern im Glasbau

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart (Antragsteller)
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)
Pfaffenwaldring 7 und 14
70569 Stuttgart

TU Darmstadt (Mitforschende Stelle)
Institut für Statik und Konstruktion (ISM + D)
Franziska-Braun-Straße 3
64287 Darmstadt

Förderstelle: Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: II 3-F20-10-1-168 / SWD – 10.08.18.7-13.16) Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren

Förderkennzeichen: SWD – 10.08.18.7-13.16

Projektleiter: Dr.-Ing. Walter Haase (ILEK)

Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Christian Kelleter (ILEK)
Dipl.-Ing. Michael Drass (ISM + D)

Bearbeitungsbeginn: Januar 2014

Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 15.01.2016

Abbildung auf der Titelseite: Uniaxiale Zugprobe und Finite-Elemente-Rechenmodell

Dieser Bericht umfasst 201 Seiten.

Stuttgart, den

Dr.-Ing. Walter Haase

Dipl.-Ing. Christian Kelleter

Darmstadt, den

Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

M.Eng. Michael Drass

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	9
1.2	Ziel des Forschungsvorhabens	9
1.3	Methodische Vorgehensweise	9
2	Recherche und Stand der Technik	9
3	Grundlagen von Kunststoffen	12
3.1	Vernetzung von Molekülketten	13
3.2	Thermoplaste	14
3.3	Elastomere	14
3.4	Thermoplastische Elastomere	14
3.5	Duroplaste.....	14
3.6	Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen	14
3.7	Kunststoffhärte	17
3.8	Untersuchte Kunststoffe	18
3.8.1	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk.....	18
3.8.2	Silikon	19
3.8.3	Thermoplastisches Elastomer	19
3.8.4	Thermoplastisches Polyurethan	19
4	Voruntersuchungen	19
4.1	Versuchsaufbau	20
4.2	Versuchsprogramm.....	22
4.3	Ergebnisse	23
4.3.1	Pressung	24
4.3.2	Formfaktor.....	25
4.3.3	Härte.....	25
4.3.4	Belastungsgeschwindigkeit	25
5	Materialcharakteristik und Experimentelle Untersuchungen	27
5.1	Allgemeines	27
5.1.1	Materialien	27
5.1.2	Vorbemerkungen zum experimentellen Versuchsprogramm	27
5.1.3	Anmerkungen zu den Spannungszuständen unterschiedlicher experimenteller Untersuchungen	29
5.1.4	Anmerkungen zum Energieeintrag.....	31
5.1.5	Anmerkungen zur optischen Versuchsauswertung.....	34

5.1.6	Anmerkungen zur statischen Auswertung	34
5.2	Monotone, uniaxiale Zugversuche	36
5.2.1	Allgemeines	36
5.2.2	Probenherstellung	36
5.2.3	Versuchsdurchführung	38
5.2.4	Versuchsauswertung	38
5.3	Zyklische, uniaxiale Zugversuche	42
5.3.1	Allgemeines	42
5.3.2	Probenherstellung	43
5.3.3	Versuchsdurchführung	43
5.3.4	Versuchsauswertung	43
5.4	Monotone, uniaxiale Druckversuche	46
5.4.1	Allgemeines	46
5.4.2	Probenherstellung	48
5.4.3	Versuchsdurchführung	50
5.4.4	Versuchsauswertung	52
5.5	Dynamisch-Mechanische Thermoanalyse	55
5.5.1	Allgemeines	55
5.5.2	Probenherstellung	56
5.5.3	Versuchsdurchführung	57
5.5.4	Versuchsauswertung	58
6	Numerische Simulation	61
6.1	Regressionsmodell	61
6.1.1	Formänderungsenergie	62
6.1.2	Dehnungen	63
6.2	Formänderungsenergiedichtefunktionen	63
6.2.1	Ansatz nach Arruda-Boyce	63
6.2.2	Reduzierter Polynom Ansatz	64
6.2.3	Polynomansatz	64
6.2.4	Ansatz nach Ogden	64
6.3	Kurvenanpassung (Curve-Fitting)	64
6.3.1	Allgemeines	64
6.3.2	Gauß-Newton-Verfahren	64
6.3.3	Levenberg-Marquardt-Algorithmus	65
6.4	Anpassungsgüte der Materialmodelle	66
6.4.1	Grundlagen zur Ermittlung des Determinationskoeffizients	66
6.5	Anpassungsgüte des uniaxialen Zugversuches	66
6.5.1	Überprüfung der Anpassungsgüte über eine FEM-Simulation	68
6.6	Anpassungsgüte der uniaxialen Druckversuche	73
6.6.1	Überprüfung der Anpassungsgüte über FEM-Simulationen	75

7	Semi-Analytisches Berechnungsverfahren	79
7.1	Ableitung materieller Kennwerte auf Basis von Indentation und Shore-Härten	79
7.2	Analyse des Modells nach BATTERMANN und KÖHLER für geklemmte Systeme	80
7.3	Entwicklung eines mechanischen Modells auf Basis von Druckversuchen	81
7.3.1	Darstellung des mechanischen Modells	82
7.3.2	Verifizierung des MISO-Material-Modells	84
7.3.3	Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (I)	87
7.3.4	Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (II)	89
7.3.5	Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (III)	90
7.3.6	Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (IV)	90
7.4	Fazit zur Modellierung geklemmter Punkthalterssysteme im Glasbau	91
8	Zusammenfassung	93
9	Verzeichnisse	95
9.1	Abbildungsverzeichnis	95
9.2	Tabellenverzeichnis	98
10	Literatur	99
11	Anlagen	102
11.1	Beispielrechnung nach dem Gauß-Newton Verfahren	102
11.2	Erstellte Materialmodelle für TPU aus dem uniaxialen Zugversuch	105
11.3	Erstellte Materialmodelle für TPE aus dem uniaxialen Zugversuch	111
11.4	Erstellte Materialmodelle für EPDM aus dem uniaxialen Zugversuch	117
11.5	Erstellte Materialmodelle für Silikon aus dem uniaxialen Zugversuch	123
11.6	Erstellte Materialmodelle für TPU aus dem uniaxialen Druckversuch	129
11.7	Erstellte Materialmodelle für TPE aus dem uniaxialen Druckversuch	147
11.8	Erstellte Materialmodelle für Silikon aus dem uniaxialen Druckversuch	165
11.9	Erstellte Materialmodelle für EPDM aus dem uniaxialen Druckversuch	183
11.10	Daten zur Vereinfachten Modellierung von Klemmhaltern	201

Bezeichnungen

A	Fläche
b	Breite
\underline{C}	Cauchy-Green-Tensor
D	Jacobi-Matrix
E	E-Modul
E^*	komplexer E-Modul
E'	Speicher Modul
E''	Verlustmodul
E_D	Druckmodul
f	Frequenz
F	Indentationskraft
G	Schubmodul
h	Höhe
\bar{I}	deviatorischer Anteil der Invariante
I_1, I_2, I_3	erste, zweite und dritte Invariante des Spannungstensors
J	Volumenverhältnis
l	Länge
q	Formbeiwert
R^2	Determinationskoeffizient
SD	Standardabweichung
SEM	Standardfehler
ShA	Shore A Härte
T_g	Glasübergangstemperatur
u_{Fit}	Maschinenweg
$u_{Maschine}$	Gesamtweg des Versuches
u_{tot}	Verformung in Probe
v	Prüfgeschwindigkeit
V	Referenzvolumen
w	Durchbiegung in Glasmitte
W	Formänderungsenergie
w_z, w_d	spezifische Energie des Zug- und Druckversuches
δ	Indentationsweg
ε	Dehnung
ε_t	ingenieurmäßige Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	Dehnrage
ε_w	logarithmische Dehnung
λ	Hauptverstreckgraden
ν	Querkontraktionszahl
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	erste, zweite und dritte Hauptspannung
σ_t	Technische Spannung
σ_{tw}	"wahre" Spannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannung in x-, y- und z-Richtung
τ	Schubspannung

1 Einleitung

1.1 Motivation

Um Spannungsspitzen im Auflagerbereich von geklemmten Glasscheiben zu vermeiden, werden zwischen Stahlklemmhalter und Glasscheibe Kunststoffzwischen­schichten gelegt. Die Steifigkeit dieser Kunststoffzwischen­schicht ist maßgeblich für die Spannungen im Glas und für die Verformung der Glasscheibe verantwortlich. Wie bei vielen komplexen Materialien der technischen Anwendung findet auch bei Kunststoff eine vereinfachte Beschreibung des Tragverhaltens statt. Dieser Ansatz geht auf BATTERMANN und KÖHLER [1] zurück, die für Brückenlager aus Elastomeren einfache Berechnungsmodelle aufgestellt hat. Die Last-Verformungsbeziehungen sind bei geklemmten Glasscheiben allerdings anders.

In der DIN 18008-3 [2] werden für die Zwischenschichten bei Klemmhalterungen nur grobe Richtwerte für die Berechnung der Spannungen in der Glasscheibe angegeben. Dabei wird für Elastomere ein rechnerischer E-Modul zwischen 5 und 200 N/mm² und für Thermoplaste ein E-Modul zwischen 10 und 3000 N/mm² angegeben. Nähere Informationen zu diesen Kennwerten liegen nicht vor.

Erst eine genaue Kenntnis der Steifigkeit der Kunststoffzwischen­schichten würde eine genauere, wirtschaftliche und ressourcenschonende Bemessung der Glasscheiben erlauben.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Ermittlung realitätsnaher Steifigkeitswerte der Kunststoffzwischen­schichten, um eine wirtschaftliche und ressourcenschonendere Bemessung von Glasklemmhaltern zu ermöglichen. Somit können Glasscheiben dünner ausgeführt werden, wodurch der Verbrauch von Ressourcen und das Entstehen grauer Energie reduziert werden kann.

Im Anschluss an die Versuchsreihen werden Bemessungshilfen erarbeitet, welche eine einfache Erfassung der tatsächlichen Verhältnisse für den bemessenden Ingenieur ermöglichen. Diese werden auf gängige Statiksoftware ausgelegt, um ein breites Anwendungsspektrum sicherzustellen.

1.3 Methodische Vorgehensweise

In Kapitel 5 werden die ermittelten Materialkennwerte dargestellt. Hierzu wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Um der Eigenschaft von Kunststoffen, die unterschiedlich auf Zug und Druck reagieren, gerecht zu werden, wurden sowohl Zug- als auch Druckversuche durchgeführt. Zusätzlich wurden dynamische Beanspruchungen bei unterschiedlichen Temperaturen über eine Dynamisch-Mechanische-Thermo-Analyse (DMTA) durchgeführt.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Versuche erfolgte die Herleitung eines Materialmodells für die Finite-Elemente-Methode. Dieses konnte auf die Güte der Anpassung untersucht werden.

Eine vereinfachte Bemessung von Klemmhalterungen wird im weiteren Projektverlauf auf der Basis der bisherigen Erkenntnisse entwickelt.

2 Recherche und Stand der Technik

Allgemein wird im Glasbau zwischen linienförmiger und punktförmiger Lagerung unterschieden. Bei der punktförmigen Lagerung wird weiter zwischen der Klemmung mit und ohne Bohrung unterschieden. Punkthalter besitzen einen Punkthalterbolzen, der durch eine Bohrung im Glas die beiden Teller verbindet (siehe Abbildung 2-1). Diese Bohrung stellt eine Schwächung des Glasquerschnitts dar. Die Schwächung wird durch Klemmhalter, bei denen das Glas am Rand von zwei Tellern eingefasst wird, umgangen (siehe Abbildung 2-2). Dadurch entsteht ein deutlicher Vorteil, um Spannungsspitzen im Glas zu vermeiden [3].

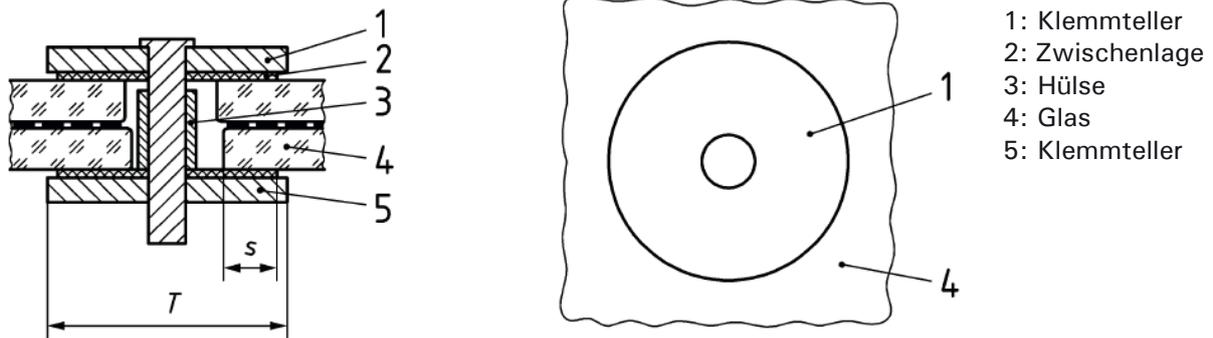


Abbildung 2-1: Prinzipdarstellung eines Punkthalters/Tellerhalters im Schnitt (links) und in der Draufsicht (rechts) aus [2]

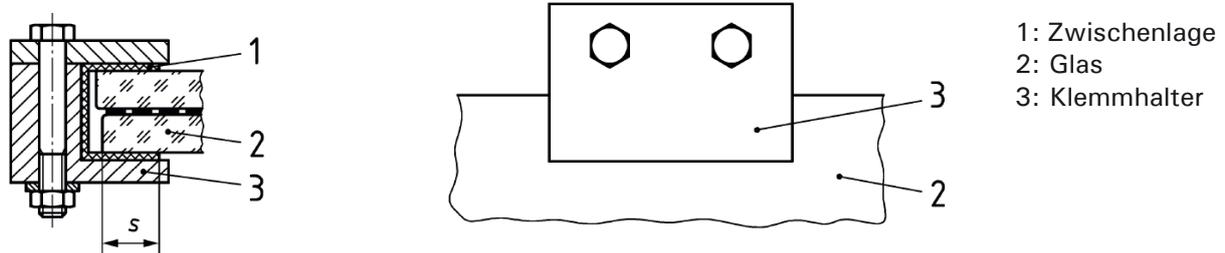


Abbildung 2-2: Prinzipdarstellung eines Klemmhalters im Schnitt (links) und in der Draufsicht (rechts) aus [2]

Im Rahmen dieser Arbeit werden Zwischenschichten von Klemmhaltern untersucht. Um einen Überblick über aktuelle Klemmhalterungen im Bereich des Glasbaus zu erhalten, wurden Serienklemmhaltern von den Drittmittelpartnern untersucht. Dabei wurden die Abmessungen der Kunststoffzwischen-schichten gemessen und mit den Soll-Werten verglichen. Zusätzlich zu den Serienklemmhaltern der Drittmittelpartner fand eine umfangreiche Betrachtung von Einzelanfertigungen aus dem Projektportfolio des Ingenieurbüros Werner Sobek Stuttgart GmbH statt. Dadurch konnten zum einen eventuelle Herstellungstoleranzen zwischen den Kunststoffabmessungen ermittelt werden, zum anderen konnte der baupraktisch relevante Bereich in Bezug auf Abmessungen und Härte der Kunststoffe abgesteckt werden. Eine Übersicht der untersuchten Serienklemmhalter der Drittmittelpartner ist der Tabelle 2-1 zu entnehmen.

Tabelle 2-1: Übersicht untersuchter Serienklemmhalter

Hersteller	Bezeichnung	Einseitige glasüberdeckende Klemmfläche [mm ²]	Dicke der Kunststoffzwischen-schicht nach Herstellerangaben [mm]	Dicke der Kunststoffzwischen-schicht gemessen [mm]	Besonderheiten
Schletter GmbH	ECO 6/7/8 schmal	875	4,7	4,7	Gewellte Oberfläche des Kunststoffes
	ECO 6/7/8 breit	1320	4,7	4,7	Gewellte Oberfläche des Kunststoffes
	ECO 4 schmal	770	Keine Angaben	Nicht vorhanden	
	ECO 4n breit	1320	Keine Angaben	Nicht vorhanden	
	Rapid	1080	2,8	3,7	Genoppte Oberfläche des Kunststoffes
	Laminat Profi schmal	1120	3	2,45	Gewellte Oberfläche des Kunststoffes
	Laminat Profi breit	952	3	2,45	Gewellte Oberfläche des Kunststoffes
Längle Glas GmbH	Al-Wall	2520	4,7	4,7	Gewellte Oberfläche des Kunststoffes

Auffällig ist die unterschiedliche Ausführung der Kunststoffzwischen-schichten bei den Serienklemmhaltern in Tabelle 2-1. Neben leicht gewellten Oberflächen (vergleiche Abbildung 2-3) und genoppten Oberflächen werden auch stark profilierte Kunststoffgeometrien hergestellt.

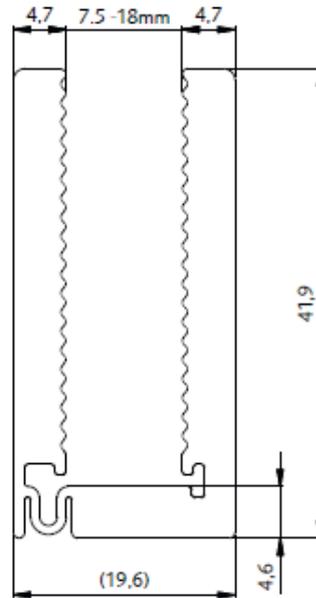


Abbildung 2-3: Gewellte Oberflächenausbildung des Zwischenmaterials eines AI-Wall Klemmhalter der Firma Längle Glas GmbH

Die Kunststoffzwischen-schichten aus dem Projektportfolio Werner Sobek Stuttgart GmbH wiesen, soweit gesichtet, keine besondere Oberflächenstruktur auf.

3 Grundlagen von Kunststoffen

„Polymerwerkstoffe (Kunststoffe) sind in ihren wesentlichen Bestandteilen organische Stoffe makromolekularer Art. Die Makromoleküle werden aus niedermolekularen Verbindungen (Monomeren) durch die Verfahren Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition synthetisch hergestellt [...]“ [4]. Makromoleküle sind chemische Verbindungen bei denen mindestens 1000 Atome pro Makromolekül vorliegen [5]. Kunststoffe gelten als hochmolekulare Stoffe, da sie zum überwiegenden Teil aus Makromolekülen bestehen.

Bei den meisten Kunststoffen handelt es sich um ein Gemisch. Neben den Makromolekülen bestehen viele Kunststoffe aus Zusatzstoffen¹, mit denen Eigenschaften und Verarbeitbarkeit gezielt angepasst werden können.

Generell lassen sich Kunststoffe in zwei große Übergruppen unterteilen. In die vernetzten und die unvernetzten Kunststoffe. Eine feinere Klassifizierung beruht auf den Unterschieden im thermomechanischen Verhalten. Daraus folgend werden Kunststoffe entsprechend Tabelle 3-1 nach der räumlichen Anordnung ihrer Makromoleküle und den zwischen den Molekülen wirkenden Bindungskräften unterschieden.

¹ Zusatzstoffe in Kunststoffen werden häufig auch als Additive bezeichnet

Tabelle 3-1: Einteilung der Kunststoffe nach [6]

Thermoplaste	Thermoplastische Elastomere	Elastomere	Duroplaste
Unvernetzt	Schwach vernetzt	Schwach vernetzt	Stark vernetzt
Schmelzbar / löslich	Schmelzbar / löslich	Nicht schmelzbar / nicht löslich / quellfähig	Nicht schmelzbar / nicht löslich / Nicht quellfähig
Plastisch formbar	Gummielastisch	Gummielastisch	Nicht plastisch formbar
i.a. hoher E-Modul	Kleiner E-Modul	Kleiner E-Modul	Hoher E-Modul

In älterer Literatur wird die Gruppe der Thermoplastischen Elastomere (TPE) häufig als Sonderfall aufgeführt und Kunststoffe somit nur in die übrigen drei Kategorien unterteilt. Die TPE gewinnen jedoch immer mehr an Bedeutung [7].

3.1 Vernetzung von Molekülketten

In der Polymerstruktur vorherrschende Bindungskräfte haben einen großen Einfluss auf das Werkstoffverhalten der Kunststoffe. Eine Übersicht zu den vorliegenden Vernetzungen kann Abbildung 3-1 entnommen werden. Neben der Verzahnung von Molekülketten können diese chemisch oder physikalisch verbunden sein. Erst durch die Vernetzung entstehen die räumlichen Netzwerkstrukturen, die für die typischen Werkstoffeigenschaften von Kunststoffen verantwortlich sind. Die Vernetzung findet meist während der Synthese statt, kann aber auch nachträglich erfolgen [8].

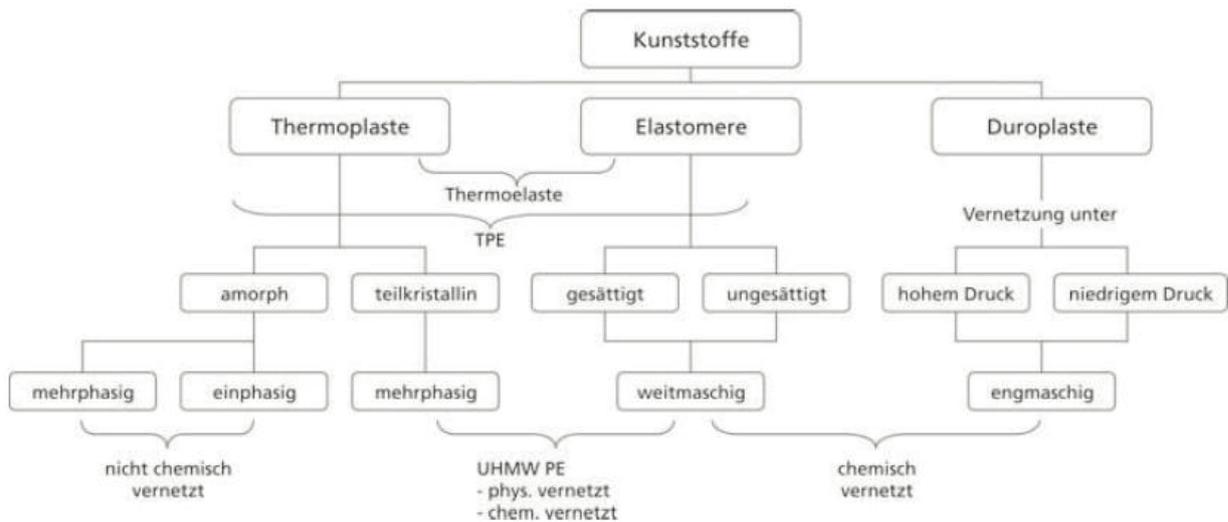


Abbildung 3-1: Einteilung der Kunststoffe aus [7]

Bei den chemischen Bindungen handelt es sich um Hauptvalenzbindungen, auch kovalente Bindungen genannt, die einen festen Zusammenhalt von Molekülen oder Atomen beschreiben. Diese feste Bindung herrscht zwischen den Monomeren in und zwischen einer Molekülkette [9].

Nebervalenzkräfte sind physikalische Bindungen und können als Anziehungskräfte der Moleküle angesehen werden. Sie wirken zwischen den Molekülketten und halten diese zusammen, auch wenn keine Hauptvalenzkräfte vorliegen. Folglich spielen Sie bei den Thermoplasten, bei denen keine chemische Bindung vorliegt, eine entscheidende Rolle. Die Bindungsenergie von Nebervalenzkräften liegt mit 2 bis 20 KJ/mol um den Faktor 100 bis 10 geringer als bei den Hauptvalenzkräften [5].

Eine schematische Darstellung der unterschiedlichen Vernetzungen der Kunststoffgruppen ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

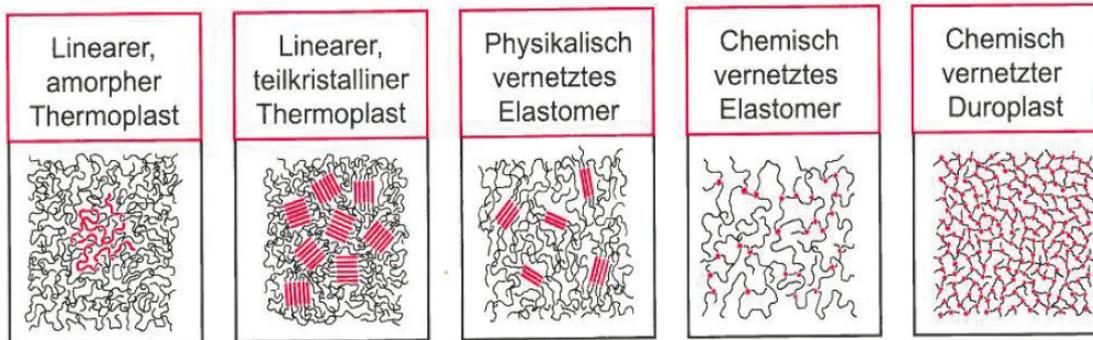


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung von verschiedenen Vernetzungen aus [5]

3.2 Thermoplaste

Thermoplaste sind unvernetzte Kunststoffe, bei denen die Bindung der Makromoleküle über Nebenvanzenkräfte geschieht. Daraus resultiert eine gute Verarbeitbarkeit, da ein Erweichen und Schmelzen möglich ist. Bei Thermoplasten erfolgt zusätzlich eine Unterscheidung nach ihrem Ordnungszustand. So sind amorphe und teilkristalline Thermoplaste bekannt.

3.3 Elastomere

Bei Elastomeren handelt es sich um weitmaschig vernetzte, amorphe Kunststoffe, die nicht schmelzbar sind. Das Verhalten ist gummiartig, d.h. sie besitzen eine hohe reversible Dehnbarkeit. Der Grad der Vernetzung beeinflusst wesentlich die Steifigkeit und die Lage der Glasübergangstemperatur. Dabei gilt: Je höher der Vernetzungsgrad, desto steifer das Elastomer und desto geringer die Dehnungsfähigkeit. Bei Elastomeren wird zwischen gesättigt und ungesättigt unterschieden. Die Elastomere, die in diesem Projekt betrachtet werden sind gesättigt.

3.4 Thermoplastische Elastomere

Thermoplastische Elastomere sind mehrphasige Kunststoffe, welche die Vorteile von Thermoplasten und Elastomeren vereinen. Es liegt keine permanente kovalente Bindung, sondern lediglich eine reversible Vernetzung vor. Somit wird ein wiederholtes Aufschmelzen und Verarbeiten möglich.

3.5 Duroplaste

Duroplaste sind stark vernetzte hochsteife Kunststoffe, die eine hohe Festigkeit aufweisen können. Sie neigen zur Versprödung bei Kälte und sind nicht schmelzbar. In einer vertikal angeordneten Vergrasung dienen Duroplaste häufig als Klotzung zum Abtrag des Eigengewichtes. Für die Zwischenschicht von geklemmten Scheiben spielen Duroplaste nur eine untergeordnete Rolle, weshalb auf diese nicht weiter eingegangen wird.

3.6 Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen

Die Belastungsgeschwindigkeit hat einen erheblichen Einfluss auf die Steifigkeit der untersuchten Materialien [10]. In Abbildung 3-3 sind qualitativ verschiedene Geschwindigkeiten eines uniaxialen Zugversuches dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Versuchsgeschwindigkeit die Steifigkeit des Materials zunimmt.

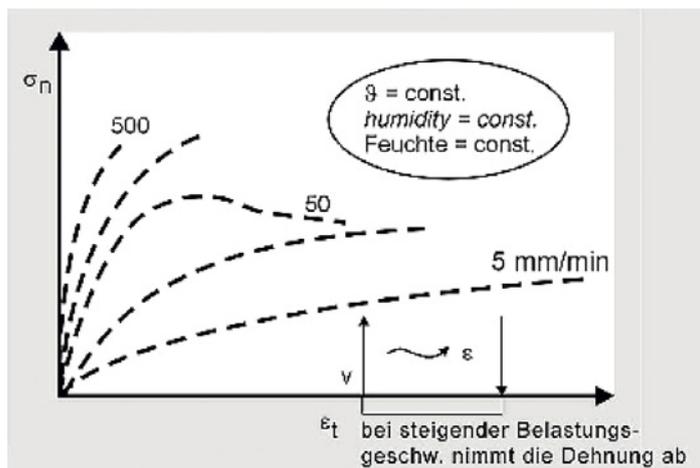


Abbildung 3-3: Qualitative Spannungs-Dehnungs-Beziehungen bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten aus [10]

Neben der Belastungsgeschwindigkeit hat die Belastungsart ebenfalls einen großen Einfluss auf das Verhalten der Kunststoffe. Abbildung 3-4 verdeutlicht zwei charakteristische Zusammenhänge. Zum einen ist das nicht-lineare Werkstoffverhalten ersichtlich, zum anderen reagiert das Material unterschiedlich auf Druck- und Zugbelastungen. Bereits nach einer Verformung von 10 % besteht eine Abweichung der Spannungen zwischen den beiden Belastungsarten von ca. 19 %. Dieser Effekt wurde für Elastomere von BATTERMANN und KÖHLER [1] aufgestellt. Es wird angenommen, dass sich die Kunststoffe aus der vorliegenden Forschungsarbeit ähnlich verhalten.

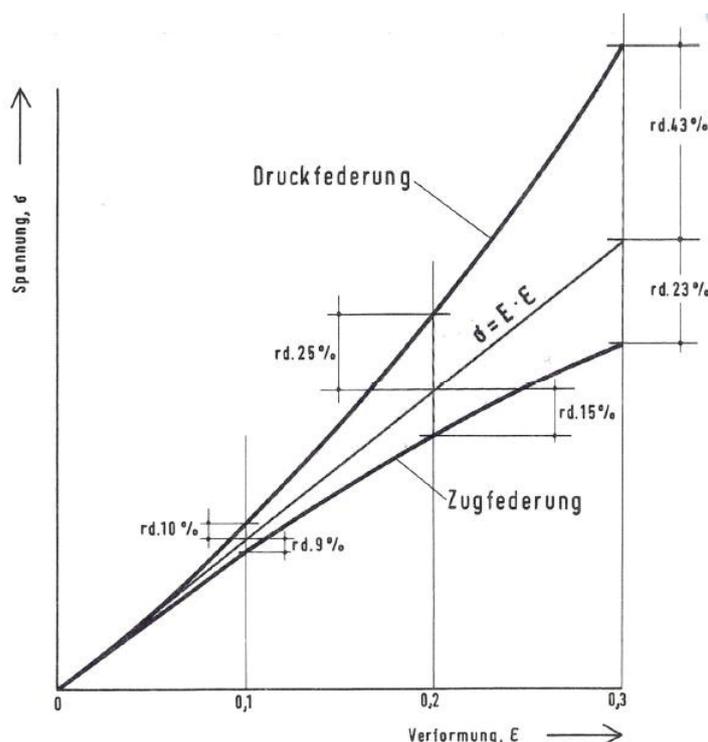
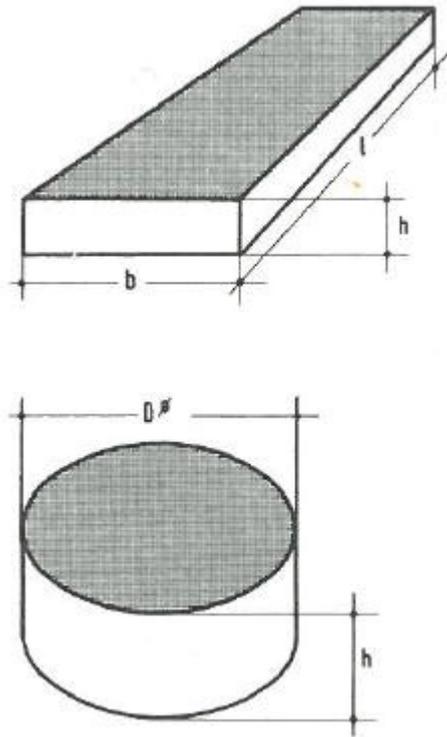


Abbildung 3-4: Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Druck- und Zugbelastungen aus [1]

BATTERMANN und KÖHLER leitet in [1] grundlegende Zusammenhänge zwischen der Härte und der Steifigkeit von Elastomeren her. In Abbildung 3-6 ist erkennbar, dass der Elastizitätsmodul (Druckmodul) stark von der Härte des Kunststoffes abhängt. Es ist weiter zu erkennen, dass der Formfaktor einen Einfluss auf die Steifigkeit hat. Der Formfaktor wird aus dem Verhältnis der belasteten Körperfläche zur freien Mantelfläche des Stoffelementes bestimmt. Das Last-Verformungsverhalten ist bei Druckbelastungen neben der Shore Härte somit auch von der Form abhängig. Die Formfaktoren für Quader und Zylinder sind der Abbildung 3-5 zu entnehmen.



$$q = \frac{b \cdot l}{2 \cdot h \cdot (b + l)}$$

$$q = \frac{D}{4 \cdot h}$$

Abbildung 3-5: Formfaktoren für Quader und Zylinder nach [1]

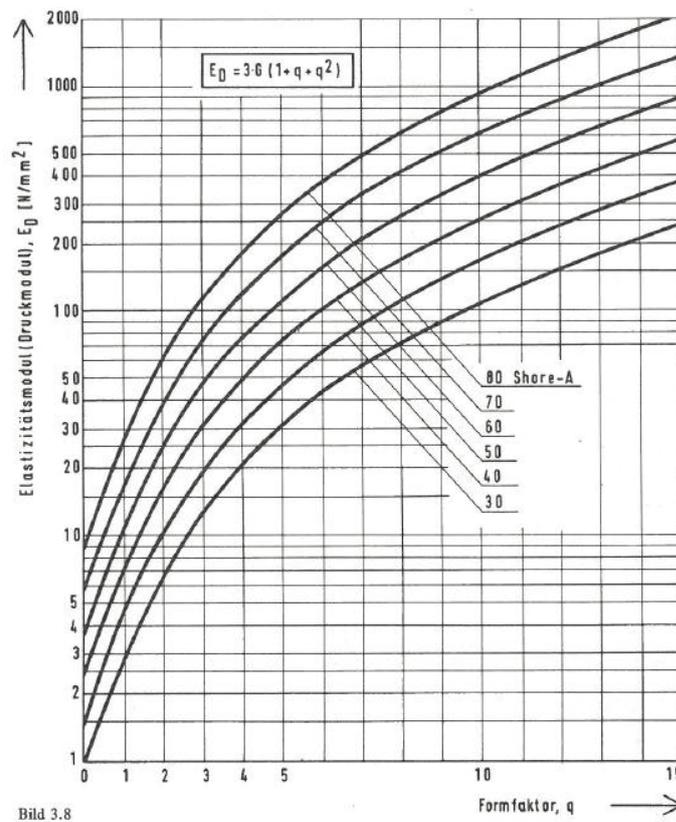


Abbildung 3-6: Elastizitätsmodul als Funktion des Formfaktors für verschiedene Härten aus [1]

Die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen zeigen eine starke Temperaturabhängigkeit. Der Schwerpunkt des Forschungsprojektes liegt bei den Elastomeren, deshalb wird auf diese im Folgenden näher eingegangen. Die ebenfalls in dieser Arbeit betrachteten thermoplastischen Elastomere verhalten sich ähnlich. Thermoplaste und Duroplaste können sich jedoch zum Teil deutlich anders verhalten [11]. Abbildung 3-7 zeigt die Temperaturabhängigkeit eines Elastomers und eines thermoplastischen Elastomers.

Der Temperaturverlauf kann in vier Abschnitte unterteilt werden. Dabei gibt es einen recht weiten Temperaturbereich (Abschnitt III), in dem die mechanischen Eigenschaften nahezu konstant sind. Hierbei handelt es sich um den entropieelastischen Bereich. Unterhalb dieser Temperatur (Abschnitt II) ist die Temperaturabhängigkeit am stärksten ausgeprägt. In diesem Glasübergangsbereich liegt die sogenannte Glasübergangstemperatur T_g . Unterhalb von T_g liegt der energieelastische Bereich (Abschnitt I).

In Abschnitt IV zersetzen sich Elastomere, bei Thermoplasten und thermoplastischen Elastomeren beginnt das viskose Fließen. In diesem Abschnitt unterscheidet sich der Verlauf der beiden Kurven, der sich ansonsten stark ähnelt deutlich.

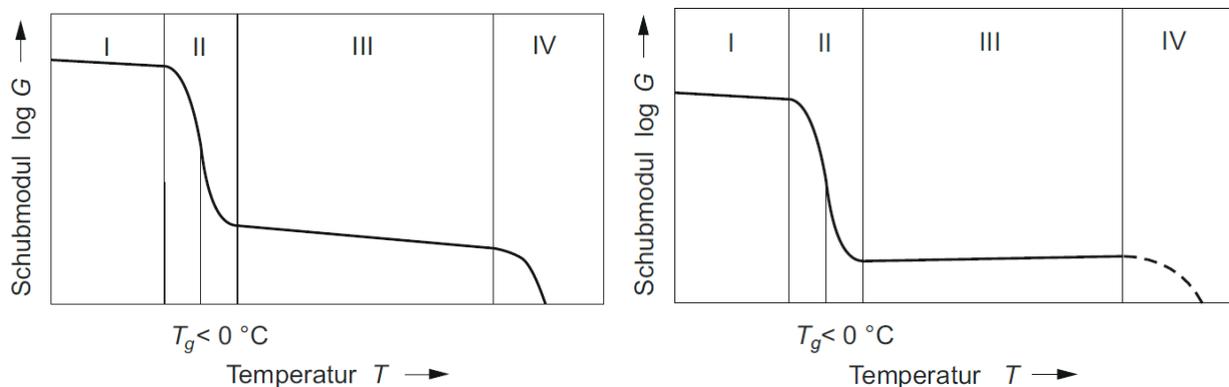


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit des Schubmoduls von thermoplastischen Elastomeren (links) von Elastomeren (rechts) aus [11]

Die in diesem Forschungsprojekt untersuchten Materialien besitzen eine Glasübergangstemperatur, die unter -20°C liegt (vgl. Kapitel 5.5). Dies ist von Bedeutung, da im baupraktischen Temperaturbereich (-20°C bis 80°C) keine starken Schwankungen der Steifigkeit zu erwarten sind. Materialien, bei denen T_g oberhalb dieser Grenze liegen, sollten nicht als Zwischenschicht von geklemmten Glasscheiben verwendet werden.

3.7 Kunststoffhärte

Die Härte von Kunststoffen ist im Anwendungsfall von geklemmten Glasscheiben ein wesentliches Auswahlkriterium und wichtiger Materialkennwert. Ähnlich der Festigkeit eines Stahls, werden Kunststoffe häufig über die Härte charakterisiert. Allgemein ist die Härte der Widerstand eines Materials gegen das Eindringen eines festgelegten Körpers bei einer definierten Kraft. Bei Elastomeren ist eine Definition nach *Shore A* verbreitet [8]. Diese Definition geht auf Albert F. SHORE zurück und wird in der DIN EN ISO 868:2003-10 [12] und der DIN ISO 7619-1:2012-02 [13] geregelt. Die Methode nach der *International Rubber Hardness Degress* (IRHD) ist ein der Shore Härte sehr ähnliches Verfahren und liefert im Bereich von 30-80 IRHD gleiche Skalenwerte [14].

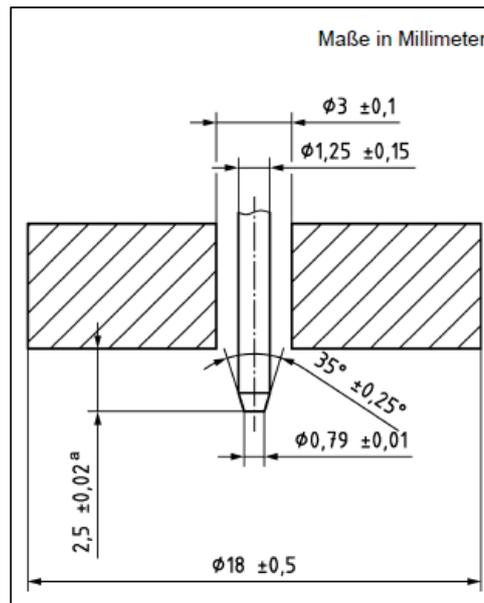


Abbildung 3-8 Eindringkörper und Andruckplatte zur Shore A Härte Messung aus [5]

Die Shore A Skala reicht von 0 bis 100. Kein Eindringwiderstand entspricht dem Wert 0 und 100 keinem Eindringen. Als Eindringkörper wird ein Kegelstumpf verwendet (siehe Abbildung 3-8). Die Messung der Härte findet bei Kunststoffen mit Durometern statt. Es werden noch weitere Shore Skalen aufgeführt, für deren Härtebereich es entsprechende Durometer gibt. Die Auswahl der Shore Härte Skala erfolgt nach DIN ISO 7619-1 [13] und ist in Tabelle 3-2 aufgeführt.

Tabelle 3-2: Anwendungsbereich der Shore Härte Skalen nach [13]

Skala	Härtebereich
A	normaler Härtebereich
D	hoher Härtebereich
AO	niedriger Härtebereich
AM	normaler Härtebereich und dünne Probekörper

3.8 Untersuchte Kunststoffe

In Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss und den Industriepartnern wurden vier Kunststoffe untersucht. Diese sind in Tabelle 3-3 aufgeführt und in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

Tabelle 3-3: Untersuchte Kunststoffe und deren Klassifizierung

Kunststoff	Kunststoffklasse
Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)	Elastomer
Silikon	Elastomer
Thermoplastisches Elastomer (TPE)	Thermoplastisches Elastomer
Thermoplastisches Polyurethan (TPU)	Thermoplastisches Elastomer

Eine Auflistung der untersuchten Kunststoffe und der jeweiligen Shore A Härten können der Tabelle 5-1 entnommen werden.

3.8.1 Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk

Über die letzten Jahre hat sich Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM²) als Zwischenmaterial bei geklemmten Halterungen bewährt [3]. Dafür ist ausschlaggebend, dass es im Vergleich zu anderen

² Kurzzeichen EPDM leitet sich aus der englischen Bezeichnung *ethylen-propylen-dien-monomer* ab

Elastomeren auf Kautschukbasis alterungsbeständig und resistent gegen Chemikalien und UV-Strahlung ist. Dies liegt an den gesättigten Hauptketten, die bei vergleichbaren Kautschuken nicht so stark ausgebildet sind [7].

Darüber hinaus ist EPDM im Vergleich zu anderen Elastomeren in einem sehr weiten Temperaturbereich (-50° C bis +150°C) einsetzbar [6].

3.8.2 Silikon

Silikon wird auch in die Gruppe der Elastomere eingegliedert und wird bereits als Zwischenschicht geklemmter Scheiben eingesetzt [15]. Es ist im Vergleich zu EPDM teurer [7], jedoch besitzt einen großen Widerstand gegen UV-Licht und Ozon bedingte Alterung. Der Einsatz im Temperaturbereich zwischen -60°C bis +250°C ist für den Einsatz als Zwischenmaterial mehr als ausreichend.

3.8.3 Thermoplastisches Elastomer

Thermoplastische Elastomere (TPE) verhalten sich im Bereich der Raumtemperatur wie Elastomere, bei Wärmezufuhr lassen sie sich, wie auch die Thermoplaste, plastisch Verformen. Sie können beliebig oft aufgeschmolzen werden, ohne dass sich die Makromoleküle zersetzen. Dies ist gerade hinsichtlich der Verarbeitung und der Wiederverwertbarkeit ein Vorteil gegenüber herkömmlichen Elastomeren.

3.8.4 Thermoplastisches Polyurethan

Bei Elastollan® handelt es sich um ein spezielles thermoplastisches Elastomer auf Urethanbasis (TPU) der Firma BASF Polyurethanes. Die wesentlichen Bestandteile sind Polycole (langkettige Diöle), Diisocyanate und kurzkettige Diöle. Durch entsprechende Variation der Mengenteile dieser Ausgangsstoffe bei der Reaktion, können die Eigenschaften wie z.B. die Shore Härte des Elastollans gezielt gesteuert werden. Elastollan® besitzt eine hohe Beständigkeit gegen Öle, Fette, Sauerstoff und Ozon [16]. Eine nähergehende Betrachtung von TPU ist somit sinnvoll.

4 Voruntersuchungen

Bei Kunststoffzwischenschichten bestehen Variationsmöglichkeiten bezogen auf:

- die Shore Härte
- die Dicke
- die Form
- das Material

Um den zu untersuchenden Bereich einzugrenzen und die Variationsmöglichkeiten einzudämmen, wurden zunächst Voruntersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde ein Belastungsfall gewählt, der bei geklemmten Glasscheiben häufig vorkommt. *In Plane* Belastungen (z.B. Eigengewicht) werden über Klotzungen in das Tragwerk abgetragen. *Out of plane* Belastungen, wie sie z.B. durch Wind auftreten, werden über Kontakt und Reibung abgetragen.

Die Voruntersuchungen betrachten den Lastabtrag über Reibung. Bei Seilnetzfassaden bspw. kommt es zu großen Durchbiegungen des Seiltragwerks. Bei der Eingangshalle der Universität Bremen betragen diese maximal ca. 350 mm, die Zentrale der europäischen Investitionsbank in Luxemburg kann eine maximale Durchbiegung von 500 mm aufweisen [17, 18]. Somit verschieben sich die Klemmhalter, die gleichzeitig die Auflagerpunkte der Scheiben bilden und ihr Abstand zueinander vergrößert sich (vergleiche Abbildung 4-1).

Zusätzlich erfährt die Glasscheibe eine Durchbiegung. Dadurch kommt es zu einer Schubbeanspruchung, die über Reibung abgetragen wird.

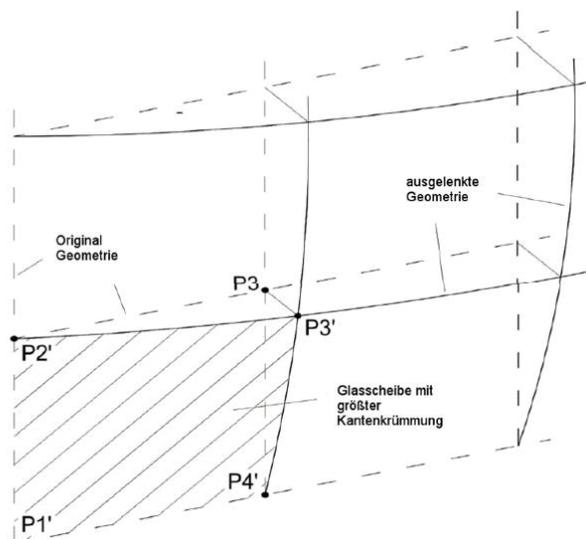


Abbildung 4-1: Skizzenhafte Darstellung einer Seilnetzkonstruktion im ausgelenkten Zustand aus [19]

Experimentelle Untersuchungen dieser Art wurden bislang bei Elastomerlagern für den Brückenbau [20] und bei Punkthaltern [21, 22] durchgeführt, jedoch nicht bei Klemmhaltern. Deshalb musste ein Versuchsaufbau entwickelt werden, der auf die Abmessungen und Lastabtragungsmechanismen von geklemmten Scheiben ausgelegt ist.

4.1 Versuchsaufbau

Es wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der den Lastabtrag durch Reibung bei geklemmten Glasscheiben nachbildet. Dabei sollte die Möglichkeit gegeben sein folgende Parameter variieren zu können:

- Dicke der Kunststoffzwischenenschicht
- Form der Kunststoffzwischenenschicht
- Härte der Kunststoffzwischenenschicht
- Pressung der Kunststoffzwischenenschicht
- Auszugsgeschwindigkeit der Glasscheibe aus dem Klemmhalter

Der entwickelte Versuchsaufbau kann Abbildung 4-2 entnommen werden. Die beiden Kunststoffpads wurden zentrisch über zwei Stahlplatten an die Glasscheibe geklemmt. Die Pressung wurde über zwei M16 Schrauben aufgebracht, an denen eine Kraftmessdose K180 angebracht war. Die Relativverschiebung zwischen Glasscheibe und den Stahlklemmhaltern wurde über induktive Wegaufnehmer WA/20 gemessen (vergleiche Abbildung 4-3). Die Stahlklemmhalter wurden aus kalt gewalztem Stahl der Güte S235 hergestellt und zuvor einer visuellen Prüfung auf Kratzer und Riefen unterzogen. Bei der Auswahl des Stahls wurde eine lange Lagerung vermieden um Rostnarben und eine große Rautiefe auszuschließen. Es wurde ein Einscheibensicherheitsglas (ESG) mit einer Dicke von 12 mm gewählt, dieses wurde in die institutseigenen (ILEK) Prüfmaschine Zwick 1474 eingespannt. Zwischen den Pressbacken der Prüfmaschine und der Glasscheibe wurde ein 2 mm dickes ShD 50 hartes Pad aus TPU gelegt. Dadurch wurde eine Beschädigung des Glases vermieden und Haftung zwischen Stahlklemmbacke und Glas sichergestellt. Eine zentrische Einspannung wurde über zwei untenliegende Gleitschrauben M10 sichergestellt. Um Dehnungen im Glas messen zu können wurden zwei Dehnungsmessstreifen ca. 2 cm über den Kunststoffzwischenenschichten appliziert. Der fertige Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-4 erkennbar.

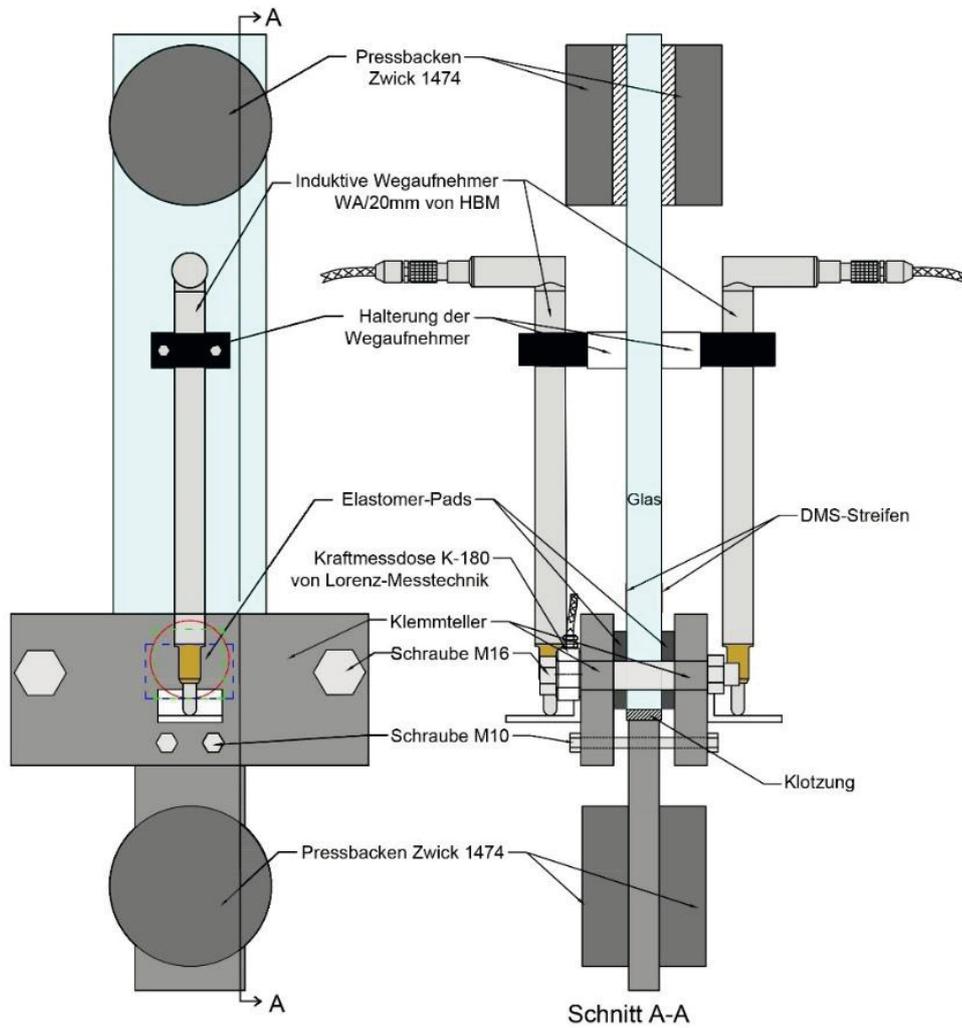


Abbildung 4-2: Ansicht und Schnitt des entwickelten Versuchsaufbaus für die Schubversuche



Abbildung 4-3: Induktiver Wegaufnehmer WA/20 (links) und Kraftmessdose K-180 (rechts)

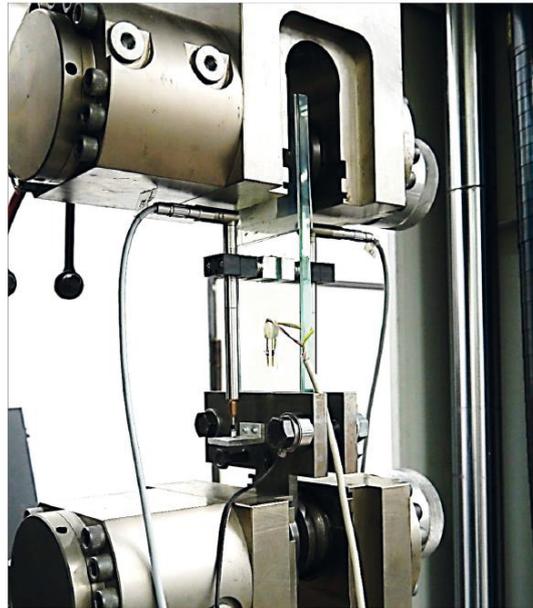


Abbildung 4-4: Versuchsaufbau eingespannt in die institutseigene Prüfmaschine Zwick 1474

4.2 Versuchsprogramm

Für die Voruntersuchungen wurde Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) gewählt. Nach [1] hat bei einer Druckbeanspruchung die Form der Kunststoffzwischen­schicht einen Einfluss auf dessen Steifigkeit. Dieser Effekt wurde jedoch an deutlich größeren Brückenlagern beobachtet. Um zu überprüfen, ob dieser Effekt auch bei den Dimensionen, die im Glasbau üblich sind auftritt, wurden drei unterschiedliche Formen untersucht. Ein Rechteck, ein Quadrat und eine Kreisgeometrie (siehe Abbildung 4-5). In Tabelle 4-1 sind die untersuchten Formfaktoren aufgelistet.

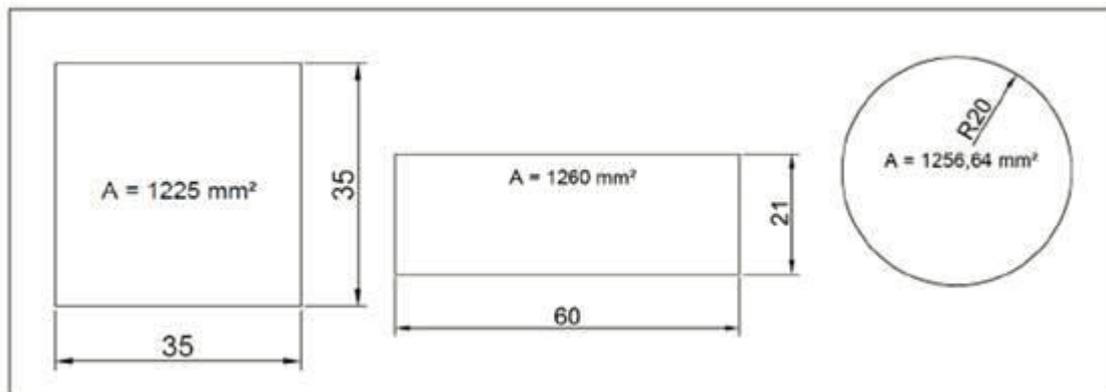


Abbildung 4-5: Untersuchte Probekörpergeometrien im Schubversuch; Quadrat links; Rechteck mitte; Kreis rechts

Die Abmessungen orientieren sich zum einen an der DIN ISO 18008-3 [2], dort ist eine Klemmfläche von min. 1000 mm² gefordert. Zum anderen sollten die Geometrien leicht herstell- und einbaubar sein. Daraus resultieren für die beiden untersuchten Kunststoffdicken von 4 mm und 8 mm unterschiedliche Formfaktoren, die Tabelle 4-1 entnommen werden können. Die Formeln zur Berechnung der Formfaktoren sind in Abbildung 3-5 dargestellt.

Tabelle 4-1: Formfaktoren der untersuchten Geometrien

Kunststoffdicke	Quadrat	Rechteck	Kreis
4 mm	2,19	1,94	2,5
8 mm	1,1	0,98	1,25

Neben der Form ist die Härte ein Parameter, der vom Tragwerksplaner durch die Wahl des Kunststoffes beeinflusst werden kann. Die Härte der Kunststoffzwischen-schicht hat einen erheblichen Einfluss auf die Spannungen und Verformungen der Glasscheibe. Für die Voruntersuchungen wurden zwei Härten ShA 25 und ShA 65 untersucht.

Der Pressdruck wurde so festgelegt, dass es zu einer Stauchung der beiden Kunststoffzwischen-schichten kommt. Für beide untersuchten Kunststoffdicken entsteht eine Stauchung von insgesamt 1, 2, 3 und 5 mm. Dabei wurde die Klemmkraft über die Kraftmessdose K180 gemessen. Das Versuchsprogramm wurde jedoch auf die konstante Flächenpressung der Kunststoffproben ausgerichtet, da es bei der Klemmkraft zu Kriech- und Relaxationseinflüssen kam. So schien durch die Einstellung der Pressung eine höhere Vergleichbarkeit der einzelnen Versuche erreichbar zu sein. Dieses Vorgehen liegt näher an der Ausführung auf der Baustelle, da hier keine Vorspannkraft der Anzugsschraube vorgegeben wird, sondern die beiden Teile der Stahlklemmhalter bis zum Kontakt untereinander verschraubt werden.

In Kapitel 3.6 wurde ein deutlicher Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Steifigkeit bei Zugversuchen aufgezeigt. Es ist zu untersuchen, ob dies beim Schubwiderstand ebenfalls der Fall ist. So wurden die Traversengeschwindigkeiten 2 mm/min, 10 mm/min und 100 mm/min gewählt.

Bei drei Versuchen pro Parameterkonstellation läge die Zahl der Versuche bei insgesamt 324. Diese Anzahl ist für eine Voruntersuchung recht hoch³. Deshalb wurde, um die Anzahl der Versuche zu reduzieren, das Versuchsprogramm gekürzt und bei Bedarf erneut angepasst. Die Bezeichnung der ausgewählten Versuche setzt sich wie folgt zusammen: Pressung_Form_Belastungsgeschwindigkeit_Härte_Dicke.

Vor Versuchsbeginn wurden die Soll- und Ist-Dicken der Probekörper verglichen. Die drei untersuchten Materialien wurden jeweils aus einer Charge geliefert. Die Auswertung ist Tabelle 4-2 entnehmbar.

Tabelle 4-2: Vergleich der Soll- und Ist-Dicken der untersuchten Kunststoffe

Härte [ShA]	25	65	65
Soll-Dicke [mm]	4	4	8
Ist-Dicke[mm]	3,9 – 4,0	4,0 – 4,4	8,0 – 8,5
Maximale Abweichung [%]	2,5	10	6,25

4.3 Ergebnisse

Die hohe Anzahl der Versuche erlaubt es nicht auf jeden einzelnen Versuch einzugehen, deshalb erfolgt die Darstellung der Ergebnisse anhand exemplarischer Einzelversuche.

Bei den Versuchen konnten unterschiedliche Versagensarten des Reibverbundes zwischen Glas, Kunststoffzwischen-schicht und Stahlklemmteller beobachtet werden (siehe Abbildung 4-6:). Beim Großteil der Versuche fiel ein Gleiten zwischen Kunststoffzwischen-schicht und Stahl auf (Versagensart b. nach Abbildung 4-6). In diesen Fällen lag eine gute Haftung zwischen Glas und Kunststoffzwischen-schicht vor. Nach Versuchsende konnten die Kunststoffe nur mit deutlicher Kraft vom Glas gelöst werden, obwohl beide Glas Oberflächen, die vier Kunststoffflächen und die Stahlklemmteller vor jedem Versuch zuerst mit Aceton und danach mit Wasser gereinigt wurden.

³ Versuchsvorbereitung und Durchführung dauert ca. eine Stunde, d.h. ca. acht Wochen für alle Versuche

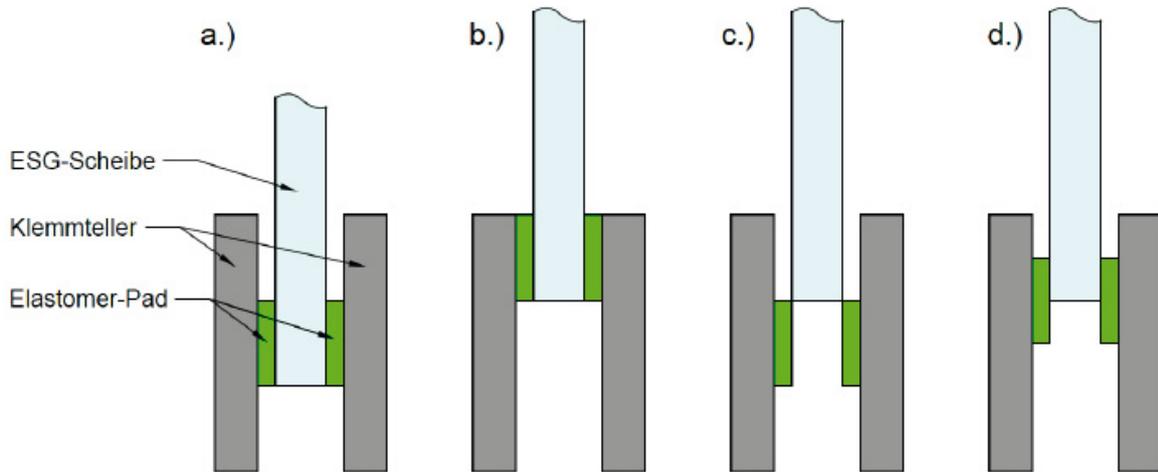


Abbildung 4-6: Zustände vor und während des Schubversuches; a.) vor Versuchsbeginn; b.) Gleiten Stahl-Kunststoff; c.) Gleiten Kunststoff-Glas; d.) Kombination von b.) und c.) nach [23]

4.3.1 Pressung

Bei allen Versuchen hat die Pressung der Kunststoffzwischen- schicht einen großen Einfluss auf den Schubwiderstand. In Abbildung 4-7 sind exemplarisch für die quadratische Form, ShA 65, 8 mm Dicke bei 2 mm/min die verschiedenen Kraft-Weg-Beziehungen dargestellt. Bei 5 mm Flächenpressung der Kunststoffzwischen- schicht in Dickenrichtung - entspricht einer anfänglichen Klemmkraft von 15 kN - erhöht sich der Schubwiderstand deutlich gegenüber einer Pressung von lediglich 1 mm – entspricht einer anfänglichen Klemmkraft von 3 kN. Abschließend konnte der Zusammenhang zwischen der Pressung und dem Schubwiderstand nicht erfasst werden. Die Streuung der Messergebnisse lässt nur Tendenzen erkennen. Dies könnte mit der Abweichung der Dicke der Kunststoffzwischen- schicht zusammenhängen (vergleiche Tabelle 4-2). Für eine Voruntersuchung ist das Aufzeigen einer klaren Tendenz jedoch als ausreichend zu bewerten.

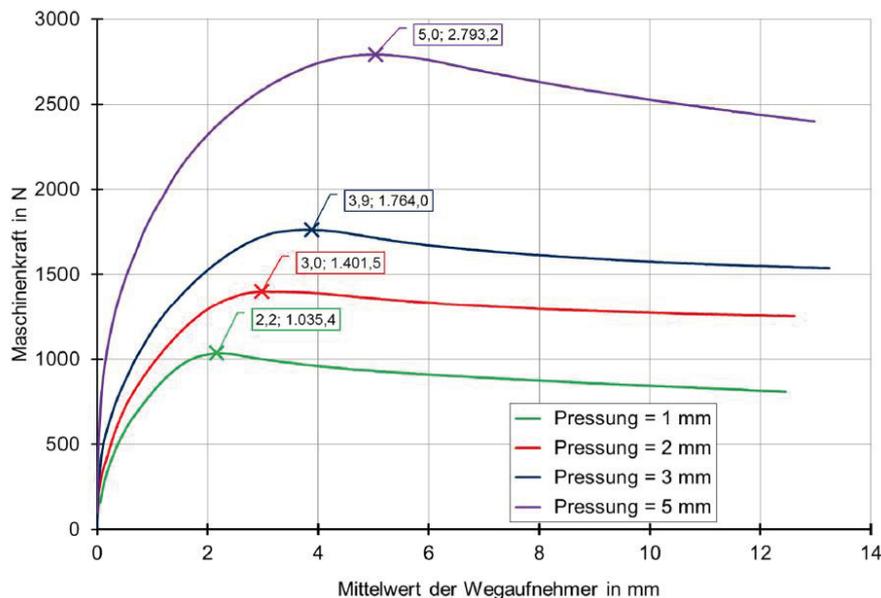


Abbildung 4-7: Einfluss der Pressung auf die Kraft-Weg-Beziehung der Versuchsreihe 1/2/3/5_R1_2_65_8

4.3.2 Formfaktor

Ein Einfluss der Form auf die Kraft-Weg-Beziehung konnte bei über 80% der Versuche nicht festgestellt werden. Ob dies auf die Dimension der Probekörper oder die kombinierte Schub-Druckbeanspruchung zurückzuführen ist, kann nicht abschließend geklärt werden. Denkbar ist auch eine zu kleine Streuung des Formfaktors bei den untersuchten Formen. Deshalb werden uniaxiale Druckversuche mit den gleichen Probekörpergeometrien durchgeführt. Eine leichte Variation der Ergebnisse ist zu erkennen. Allerdings ist dies auf die unterschiedliche Klemmfläche der drei Geometrien zurückzuführen.

4.3.3 Härte

Bereits beim Aufbringen der Pressung konnte ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Härten festgestellt werden. Die Kunststoffpads mit einer Härte von ShA 65 und einer Dicke von 4 mm konnten jeweils um 1 mm gestaucht werden, die Kunststoffpads mit einer Härte von ShA 25 und der gleichen Dicke konnten problemlos jeweils um mehr als 2 mm gestaucht werden. Der Schubwiderstand der härteren Pads ist bei geringerer Pressung deutlich größer als der des weicheren Pads. Exemplarisch ist dies in Abbildung 4-8 für die Versuche 4_R2_2_25_4 und 2_R2_2_65_4 dargestellt.

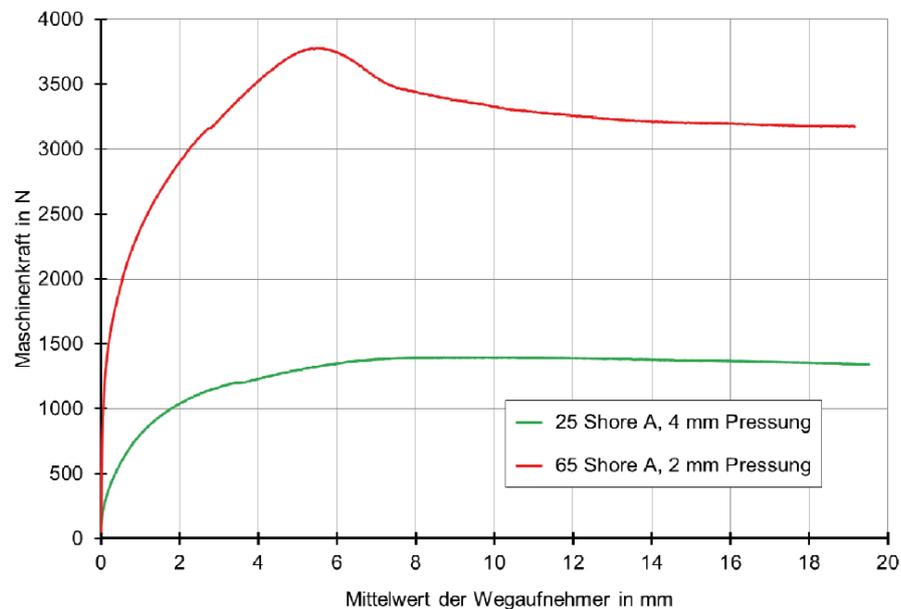


Abbildung 4-8: Einfluss der Härte auf die Kraft-Weg-Beziehung der Versuche 4_R2_2_25_4 und 2_R2_2_65_4

4.3.4 Belastungsgeschwindigkeit

Es wurden bei den drei untersuchten Belastungsgeschwindigkeiten deutliche Tendenzen bezogen auf den Schubwiderstand festgestellt. Je höher die Versuchsgeschwindigkeit gewählt wurde, desto steifer verhielten sich die Kunststoffpads. Die Versuchsreihe 2_R1_2/10/100_25_4 zeigt diesen Effekt beispielhaft (siehe Abbildung 4-9). Daraus folgt, dass Versuche zur Materialkennwertermittlung eher mit geringen Versuchsgeschwindigkeiten durchzuführen sind. So wird sichergestellt, dass die tatsächliche Steifigkeit der Kunststoffzwischen-schicht nicht überschätzt wird für die eher geringen Belastungsgeschwindigkeiten im Bauwesen.

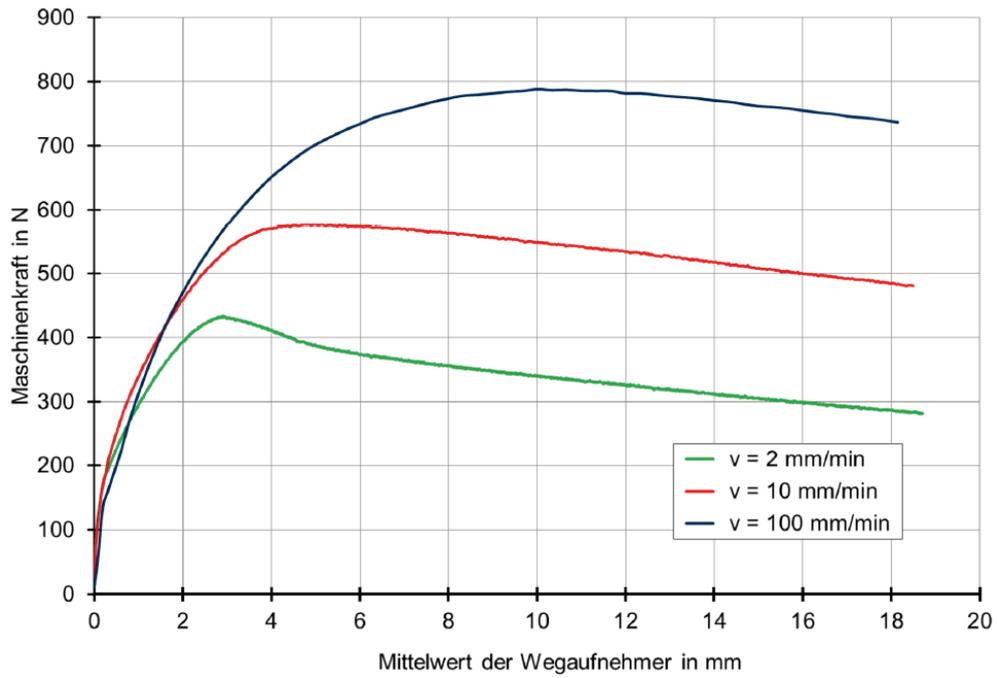


Abbildung 4-9: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Kraft-Weg-Beziehung der Versuchsreihe 2_R1_2/10/100_25_4

5 Materialcharakteristik und Experimentelle Untersuchungen

5.1 Allgemeines

Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes liegt in der Materialcharakterisierung kleinteiliger Elastomerlager zur Reduzierung von Glasdicken im Fassadenbereich. Hierzu wurden zahlreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um das strukturelle Verhalten für Zug- und Druckbelastungen sowie viskoelastische Eigenschaften der gummiartigen Materialien zu identifizieren.

5.1.1 Materialien

Die experimentellen Untersuchungen gliedern sich in vier unterschiedliche Werkstoffgruppen, wobei sich eine zweite Gliederungsebene hinsichtlich der Untersuchungen unterschiedlicher Shore-A-Härten ergibt. Bei den Untersuchungen wurden Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM), Silikon, thermoplastische Elastomere (TPE) sowie thermoplastische Polyurethane (TPU) analysiert (vgl. Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Übersicht der untersuchten Werkstoffe

Kunststoffbezeichnung	Klassifizierung	Shore A Härte	Hersteller	Eigenschaften
EPDM	Elastomer	50	Kubo Tech AG	<ul style="list-style-type: none"> Farbe schwarz Temperaturbereich -25°C bis +100°C Ozon- und Witterungsbeständigkeit
		60		
		70		
Silikon	Elastomer	40	Kubo Tech AG	<ul style="list-style-type: none"> Farbe transparent -50°C bis +180°C Gute Temperaturbeständigkeit
		50		
		60		
TPE	Thermoplastisches Elastomer	50	KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG	<ul style="list-style-type: none"> Farbe weiß
		60		
		70		
TPU	Thermoplastisches Elastomer	60	BASF Polyurethanes GmbH	<ul style="list-style-type: none"> Farbe schwarz Hohe Beständigkeit gegen Öle, Fette, Sauerstoff und Ozon
		70		
		80		

5.1.2 Vorbemerkungen zum experimentellen Versuchsprogramm

Wird das Einsatzgebiet der zu untersuchenden Elastomerlager betrachtet, welche als Auflager zwischen Glasscheiben und Stahlklemmaltern im Bereich von Fassaden eingesetzt werden, muss das experimentelle Versuchsprogramm den in der Realität vorherrschenden Belastungen entsprechen.

Von großer Relevanz sind daher quasi-statische Zug- und Druckuntersuchungen, Untersuchungen zu den viskosen Eigenschaften der Materialien zur Ableitung zeitabhängiger Materialgesetze, temperaturabhängige Versuche sowie Langzeituntersuchungen zur Charakterisierung von Kriecheffekten, Langzeitstabilität und Dauerhaftigkeit. Das Langzeitverhalten lässt sich dabei aus den viskosen Eigenschaften der Materialien ableiten [24].

Da es sich bei den zu untersuchenden Materialien um gummiartige Werkstoffe handelt, welche im Allgemeinen als temperatur- und dehnratenabhängige Materialien beschrieben und weiterhin über viskoelastische bzw. hyperelastische Materialmodelle abgebildet werden, müssen dementsprechend Experimente zur Charakterisierung der hyperelastischen Eigenschaften sowie Versuche hinsichtlich der Viskoelastizität ausgearbeitet und durchgeführt werden.

Häufig werden hyperelastische Materialmodelle ausschließlich auf Basis von experimentellen uniaxialen Zuguntersuchungen aufgebaut, da weitere Untersuchungen zu aufwendig und kostenintensiv sind [25]. Da in der Realität jedoch multiaxiale Beanspruchungszustände die Regel sind, können derartige Materialmodelle zu unphysikalischen also unrealistischen Ergebnissen führen. Insbesondere unter Betrachtung hydrostatischer Belastungsszenarien, welche die Schädigung bzw. die Schädigungsprozesse

von gummiartigen Materialien initiieren, führen auf Basis von uniaxialen Versuchen aufbauende Materialformulierungen unter Umständen zu einem falschen Antwortverhalten der Struktur [26]. Ein vollständiges Versuchsprogramm zur Charakterisierung hyperelastischer Materialmodelle von gummiartigen Materialien, welches den gesamten Spannungsbereich im sechsdimensionalen Spannungsraum abbildet, ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

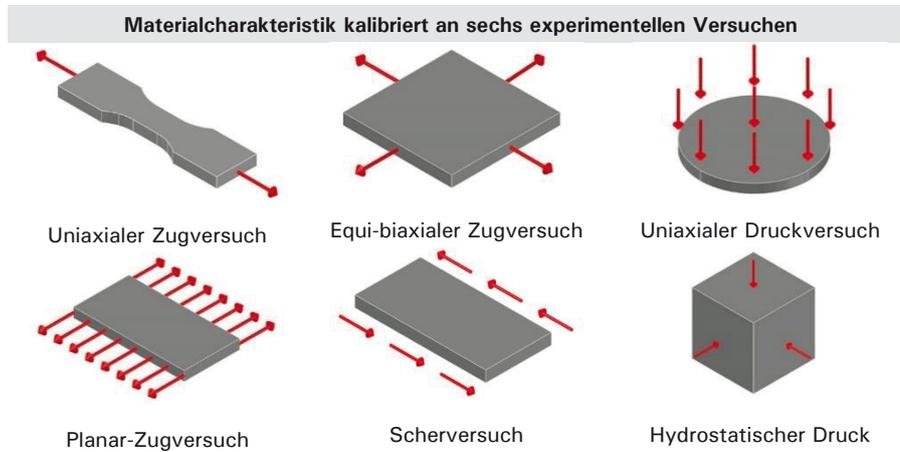
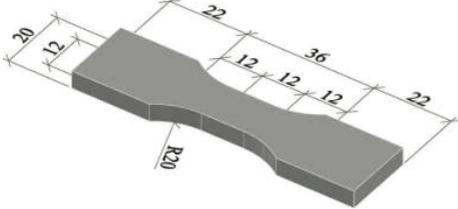
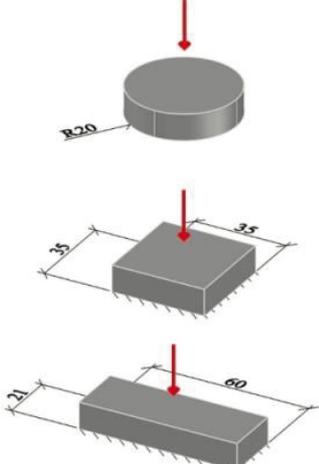


Abbildung 5-1: Vollständiges Versuchsprogramm gummiartiger Materialien

Auf Grund des hohen experimentellen Aufwands und der damit verbundenen Kosten erfolgt im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Beschränkung des Versuchsprogramms auf uniaxiale Zug- und Druckversuche. Die Beschränkungen der mechanischen Untersuchungen lassen sich damit begründen, dass einerseits das vornehmliche Belastungsszenario als Druckbeanspruchung aus angreifenden Windkräften resultiert, andererseits die Untersuchung der Festigkeiten der Materialien bzw. die Entwicklung von Festigkeitshypothesen von geringer Bedeutung ist, da die Belastungsszenarien im Gebrauchslastniveau bleiben, sodass hydrostatische Versuche aus dem Versuchsprogramm herausfallen. Weitere Erklärungen hinsichtlich der Festlegung des experimentellen Versuchsprogramms auf uniaxiale Versuche werden in Abschnitt 5.1.3 gegeben.

Die Prüfkörpergeometrien sind der Tabelle 5-2 zu entnehmen. Bei den Zugproben wird die Geometrie nach Becker [27] verwendet. Die Geometrie der Druckproben ergibt sich zum einen aus der Forderung nach DIN 18008 Teil 3 [2], in der eine minimale gedrückte Fläche von Klemmhaltern von 1000 mm^2 gefordert wird, zum anderen soll eine möglichst große Streubreite des Formfaktors nach BATTERMANN und KÖHLER [1] erzielt werden.

Tabelle 5-2: Gewählte Prüfkörper-Geometrien für uniaxiale Zug- und Druckversuche

Name	Normung/Bezugsquelle	Geometrie	Versuchsmatrix
Uniaxialer Zugversuch	Dissertation BECKER [27]		<ul style="list-style-type: none"> • Monoton: 5 Proben je Material und Härte (60 Versuche) • Zyklisch: 1 Probe je Material für SH60 mit 3 Zyklen (4 Versuche)
Uniaxiale Druckversuche	In Anlehnung an BATTERMANN UND KÖHLER [1]		<ul style="list-style-type: none"> • Monoton: 4 Proben je Material, Härte und Geometrie (144 Versuche)

5.1.3 Anmerkungen zu den Spannungszuständen unterschiedlicher experimenteller Untersuchungen

Für die experimentelle Ermittlung von Materialkennwerten sind quasi-statische Zug- und Druckuntersuchungen von großer Relevanz. Ebenfalls von großer Bedeutung sind Untersuchungen zu den viskosen Eigenschaften, temperaturabhängige Versuche sowie Langzeituntersuchungen zur Charakterisierung von Kriecheffekten, der Langzeitstabilität und der Dauerhaftigkeit.

Im Allgemeinen ist der uniaxiale Zugversuch das einzige Experiment, bei dem innerhalb des zu untersuchenden Probekörpers ein uniaxialer Spannungszustand gewährleistet werden kann, sodass Materialmodelle basierend auf und kalibriert anhand von uniaxialen Zugversuchen in der Anwendungspraxis großen Anklang finden [28]. Dieser klar abgegrenzte, uniaxiale Spannungszustand ist notwendig für die Parameteridentifikation hyperelastischer Materialformulierungen, um physikalisch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten [27].

Dennoch ist anzumerken, dass der genannte uniaxiale Spannungszustand nur einen kleinen Anteil der in der Praxis auftretenden Belastungsszenarien repräsentiert, sodass die abgeleiteten Materialmodelle auch in der Lage sein müssen, komplexere Spannungszustände, wie den inhomogenen Schubtest nach DE BORST & VAN DEN BOGERT [29], abbilden zu können.

So ist es nicht verwunderlich, dass in der Literatur gerade bei komplexen Experimenten, wie dem nicht-homogenen Schubtest bzw. biaxialen Zugversuchen unter asymmetrisch induzierten Verzerrungszuständen, unphysikalische bzw. sich widersprechende Resultate hervorgehen [28], [30], [31]. Für den inhomogenen Schubtest ist die Fehleranfälligkeit bzw. das unphysikalische Verhalten auf Materialmodelle zurückzuführen, welche die zweite Invariante berücksichtigen. Die Fehleranfälligkeit bei biaxialen Zugversuchen lässt sich auf die komplexe experimentelle Durchführung zurückführen. Zusätzlich haben die Anisotropie des Materials unterschiedliche Probenherstellungs- und Probenlagerungsbedingungen sowie eine imperfekte Elastizität einen Einfluss auf die experimentellen Ergebnisse, welche hinsichtlich der Parameteridentifizierung nicht zu vernachlässigen sind.

Um aufzuzeigen, dass nur bei Zugversuchen ein homogener Spannungszustand gewährleistet werden kann, wird in Abbildung 5-3 für unterschiedliche experimentelle Aufbauten die Triaxialität basierend auf numerischen Untersuchungen ausgewertet. Dabei werden uniaxiale Zug- und Druckversuche, Schubversuche, biaxiale und triaxiale Versuche numerisch nachgebildet.

Um die Spannungs-Triaxialität im Hauptspannungsraum auswerten zu können, wird ein Kriterium basierend auf der Arbeit nach SIKORA [32] eingeführt, welcher einen Faktor bestimmt, der die Abweichung vom hydrostatischen Spannungszustand definiert. Die Formulierung der Triaxialitätsabweichung auf Basis von Hauptspannungen bietet den Vorteil der Invarianz gegenüber Koordinatentransformationen.

$$\eta_{Hyd.} = -\frac{2}{\eta} = 2 \frac{\sigma_{vm}}{tr(\sigma)} = \frac{\sqrt{6[(\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2]}}{\sigma_m} \quad (5-1)$$

Mit

$$\sigma_m = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (5-2)$$

In [32] wird vorgeschlagen den diskreten, theoretischen Wert der Spannungs-Triaxialität auf einen definierten Bereich aufzuweiten. Die Abweichung vom theoretischen Wert wird dabei auf $\pm 10\%$ gesetzt, woraus sich Triaxialitätsbereiche gemäß Tabelle 5-3 ergeben. Diese Bereiche werden später verwendet, um die numerisch ermittelten, beliebigen Spannungszustände einem definierten Spannungszustand zuzuordnen.

Tabelle 5-3: Triaxialitätsbereich theoretisch / 10 % Abweichung vom ideellen Wert nach [32]

Zustand	Theoretischer Wert $\eta_{Hyd.}$	Triaxialitätsbereich nach Sikora 10 % Abweichung	Triaxialitätsbereich nach Kolling 10 % Abweichung
Triaxial	0	$0 \leq \eta_{Hyd.} \leq 0,3$	$-\infty \leq \eta \leq -6,667$
Biaxial	3	$2,6 \leq \eta_{Hyd.} \leq 3,5$	$-0,77 \leq \eta \leq -0,57$
Uniaxial	6	$4,5 \leq \eta_{Hyd.} \leq 8,2$	$-0,44 \leq \eta \leq -0,24$
Schub	∞	$ \eta_{Hyd.} \geq 35$	$\eta \geq -0,057$

Unter Parametrisierung des Hauptspannungstensors, kann die Triaxialität der Hauptspannungen in Abhängigkeit von zwei Faktoren visualisiert werden. Mit Hilfe dieser Graphen ist es möglich, beliebige Spannungszustände in Triaxialitätsbereiche, bi- und uniaxiale Bereiche sowie Bereiche des homogenen Schubes einzuordnen. Ferner können Bereiche mit einer gemischten Belastung identifiziert werden.

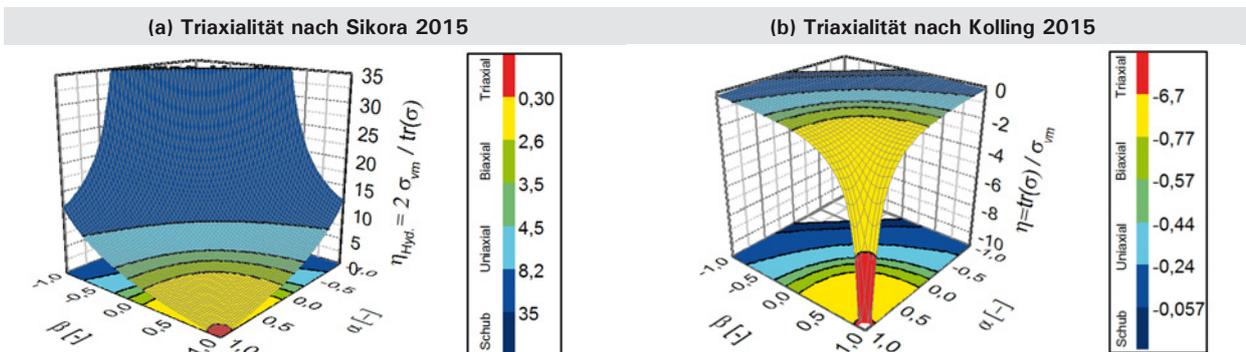


Abbildung 5-2: Triaxialität unter Parametrisierung des Hauptspannungstensors

Der Hauptspannungstensor wird dabei über die beiden variablen α und β wie folgt modifiziert:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \alpha\sigma & 0 \\ 0 & 0 & \beta\sigma \end{pmatrix} \quad (5-3)$$

Der Bereich des homogenen Schubspannungszustands kann mit dem Triaxialitätskriterium nach Sikora nicht dargestellt werden, da sich dieser im hinteren Bereich des Graphen verbirgt. Daher wird zusätzlich auf das gängige Kriterium $\eta = -2/\eta_{hyd.}$ zurückgegriffen, da hier eine eindeutige Zuordnung des Schubspannungszustandes erfolgen kann und dieser auch visualisierbar ist.

Es folgt nun die Darstellung der Ergebnisse hinsichtlich der Triaxialität basierend auf unterschiedlichen numerischen Modellen. Damit soll aufgezeigt werden, dass alle vom Zugversuch (hydrostatischer Druckversuch) abweichenden experimentellen Untersuchungen keinen homogenen Beanspruchungszustand darstellen und somit die Parameteridentifikation basierend auf zusätzlichen experimentellen Untersuchungen wie triaxiale Versuche sowie Schubversuche kritisch zu hinterfragen ist und demzufolge im Rahmen dieses Forschungsvorhabens keine Anwendung findet.

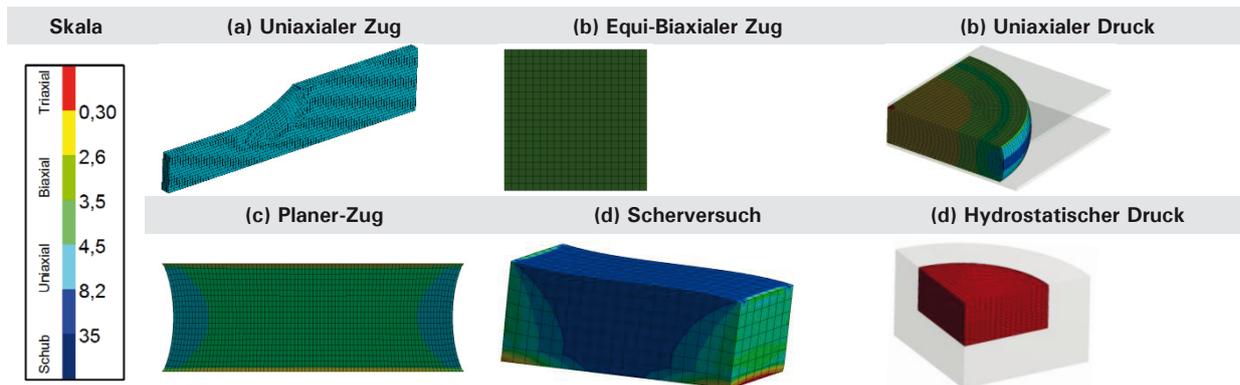


Abbildung 5-3: Untersuchung der Triaxialität anhand unterschiedlicher numerischer Modelle

Aus Abbildung 5-3 geht hervor, dass lediglich im uniaxialen und equi-biaxialen Zugversuch eine uniaxiale bzw. eine reine Form des Spannungs- und Dehnungsverhaltens vorliegt. Betrachtet man den Schubversuch und den uniaxialen Druckversuch, welcher Reibeffekte berücksichtigt, fällt deutlich auf, dass der gewünschte uniaxiale Beanspruchungszustand nur in bestimmten Bereichen auftritt, sodass im Rahmen dieses Forschungsprojektes die experimentellen Untersuchungen auf uniaxiale Zug- und Druckversuche beschränkt wird. Um die Ergebnisse für uniaxialen Druck zu verbessern, ist es zwingend erforderlich, die Reibung zu minimieren. Für den Fall des equi-biaxialen Zugs bzw. des hydrostatischen Druckes entstehen zwar ebenfalls die gewünschten Beanspruchung, allerdings treten hier häufig versuchstechnische Probleme bzw. unverhältnismäßig hohe Kosten auf, sodass derartige Versuche ebenfalls keine Beachtung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes finden.

5.1.4 Anmerkungen zum Energieeintrag

Polymere Werkstoffe weisen ein zeitabhängiges Materialverhalten auf, sodass für die experimentellen Untersuchungen ein Parameter identifiziert werden muss, welcher eine Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Belastungsszenarien ermöglicht.

In [33] wird ein Berechnungsalgorithmus beschrieben, welcher den Energieeintrag zwischen einem uniaxialen Zug- und einem Scherversuch vergleicht. Dabei wird die zu leistende, mechanische Arbeit zur infinitesimalen Verzerrung eines Einheitsvolumens für den uniaxialen Zugversuch berechnet. Basierend auf dem berechneten Energieeintrag in ein Einheitsvolumen wird für die Scherversuche die Versuchsgeschwindigkeit bzw. die Dehnrage ermittelt, welche von der Dehnrage des Zugversuchs sowie der gemessenen Querdehnrage abhängt. Hieraus ergeben sich zwar Unterschiede der Dehnrage beim Vergleich zwischen Zug- und Scherversuchen, allerdings identische Versuchsgeschwindigkeiten für Zug- und Druckversuche.

Innerhalb dieser Arbeit wird daher ein modifizierter Ansatz ausgearbeitet, bei dem das ganze Volumen des Probekörpers betrachtet wird, sodass anders als in [33] die mechanische Arbeit über den gesamten Probekörper integriert wird und nicht nur über einen infinitesimalen Ausschnitt.

Die zu leistende mechanische Arbeit berechnet sich dabei zu:

$$W = \int_V F dl = \int_V \sigma A dl d\varepsilon = V \int \sigma d\varepsilon \quad (5-4)$$

Die Lösung des Integralausdrucks erfolgt unter der Annahme der Linearisierung einer infinitesimalen Verformung, sodass sich die mechanische Arbeit an einem infinitesimalen Volumen zu

$$w_{,dt} = \frac{1}{2} d\sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} d\varepsilon^2 = \frac{1}{2} E d\varepsilon^2 = \frac{1}{2} E \dot{\varepsilon}^2 \quad (5-5)$$

berechnet. Setzt man nun die Ausdrücke der zu leistenden, mechanischen Arbeit zwischen Zug- und Druckversuchen gleich und die spezifische Energie zwischen Zug und Druck ungleich

$$\begin{aligned} W_z &= W_D \\ w_z &\neq w_D \end{aligned} \quad (5-6)$$

ergibt sich eine zu verrichtende Dehnrade für Druckversuche von

$$\dot{\varepsilon}_D = \frac{1}{\dot{\varepsilon}_Z} \sqrt{\frac{V_Z}{V_D}} \quad (5-7)$$

mit

- $\dot{\varepsilon}_D$ = Dehnrade für den Druckversuch
- $\dot{\varepsilon}_Z$ = Dehnrade für den Zugversuch
- V_Z = Referenzvolumen des Zugversuchs
- V_D = Referenzvolumen des Druckversuchs

Das Referenzvolumen des Zugversuchs bezieht sich dabei auf das Volumen, in dem mechanische Arbeit geleistet wird. Demzufolge wird nur der Bereich betrachtet, in dem eine ungehinderte Verzerung stattfindet, also der Bereich der freien Dehnlänge, wohingegen man sich bei den Druckversuchen auf das gesamte Volumen der Probekörper bezieht (vgl. Abbildung 5-4). Da bei den Druckversuchen keine Einspannung in Pressbacken vorliegt.

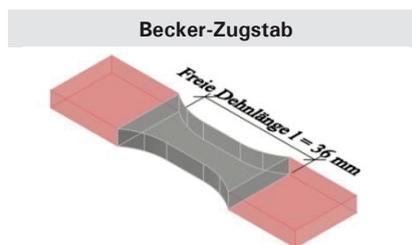


Abbildung 5-4: Freie Dehnlänge für uniaxialen Zugversuch

Um das vorgestellte Verfahren zu verifizieren, wurden numerische Vergleichsstudien durchgeführt, bei denen der Energieeintrag über alle Elemente integriert wurde. Die der FEM zu Grunde liegende Geometrie entsprach denen aus den experimentellen Zug- und Druckversuchen. Die Elementkantenlänge wurde auf 0,5 mm fixiert.

Die Ergebnisse der numerischen Vergleichsrechnung und der analytischen Lösung sind in Abbildung 5-5 dargestellt. Für die analytische Lösung ergibt sich der Energieeintrag zu $W = 794,43$ [mJ]. Auf dieser Grundlage wurde nach Gleichung (5-7) die Dehnrade für die Druckversuche berechnet und als Randbedingung in das numerische Modell übergeben.

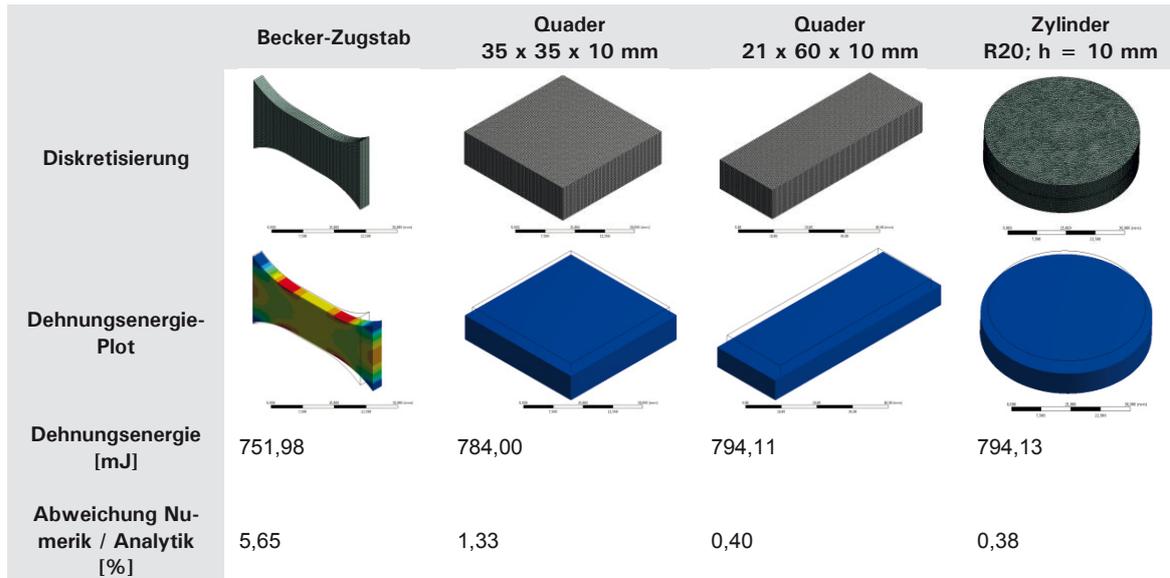


Abbildung 5-5: Verifikation des Verfahrens des Energieeintrags für Zug- und Druckversuche

Der Vergleich zwischen dem analytischen Ansatz und den numerischen Vergleichsrechnungen bestätigt die Richtigkeit der Methode, was mit der geringen Abweichung zwischen den analytischen und numerischen Ergebnissen begründet werden kann. Die Abweichung für den Becker-Zugstab von 5,65 % lässt sich auf den Übergang zwischen freier und eingespannter Dehnlänge der modellierten Probengeometrie zurückführen. Bei einer Konvergenzstudie konnte keine Netzabhängigkeit erkannt werden (vgl. Abbildung 5-6).

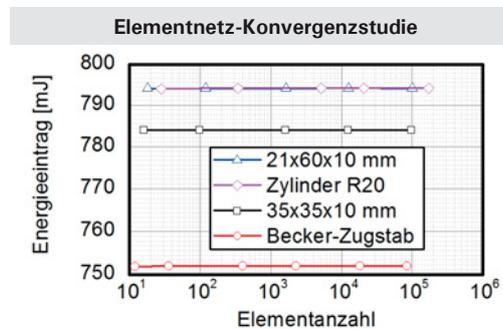


Abbildung 5-6: Darstellung der Elementnetzabhängigkeit

Für die noch folgenden Druckversuche wird die Prüfgeschwindigkeit bzw. die Dehnrage nach Gleichung (5-7) berechnet und festgelegt. Die Basis der Berechnung liegt auf den Zugversuchen an dem Becker-Zugstab, bei denen eine Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min festgelegt wurde. Auf dieser Grundlage ergeben sich exemplarisch für das Material KUBO-EPDM folgende Prüfgeschwindigkeiten für die Druckversuche (vgl. Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: Prüfgeschwindigkeit v der Zug- und Druckversuche ermittelt nach der modifizierten Energieeintragsmethode

Becker-Zugstab	Quader 35 x 35 x 10 mm	Quader 21 x 60 x 10 mm	Zylinder R20; h = 10 mm
$v_z = 5,00 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$	$v_z = 0,48 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$	$v_z = 0,48 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$	$v_z = 0,48 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$

5.1.5 Anmerkungen zur optischen Versuchsauswertung

Die Auswertung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der experimentellen Untersuchungen erfolgt über eine Auswertung der optischen Aufnahmen von an den Proben angebrachten diskreter, lokaler Messmarken. Die Messmarken werden dabei auf die zu untersuchende Probe appliziert. Über eine Punktverfolgung wird anschließend das lokale Deformations- bzw. Dehnungsverhalten ermittelt.

Um die Punktverfolgung während eines Versuchs durchführen zu können, wird ein MATLAB®-Skript geschrieben, welches in der Lage ist, eine Video-Datei bzw. eine Bildfolge auszulesen und das lokale Deformationsverhalten der einzelnen Messmarken zu bestimmen.

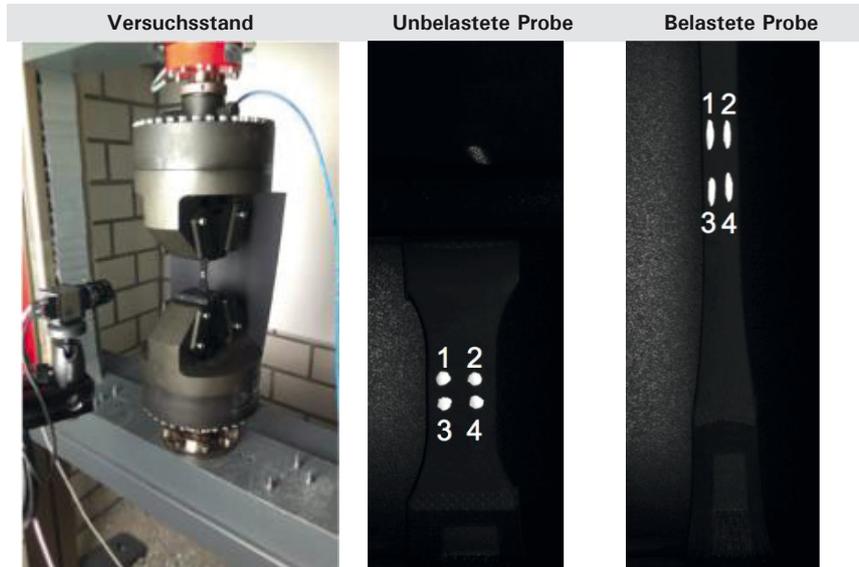


Abbildung 5-7: Darstellung des Versuchsaufbaus einer Zugprüfung

Das Grundgerüst des MATLAB®-Skripts besteht darin, die aufgenommenen Bilder bzw. Videos einzulesen, die applizierten Messmarken aller Bilder automatisch über ihre Pixelfläche zu identifizieren und deren Schwerpunktkoordinaten zu berechnen. Hinsichtlich der Kalibrierung der aufgenommenen Bilder/Videos und der Durchführung der Versuche, müssen alle eingelesenen Bilder während der Prüfdauer in der zeitlichen und einheitlichen geometrischen Reihenfolge abgespeichert werden, um die Deformation der Probe in Relationen der Markierungen untereinander berechnen zu können.

In Tabelle 5-5 wird exemplarisch die Anordnung der Messmarken für die uniaxialen Zugversuche und die aus der Videoauswertung berechenbaren Messgrößen dargestellt. Bei der Auswertung der uniaxialen Druckversuche wird auf eine Punktverfolgung verzichtet, da die Messwerte im Bereich von $6 \leq t \leq 10$ [mm] liegen und hier die Applizierung der Messmarken nicht möglich ist. Die Auswertung erfolgt für diese Versuche anhand des Kraft- und Wegsignals der Prüfmaschine.

Tabelle 5-5: Messmarkenanordnung für den uniaxialen Zugversuch und ableitbare Messgrößen

Versuchstyp	Messmarken	Ableitbare Messgrößen
Uniaxialer Zugversuch		Spannung, Längsdehnung, Querdehnung, Querdehnzahl

5.1.6 Anmerkungen zur statischen Auswertung

In Abschnitt 5.2.4 wird das Spannungs-Dehnungs-Verhalten aller uniaxialen Zugversuche ausgewertet, welches getrennt nach Material und Shore-A-Härte dargestellt wird. Die Auswertung erfolgt mittels deskriptiver Statistik, sodass in diesem Abschnitt beispielhaft das methodische Vorgehen der sta-

tistischen Auswertung für das Material Kraiburg-TPE-SH50 vorgestellt wird. Die deskriptive, auch beschreibende Statistik genannt, ist die Erhebung und Aufbereitung eines großen Datenmaterials in strukturierter und übersichtlicher Form durch Graphiken, Tabellen oder ähnlichem.

In Abbildung 5-8 sind die Spannungs-Dehnungs-Graphen exemplarisch gegenübergestellt und mittels deskriptiver Statistik ausgewertet. Die Auswertung der Streuung von Experimenten erfolgt im Allgemeinen über die Ermittlung des Standardfehlers (Streuung des Mittelwertes) sowie der Standardabweichung (Streuung des Einzelwertes). Der Standardfehler ist dabei ein Maß für die Variabilität des Mittelwertes der Stichprobe, wohingegen die Standardabweichung ein Maß für die Variabilität der Datenwerte einer Stichprobe darstellt. Bei der Auswertung werden Gauß'sche Normalverteilungen vorausgesetzt, sodass die Standardabweichung auch als reale Streuung beziehungsweise den Standardfehler als theoretische Streuung der Mittelwerte verstanden werden kann.

Die in Abbildung 5-8 dargestellten Graphen (a) - (c) zeigen die Spannungs-Dehnungs-Diagramme und deren Standardfehler bzw. Standardabweichung, wobei der Standardfehler als ein Streuungsmaß bezogen auf den Stichprobenumfang und den Mittelwert zu verstehen ist. Die Standardabweichung gibt hingegen die einfache Streuung vom Mittelwert ($\bar{x} \pm 1 \cdot SD$) unter Annahme einer Normalverteilung an. Die einfache Standardabweichung entspricht demzufolge einer Wahrscheinlichkeit, dass 68,3 % aller Proben innerhalb der angegebenen Streubreite liegen. Für die zwei- bzw. dreifache Standardabweichung ergeben sich Wahrscheinlichkeiten von 95,4 % bzw. 99,7 %.

Unter näherer Betrachtung des Graphen (a) mit einem Probenumfang von $n=2$, bei dem eine lineare Funktion einer quadratischen Funktion gegenübergestellt ist, fällt auf, dass die Standardabweichung eine zu geringe Präzision aufzeigt. Das heißt, starke Abweichungen der experimentellen Daten untereinander führen zu einer Verschlechterung der Präzision der Standardabweichung infolge der quadratischen Gewichtung. Weiterhin kommt der Fehler aufgrund des geringen Stichprobenumfanges zustande. Der Standardfehler hingegen gibt die minimalen bzw. maximalen Funktionswerte wieder.

Werden hingegen experimentelle Ergebnisse mit einem höheren Probenumfang (Graph (b)) untersucht, zeigt der Standardfehler eine zu hohe Präzision, sodass bei einem Probenumfang von $n \geq 5$ die Auswertung experimenteller Daten mittels Standardabweichung vorzuziehen ist. Zeigen die experimentellen Ergebnisse jedoch große Unterschiede untereinander, führt die Standardabweichung zu einer zu kleinen Abweichung bzw. einer fehlerhaften Präzision (vgl. Abbildung 5-8-(c)).

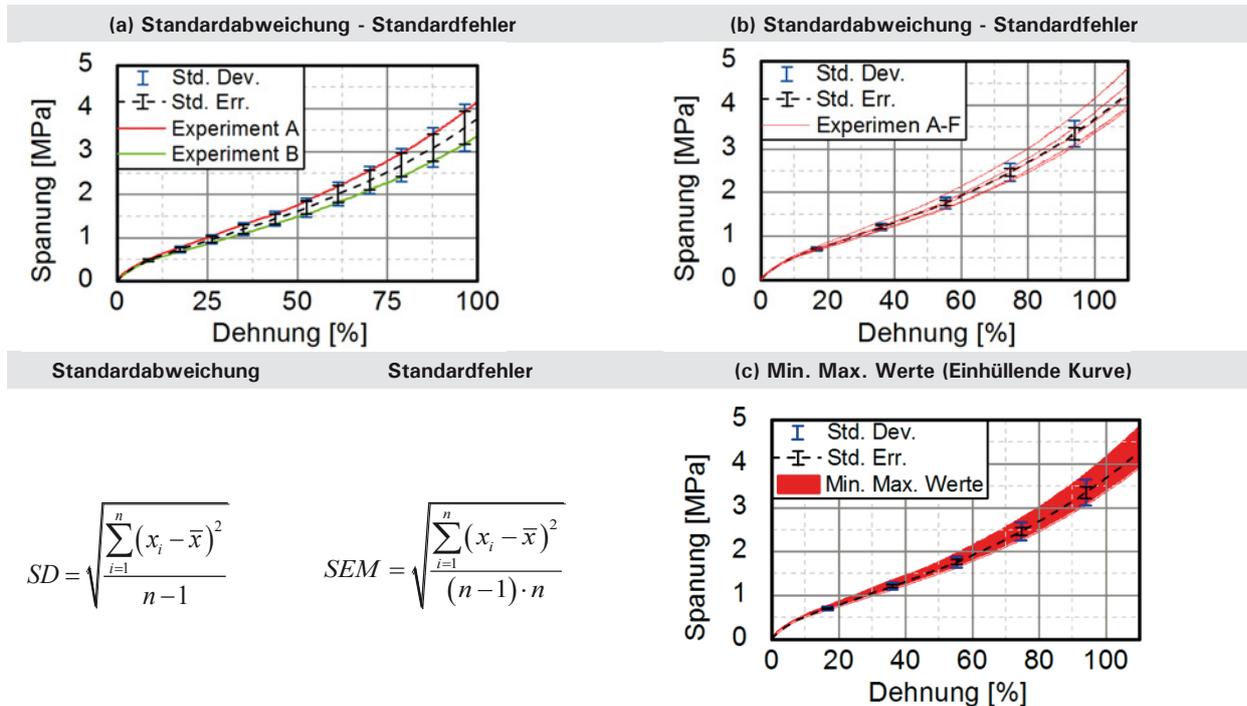


Abbildung 5-8: Vergleich zwischen Standardabweichung, Standardfehler und einhüllende Spannungs-Dehnungs-Kurven

Die Auswertung der experimentellen Daten erfolgt nachfolgend über die Auswertung mit einer einfachen bzw. dreifachen Standardabweichung, um sicherzustellen, dass sich 68,3% bzw. 99,7 % der Messwerte innerhalb des geforderten Intervalls befinden. Bei Durchführung weiterer, sich wiederholender experimenteller Untersuchungen unter gleichen Laborbedingungen wird diese Methode ebenfalls angewendet.

Hinsichtlich der noch folgenden numerischen Untersuchungen erfolgt die Kalibrierung der hyperelastischen Materialmodelle auf Basis der Mittelwerte der experimentellen Kurven. Zur Validierung und Verifikation der numerischen Untersuchungen wird jedoch die Einhüllende (min. / max. Werte) der experimentellen Untersuchungen den numerischen Resultaten gegenübergestellt.

5.2 Monotone, uniaxiale Zugversuche

5.2.1 Allgemeines

Die Prüfung von polymeren Werkstoffen ist derzeit in der DIN EN ISO 527-1 geregelt [34]. Dennoch wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes auf die in [27] beschriebene Prüfkörpergeometrie zurückgegriffen, da diese eine ideale Form beschreibt, welche keine Einschränkungen hinsichtlich der Versuchsgeschwindigkeit und einem uniaxialen Spannungszustand aufweist. Aufgrund dieser Tatsache sind Prüfungen unter quasi-statischen und dynamischen Bedingungen möglich unter Gewährleistung einer Vergleichbarkeit für stark unterschiedliche Dehnraten. Der Prüfkörper nach [27] wird im Folgenden als Becker-Zugstab bezeichnet und beschreibt einen Kompromiss zwischen der in den Zugstab eingebrachten Energie bzw. Dehnraten und einem uniaxialen Spannungszustand. Außerdem ist der Becker-Zugstab deutlich breiter als die Normgeometrien. Dies erlaubt die Applikation von zwei nebeneinander liegenden Messmarken: Das hat zur Folge, dass die Querdehnung der Zugprobe leicht gemessen und ausgewertet werden kann. Da in dem vorliegenden Forschungsprojekt der Bereich des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit untersucht werden soll, welcher mit einer Zugdehnung von ungefähr 50% beschrieben wird, kann bei den Zugversuchen von einer uniaxialen Belastung ausgegangen werden. Diese Bereiche entsprechen typischen Anwendungsgrenzen gummiartiger Materialien [35].

5.2.2 Probenherstellung

Auf die Herstellung der Halbzeuge in Form von Spritzgussplatten, aus denen die Probekörper gestanzt wurden, konnte keinen Einfluss genommen werden, da diese von den kooperierenden Unternehmen angeliefert wurden. Die Herstellung der gummiartigen Platten erfolgt im Spritzgussverfahren, bei dem über eine Spritzgießmaschine der Werkstoff zunächst verflüssigt und anschließend bei hohem Druck in die entsprechende Form gebracht wird. Durch einen simplen Abkühlvorgang bzw. eine Vernetzungsreaktion geht der verflüssigte Kunststoff in seine feste Form über.

Zur Herstellung der Prüfkörper mit den Maßen des Becker-Zugstabes, wurden zwei unterschiedliche Verfahren getestet. Zum einen wurden die Prüfkörper durch Fräsen in die entsprechende Form gebracht, zum anderen erfolgte die Herstellung mit einer konventionellen Schneidpresse.

Unter rein optischer Betrachtung der Ergebnisse beider Verfahren ist erkennbar, dass die Prüfkörperherstellung ausschließlich mittels Schneidpresse erstellt werden sollten, da es infolge des Fräsprozesses zu Störstellen im Randbereich kommt, sodass hierdurch eine adäquate Geometrienachbildung nicht gewährleistet werden kann. Infolge der auftretenden Störstellen, welche nicht näher ausgewertet wurden, kann ein homogener, uniaxialer Spannungszustand im randparallelen Bereich nicht gewährleistet werden, was zu einer fehlerhaften numerischen Parameteridentifikation hinsichtlich hyperelastischer bzw. viskoelastischer Materialmodelle führen kann.

Ein exemplarisches Ergebnis der Prüfkörperherstellung mit den oben genannten unterschiedlichen Verfahren ist in Abbildung 5-9 dargestellt.

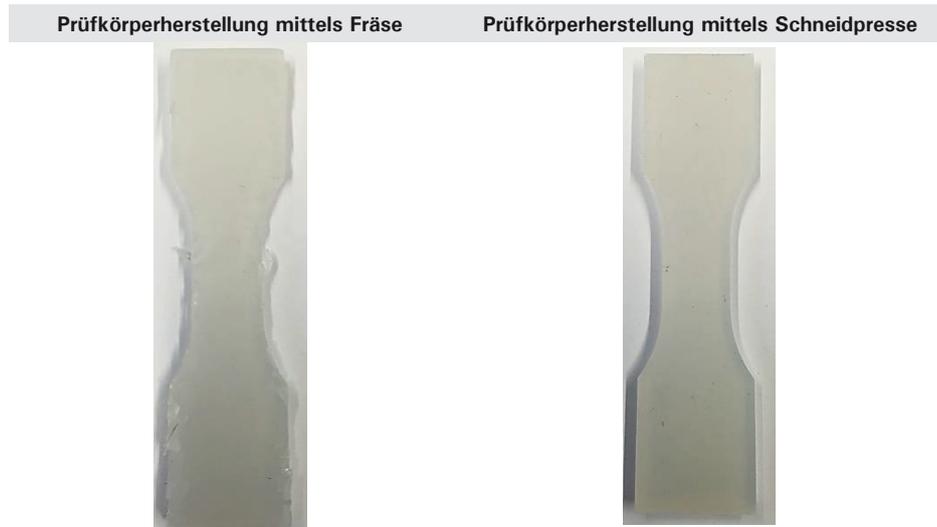


Abbildung 5-9: Unterschiedlich hergestellte Prüfkörper

Einen Einfluss der unterschiedlichen Shore-A-Härten auf die Herstellung der Prüfkörper konnte weder beim Fräsen noch beim Stanzen festgestellt werden.

Ein weiterer zu untersuchender Parameter bei der Herstellung der Prüfkörper liegt in der Auswertung des parallelen Randbereichs des Becker-Zugstabes. Hierbei werden an drei Messstellen die Dicke der Probe mit einer Schieblehre ermittelt. In Abbildung 5-10 ist exemplarisch für das Material Silikon der Firma KUBO die Streuung der Probenbreiten an drei unterschiedlichen Messstellen ermittelt. Dabei werden jeweils die einfache Standardabweichung, die minimalen und maximalen Werte sowie die Mittelwerte dargestellt. Zusätzlich wird über die Box-Diagramme der 25-, 50-, 75 % Bereich dargestellt, in welchen sich die entsprechende prozentuale Anzahl der Datenpunkte befindet.

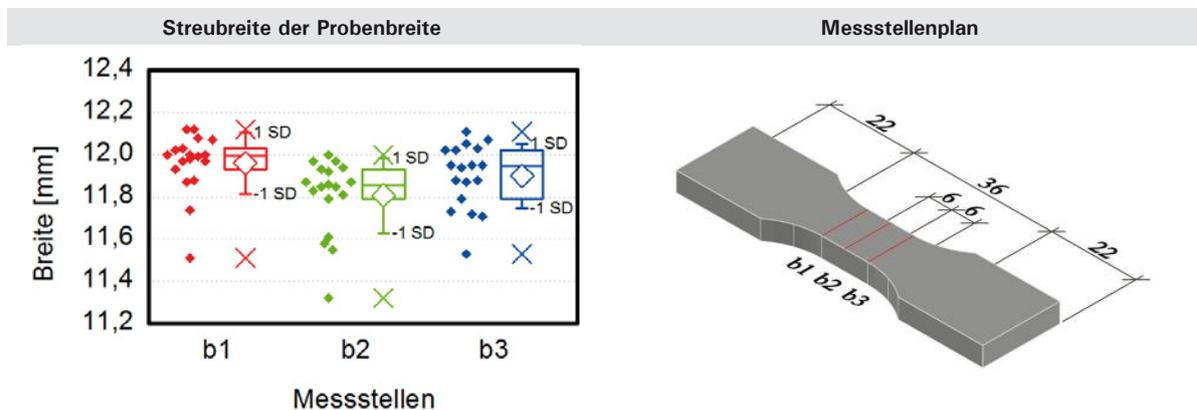


Abbildung 5-10: Streuung der Probenbreiten am Beispiel von Silikon an drei unterschiedlichen Messstellen

Aus Abbildung 5-10 geht hervor, dass sich zum einen der größte Teil des Probenumfangs im Bereich einer Breite von ungefähr 12 mm befindet. Zum anderen ist feststellbar, dass sich die Probenbreite zur Mitte verringert und zu den Enden aufweitet. Dieser Effekt wird auf den Stanzvorgang zurückgeführt, bei dem sich aufgrund von Reibeffekten zwischen Probe, Unterlage und Stanzwerkzeug eine verringerte Probenbreite einstellt. Infolge der geringen Abweichung zwischen den gestanzten Probekörpern zu den ideellen Prüfkörpermaßen, wird in den numerischen Untersuchungen der ideale Querschnitt zu Grunde gelegt. Eine gemessene durchschnittliche Abweichung der Probenbreite von 0,2 mm ist vernachlässigbar gering.

5.2.3 Versuchsdurchführung

Die Prüfung der Becker-Zugstäbe erfolgt an einer elektromechanischen Zugprüfmaschine der Firma Zwick & Roell, welche eine Maximalkraft von 50 kN unter einer maximalen Traversengeschwindigkeit von 600 mm/min aufbringen kann. Die Kraftmessung erfolgt über eine 50 kN Kraftmessdose. Messungenauigkeiten infolge geringer Prüflasten von $F_{max} = 20 \text{ N}$ können trotz der verwendeten Kraftmessdose ausgeschlossen werden, da Sensitivitätsstudien zwischen einer 50 kN und 500 N Kraftmessdose im Kraftbereich von $F = 0\text{-}30 \text{ N}$ eine relative Abweichung von maximal 5 % zeigten (vergleiche Abbildung 5-11). In dieser Studie wurden die beiden Kraftmessdosen unter gleichen Bedingungen geprüft und deren unterschiedliche Ausgabe bei Kräften zwischen 1 und 300 N gemessen.

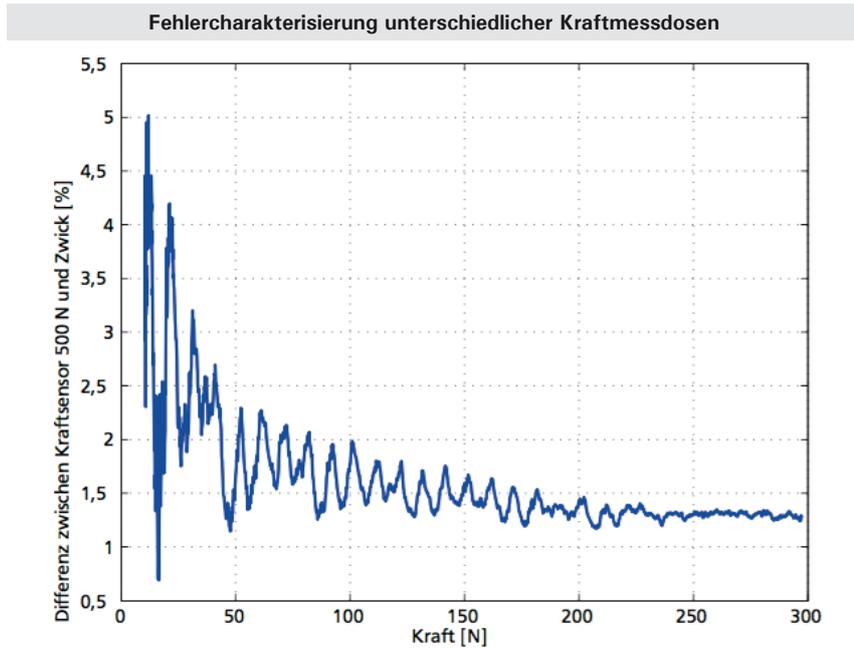


Abbildung 5-11: Differenz zwischen einer 50 kN und einer 10 kN Kraftmessdose

5.2.4 Versuchsauswertung

In den folgenden Graphen wird das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der uniaxialen Zugversuche dargestellt. Dabei wird der gemittelte Wert aller Zugversuche einer Serie, deren Standardfehler sowie deren Standardabweichung dargestellt.

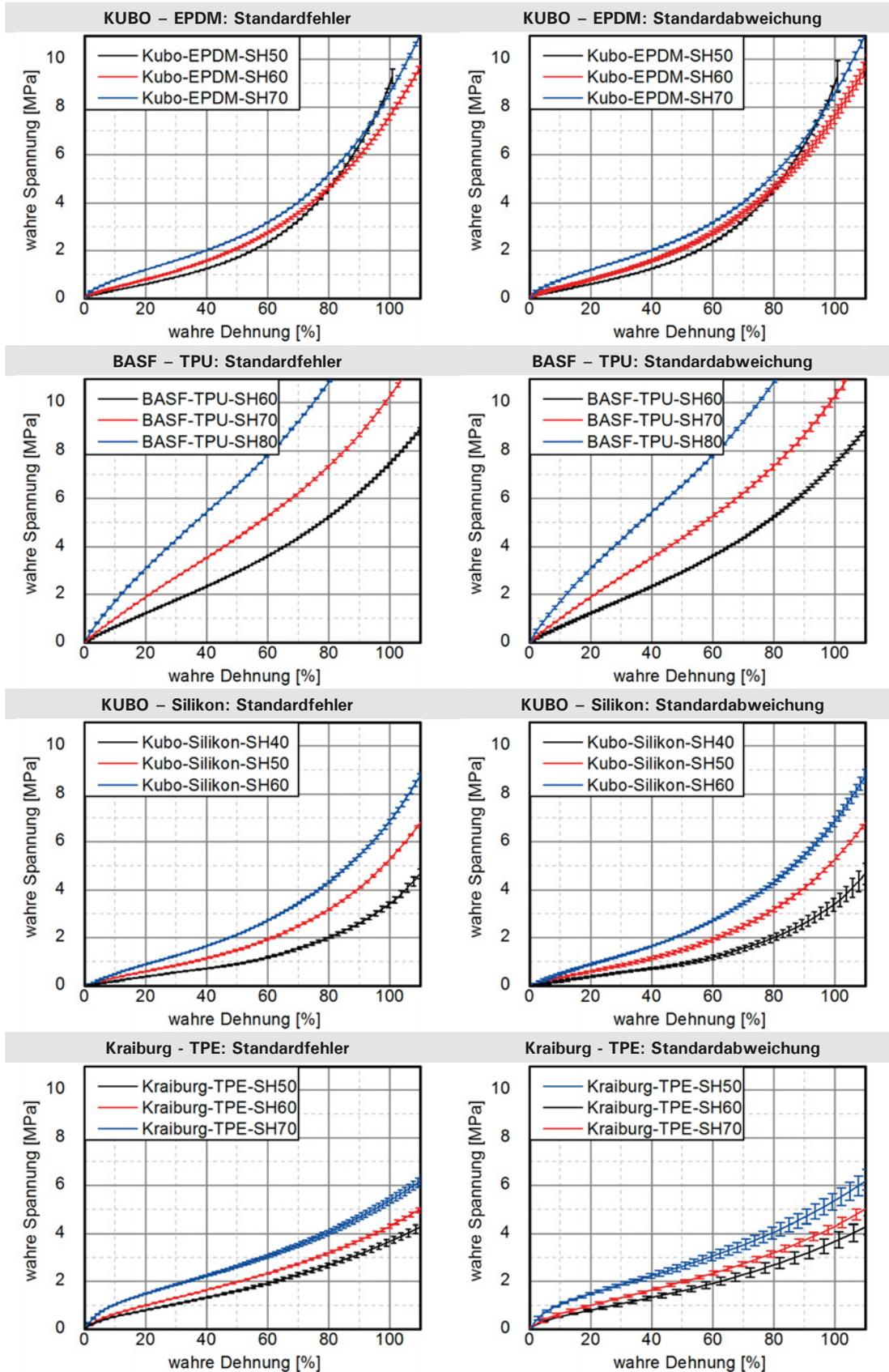


Abbildung 5-12: Arbeitslinien der uniaxialen Zugversuche (SHxx \triangleq Shore-Härte)

Um einen Vergleich zwischen allen Zugversuchen zu erhalten bzw. die Steifigkeiten aller Materialien gegenüberzustellen, kann Abbildung 5-13 herangezogen werden. Darin sind die Ergebnisse der mittleren Spannungs-Dehnungs-Graphen aller untersuchten Materialien zusammengefasst

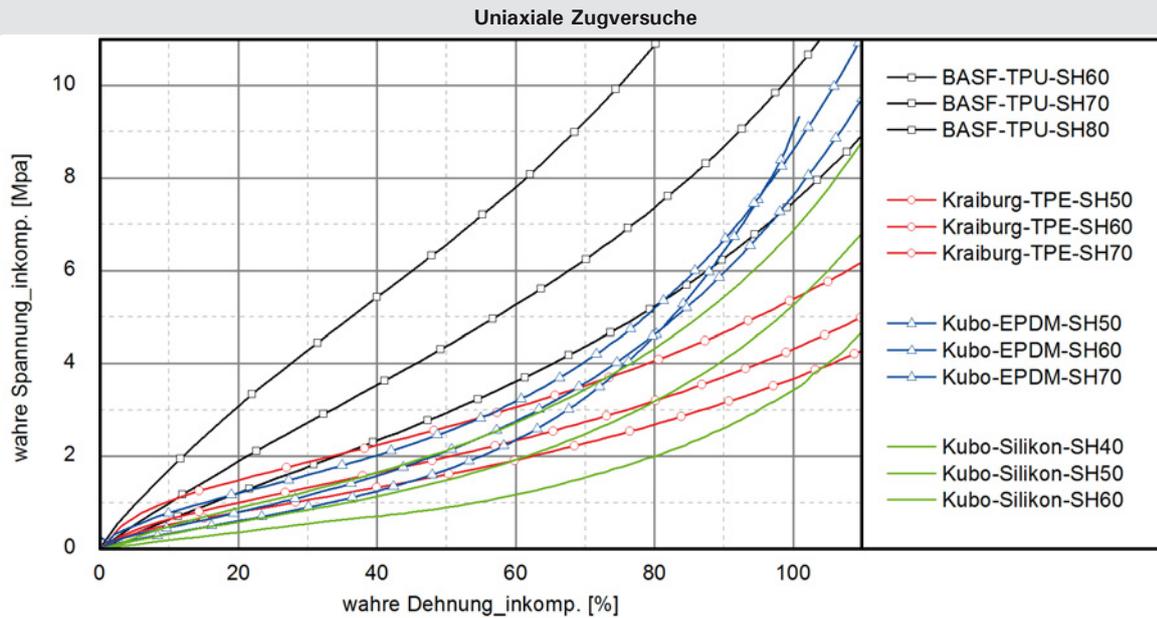


Abbildung 5-13: Spannungs-Dehnungs-Verhalten uniaxiale Zugversuche

Bei Betrachtung von Abbildung 5-12 ist zunächst eine Abhängigkeit zwischen Shore-A-Härten und der Steifigkeit des Materials erkennbar. Nimmt die Shore-A-Härte zu, verhält sich das Material steifer. Diese Erkenntnis gilt allerdings nicht für das Material Kubo-EPDM, da hier ein Kreuzen der Spannungsantworten unterschiedlicher Shore-A-Härten für große Dehnungen (ca. 80 %) zu erkennen ist. Die Materialien EPDM und Silikon verhalten sich in ihrer Systemantwort sehr ähnlich bezogen auf den typischen, nichtlinearen S-förmigen Verlauf. Hier ist ab einer wahren Dehnung von ca. 80 % ein Steifigkeitszuwachs zu erkennen, welcher typisch für derartige Materialien ist.

Die Steifigkeitszunahme liegt darin begründet, dass die Molekülketten von einer ursprünglichen, ungeordneten Knäuelform in einen gerichteten Zustand übergehen. D.h. bei einem uniaxialen Streckvorgang bzw. auch weiteren Streckvorgängen nimmt die Entropie in gummiartigen Materialien ab und die zu leistende mechanische Arbeit ist direkt abhängig von der Entropieänderung [36]. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung (5-8) sowie (5-9) nochmals dargestellt, bei denen die Formänderungsenergie-dichte bzw. die technische Spannung in Abhängigkeit der vernetzten Molekülketten N in einem Einheitsvolumen, der Boltzmann-Konstante k , der absoluten Temperatur sowie der Streckung λ formuliert ist [37].

$$W = \frac{1}{2} NkT (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (5-8)$$

Für den uniaxialen Zug bestimmt sich die technische Spannung zu

$$\sigma_{\text{techn.}} = \frac{\partial W}{\partial \lambda} = NkT (\lambda^2 - \lambda^{-2}) \quad (5-9)$$

Der beschriebene, typische Steifigkeitszuwachs ist ebenfalls beim Material TPE zu erkennen, wobei dieser erst ab einer wahren Dehnung von über 100 % zu erkennen ist. TPU hingegen weist einen deutlich steiferen Verlauf der Arbeitslinien im Vergleich zu den Materialien TPE, EPDM und Silikon auf. Der typische S-förmige Verlauf ist nur ansatzweise zu erkennen, infolge einer hohen, nahezu linear verlaufenden Anfangssteifigkeit.

Wird der Verlauf der Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Längsdehnung betrachtet, so erkennt man bei den Thermoplasten (TPE, TPU) eine Konvergenz der Poissonzahl. Für TPU kann eine Querdehnzahl von 0,5 angegeben werden. Hier ist eine geringe Streubreite und eine deutliche Konvergenz zu erkennen. Bei TPE hingegen ist zwar eine Konvergenz bei großen Dehnungen zu sehen, allerdings existiert hier auch eine große Streubreite der Poissonzahl.

Für das Silikon und das EPDM kann eine mittlere Querdehnzahl ebenfalls nur schwer formuliert werden, da hier eine große Streubreite und eine mäßige Konvergenz existiert. Insbesondere das Silikon weist innerhalb der einfachen Standardabweichung Querkontraktionszahlen von 0,35-0,5 auf, wobei eine

Konstanz der Querkontraktionszahl gerade im Bereich von großen Dehnungen nicht ersichtlich ist. Für das EPDM kann unter Außerachtlassung der Ergebnisse der Shore-A-Härte ShA70 eine gute Konvergenz mit einer mäßigen Streubreite festgestellt werden. Hier ergibt sich der Bereich der Querkontraktionszahl zu 0,43-0,47. Die Querkontraktionszahl der Shore-A-Härte ShA70 weist einen stetig abfallenden Verlauf auf, was möglicherweise auf die optische Versuchsauswertung zurückzuführen ist. Hier ist es gerade im Bereich großer Dehnungen möglich, dass die applizierten Markierungen abplatzen und es dadurch zur fehlerhaften Ermittlung der lokalen Dehnungen kommt.

Die mittleren Querkontraktionszahlen der unterschiedlichen Materialien in Abhängigkeit unterschiedlicher Shore-A-Härten kann Tabelle 5-6 entnommen werden.

Tabelle 5-6: Mittlere Querkontraktionszahlen in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialien

Shore-A-Härte	Kubo - EPDM	Kraiburg - TPE	Kubo - Silikon	BASF - TPU
40	-	-	$\nu = 0,448$	-
50	$\nu = 0,461$	$\nu = 0,464$	$\nu = 0,416$	-
60	$\nu = 0,477$	$\nu = 0,481$	-	$\nu = 0,499$
70	$\nu = 0,464$	$\nu = 0,474$	-	$\nu = 0,494$
80	-	-	-	$\nu = 0,490$

Für die noch folgenden numerischen Untersuchungen wird pauschal bei allen Materialien Volumenkonstanz angenommen, d.h. die Querkontraktionszahl wird zu 0,5 angenommen. In der Literatur wird zwar bei einer Abweichung des Materialwertes vom Idealwert der Querkontraktionszahl von 0,5 empfohlen, die Kompressibilität des Materials zu berücksichtigen [38], jedoch ist der Einfluss der Kompressibilität unter Betrachtung moderater Dehnbereiche, welche sich für dieses Projekt im Gebrauchslastbereich befinden, vernachlässigbar.

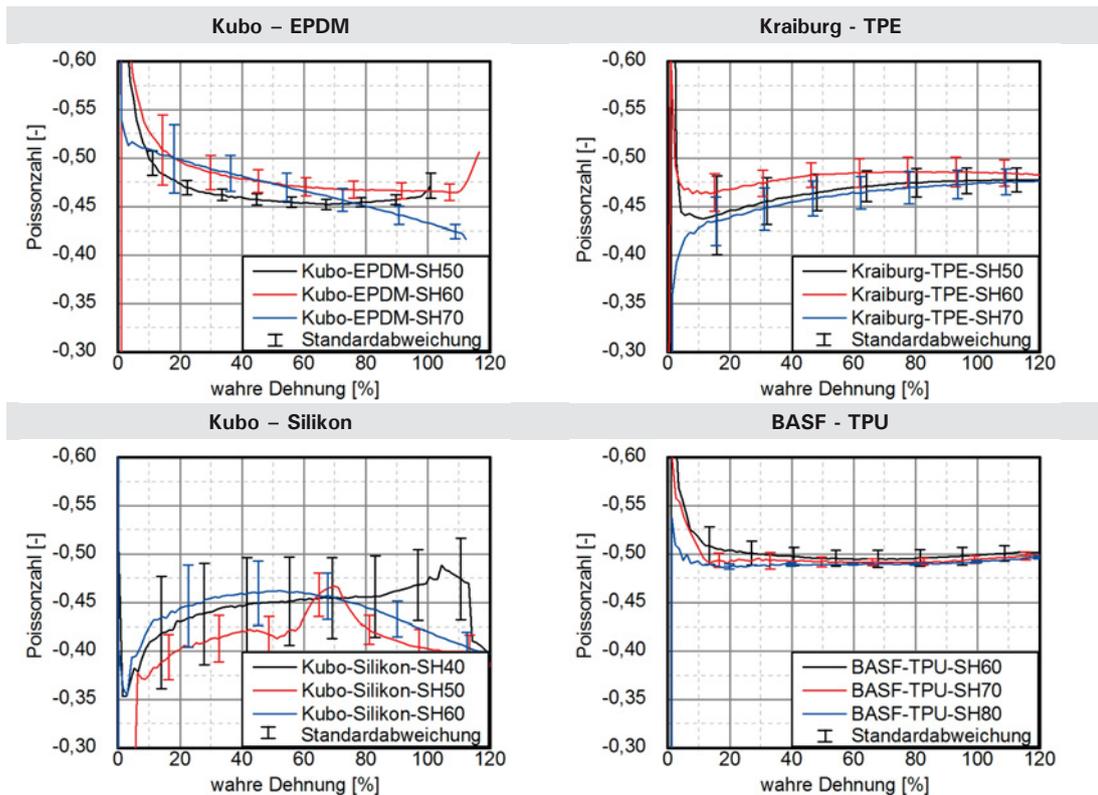


Abbildung 5-14: Poissonzahl in Abhängigkeit der wahren Längsdehnung

Numerische Vergleichsrechnungen basierend auf uniaxialen Zugversuchen belegen, dass für moderate Dehnungsbereiche die Differenz zwischen inkompressiblen, nahezu inkompressiblen und kompressiblen Materialien sehr gering ist.

Zusätzlich zu den numerischen Untersuchungen werden analytische Berechnungen auf Grundlage der folgenden Gleichungen durchgeführt.

$$\sigma_{wahr} = \sigma_{techn.} \left(1 + \varepsilon_{längs, techn.}\right) \quad (5-10)$$

$$\sigma_{wahr} = \frac{\sigma_{techn.}}{\left(1 + \varepsilon_{quer, techn.}\right)^2} \quad (5-11)$$

$$\sigma_{wahr} = \sigma_{techn.} \left(1 + \varepsilon_{techn.}\right)^{-2\nu} \quad (5-12)$$

$$\varepsilon_{wahr} = \ln\left(1 + \varepsilon_{längs, techn.}\right) \quad (5-13)$$

Bei den analytischen Untersuchungen ergibt sich bei moderaten Dehnungsbereichen nur ein geringfügiger Unterschied zu den im Versuch ermittelten Verformungen zwischen inkompressiblen bzw. kompressiblen Materialien. Deutliche Abweichungen ergeben sich für große Verzerrungsbereiche, was auf die Linearisierung der Verzerrungen bei den analytischen Gleichung zurückzuführen ist. Effekte aus der geometrischen Nichtlinearität bleiben dementsprechend unberücksichtigt.

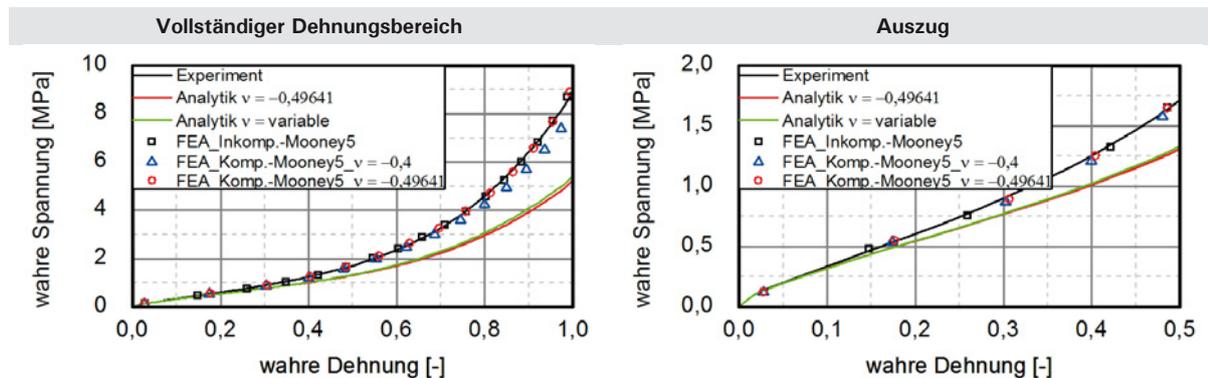


Abbildung 5-15: Vergleich der Spannungen ermittelt aus Versuchen und analytischen Berechnungen bei unterschiedlichen Querkontraktionszahlen

5.3 Zyklische, uniaxiale Zugversuche

5.3.1 Allgemeines

Zyklische Versuche spielen eine wesentliche Rolle für die Materialcharakteristik von gummiartigen Werkstoffen, da infolge zyklischer Beanspruchung Schädigungseffekte eintreten, welche die Materialsteifigkeit erheblich reduzieren. Dieses Verhalten wird als Mullins-Effekt beschrieben, bei dem eine Steifigkeitsminderung für den zweiten Entlastungs-Belastungs-Zyklus auftritt [39]. Für weitere Belastungszyklen wird die Last nicht über die Grenzlast des ersten Zyklus hinaus gesteigert. Bei Überschreitung der Grenzlast und weiterer Laststeigerung mit anschließender Entlastung finden weitere Schädigungsprozesse statt, welche eine Reduzierung der Steifigkeit verursachen (vgl. Abbildung 5-16). In der Literatur finden sich zahlreiche Ansätze zur Beschreibung der Schädigung sowie deren numerische Umsetzung, sodass an dieser Stelle auf die Arbeiten [40] und [41] verwiesen wird.

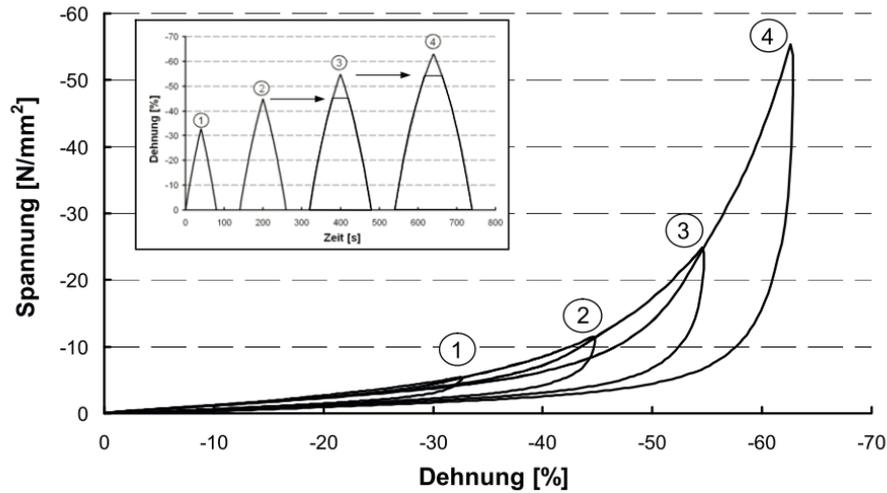


Abbildung 5-16: Schematische Darstellung des Mullins-Effekts für unterschiedliche Dehnung nach [20]

Wird das Anwendungsgebiet von Klemmhaltern und deren Belastungsszenarien betrachtet, welche vornehmlich aus sich ändernden Windbelastungen resultieren, ist es folgerichtig sinnvoll zyklische Versuche durchzuführen, um hinsichtlich der Materialparameterbestimmung die minimalen Werte zu erhalten. Die maximalen Materialparameter ergeben sich aus den monotonen, quasi-statischen, uniaxialen Zugversuchen, sodass diese auf Basis der monotonen und zyklischen Belastungen Grenzwerte des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens erhalten werden. Die Grenzwerte werden später für die Erstellung eines Bemessungskonzeptes herangezogen.

5.3.2 Probenherstellung

Die Probenherstellung der zyklischen Versuche erfolgt in gleicher Weise, wie für die monotonen, uniaxialen Zugversuche, sodass an dieser Stelle auf Abschnitt 5.2.2 verwiesen wird.

5.3.3 Versuchsdurchführung

Zusätzlich zu den monotonen, quasi-statischen, uniaxialen Zugversuchen werden zyklische Versuche an den Becker-Zugstäben für die ShA 60 durchgeführt. Die Beschränkung auf die Shore-A-Härte liegt darin begründet, dass von allen Materialien die genannte Härte vorliegt, sodass hier konkrete Vergleiche durchgeführt werden kann.

Die zyklische Belastung erfolgt kraftgesteuert, wobei die Versuchsgeschwindigkeit entsprechend der weggeregelten uniaxialen Zugversuche gewählt wurde. Alle Proben wurden daher auf ein Kraftniveau belastet, das einer mittleren, wahren Dehnung von ca. 80-90 % entsprach.

5.3.4 Versuchsauswertung

Bei der Versuchsdurchführung und -auswertung von gummiartigen Materialien unter zyklischer Belastung treten viskose Effekte auf, sodass ein Dehnungsresiduum für die jeweiligen Belastungszyklen auftreten kann.

Da die viskosen Effekte bei der Materialbeschreibung über hyperelastische Materialgesetze vernachlässigt werden, erfolgt eine Anpassung der experimentellen Spannungs-Dehnungs-Verläufe basierend auf den Regeln nach CHAGNON ET. AL [42]:

- Der Belastungspfad entspricht dem Belastungspfad aus der monotonen Belastung.
- Die Belastungspfade aus weiteren Zyklen werden vernachlässigt.
- Es gilt die Annahme, dass der Mullins-Effekt nur im ersten Be- und Entlastungs-Zyklus stattfindet, sodass die Hysteresen aus weiteren Versuchen superponieren.
- Das Be- und Entlastungsverhalten wird über den ersten Zyklus beschrieben.
- Mögliche Dehnungsresiduen werden zum Ursprung verschoben.
- Erweiterung der Datensätze, um einen monotonen Pfad zu erreichen.

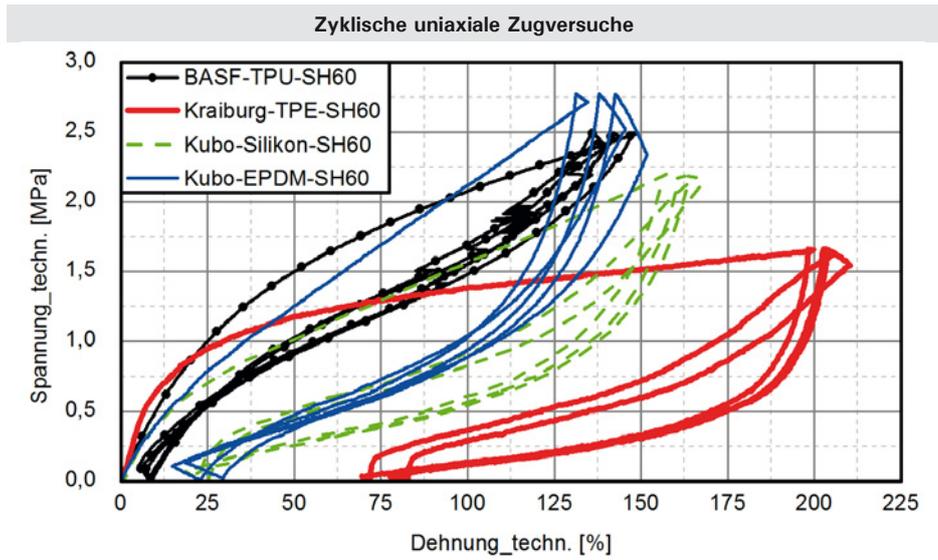


Abbildung 5-17: Arbeitslinien der zyklischen Versuche für unterschiedliche Materialien

Die Ergebnisse der zyklischen Versuche werden in Abbildung 5-17 bis Abbildung 5-19 dargestellt.

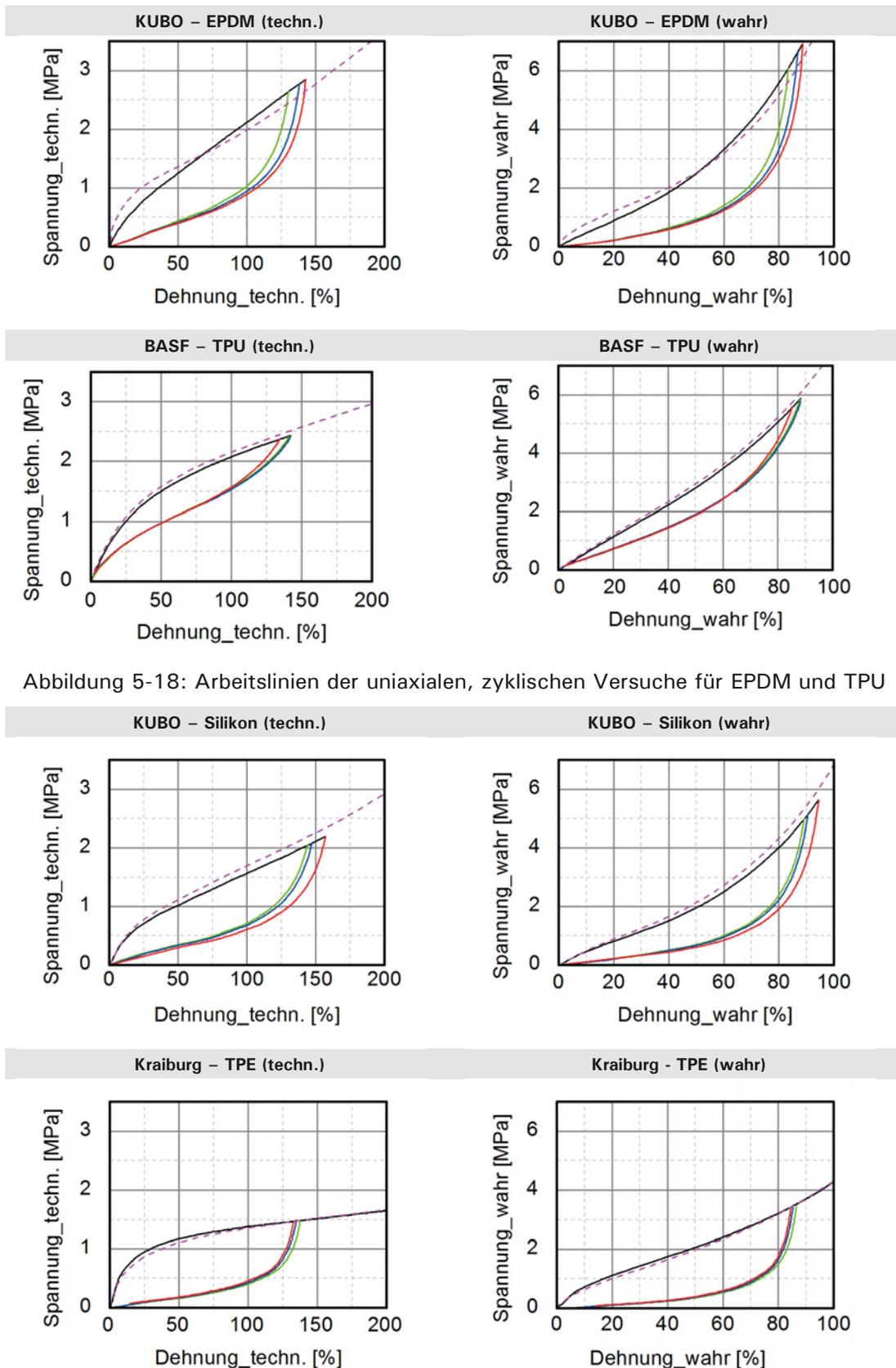


Abbildung 5-18: Arbeitslinien der uniaxialen, zyklischen Versuche für EPDM und TPU

Abbildung 5-19: Arbeitslinien der uniaxialen, zyklischen Zugversuche für Silikon und TPE

Die erstellten Arbeitslinien zeigen, dass die Schädigungsprozesse erst ab einer Dehnung auftreten, die bei geklemmten Glasscheiben unter normalen Umständen nicht erreicht werden. Zusätzlich zeigten die

Polymere unter zyklischer Druckbelastung weniger ausgeprägte Schädigungseffekte. Deshalb werden für den weiteren Verlauf die Erstbelastungskurven für die Entwicklung der Materialparameter verwendet.

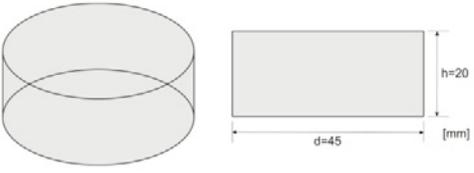
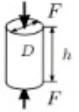
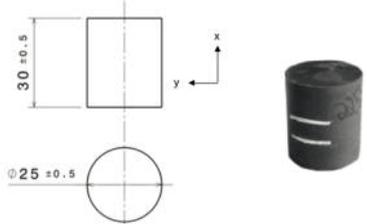
5.4 Monotone, uniaxiale Druckversuche

5.4.1 Allgemeines

Zur Bestimmung der Druckeigenschaften von Kunststoffen bezieht man sich im Allgemeinen auf die DIN EN ISO 604:2003 [43]. Diese Prüfnorm befasst sich mit der Durchführung von Druckversuchen an Prismen, Zylindern und Rohren. Hinsichtlich der Prüfkörpergeometrien werden Einschränkungen bzgl. der Länge, Breite und Dicke getroffen. Weiterhin unterscheidet man in der Norm zwischen Festigkeits- und Modulprüfungen. Eine Übersicht über die Randbedingungen bei der Prüfung der Materialeigenschaften unter uniaxialem Druck und einen Vergleich mit Druckprüfungen aus aktuellen Forschungsarbeiten ist in Tabelle 5-7 gegeben. Dabei ist auffällig, dass die geforderten Nennmaße zur Druckprüfung gemäß DIN EN ISO 604:2003 in keiner der aufgeführten Forschungsarbeiten eingehalten wurden. Hier wurden Prüfkörpergeometrien gewählt, welche einen Kompromiss zwischen den Festigkeits- und Modulprüfungen sowie den Prüfungen an kleinen Proben darstellen. Weiterhin fällt auf, dass in den Forschungsarbeiten die gewählte Grundfläche der Druckproben um ein Vielfaches größer ist als die nach Norm geforderte Fläche. Dieser Sachverhalt begründet sich mit der Vermeidung von Stabilitätsversagen.

Die Reduzierung der Prüfkörperlänge ist normkonform, da diese die Reduzierung der Länge zur Vermeidung von Stabilitätsversagen zulässt [43]. Die entstehenden Effekte aus der Behinderung der Querkontraktion im Lasteinleitungs- und Lagerungsbereich können nur mit Hilfe der Applizierung von Teflonfolie, Teflonspray oder Schmierfett vermieden werden. Die behinderte Querkontraktion erzeugt keinen uniaxialen Spannungszustand im Prüfkörper.

Tabelle 5-7: Uniaxiale Druckprüfung von Kunststoffen: Vergleich Norm und Forschung

Norm	Beschreibung	Referenzen																																																											
DIN EN ISO 604:2003 [43]	<ul style="list-style-type: none"> Bestimmung von Druckeigenschaften von Kunststoffen Prüfgeschwindigkeiten 1-20 mm/min Probekörper rechtwinkliges Prisma, Zylinder oder Rohr Länge l in Druckrichtung Unterscheidung Festigkeits- und Modulprüfung Prüfungen kleinerer Proben möglich <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <caption>Maße in Millimeter</caption> <thead> <tr> <th>Typ</th> <th>Messung</th> <th>Länge, l</th> <th>Breite, b</th> <th>Dicke, h</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>Modul</td> <td>50 ± 2</td> <td rowspan="2">$10 \pm 0,2$</td> <td rowspan="2">$4 \pm 0,2$</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>Festigkeit</td> <td>$10 \pm 0,2$</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <caption>Tabelle A.1 — Nennmaße kleiner Probekörper</caption> <thead> <tr> <th rowspan="2">Maße</th> <th colspan="2">Maße in Millimeter</th> </tr> <tr> <th>Typ 1</th> <th>Typ 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dicke</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Breite</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Länge</td> <td>6</td> <td>35</td> </tr> </tbody> </table> <p style="font-size: small; margin-left: 20px;">Der Probekörper Typ 2 darf nur zur Ermittlung des Druckmoduls verwendet werden; in diesem Fall wird zur Erleichterung der Messung eine Messlänge von 15 mm empfohlen.</p>	Typ	Messung	Länge, l	Breite, b	Dicke, h	A	Modul	50 ± 2	$10 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$	B	Festigkeit	$10 \pm 0,2$	Maße	Maße in Millimeter		Typ 1	Typ 2	Dicke	3	3	Breite	5	5	Länge	6	35	aus [44]  <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>Material</td> <td>Silikon</td> </tr> <tr> <td>Prüfgeschwindigkeit</td> <td>5 / 50 mm/min</td> </tr> <tr> <td>Prüfmaschine</td> <td>-</td> </tr> </table> aus [32] UAD-Prüfung  <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>Klebstoff</td> <td>PU-1</td> </tr> <tr> <td>Aushärtung</td> <td>$> 7 d / RT$</td> </tr> <tr> <td>Durchmesser \bar{D}</td> <td>11,9 mm</td> </tr> <tr> <td>Höhe h</td> <td>20,1 mm</td> </tr> <tr> <td>Prüfgeschwindigkeit</td> <td>$v = 0,5 \text{ mm/min}$</td> </tr> <tr> <td>Prüfmaschine</td> <td>Zwick (200 kN)</td> </tr> <tr> <td>Prüfbedingungen</td> <td>$T = RT$</td> </tr> </table> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>Material</td> <td>Polyurethan</td> </tr> <tr> <td>Prüfgeschwindigkeit</td> <td>$V = 0,5 \text{ mm/s}$</td> </tr> <tr> <td>Prüfmaschine</td> <td>Zwick (200 kN)</td> </tr> </table> aus [33]  <p style="font-size: x-small;">Abbildung 3.9 Druckprobe in Anlehnung an DIN EN ISO 604 und DIN ISO 7743 [88, 89] (technische Zeichnung links; Bild rechts)</p> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>Material</td> <td>PUR-Basis</td> </tr> <tr> <td>Prüfgeschwindigkeit</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Prüfmaschine</td> <td>-</td> </tr> </table>	Material	Silikon	Prüfgeschwindigkeit	5 / 50 mm/min	Prüfmaschine	-	Klebstoff	PU-1	Aushärtung	$> 7 d / RT$	Durchmesser \bar{D}	11,9 mm	Höhe h	20,1 mm	Prüfgeschwindigkeit	$v = 0,5 \text{ mm/min}$	Prüfmaschine	Zwick (200 kN)	Prüfbedingungen	$T = RT$	Material	Polyurethan	Prüfgeschwindigkeit	$V = 0,5 \text{ mm/s}$	Prüfmaschine	Zwick (200 kN)	Material	PUR-Basis	Prüfgeschwindigkeit	-	Prüfmaschine	-
		Typ	Messung	Länge, l	Breite, b	Dicke, h																																																							
		A	Modul	50 ± 2	$10 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$																																																							
		B	Festigkeit	$10 \pm 0,2$																																																									
		Maße	Maße in Millimeter																																																										
			Typ 1	Typ 2																																																									
		Dicke	3	3																																																									
		Breite	5	5																																																									
		Länge	6	35																																																									
		Material	Silikon																																																										
Prüfgeschwindigkeit	5 / 50 mm/min																																																												
Prüfmaschine	-																																																												
Klebstoff	PU-1																																																												
Aushärtung	$> 7 d / RT$																																																												
Durchmesser \bar{D}	11,9 mm																																																												
Höhe h	20,1 mm																																																												
Prüfgeschwindigkeit	$v = 0,5 \text{ mm/min}$																																																												
Prüfmaschine	Zwick (200 kN)																																																												
Prüfbedingungen	$T = RT$																																																												
Material	Polyurethan																																																												
Prüfgeschwindigkeit	$V = 0,5 \text{ mm/s}$																																																												
Prüfmaschine	Zwick (200 kN)																																																												
Material	PUR-Basis																																																												
Prüfgeschwindigkeit	-																																																												
Prüfmaschine	-																																																												

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens werden daher Prüfkörper gewählt, die nach DIN EN ISO 604:2003 normkonform sind und gleichzeitig einen unterschiedlichen Formfaktor besitzen (vgl. Kapitel 3.6). Zwar liegen die Formbeiwerte verhältnismäßig nah beieinander, jedoch können beliebige Formfaktoren auf Grund der - im Vergleich zum Brückenbau - kleinen Abmessungen im konstruktiven Glasbau nicht umgesetzt werden (siehe Abbildung 5-20).

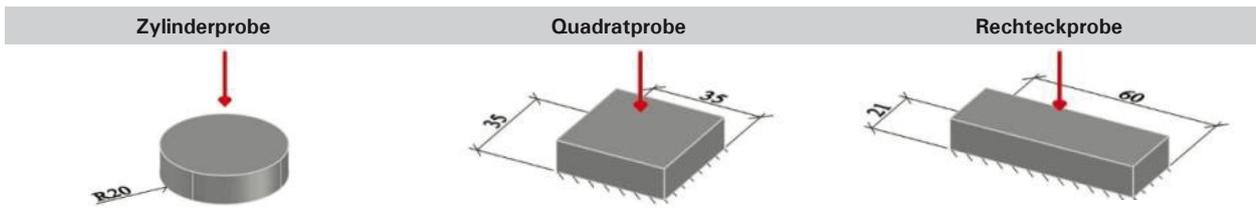


Abbildung 5-20: Schematische Darstellung der Probegeometrien für die monotonen, uniaxialen Druckversuche

Der Formfaktor nach BATTERMANN und KÖHLER [1] der einzelnen Proben ist Tabelle 5-8 zu entnehmen.

Tabelle 5-8: Übersicht der Formfaktoren für die monotonen uniaxialen Druckversuche

Material	Geometrie	Abmessungen	Formfaktor nach [1]
Kubo - EPDM	Kreis	$r = 20 \text{ mm}, h = 10 \text{ mm}$	1
	Quadrat	$35 \times 35 \times 10 \text{ mm}$	0,86
	Rechteck	$21 \times 60 \times 10 \text{ mm}$	0,78
Kubo - Silikon	Kreis	$r = 20 \text{ mm}, h = 10 \text{ mm}$	1
	Quadrat	$35 \times 35 \times 10 \text{ mm}$	0,86
	Rechteck	$21 \times 60 \times 10 \text{ mm}$	0,78
BASF - TPU	Kreis	$r = 20 \text{ mm}, h = 10 \text{ mm}$	1
	Quadrat	$35 \times 35 \times 10 \text{ mm}$	0,86
	Rechteck	$21 \times 60 \times 10 \text{ mm}$	0,78
Kraiburg - TPE	Kreis	$r = 20 \text{ mm}, h = 6 \text{ mm}$	1,667
	Quadrat	$35 \times 35 \times 6 \text{ mm}$	1,46
	Rechteck	$21 \times 60 \times 6 \text{ mm}$	1,29

Herstellungsbedingt konnten die Proben der Firma Kraiburg nicht in einer Dicke von 10 mm ausgeführt werden, wodurch es zu Abweichungen im Formfaktor kommt.

5.4.2 Probenherstellung

Die drei Geometrien für die Druckversuche setzen sich folgendermaßen zusammen:

- Quadratisch 35mm x 35mm (abgekürzt mit Q)
- Rechteckig 60mm x 21mm (abgekürzt mit R)
- Kreisrund \varnothing 40mm (abgekürzt mit K)

Die Versuchskörper werden aus der Plattenware, die vom jeweiligen Hersteller (BASF, Kraiburg, KUBO Tech.) hergestellt wurden, herausgesägt. Eine Stanzung, wie sie bei der Probenherstellung für die Zugversuche durchgeführt wurden, kann bei einer Dicke von 10 mm nicht durchgeführt werden. Hier kommt es zu deutlichen Ausbauchungen und unsauberen Schnittkanten.

Für die eckigen Versuchskörper (Quadrat, Rechteck) wird eine Bandsäge verwendet. Für die kreisrunden Körper wird eine Standbohrmaschine mit Lochsägeaufsatz verwendet. Es stellt sich für den Lochsägeaufsatz heraus, dass stumpfe Holz-Lochsägeaufsätze am besten für die Herstellung kreisrunder Proben von gummiartigen Werkstoffen geeignet sind (siehe Abbildung 5-21). Spezielle Kunststoff Aufsätze können nicht verwendet werden, da diese nicht in dem gewünschten Durchmesser vertrieben werden.

Bandsäge



Standbohrmaschine



Lochsägenaufsatz



Spannpratze mit fixierter Materialplatte

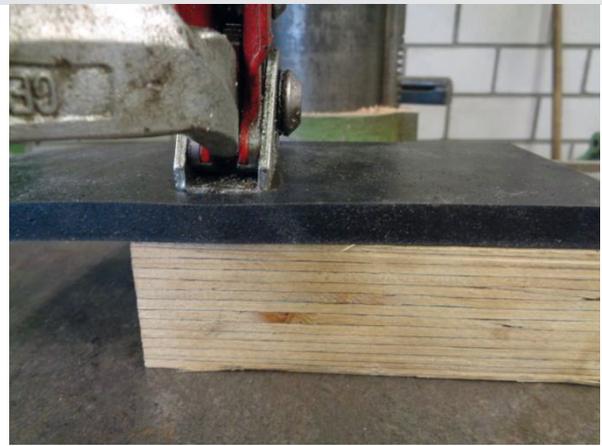


Abbildung 5-21: Herstellung der unterschiedlichen Probegerometrien für die uniaxialen Druckversuche

Bei der Benutzung der Bandsäge fällt auf, dass die Sägegeschwindigkeit (Vorschub und Umdrehungen/min) und die Shore-Härte einen Einfluss auf die Sauberkeit der Schnittkante haben. Es bedarf einiger Probesägungen, bevor die tatsächlichen Probekörper erstellt werden. Durch die Reibung des Sägeblattes am Werkstoff ergibt sich ein Temperatureinfluss, der allerdings keine Berücksichtigung in nachfolgenden Analysen findet.

Bei der Benutzung der Standbohrmaschine wird die Materialplatte, aus der die kreisrunde Probe ausgesägt wird, über eine Spannpratze fixiert. Dabei ist zu beachten, dass der durch die Spannpratze gedrückte Bereich für die Versuchskörperherstellung nicht mehr tauglich ist, da diese Stelle bereits vorbelastet ist. Weiterhin wird die Materialplatte während des Sägens/Bohrens festgehalten, um einen homogenen Kreis bzw. Ausschnitt zu generieren.

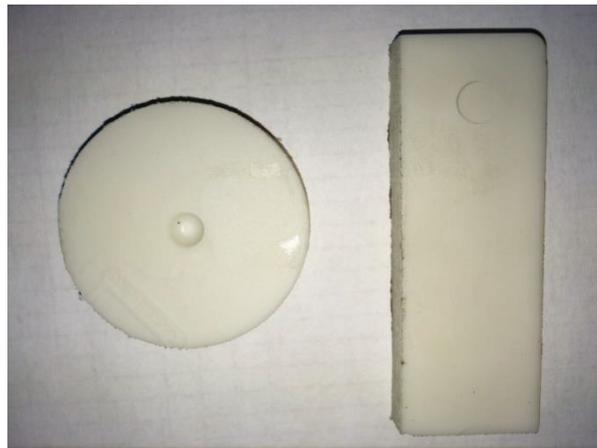


Abbildung 5-22: Oberflächenbeschaffenheit der Proben des Materials Kraiburg TPE nach der Probenherstellung. Kreisbohrer (links); Bandsäge (rechts)

Die gelieferten Plattenwaren der Firmen BASF, Kraiburg und KUBO Tech. weisen jeweils unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten auf. Je nach Beschaffenheit wird versucht einen, möglichst homogenen Versuchskörper auszuschneiden (Homogenität der Oberflächenbeschaffenheit). Nach der Herstellung der Prüfkörper werden unsaubere Sägekanten mit Hilfe eines Messers bereinigt. Im Anschluss daran werden die Versuchskörper mit Wasser von Sägespänen und anderen Verschmutzungen gereinigt.

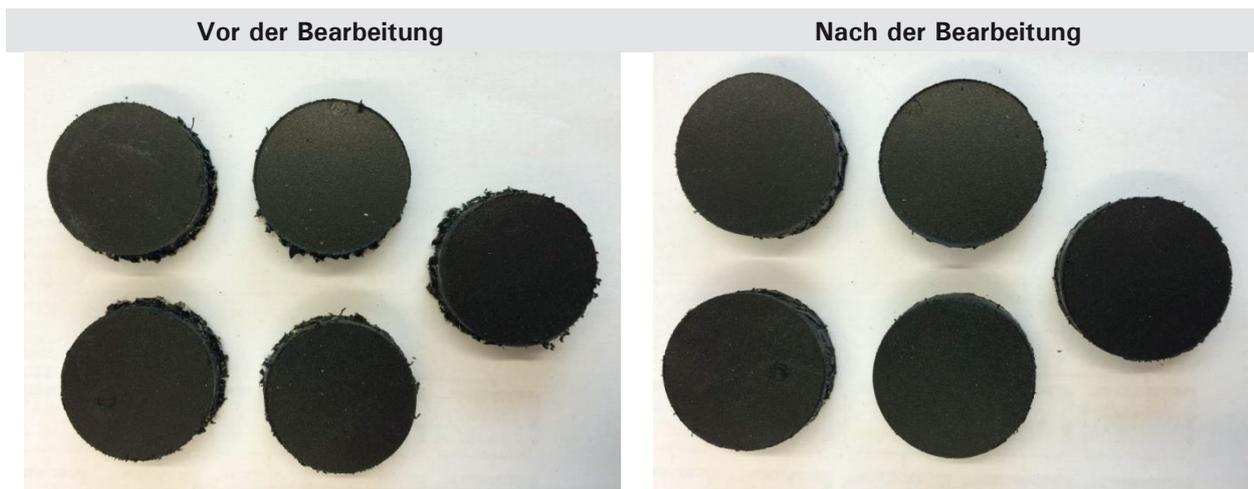


Abbildung 5-23: Darstellung der Proben nach der Herstellung und der nach der Bearbeitung

Bevor die hergestellten Versuchskörper dem Druckversuch ausgesetzt werden, wird jeder Körper mit einer Schieblehre vermessen. Die Breite und Länge bzw. der Durchmesser und die Dicke (abhängig von der Geometrie des Körpers) werden an drei unterschiedlichen Stellen des Körpers aufgenommen. Bei numerischen Nachrechnungen kann dadurch die tatsächlich vorhandene Geometrie verwendet werden und es muss nicht eine Idealisierung herangezogen werden.

5.4.3 Versuchsdurchführung

Es wird eine hydraulische Druckprüfmaschine der Firma MAN verwendet. Bei der Versuchsdurchführung werden die untere und die obere Druckplatte mit Schmierfett der Firma Still beschichtet, um eine ungestörte Querdehnung des Materials zu ermöglichen. Idealerweise entstehen durch die Probenvorbereitung keine Ausbauchungen am Rand der Probe, wodurch ein einachsiger Spannungszustand erzeugt werden kann und eine gesicherte Materialparameteridentifikation möglich ist (vgl. Abbildung 5-24).

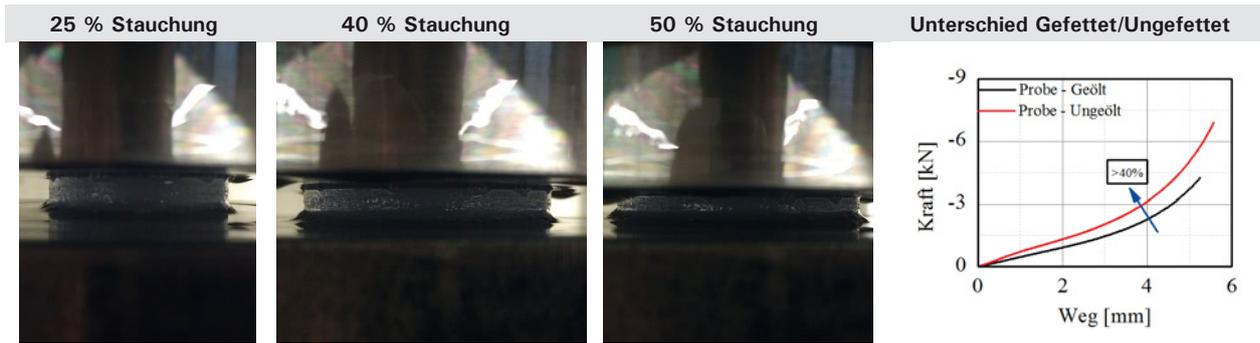


Abbildung 5-24: Analyse des Querdehnungsverhaltens von gefetteten (dargestellt) und ungefetteten Proben (nicht dargestellt) im Druckversuch

Weiterhin muss bei der Materialparameteridentifikation mit uniaxialen Druckversuchen von gummiartigen Werkstoffen die Maschinensteifigkeit berücksichtigt werden (vgl. [45]).

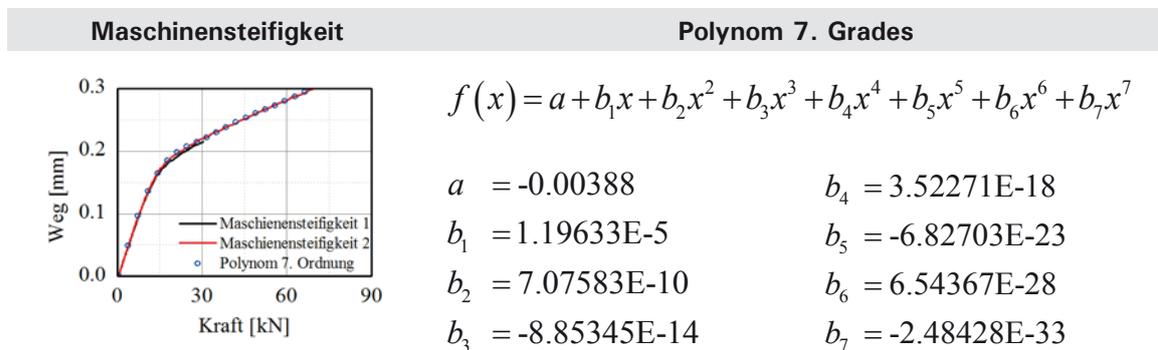


Abbildung 5-25: Approximation der Maschinensteifigkeit über eine Polynomfunktion 7. Grades

Mit Hilfe der Polynomfunktion ist es möglich, die gemessene Kraft-Verformungsbeziehung der Probe ohne die Einflüsse aus der Maschinensteifigkeit zu ermitteln und so die tatsächlich auftretende Materialantwort zu erhalten (siehe Abbildung 5-25). Hieraus können die technischen bzw. wahren Dehnungen bzw. die tatsächlich stattfindende Verformung innerhalb der Probe wie folgt ermittelt werden:

$$u_{tot} = u_{Maschine} - u_{Fit} \tag{5-14}$$

$$\epsilon_{tech.} = \frac{u_{Maschine} - u_{Fit}}{l_0} \tag{5-15}$$

$$\epsilon_{wahr} = \ln \left(1 - \frac{u_{Maschine} - u_{Fit}}{l_0} \right) \tag{5-16}$$

mit

- u_{tot} = Verformung in der Probe
- $u_{Maschine}$ = Gesamtweg des Versuchs
- u_{Fit} = Maschinenweg

Weiterhin ist bei der Versuchsdurchführung der Energieeintrag zu beschreiben, also mit welcher Prüfgeschwindigkeit die einzelnen Proben gedrückt werden müssen, um im Mittel die gleiche Dehnrage in die Prüfkörper entsprechend der Zugversuche einzutragen. Um einen gleichen Energieeintrag zwischen den uniaxialen Zugversuchen und den Druckversuchen zu gewährleisten, wird auf das definierte Energiekriterium aus Kapitel 5.1.4 zurückgegriffen. Hieraus ergeben sich für die unterschiedlichen Materialien mit den unterschiedlichen Probengeometrien die Druck-Prüfgeschwindigkeiten aus Tabelle 5-9.

Tabelle 5-9 Prüfgeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Materialien

Material	Zug-Prüfgeschwindigkeit [mm/min]	Druck-Prüfgeschwindigkeit [mm/min]
Kubo-EPDM	5,0	0,48
Kubo-Silikon	5,0	0,39
Kraiburg-TPE	5,0	0,23
BASF-TPU	5,0	0,61

5.4.4 Versuchsauswertung

Die Versuchsauswertung der durchgeführten monotonen, uniaxialen Druckversuche zeigt das Kraft-Verformungs-Verhalten bzw. die Spannungs-Dehnungsantworten der unterschiedlichen Materialien, Geometrien und Shore-Härten auf. Dargestellt werden nur die Mittelwertkurven, da die Streuung der Versuche so gering ist, dass sie vernachlässigbar bzw. visuell nicht darstellbar ist (siehe Abbildung 5-26).

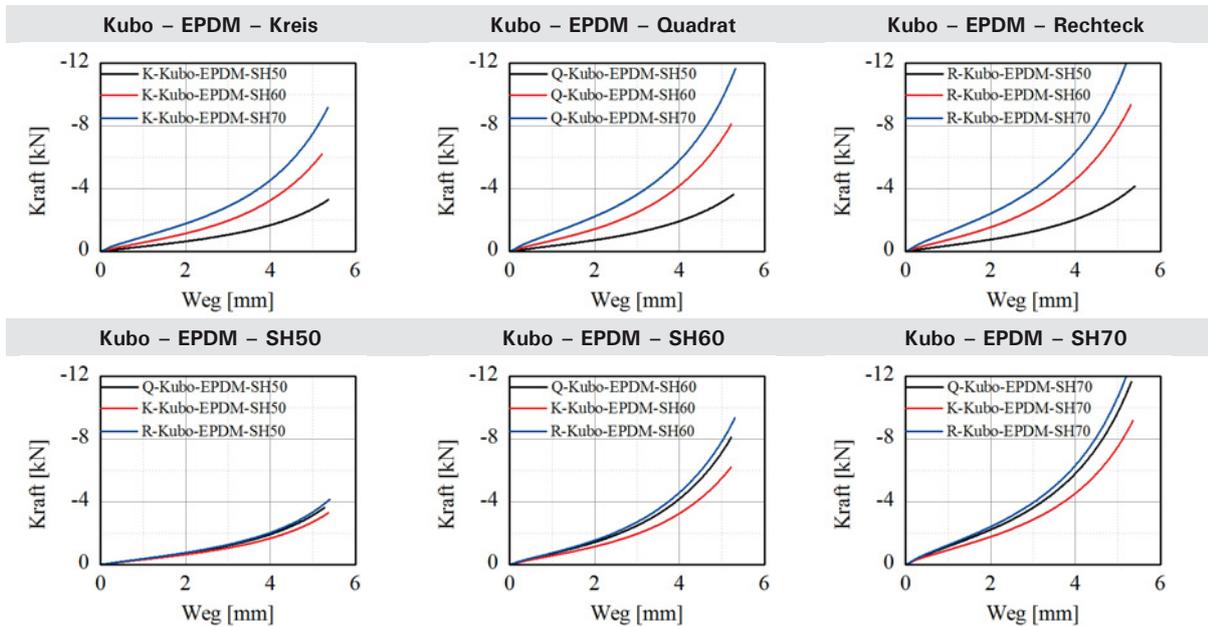


Abbildung 5-26: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für EPDM

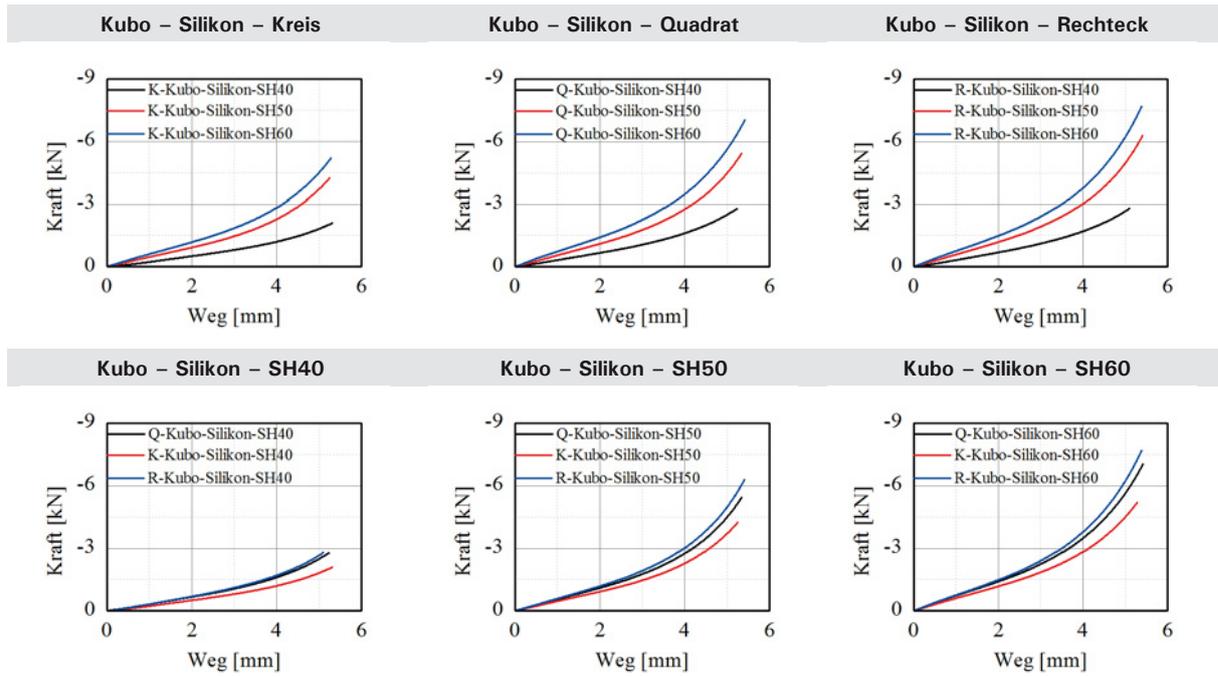


Abbildung 5-27: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für Silikon

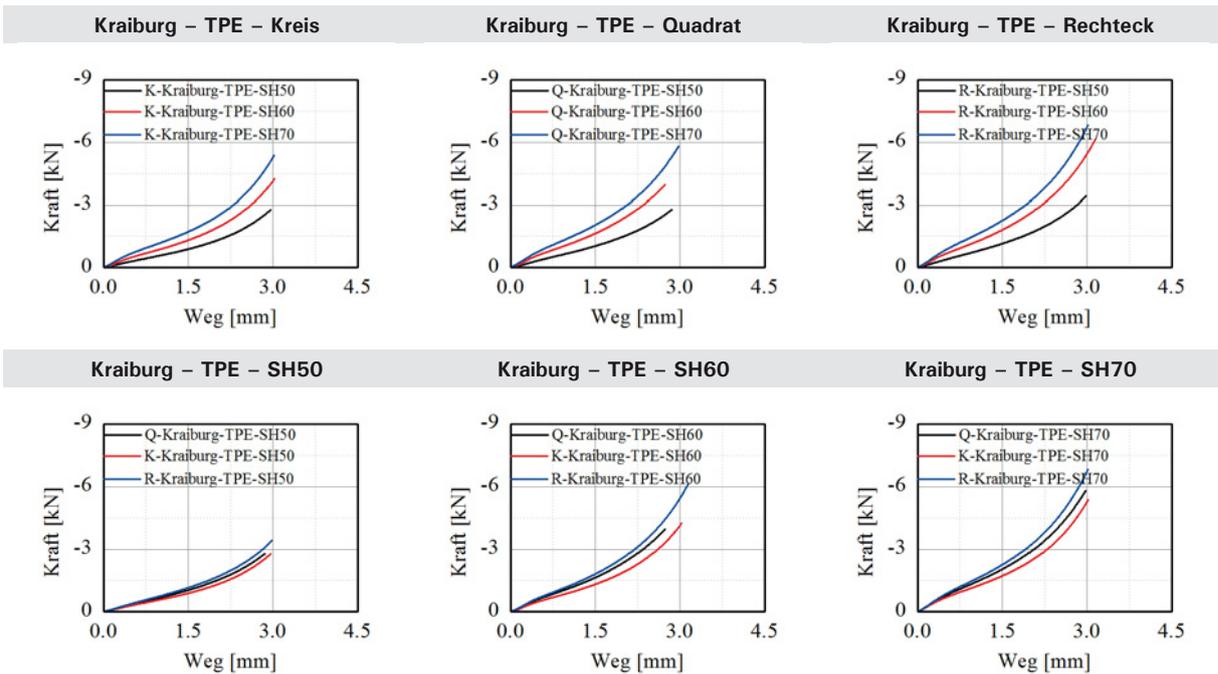


Abbildung 5-28: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für TPE

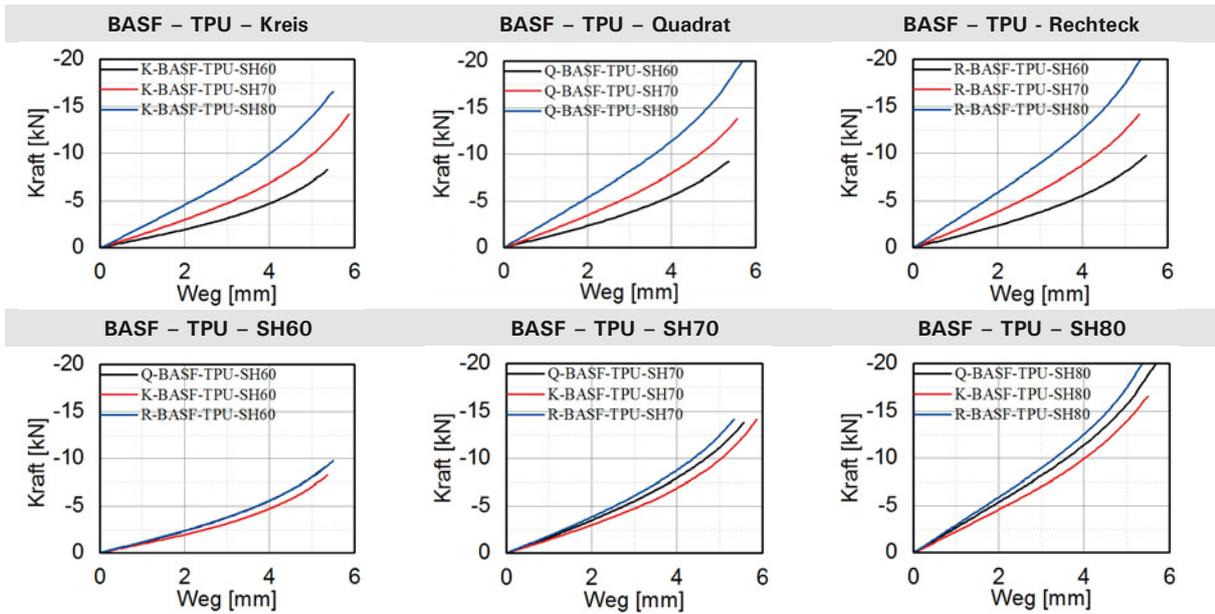


Abbildung 5-29: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für TPU

Ohne auf die einzelnen Versuchsergebnisse im Detail einzugehen, ist eine Tendenz bei allen Prüfungen zu erkennen. Unabhängig von der Shore-Härte ist die schwächste Materialantwort bei den kreisrunden Proben zu erkennen. Die stärkste Materialantwort bringen die rechteckigen Proben mit sich, sodass sich die Materialantworten der quadratischen Proben zwischen den beiden zuvor genannten Geometrien befinden. Dieser Sachverhalt steht im völligen Gegensatz zu den Ergebnissen nach BATTERMANN und KÖHLER, der bei steigendem Geometriefaktor auch eine steigende Steifigkeit postuliert. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass bei steigendem Geometriefaktor die Steifigkeit abnimmt. Der Effekt, dass mit zunehmender Shore-Härte die Steifigkeit des Materials zunimmt, ist ebenfalls bei den Druckversuchen zu erkennen. Eine weitere Darstellung der durchgeführten Druckversuche kann Abbildung 5-30 entnommen werden, in der in Abhängigkeit der Probengeometrie das Kraft-Verformungs-Verhalten aufgetragen ist. Da bei den geprüften Materialien keine gleichen Shore-Härten geprüft werden konnte, diese also variieren, wird lediglich die Mutterserie (ShA 60) dargestellt, da hier von allen Materialien Ergebnisse vorliegen.

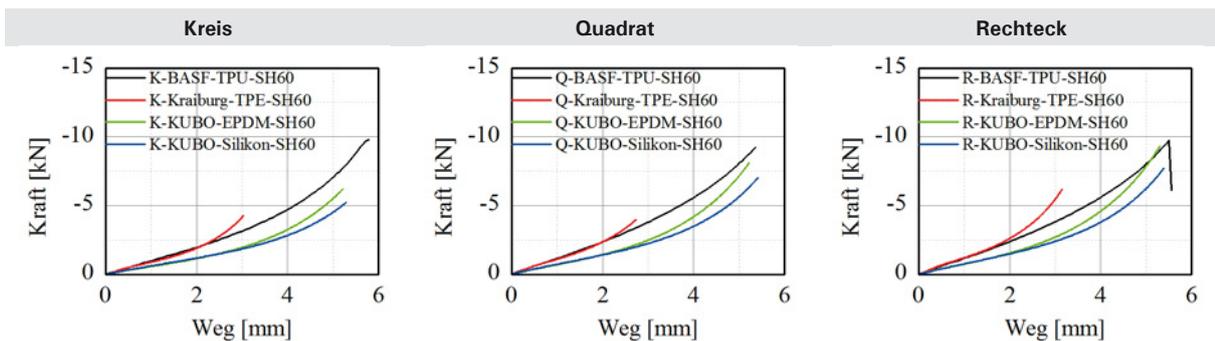


Abbildung 5-30: Vergleich der unterschiedlichen Geometrien

Auffällig ist, dass unabhängig von der gewählten Probengeometrie ein tendenziell ähnliches Verhalten in der Materialantwort vorliegt. Weiterhin ist es ersichtlich, dass die Materialien Kubo-EPDM und Kubo-Silikon bis zu einer Stauchung von 2,5 mm ein gleiches Materialverhalten aufweisen. Danach verhalten sich die Proben des Materials EPDM sichtbar steifer. Betrachtet man die Materialien Kraiburg-TPE und BASF-TPU erkennt man ein deutlich steiferes Antwortverhalten im Gegensatz zu den Ergebnissen mit den Materialien von Kubo. Auch hier erkennt man ein nahezu gleiches Antwortverhalten bis zu einer Stauchung von ungefähr 1,8 mm. Danach versteift das Material von Kraiburg stärker im Gegensatz zu BASF-TPU. Weiterhin fällt auf, dass das Antwortverhalten von Kubo und BASF deutlich größere Wege erfährt, als die Messergebnisse von Kraiburg. Dies kann damit erklärt werden, dass die Dicke der

Geometrien bei Kubo und BASF gleich sind (jeweils 10 mm), wohingegen die Dicke des Materials Kraiburg-TPE nur 6 mm beträgt.

Abschließend kann zu den uniaxialen Druckversuchen gesagt werden, dass ein breites Spektrum mit den vier getesteten Materialien abgedeckt werden konnte. Daher kann der Tragwerksplaner gezielt das Material mit der entsprechenden Härte auswählen, das die Spannungen im Klemmbereich minimiert (vgl. Abbildung 5-31).

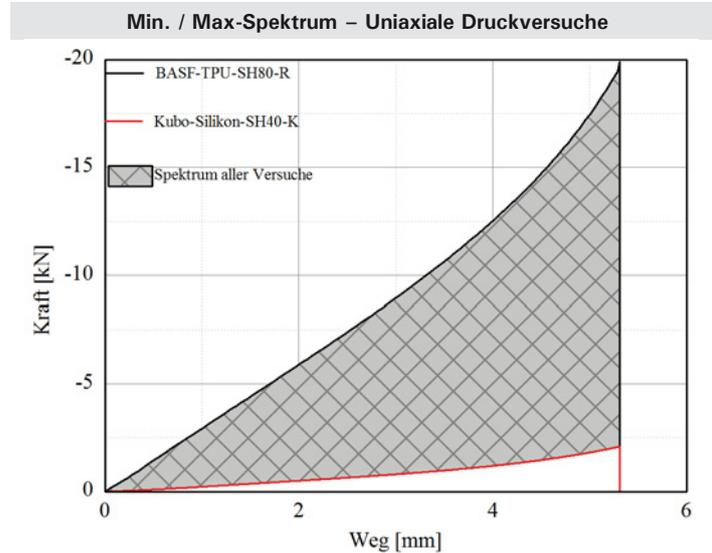


Abbildung 5-31: Kraft-Weg-Verhalten von BASF-TPU-SH80-R und Kubo-Silikon-SH40-K

5.5 Dynamisch-Mechanische Thermoanalyse

5.5.1 Allgemeines

Mit Hilfe der Dynamisch-Mechanisch Thermoanalyse (DMTA) lässt sich das zeitabhängige und temperaturabhängige Werkstoffverhalten beliebiger Materialien charakterisieren. Aus der Aufbereitung der Messdaten lässt sich u.a. die Glasübergangstemperatur T_g bestimmen.

Die Lastaufbringung bei einer DMTA ist immer eine oszillierende Schwingung, bei der man zwischen den Deformationsmodi sowie dem Versuchsablauf unterscheidet. Der Versuchsablauf kann zum einen spannungsgeregelt, zum anderen verformungsgeregelt ablaufen.

Stehen der Deformationsmodus und die Regelung der DMTA fest, gibt es drei weitere Parameter, die verändert werden können, dies sind die Spannungs- bzw. Verformungsamplitude, die Erregerfrequenz und die Temperatur. Verändert man während eines Versuchsdurchlaufs die Amplitude, so wird von einem „Amplituden-sweep“ gesprochen (vgl. Abbildung 5-32). Die anderen Parameter können ebenso „gesweept“ werden. Es sind Kombinationen möglich, wie z.B. ein Frequenz-Temperatur-sweep.

Um den linear-viskoelastischen Bereich zu bestimmen, muss zu Beginn jeder Prüfung mit einem neuen Werkstoff ein Amplituden-sweep durchgeführt werden. Das bedeutet, dass Temperatur und Erregerfrequenz konstant bleiben, während die Amplitude der Anregung stetig erhöht wird. Die Frequenz sollte während des Amplituden-sweeps nicht mehr als 1 Hz betragen.

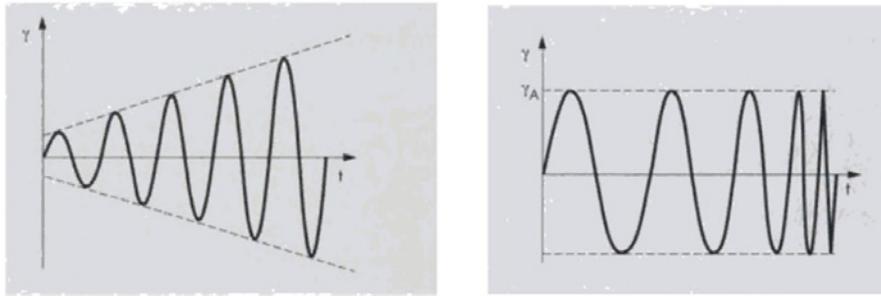


Abbildung 5-32: Beispiel eines Amplituden-sweeps (links) und eines Frequenz-sweeps (rechts)

Beim Frequenz-sweep wiederum bleiben Amplitude und Temperatur konstant, während die Frequenz der Anregung gesteigert wird (vgl. Abbildung 5-32). Mit dieser Methode kann die Zeitabhängigkeit des Materialverhaltens bestimmt werden.

Um die Glasübergangstemperatur aus den Versuchsdaten der DMTA zu bestimmen, muss ein Temperatur-sweep durchgeführt werden. Für die Auswertung der Versuchsdaten gibt es verschiedene Methoden, wobei deren Werte für T_g teilweise stark voneinander abweichen. Daher ist es wichtig, immer mit anzugeben, welche Methode angewandt wird.

Für die Ergebnisdarstellung werden Speichermodul, Verlustmodul und innere Dämpfung des Werkstoffs über die Temperatur aufgetragen. Unterschieden wird die Darstellung der Ordinatenachse. Es gibt die Möglichkeit die Koordinaten linear oder logarithmisch aufzutragen. Da sich die Modulwerte um mehrere Größenordnungen unterscheiden bzw. ändern können, empfiehlt sich eine logarithmische Darstellung der Messungen (vgl. Abbildung 5-33).

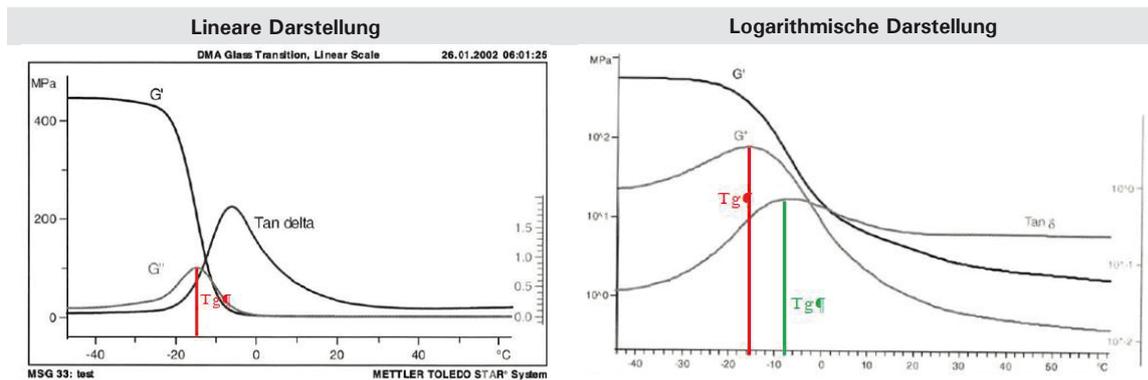


Abbildung 5-33: Auswertung der Glasübergangstemperatur in unterschiedlichen Darstellungsweisen

5.5.2 Probenherstellung

Die Herstellung der Proben erfolgt durch Stanzen mittels Stanzeisen, wobei je nach Probendicke ein anderer Durchmesser gewählt werden musste, um den geforderten Geometriefaktor von $g = 75 [1/m]$ einzuhalten. Dabei berechnet sich der Geometriefaktor nach folgender Gleichung:

$$g = \frac{2t}{\pi d^2} \quad (5-17)$$

5.5.3 Versuchsdurchführung

Die DMTA-Versuche werden mit der Prüfmaschine Mettler-Toledo DMA/SDTA861[®] durchgeführt. In Abbildung 5-34 ist die Prüfmaschine sowie eine schematische Darstellung davon abgebildet.

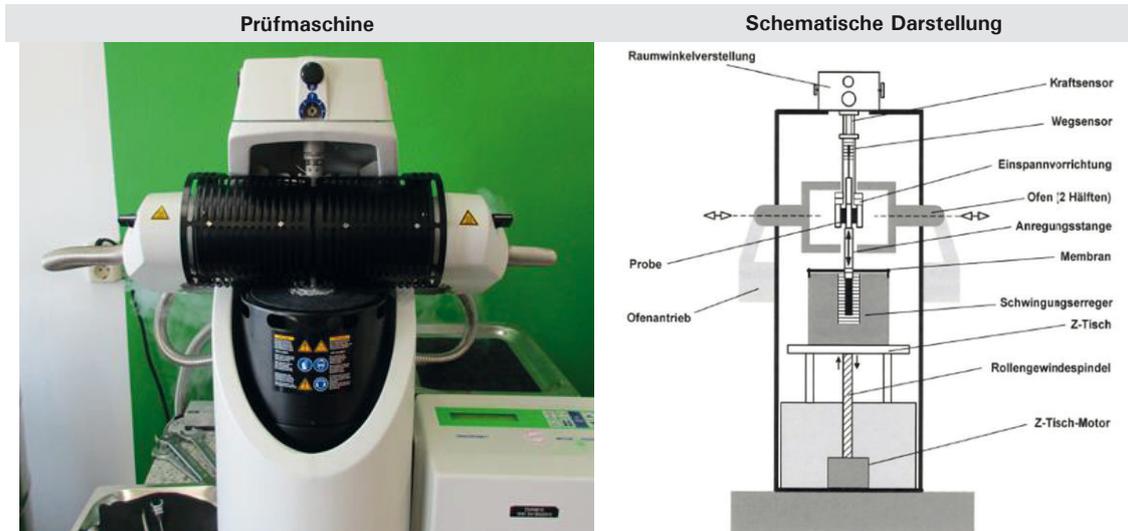


Abbildung 5-34: Auswertung der Glasübergangstemperatur

Die Einspannvorrichtung für die Probe besteht aus einem beweglichen und einem festen Teil. Der feste Teil der Einspannvorrichtung ist mit dem Ende des Wegsensors verbunden und überträgt über das Gehäuse des Wegsensors die Kraftreaktion auf den Kraftsensor. Die Kraftmessung erfolgt über einen Piezokristall. Hier wird die Kraft gemessen, die auf den Probekörper aufgebracht wird.

Der Einbau der Proben erfolgt über den Schereinsatz, der in die Einspannvorrichtung eingebaut wird. So können die Proben außerhalb der Prüfmaschine eingebaut werden. Außerdem ist die Einspannvorrichtung mit verschiedenen Einsätzen und somit für verschiedene Deformationsmodi zu verwenden.

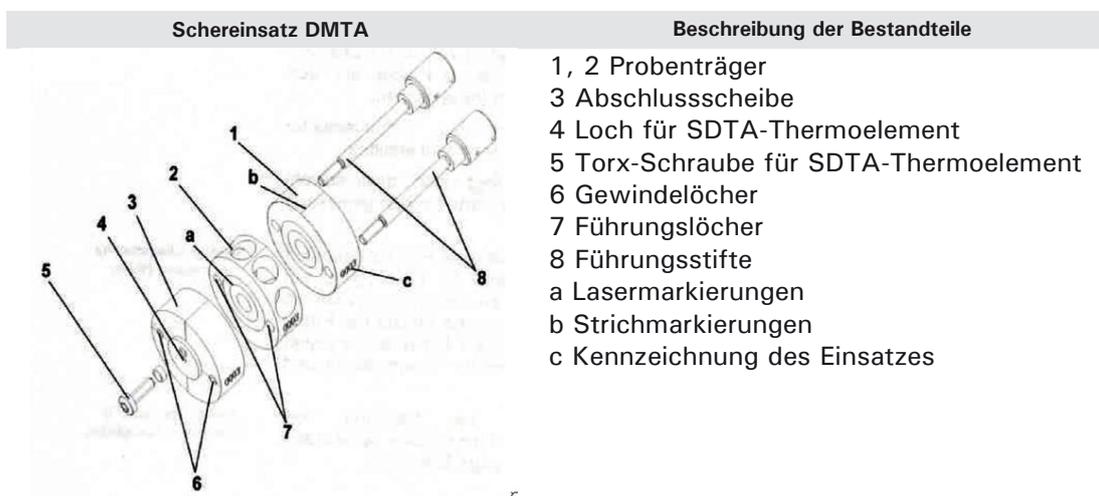


Abbildung 5-35: Standard-Schereinsatz für DMA/SDTA861

Im Rahmen dieses Projektes wird bei der DMTA die Scherung als Deformationsmodus gewählt, da hier die Ergebnisse besonders zuverlässig sind. Die Prüfungen und ihre jeweiligen Parameter sind in Tabelle 5-10 zusammengefasst.

Tabelle 5-10: Prüfprogramm der verschiedenen Materialien für die DMTA

Material	Kraftamplitude	Wegamplitude	Frequenz	Heizrate	Temperaturbereich
	$F [N]$	$L [\mu m]$	$f [Hz]$	$[K / min]$	$[^{\circ}C]$
Kubo - EPDM	20	10	1	1	-100 - +20
Kubo - Silikon	20	10	1	1	-80 - -10
Kraiburg - TPE	20	10	1	1	-100 - +20
BASF - TPU	-	-	-	-	-

5.5.4 Versuchsauswertung

In den Abbildung 5-36 bis Abbildung 5-38 werden die Versuchsergebnisse der DMTA-Untersuchungen grafisch dargestellt. Für den Werkstoff BASF-TPU liegen keine Versuchsergebnisse vor. Hier sind während des Einspannvorgangs der Probe in den Schereinsatz Probleme aufgetreten. Daher wird für das Material der Firma BASF die Glasübergangstemperatur gemäß dem Datenblatt angegeben.

Hinsichtlich der Festlegung der Glasübergangstemperatur wird der T_g -Wert beim Maximum des Verlustfaktors $\tan(\delta)$ abgelesen. Daraus ergeben sich folgende Glasübergangstemperaturen bei den unterschiedlichen Materialien (vgl. Tabelle 5-11).

Tabelle 5-11: Glasübergangstemperaturen der verschiedenen Materialien

Material	Glasübergangstemperatur $[^{\circ}C]$
Kubo - EPDM	-38
Kubo - Silikon	-54
Kraiburg - TPE	-42
BASF - TPU	-42

Die experimentellen Versuchsergebnisse werden in Abbildung 5-36 bis Abbildung 5-38 in Abhängigkeit der unterschiedlichen Materialien dargestellt. In den Tieftemperaturbereichen sind fehlerhafte Messungen aufgetreten, da sich die Prüfmaschine verstellt hatte, dennoch sind die Aussagen hinsichtlich des Glasübergangsbereiches zuverlässig.

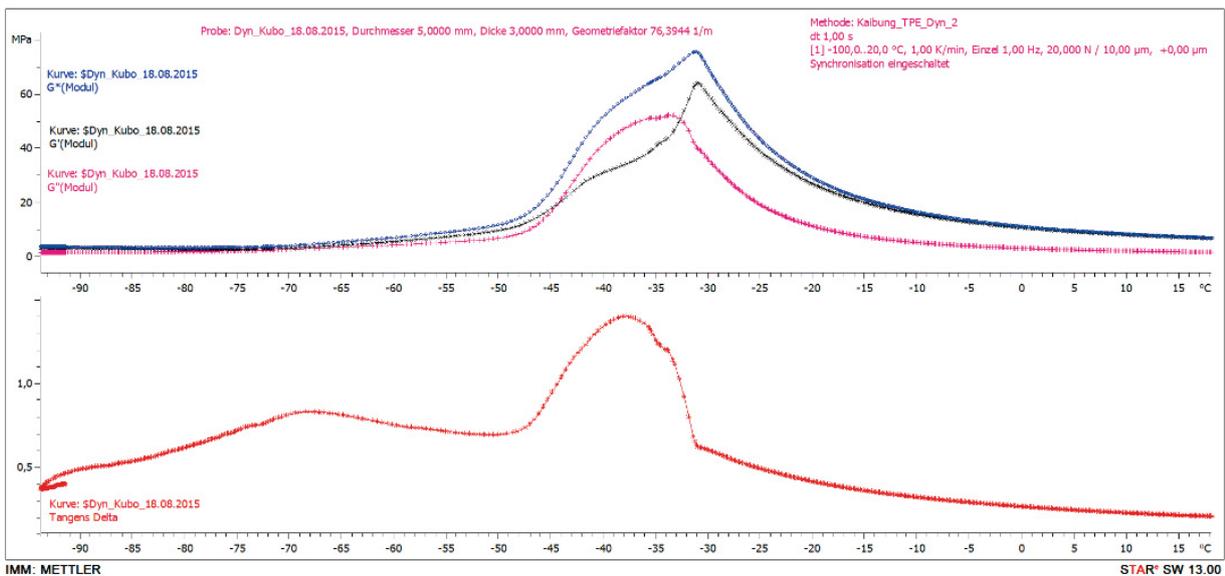


Abbildung 5-36: Ergebnisse der DMTA für KUBO-EPDM

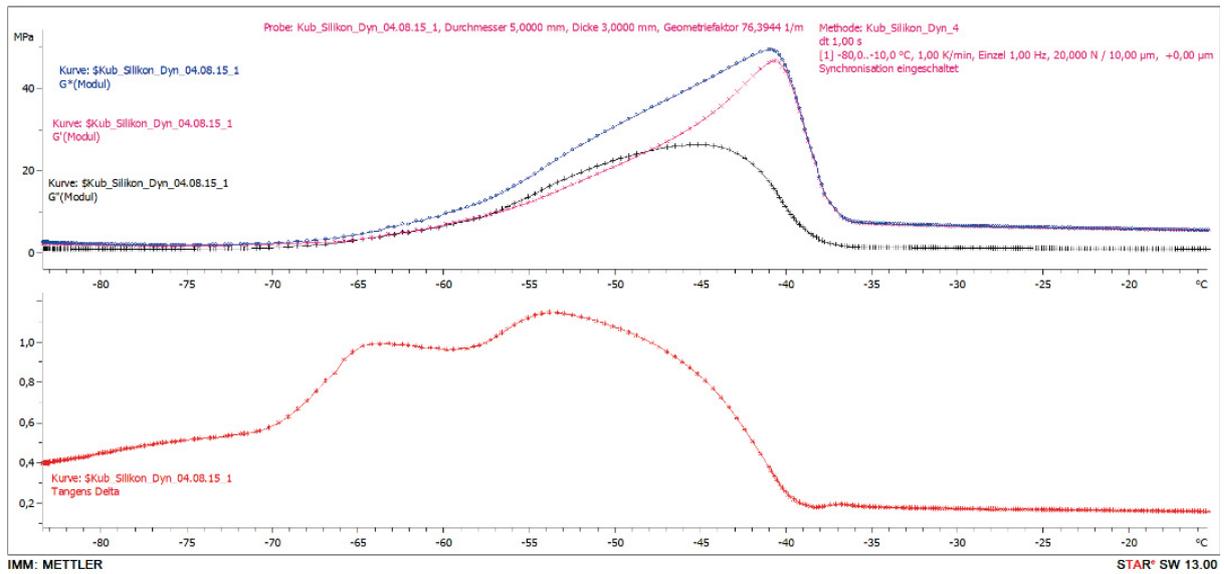


Abbildung 5-37: Ergebnisse der DMTA für KUBO-Silikon

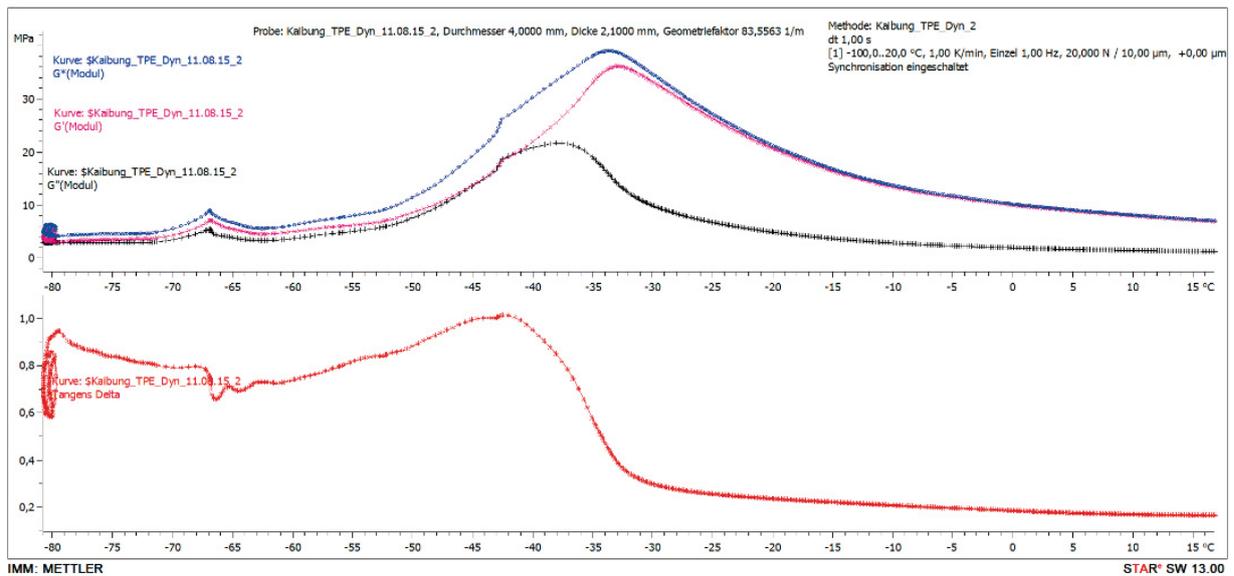


Abbildung 5-38: Ergebnisse der DMTA für Kraiburg-TPE

Die logarithmische Darstellung der DMTA-Ergebnisse sind zur Vollständigkeit in Abbildung 5-39 dargestellt.

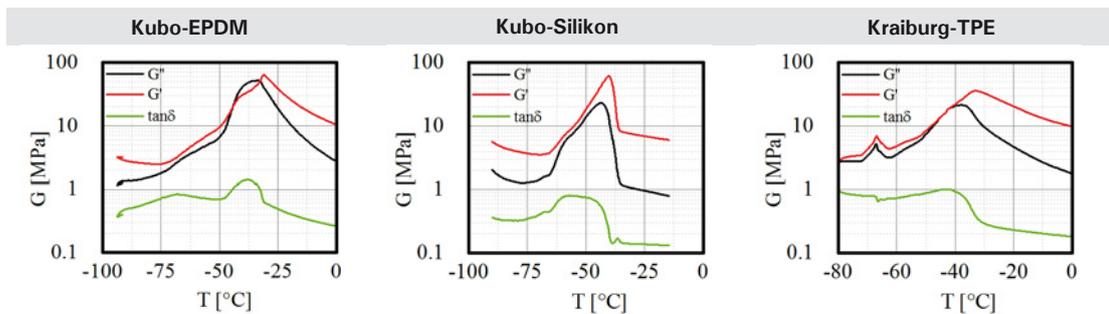


Abbildung 5-39: Logarithmische Darstellung der DMTA

Alle Materialien liegen für einen Anwendungstemperaturbereich von -20 bis + 80 °C im entropieelastischen Bereich und sind somit für den Einsatz als Klemmhalterzwischenschicht geeignet.

6 Numerische Simulation

Die Abschätzung des Tragverhaltens bei unterschiedlichen Belastungen kann erst nach der Verifikation der Regressionsmodelle geschehen. Hierzu werden die Versuche numerisch simuliert. So kann gezeigt werden wie gut das hyperelastische Materialmodell die tatsächlichen Steifigkeiten approximiert. Im Folgenden werden der monotone uniaxiale Zugversuch und der uniaxiale Druckversuch numerisch simuliert. Eine Verwendung aller Materialmodelle scheint hierbei nicht zielführend, so wird auf der Grundlage des Determinationskoeffizienten, auch Bestimmtheitsmaß genannt (siehe Kapitel 6.3), eine Vorauswahl von Materialmodellen getroffen.

6.1 Regressionsmodell

Aus den vorhandenen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen, ermittelt aus den experimentellen Untersuchungen, wird ein Regressionsmodell für numerische Berechnungen gebildet. Die untersuchten Kunststoffe weisen ein nicht-linear-elastisches Verhalten auf, allgemein als Hyperelastizität oder Green'sche Elastizität bezeichnet. Bei hyperelastischen Materialmodellen wird über die Formänderungsenergie-dichtefunktion die Spannung berechnet. Es gibt eine Vielzahl gängiger Formänderungsfunktionen. Das Erzeugen einer nicht linearen Regression, also einer Regressionskurve wird im Zusammenhang mit hyperelastischen Materialmodellen als Curve Fitting bezeichnet [46].

Nach dem Erstellen des Regressionsmodells wird die Anpassungsgüte über den Determinationskoeffizienten ermittelt. In Abbildung 6-1 ist der Ablauf der Modellerstellung – und dessen Beurteilung zu erkennen.

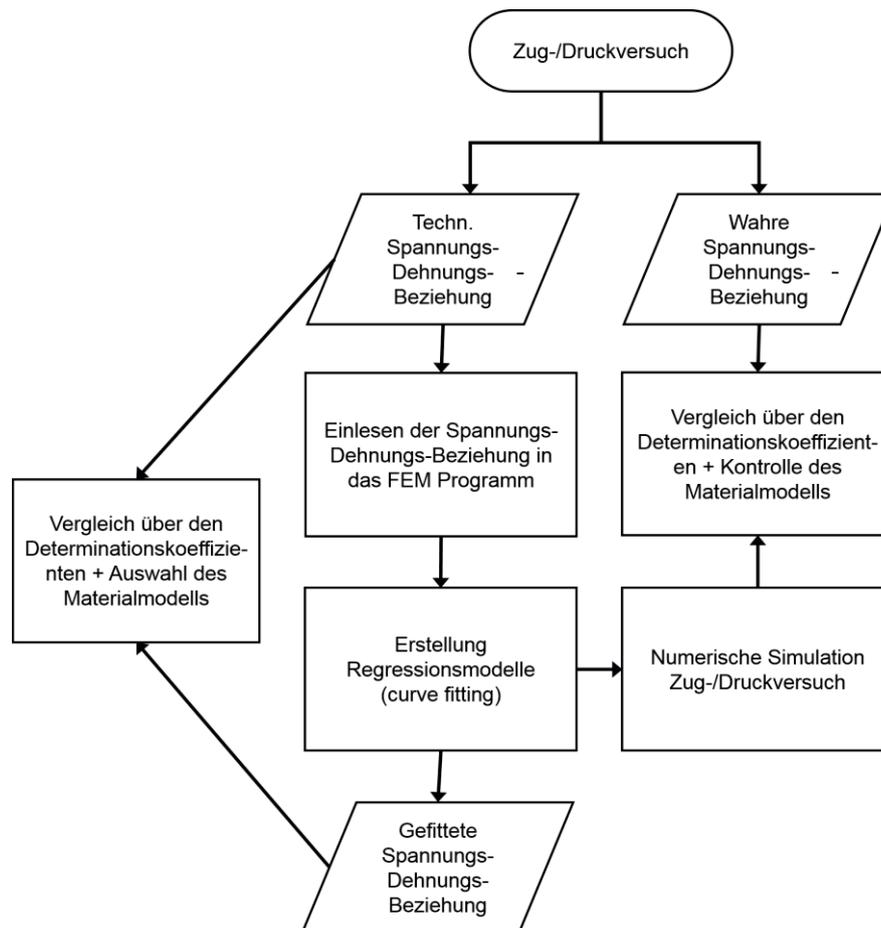


Abbildung 6-1: Ablaufdiagramm zum Vorgehen bei der Überprüfung eines numerischen Modells

6.1.1 Formänderungsenergie

Es kann nicht pauschal festgelegt werden für welche Anwendungsfälle welche Funktion der Formänderungsenergie geeignet ist. Vielmehr muss ermittelt werden welche Funktion die beste Approximation liefert. Der Zusammenhang zwischen Spannung und Formänderungsenergie ist in Gleichung (6-1) dargestellt.

$$\sigma_i = \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \quad (6-1)$$

Mit den Hauptspannungen σ_i ($i = 1; 2; 3$), der Formänderungsenergiedichte W und den Hauptverstreckgraden λ_i ($i = 1; 2; 3$). Es ist zu erkennen, dass die Hauptspannungen die Ableitung der Formänderungsenergiedichte nach dem Verstreckgrad sind. Der Verstreckgrad auch Streckung genannt bildet sich wie folgt:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = 1 + \frac{\Delta L}{L_0} = 1 + \varepsilon_i \quad (6-2)$$

Aus den Hauptverstreckgraden lässt sich der Cauchy-Green-Tensor \underline{C} bilden.

$$\underline{C} = \begin{pmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{pmatrix} \quad (6-3)$$

In vielen kommerziellen FEM-Programmen werden die Invarianten des Tensors zur Formulierung von hyperelastischen Materialmodellen verwendet. Die drei Invarianten des Tensors charakterisieren diesen und sind unabhängig vom gewählten Koordinatensystem. Die genaue Definition kann der Tabelle 6-1 entnommen werden.

Tabelle 6-1: Invarianten des Verzerrungstensors

Invariante	Definition
$I_1 = \text{Spur}(\underline{C}) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$	Längenänderung der Raumdiagonalen eines Volumenelementes
$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2$	Oberflächenänderung eines Volumenelementes
$I_3 = \det(\underline{C}) = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2$	Volumenänderung

Erkennbar ist die Beschreibung einer Volumenveränderung durch die dritte Invariante des Verzerrungstensors. Bei inkompressiblen Werkstoffen gilt somit:

$$I_3 = 1 \quad (6-4)$$

Eine Auswahl gängiger Formänderungsenergiedichtefunktionen werden im Folgenden vorgestellt. Allgemein kann jedoch festgehalten werden, dass sich die Formänderungsenergiedichte in einen deviatorischen und einen volumetrischen Anteil aufteilt.

Das Volumenverhältnis J bildet sich aus der Multiplikation der Hauptverstreckgrade.

$$J = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = \sqrt{I_3} \quad (6-5)$$

Somit kann der deviatorische Anteil der Hauptverstreckgrade nach Gleichung (6-6) gebildet werden.

$$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \cdot \lambda_i \quad (6-6)$$

Äquivalent zu den Hauptverstreckgraden kann bei den Invarianten des Verzerrungstensors ebenfalls der deviatorische Anteil mit Hilfe der deviatorischen Verstreckgraden gebildet werden.

$$\bar{I}_i = f(\bar{\lambda}_i) \quad (6-7)$$

Das erlaubt die Verwendung der Formänderungsenergiefunktionen bei inkompressiblen und kompressiblen Materialien. Je nachdem, ob der volumetrische Anteil der Folgenden Gleichung mit berücksichtigt wird oder nicht.

$$W = W_{dev}(\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\lambda}_3) + W_{vol}(J) \quad (6-8)$$

6.1.2 Dehnungen

Der Zusammenhang zwischen technischer Dehnung und wahrer Dehnung ist weithin bekannt. Trotzdem sollte, um Verwechslungen bei den unterschiedlichen Notationen in den gängigen Finite-Elemente-Methode Programmen zu vermeiden, dieser dargestellt werden.

Tabelle 6-2: Darstellung des Zusammenhangs zwischen wahren und technischen Dehnung

Dehnung	Bezeichnung	Zusammenhang
$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0}$	Technische-, Ingenieur-, Cauchy-, Nominal-	$\varepsilon_t = \lambda - 1$
$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$	Wahre-, natürliche-, logarithmische-, Hencky-	$\varepsilon_w = \ln(1 + \varepsilon_t)$
$\lambda = \frac{l}{l_0}$	Verstreckgrad, Streckung	$\lambda = 1 + \varepsilon_t$

Zur Eingabe der Spannungs-Dehnungs-Beziehung in die Programme ABAQUS und ANSYS werden technische Dehnungen und technische Spannungen verwendet.

6.2 Formänderungsenergiefunktionsdichtefunktionen

In diesem Unterkapitel werden die einzelnen Formulierungen der Formänderungsenergie kurz dargestellt. Dies erscheint sinnvoll, da eine Auswahl ausschließlich basierend auf der Determinationskoeffizienten nicht zu empfehlen ist [47]. Alle der hier aufgeführten Formulierungen können mit den FEM-Programmen ABAQUS und ANSYS ausgewählt werden.

6.2.1 Ansatz nach Arruda-Boyce

Das Modell von ARRUDA-BOYCE bezieht sich auf die Molekülketten eines Würfelementes. Die Formänderungsenergie ergibt sich aus der Summe der Formänderungsenergien einzelner Molekülketten in einem definierten Raum.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} \cdot (\bar{I}_1 - 3^i) + \frac{1}{D} \cdot \left[\frac{J^2 - 1}{2} - \ln(J) \right] \quad (6-9)$$

Mit folgenden Koeffizienten:

C_1	$\frac{1}{2}$
C_2	$\frac{1}{20}$
C_3	$\frac{11}{1050}$
C_4	$\frac{19}{7000}$
C_5	$\frac{519}{673750}$

6.2.2 Reduzierter Polynom Ansatz

Die einfachste Formulierung eines hyperelastischen Materialmodells ist das *reduced polynomial* Modell. Es basiert nur auf der ersten Invariante des Verzerrungstensors.

$$W = \sum_{i=1}^N C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (6-10)$$

Der Grad des Polynoms ist variabel und kann entsprechend den Anforderungen angepasst werden. Bei $N = 1$ liegt die Neo-Hook'sche Formulierung vor. Das Modell von Yeoh liegt bei $N = 3$ vor [36].

6.2.3 Polynomansatz

Der Polynomansatz stellt eine Erweiterung des *reduced polynomial* Modells dar. Es wird neben der ersten auch die zweite Invariante des Verzerrungstensors berücksichtigt. Liegt ein inkompressibles Material vor, so ist der zweite Summand der Gleichung null. In diesem Fall liegt die Formulierung nach MOONEY RIVLIN vor [48].

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (6-11)$$

6.2.4 Ansatz nach Ogden

Anders als bei den bisher vorgestellten Modellen wird bei dem Modell nach OGDEN die Formänderungsenergie in Abhängigkeit der Hauptverstreckgraden gebildet.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \cdot (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (6-12)$$

6.3 Kurvenanpassung (Curve-Fitting)

6.3.1 Allgemeines

Für die Bestimmung der unterschiedlichen Konstanten für die Materialmodelle wird meist die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Gauß-Newton-Algorithmus) verwendet. Da sich das Gauß-Newton-Verfahren nicht immer als stabil erweist, kann eine Ergänzung durch den Levenberg-Marquardt-Algorithmus erfolgen. Auf diese Weise kann eine höhere Konvergenzstabilität erzielt werden.

Die im Folgenden beschriebenen Algorithmen sind in einer Excel-Datei mit Hilfe von Visual-Basics for Applications (VBA) implementiert worden. Die Datei dient zur Überprüfung der Kurvenanpassungsfunktionen innerhalb der FEM-Programme, da über die Vorgehensweise dieser Programme leider keine Informationen gefunden werden konnten.

Implementiert wird das Modell nach Ogden, der Polynomansatz und der reduzierte Polynomansatz.

6.3.2 Gauß-Newton-Verfahren

Durch die „Methode der kleinsten Quadrate“ wird das Residuum minimiert. Dadurch wird ein „überbestimmtes Problem“ in eine leicht handhabbare Form transferiert.

Der Ablauf lässt sich wie folgt beschreiben (Beispiel im Anhang):

1. Aufstellen der Residuum-Funktion

$$r = f(x_1, \dots, x_n) - y \quad (6-13)$$

2. Berechnung der partiellen Ableitung nach jedem Parameter

$$r_1 = \frac{\partial r}{\partial a_1}; \dots; r_p = \frac{\partial r}{\partial a_p} \quad (6-14)$$

$$r'_{i,j} = \frac{\partial r}{\partial a_i}(x_{i,1}; \dots; x_{i,n}) \quad (6-15)$$

3. Aufbau der Jacobi-Matrix D , dem Residuenvektor r und dem Parametervektor a

$$D = \begin{bmatrix} r'_{1,1} & \dots & r'_{1,p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_{k,1} & \dots & r'_{k,p} \end{bmatrix}; r = \begin{pmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_k \end{pmatrix}; a = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} \quad (6-16)$$

4. Die Iterationen erfolgen durch die Berechnung folgender Matrixgleichung

$$a_{i+1} = a_i - (D^T \cdot D)^{-1} \cdot D^T \cdot r \quad (6-17)$$

5. Die Schleife wird abgebrochen, wenn die Differenz aller Parameter und der vorhergehenden Parameter eine Schranke ε unterschreitet

$$|a_{i+1} - a_i| \leq \varepsilon \quad (6-18)$$

Das Gauß-Newton-Verfahren konvergiert schnell, ist aber nicht sehr robust, d.h. eine Konvergenz ist nicht unbedingt gegeben. Ein Beispiel kann dem Anhang entnommen werden. Um eine höhere Robustheit zu erzielen kann das Gauß-Newton-Verfahren um den Levenberg-Marquardt-Algorithmus (LMA) ergänzt werden.

6.3.3 Levenberg-Marquardt-Algorithmus

Der LMA erweitert das Gauß-Newton-Verfahren dahingehend, dass in jedem Iterationsschritt überprüft wird, ob sich das Ergebnis der Lösung annähert oder nicht. Findet keine Annäherung an die Lösung statt, wird der Iterationsschritt verworfen und mit Hilfe eines „Dämpfungsparameters“ erneut berechnet. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt bis sich eine „Verbesserung“ der Lösung einstellt.

Das heißt der LMA benötigt meist eine längere Rechenzeit als das Gauß-Newton-Verfahren, die Wahrscheinlichkeit eines vorzeitigen Abbruches der Berechnung ist jedoch geringer.

Mit den im Abschnitt zum Gauß-Newton-Verfahren eingeführten Bezeichnungen sieht das LMA folgendermaßen aus:

1. Die Jacobimatrix D wird mit einer Einheitsmatrix multipliziert und mit dem Dämpfungsparameter μ erweitert, der Residuenvektor wird lediglich um entsprechend viele Nullen erweitert (Jacobimatrix und Residuenvektor müssen die gleiche Anzahl an Zeilen aufweisen).

$$D_{erw.} = \begin{pmatrix} D \\ \mu \cdot I \end{pmatrix} \quad r_{erw.} = \begin{pmatrix} r \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6-19)$$

2. Das lineare Ausgleichsproblem stellt sich wie folgt dar:

$$s_i = (D_{erw.}^T \cdot D_{erw.})^{-1} \cdot D_{erw.}^T \cdot r_{erw.} \quad (6-20)$$

3. Für die Prüfung der Lösungsverbesserung wird der folgende Zwischenwert berechnet:

$$\rho_\mu = \frac{\|r_{erw.}(a_i)\|_2^2 - \|r_{erw.}(a_i + s_i)\|_2^2}{\|r_{erw.}(a_i)\|_2^2 - \|r_{erw.}(a_i) + D(a_i) \cdot s_i\|_2^2} \quad (6-21)$$

4. Der Wert ρ_μ bestimmt durch folgende Fallunterscheidung über die weitere Vorgehensweise.

- $\rho_\mu \leq \beta_0$: a_i stellt *keine* Verbesserung der Lösung dar und wird verworfen. Es erfolgt eine erneute Berechnung mit einem verdoppelten Dämpfungsparameter.
 - $\beta_0 \leq \rho_\mu \leq \beta_1$: a_i stellt *eine* Verbesserung der Lösung dar. Es erfolgt keine erneute Berechnung.
 - $\beta_1 \leq \rho_\mu$: a_i stellt *eine* Verbesserung der Lösung dar. Es erfolgt keine erneute Berechnung. Der Dämpfungsparameter wird halbiert.
5. Die weitere Berechnung erfolgt analog zum Gauß-Newton-Verfahren

6.4 Anpassungsgüte der Materialmodelle

Die Anpassungsgüte soll über den Determinationskoeffizient, auch Bestimmtheitsmaß genannt, quantitativ beurteilt werden. Der Determinationskoeffizient dient als ein Auswahlkriterium für ein hyperelastisches Materialmodell. Er wird zwischen der technischen Spannungs-Dehnungs-Linie aus dem uniaxialen Zugversuch und der gefitteten Spannungs-Dehnungs-Linie aus dem FEM-Programm berechnet. Zusätzlich wird der Determinationskoeffizient zwischen der wahren Spannungs-Dehnungs-Linie aus dem uniaxialen Zugversuch und dem simulierten Zugversuch ermittelt.

6.4.1 Grundlagen zur Ermittlung des Determinationskoeffizients

Der Determinationskoeffizient dient der Bewertung der qualitativen Güte zur Bestimmung des Zusammenhanges zwischen zwei Merkmalen. Dabei wird zunächst die Varianzzerlegung durchgeführt und die Abweichung eines Merkmals y gegenüber dem arithmetischen Mittels bestimmt und mit der Variation der Residuen in Bezug gesetzt (siehe Gleichung (6-22)) [49].

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6-22)$$

Für den Determinationskoeffizient gilt weiter folgende Ungleichung.

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (6-23)$$

Erreicht der Determinationskoeffizient den Wert 1, so liegen alle gemessenen Werte auf der Regressionskurve. Ein Determinationskoeffizient, der möglichst nah an dieser oberen Grenze liegt ist erstrebenswert. Ein hoher Determinationskoeffizient ist also ein guter Anhaltspunkt zur Auswahl des Regressionsmodells, sollte aber dennoch kritisch beurteilt werden. Eine Auswahl ausschließlich basierend auf den Determinationskoeffizienten ist nicht zu empfehlen [50]. Zusätzlich muss die Sinnhaftigkeit der angepassten Kurve überprüft werden.

Da im vorliegenden Fall nur zwei erklärende Variablen betrachtet werden, wird auf die Betrachtung des adjustierten Bestimmtheitsmaßes verzichtet [51].

6.5 Anpassungsgüte des uniaxialen Zugversuches

Am Beispiel des EPDM mit einer ShA 70 wird das Vorgehen aufgezeigt, die restlichen Daten können dem Anhang (Kapitel 0) entnommen werden. Die technische Spannungs-Dehnungs-Linie aus dem uniaxialen Zugversuch besteht aus 1130 Wertepaaren bedingt durch die Aufnahmezeit des Videoextensometers. Diese technischen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen werden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen und anschließend wird aus allen sechs durchgeführten Versuchen die gemittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehung an die FEM-Software ABAQUS 6.12 übergeben. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven sind in Abbildung 6-2 zu erkennen. In ABAQUS wird beim „Curvefitten“ für jedes Materialmodell eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung mit 1130 Wertepaaren erzeugt.

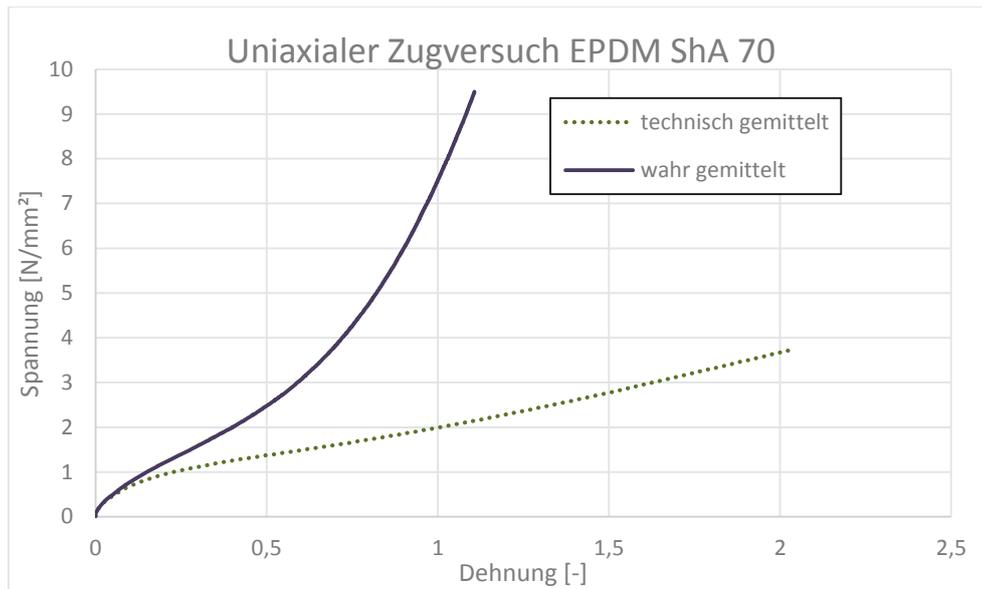


Abbildung 6-2: Technische und wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch für EPDM ShA 70

Als ABAQUS Ausgabe wird zum einen der Plot mit allen technischen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen (vergleiche Abbildung 6-3), zum anderen werden die Wertepaare in Tabellenform ausgegeben. Dies erleichtert die Bestimmung der Determinationskoeffizienten. Die Aussagekraft des Plots ist nur qualitativ, vermittelt aber einen ersten Eindruck über die Güte der Materialmodelle.

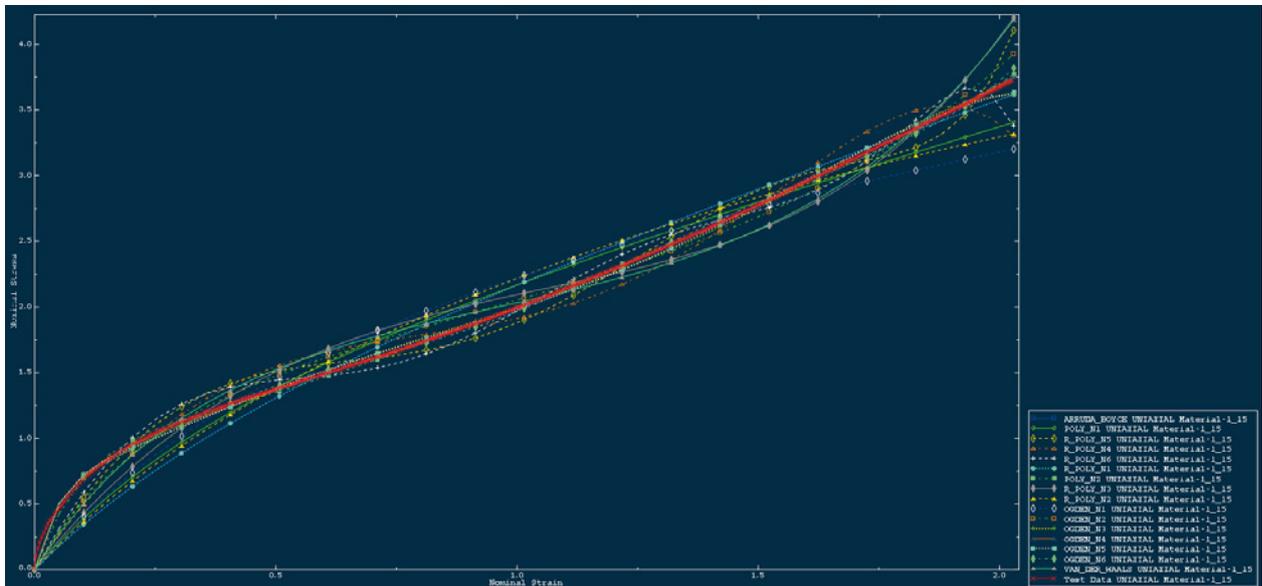


Abbildung 6-3: Technische Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus dem uniaxialen Zugversuch und der Materialmodelle aus ABAQUS

Übersichtlicher ist hier die generierte Kurve aus den Tabellenwerten der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen. Aus den Wertepaaren werden nach Gleichung (6-22) für jedes Materialmodell die Determinationskoeffizienten gebildet (vergleiche Tabelle 6-3). Je nach Grad des Polynoms der Funktion trägt die Formulierung die Bezeichnung N1 bis N6. OGDN_N5 ist folglich eine Formulierung nach OGDN mit einem Polynom fünften Grades.

Tabelle 6-3: Determinationskoeffizient für die verschiedenen Formänderungsenergiedichtefunktionen aus dem uniaxialen Zugversuch und den gefitteten Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Formänderungsenergiedichtefunktion nach	R ² [-]
ArrudaBoyce	0.968665535
OGDEN_N1	0.93676534
OGDEN_N2	0.990213558
OGDEN_N3	0.998933514
OGDEN_N5	0.99908766
OGDEN_N6	0.99922508
POLY_N1	0.96722021
POLY_N2	0.999487162
Red_POLY_N1	0.968665535
Red_POLY_N2	0.95185404
Red_POLY_N3	0.965937337
Red_POLY_N6	0.990726534
Van_der_Waals	0.972407463

In Abbildung 6-4 ist zu erkennen, dass insgesamt eine gute Anpassungsgüte der Modelle erreicht wird. Wie zu erwarten war sind die höherwertigen Polynome auch näher an der experimentellen Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Dies beruht aber auf einem rein mathematischen Zusammenhang und hat unter Umständen keine physikalischen Effekte zur Folge.

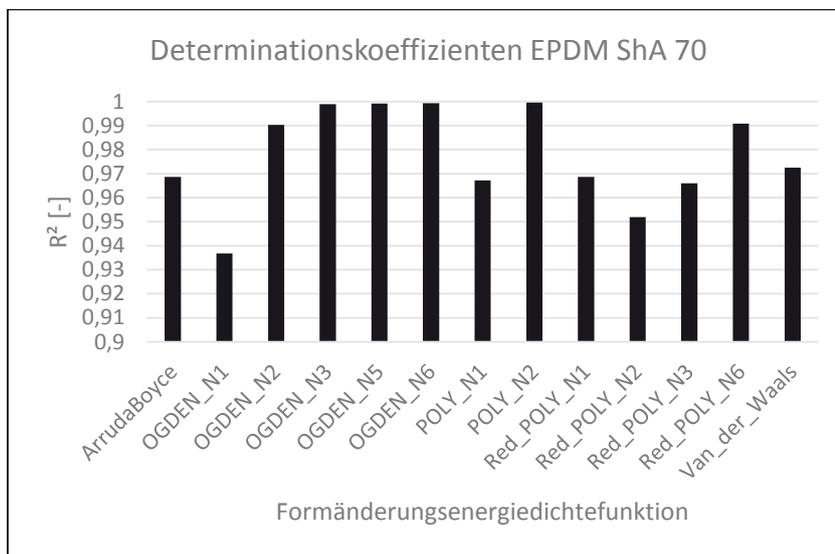


Abbildung 6-4: Determinationskoeffizienten der unterschiedlichen Formänderungsenergiedichtefunktionen aus dem uniaxialen Zugversuch und den gefitteten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen

6.5.1 Überprüfung der Anpassungsgüte über eine FEM-Simulation

In einem zweiten Schritt wird der uniaxiale Zugversuch mit allen in Tabelle 6-3 angegebenen hyperelastischen Materialmodellen in ABAQUS numerisch simuliert. Dies dient zur Kontrolle der in Kapitel 6.5 ermittelten Anpassungsgüte. Für das Element mit der Nr. 830, das am Schnittpunkt aller drei Sym-

metrieachsen des Zugstabes liegt wird die Spannungs-Dehnungs-Beziehung mit der wahren Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch verglichen. Zwischen diesen beiden Beziehungen wird erneut der Determinationskoeffizient bestimmt.

In Abbildung 6-5 ist das numerische Modell der Zugprobe aus ABAQUS zu sehen. Die starke Deformation und die qualitativen Spannungen in Y-Richtung sind zu erkennen. Als hyperelastisches Materialmodell wird in der Abbildung exemplarisch das Red_POLY_N6 gewählt. Die Geometrie wird mit vier Knoten Schalenelemente S4R vernetzt. Eine Studie zur Elementgröße lies bei gewählter Konfiguration keinen Einfluss erkennen. Um die Rechenzeit zu reduzieren wird lediglich eine Verschiebung in Y-Richtung von 80 mm an der oberen Kante vorgenommen. Das entspricht annähernd einer Dehnung von 100 %. Die untere Kante wird unverschieblich gelagert.

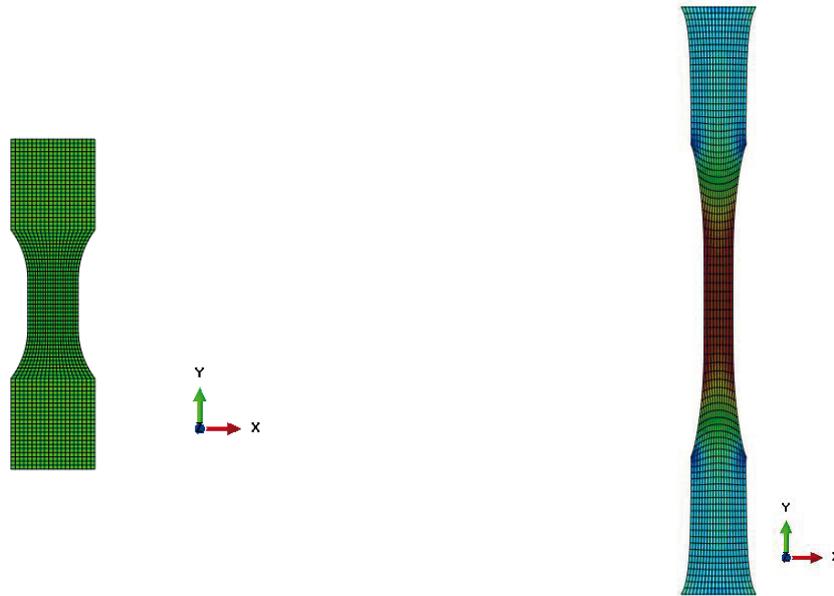


Abbildung 6-5: Modellierte Zugprobe unbelastet (links) und belastet (rechts)

Allgemein gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen der wahren Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch und der simulierten Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Eine qualitative Beurteilung kann anhand der Abbildung 6-6 vorgenommen werden. Zu erkennen sind die Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch und das exemplarische Materialmodell nach dem OGDEN_N6 Ansatz. Eine quantitative Beurteilung der einzelnen hyperelastischen Materialmodelle erfolgt im folgenden Abschnitt.

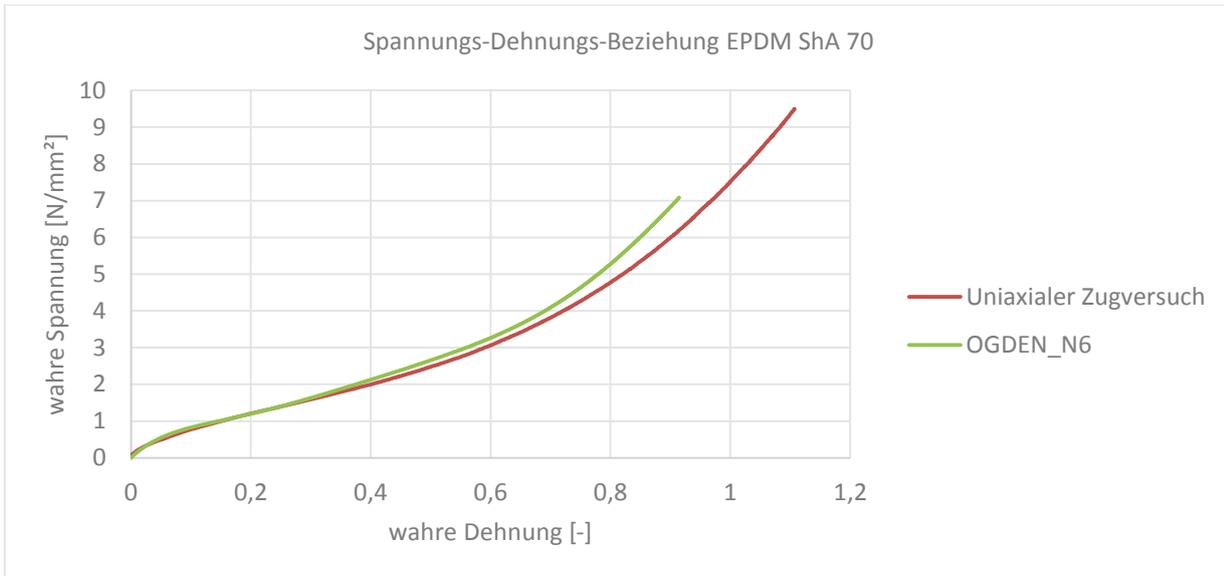


Abbildung 6-6: Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation unter Verwendung des OGDEN_N6 Ansatzes

Die wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch besteht aus 1130 Wertepaaren. Die Anzahl der Wertepaare aus der generierten Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus der numerischen Simulation ist gleich der Anzahl der Inkremente, die der ABAQUS-Solver zum Lösen des Gleichungssystems benötigt. Die Anzahl wird je nach Bedarf vom Programm automatisch festgelegt [52]. So ist die Anzahl der Wertepaare aus denen der Determinationskoeffizient bestimmt wird unterschiedlich. Daraus folgt, dass Gleichung (6-22) nicht ohne Aufbereitung der generierten Daten angewendet werden kann. Es gibt die Möglichkeit die Anzahl der Inkremente auf einen bestimmten Wert festzulegen, diese wird nach [52] jedoch nicht empfohlen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird dennoch die Anzahl der Inkremente festgelegt, es kam allerdings zu deutlich erhöhten Rechenzeiten. Deshalb erfolgt die Bestimmung des Determinationskoeffizienten in diesem Fall mit der Datenanalysesoftware Origin. Diese erlaubt es die Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus der FEM-Simulation mit einem Polynom neunten Grades abzubilden, und ermöglicht das Auslesen der Spannung an den gleichen Dehnungsstellen wie aus dem Versuch. Somit ist eine Vergleichbarkeit zwischen den Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus Versuch und Simulation gegeben.

Eine Übersicht zur qualitativen Überprüfung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ist in Abbildung 6-7 zu erkennen. Es werden gute Übereinstimmungen erreicht, lediglich die Materialmodelle OGDEN_N3 und OGDEN_N4 konvergieren nicht. Bei dem Materialmodell Red_POLY_N5 weichen die Spannungen aus der Simulation ab einer Dehnung ca. 0,9 [-] deutlich ab.

Die Determinationskoeffizienten werden für den Werkstoff EPDM ShA 70 exemplarisch bestimmt.

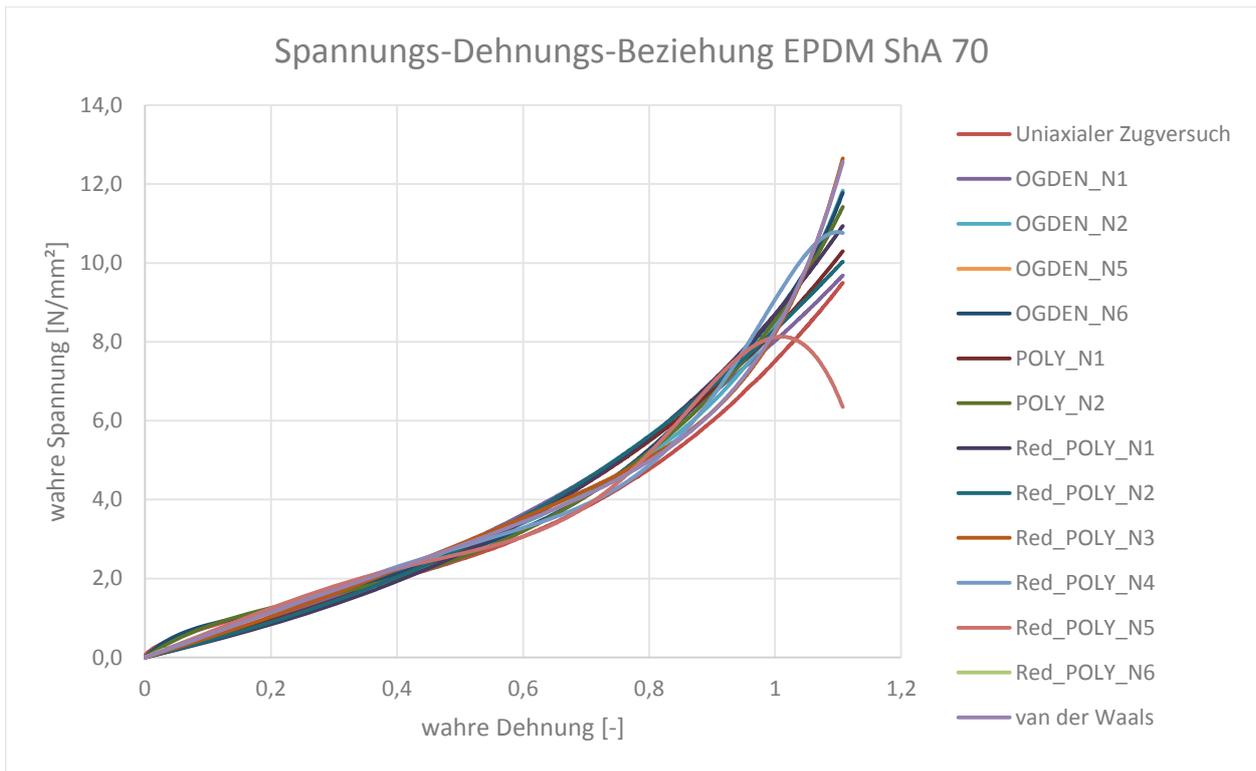


Abbildung 6-7: Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze

Es ist zu erkennen, dass es ab einer Dehnung von 1 zu deutlichen Abweichungen zwischen Versuchsdaten und simulierten Spannungs-Dehnungs-Beziehung kommt. Deshalb wurde das Betrachtungsspektrum auf eine Dehnung von 0,5 [-] reduziert und erneut die Determinationskoeffizienten bestimmt (vergleiche Abbildung 6-8). Die Determinationskoeffizienten sind für beide Betrachtungsbereiche in Tabelle 6-4 aufgelistet.

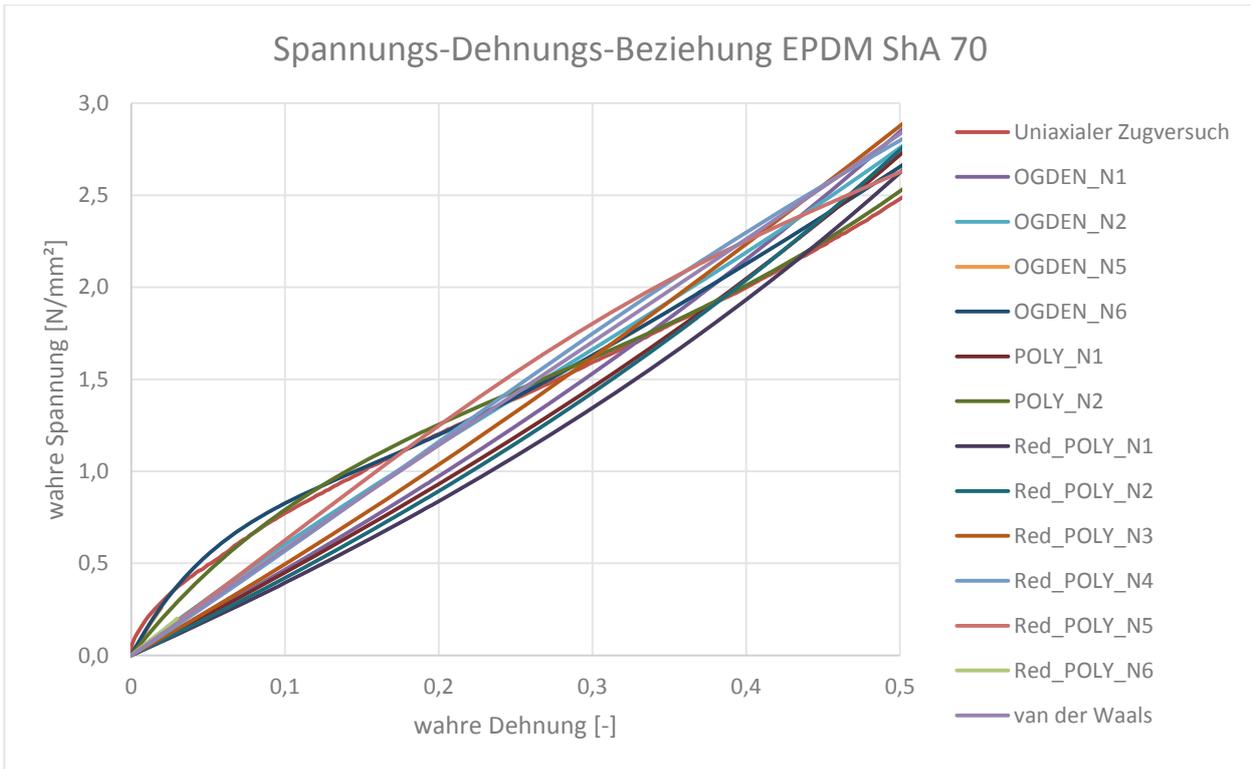


Abbildung 6-8: Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze; Dehnung bis 0,5 [-].

Tabelle 6-4: Determinationskoeffizienten EPDM ShA 70 aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation

Formänderungsenergiedichtefunktion nach	R ² [-]	R ² Dehnung bis 0,4993939 [-]
ArrudaBoyce	0.89454133	0.83497577
OGDEN_N1	0.95860314	0.87893521
OGDEN_N2	0.91349731	0.93606314
OGDEN_N3	Keine Konvergenz	Keine Konvergenz
OGDEN_N4	Keine Konvergenz	Keine Konvergenz
OGDEN_N5	0.87122235	0.98612984
OGDEN_N6	0.89314649	0.97942253
POLY_N1	0.94425141	0.89055986
POLY_N2	0.91769866	0.99648852
Red_POLY_N1	0.8947036	0.83431578
Red_POLY_N2	0.9380798	0.86474618
Red_POLY_N3	0.89065787	0.8713746
Red_POLY_N4	0.88582669	0.87937883
Red_POLY_N5	0.05018794	0.9178073
Red_POLY_N6	0.9133795	0.95177008
van der Waals	0.89373149	0.89457529

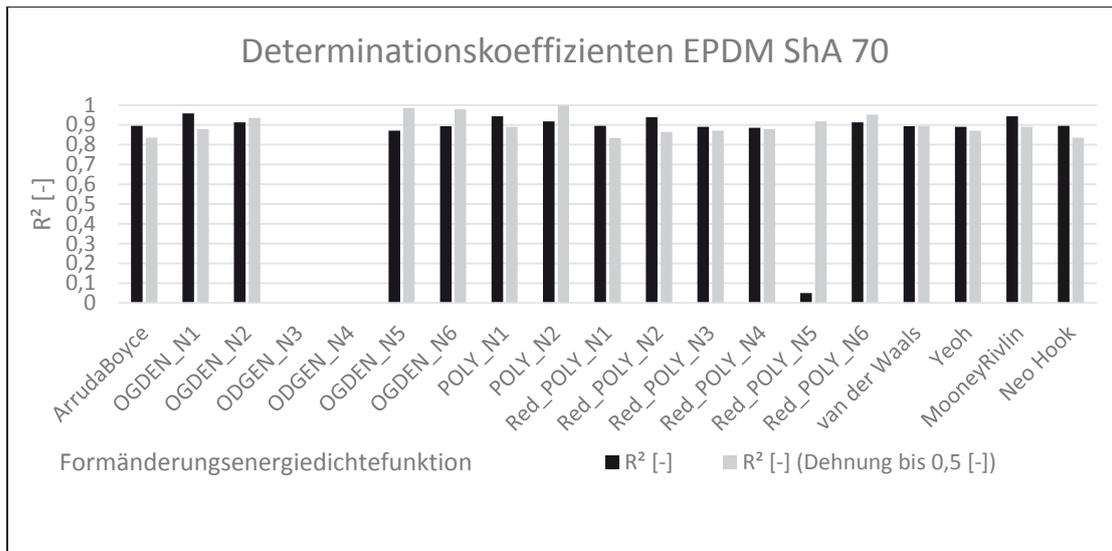


Abbildung 6-9: Determinationskoeffizienten aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation (gesamter Dehnbereich: schwarz; Dehnbereich bis 0,5 [-]: grau)

In der Übersicht (vergleiche Abbildung 6-9) ist zu erkennen, dass die Betrachtung der gefitteten Werte bereits gute Übereinstimmungen liefern. Die FEM-Simulation des uniaxialen Zugversuches und die Bestimmung der Determinationskoeffizienten dienen zur Überprüfung und zeigen, dass eine Auswahl der Formänderungsenergiedichtefunktion anhand des Determinationskoeffizienten aus den gefitteten Werten als ausreichend bewertet werden kann (vgl. Kapitel 6.5).

6.6 Anpassungsgüte der uniaxialen Druckversuche

Aus den technischen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der uniaxialen Druckversuche werden hyperelastische Materialmodelle abgeleitet und auf ihre Anpassungsgüte hin untersucht. Das Vorgehen ist dabei äquivalent zu dem der uniaxialen Zugversuche (siehe Abbildung 6-1). Dies wird am Material EPDM ShA 60 für die Rechteckgeometrie beispielhaft vorgeführt. Die restlichen Daten für die unterschiedlichen Materialien und Probengeometrien können dem Anhang (Kapitel 11) entnommen werden. Die technische Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch (quadratische Geometrie) und die daraus abgeleiteten Materialmodelle sind in Abbildung 6-10 zu erkennen. Die Aussagekraft des Plots ist nur qualitativ, deshalb werden für einen quantitativen Vergleich die Determinationskoeffizienten berechnet. Trotzdem vermittelt Abbildung 6-10 einen ersten Eindruck über die Anpassungsgüte der Materialmodelle, die in diesem Fall mit gut bewertet werden kann.

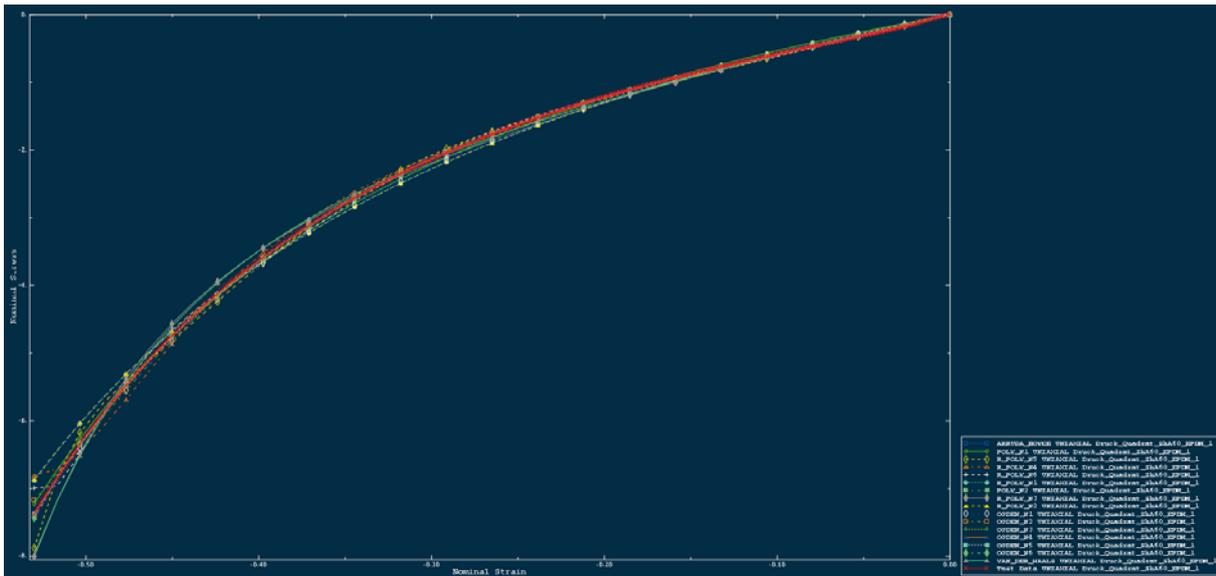


Abbildung 6-10: Technische Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch (Quadratische Geometrie) EPDM ShA 60 und der erstellten Materialmodelle aus ABAQUS

Für die technische Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch und den erstellten Materialmodellen werden zur Beurteilung der Anpassungsgüte die Determinationskoeffizienten berechnet. Diese sind in Tabelle 6-5 aufgelistet und liegen in einem Bereich, der sehr nah am Grenzwert 1 liegt, was bedeutet, dass eine gute Anpassung der Materialmodelle gelungen ist.

Tabelle 6-5: Determinationskoeffizient für die verschiedenen Formänderungsenergiedichtefunktionen aus dem uniaxialen Druckversuch (Rechteckgeometrie) und den erstellten Materialmodellen

Formänderungsenergiedichtefunktion nach	R ² [-]
ArrudaBoyce	0,986662577
OGDEN_N1	0,984773803
OGDEN_N2	0,999906282
ODGEN_N3	0,999919447
ODGEN_N4	0,999973832
OGDEN_N5	0,999968629
OGDEN_N6	0,999910703
POLY_N1	0,995277501
POLY_N2	0,999966285
Red_POLY_N1	0,986662577
Red_POLY_N2	0,999886302
Red_POLY_N3	0,991839066
Red_POLY_N4	0,996183298
Red_POLY_N5	0,997970181
Red_POLY_N6	0,998841725
van der Waals	0,996103712

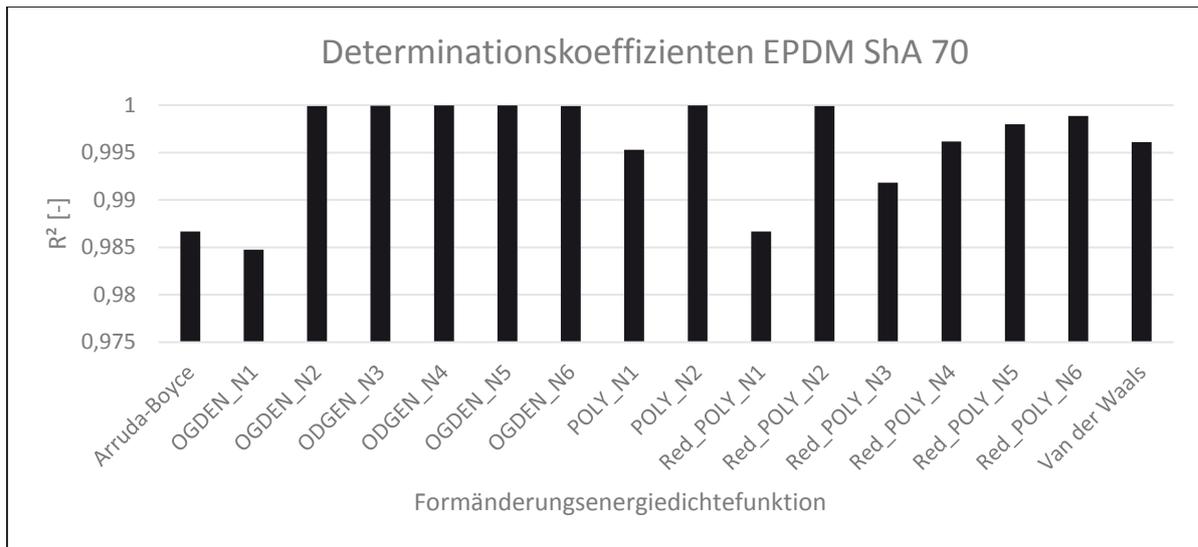


Abbildung 6-11: Determinationskoeffizienten gebildet aus dem uniaxialen Druckversuch (Rechteckgeometrie) und den erstellten Materialmodellen

6.6.1 Überprüfung der Anpassungsgüte über FEM-Simulationen

Um die Ergebnisse aus Kapitel 6.6 zu überprüfen werden einzelne uniaxiale Druckversuche über FEM-Simulationen nachgebildet und die wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem Versuch und die der Simulation verglichen. Die modellierten Druckproben sind in Abbildung 6-12 zu erkennen. Abgebildet sind die Spannungen in Y-Richtung (Dickenrichtung) exemplarisch für EPDM ShA 60 und das OGDEN_N6 Materialmodell. Die Geometrien sind mit 20 Knoten Volumenelementen C3D20RH vernetzt. Bei gewählter Konfiguration lässt eine Elementnetzstudie keine Abhängigkeit des Netzes erkennen.

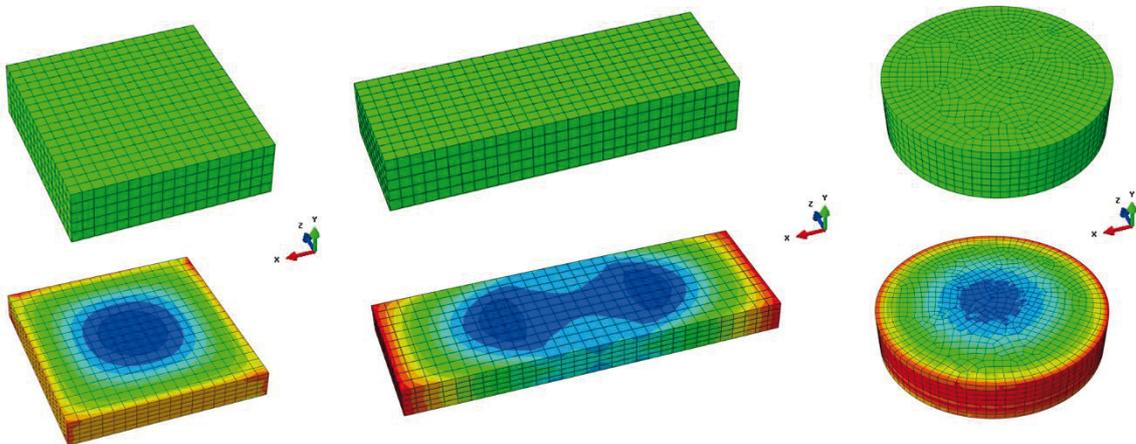


Abbildung 6-12: Modellierte Druckproben unbelastet (oben) und belastet (unten)

Die Kontaktflächen zwischen Probekörper und den beiden starren Platten (analytical rigid) wird in Tangentialenrichtung reibungsfrei ausgeführt, da bei den experimentellen Untersuchungen die Haftreibung zwischen Probekörper und Stahlpressbacke der Prüfmaschine mit Schmierfett minimiert wurde. In Normalenrichtung ist die Kontaktbeziehung „hard“ eingestellt. Dadurch wird gewährleistet, dass die Probekörper nicht in die starre Platte eindringen. Die Verformung in Dickenrichtung wird über die beiden starren Platten aufgebracht (siehe Abbildung 6-13).

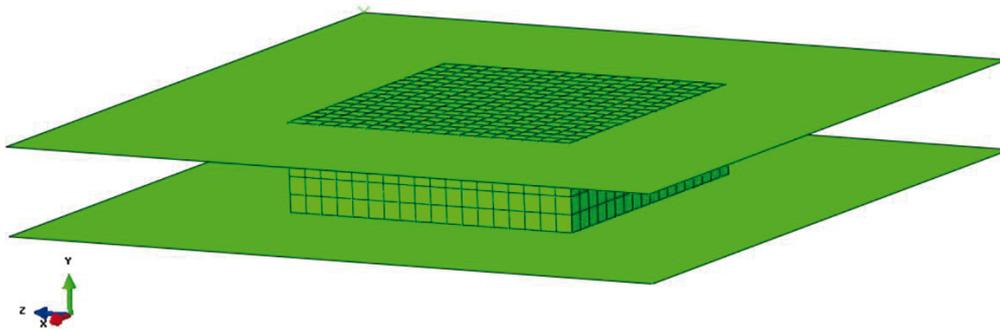


Abbildung 6-13: Modellierter Druckprobe (Quadratische Geometrie) mit den starren Platten zur Aufbringung der Verschiebung in Y-Richtung

Abbildung 6-14 zeigt die wahre Spannung über der wahren Dehnung für den uniaxialen Druckversuch der quadratischen Geometrie und den unterschiedlichen Materialmodellen der FEM-Berechnung. Eine erste visuelle Beurteilung zeigt gute Anpassungsergebnisse der unterschiedlichen Materialmodelle. Alle Ansätze der Formänderungsenergiegedichte zeigen ein leicht steiferes Verhalten im höheren Dehnbereich.

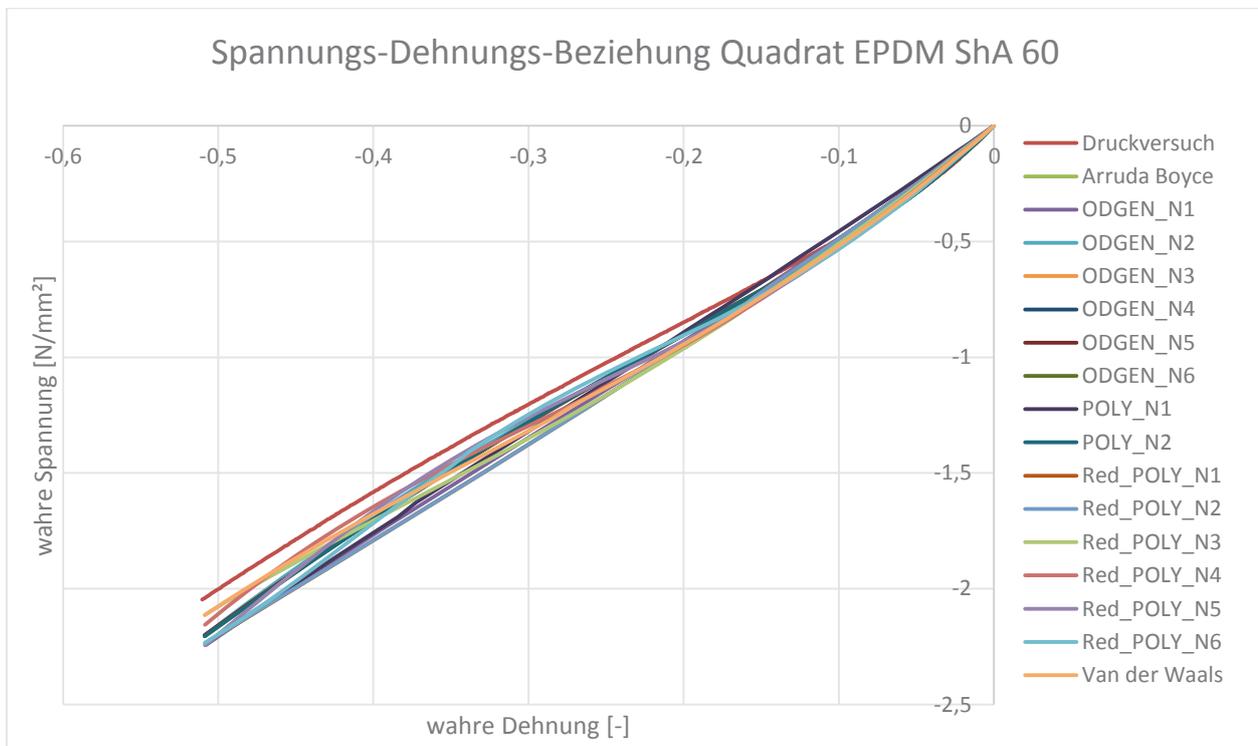


Abbildung 6-14: Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch (Quadratische Geometrie) und der FEM-Simulation unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze. EPDM ShA60

Um quantitativ beurteilen zu können, wie gut die Simulationen den Versuch abbilden, werden die Determinationskoeffizienten gebildet. Tabelle 6-6 listet die Determinationskoeffizienten auf. Diese liegen in einem Bereich um den Wert 0,95 herum und bestätigen somit die sehr gute Anpassungsgüte aus Kapitel 6.6.

Tabelle 6-6: Determinationskoeffizienten EPDM ShA 60 (Quadrat) aus dem uniaxialen Druckversuch und der FEM-Simulationen

Formänderungsenergiedichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0.938443418
OGDEN_N1	0.951430593
OGDEN_N2	0.982462763
ODGEN_N3	0.979020863
ODGEN_N4	0.978524999
OGDEN_N5	0.978272734
OGDEN_N6	0.977793163
POLY_N1	0.960969860
POLY_N2	0.977798440
Red_POLY_N1	0.938356516
Red_POLY_N2	0.938452988
Red_POLY_N3	0.967577105
Red_POLY_N4	0.981798161
Red_POLY_N5	0.978742453
Red_POLY_N6	0.973428944
Van der Waals	0.978503716

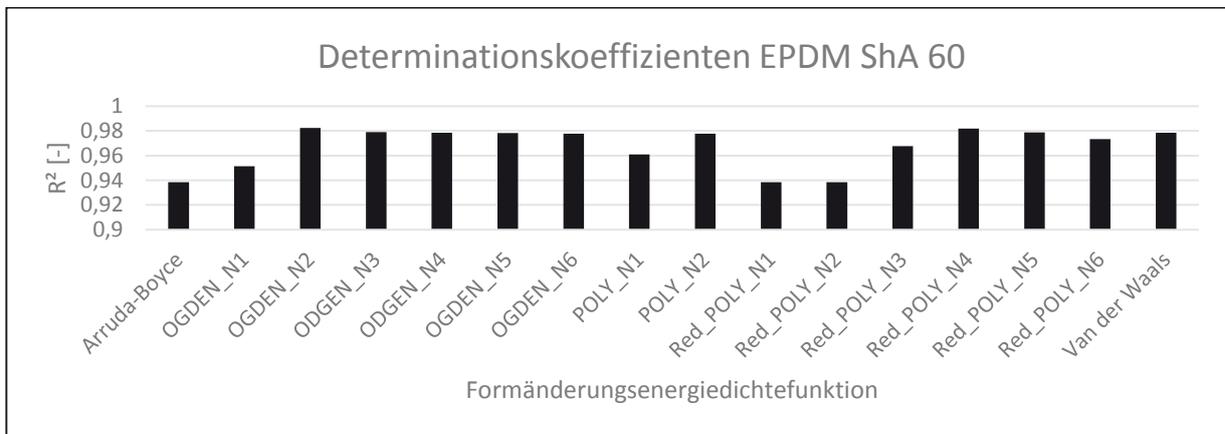


Abbildung 6-15: Determinationskoeffizienten aus dem uniaxialen Druckversuch (Quadratische Geometrie) und der FEM-Simulation unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze

Für die Verifikation der Anpassungsgüte der rechteckigen und kreisförmigen Geometrie, dargestellt in Abbildung 6-12, wird das Materialmodell nach OGDEN_N2 überprüft, da dieses bei allen Untersuchungen sehr gute Ergebnisse liefert. In Abbildung 6-16 sind für die rechteckige Geometrie die wahre Spannung über die wahre Dehnung des Versuches und der FEM-Simulation aufgetragen. Die beiden Kurven decken sich nahezu zu 100 %, somit kann über die FEM-Simulation die Steifigkeit des Materials sehr genau abgeschätzt werden. Der Determinationskoeffizient liegt in diesem Fall bei $R^2 = 0,99970309$.

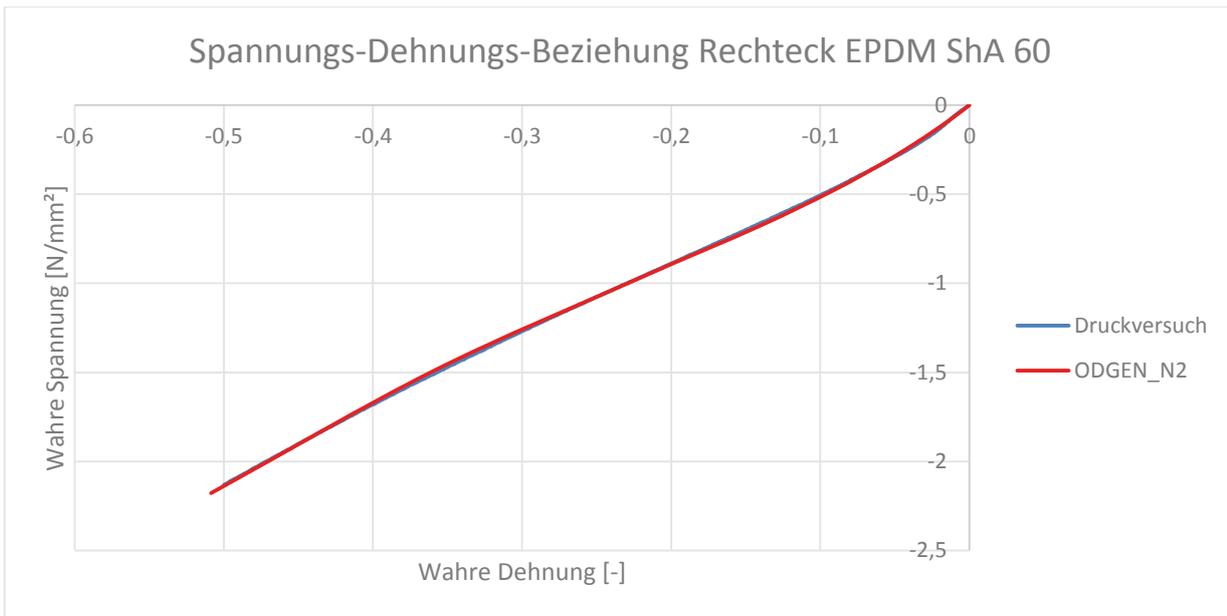


Abbildung 6-16: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch (Rechteckige Geometrie) und der FEM-Simulation mit dem Materialmodell ODGEN_N2 für EPDM ShA 60

Abbildung 6-17 zeigt die wahre Spannung über die wahre Dehnung für den uniaxialen Druckversuch der kreisförmigen Geometrie für das Material EPDM ShA 60. Es ist eine gute Übereinstimmung der Steifigkeit aus Versuch und FEM-Simulation zu erkennen. Ein Determinationskoeffizient von $R^2=0,99975066$ bestätigt das gute Ergebnis quantitativ.

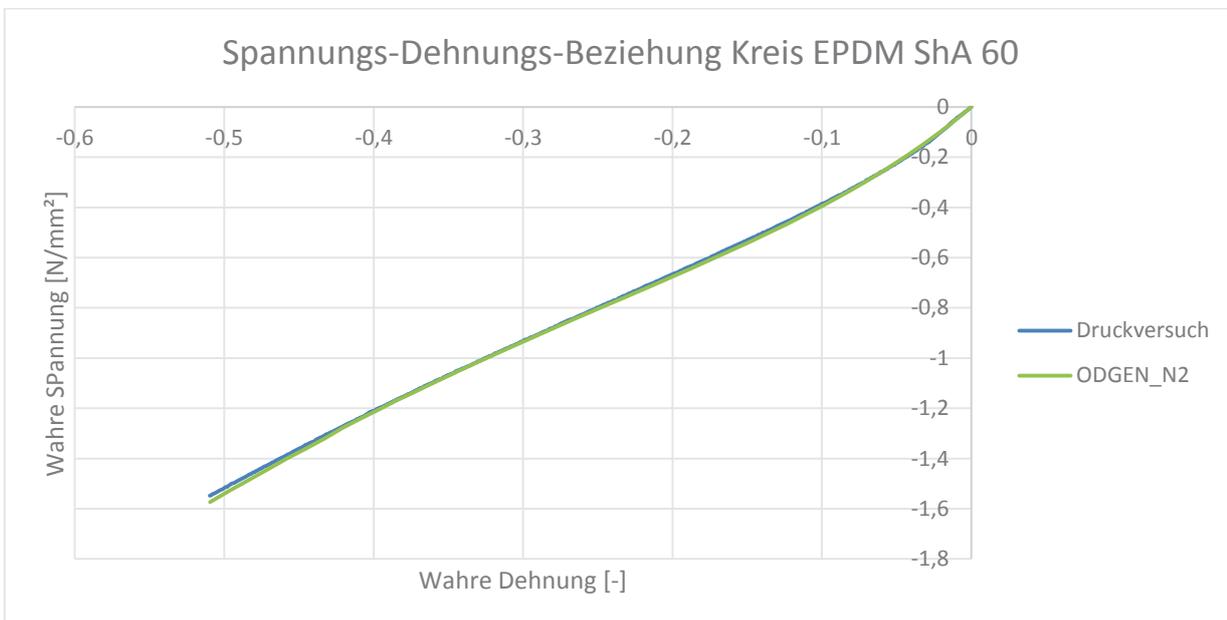


Abbildung 6-17: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch (Kreis) und der FEM-Simulation mit dem Materialmodell ODGEN_N2 für EPDM ShA 60

Die Ergebnisse aus Kapitel 6.6 konnten über die FEM-Simulationen verifiziert werden. Daraus folgt das eine Auswahl des Materialmodells anhand des Vorgehens aus Kapitel 6.6 zulässig ist. Eine aufwendige Modellierung und Simulation von Probekörpern, wie sie in diesem Kapitel zur Überprüfung durchgeführt wurden, ist nicht notwendig.

7 Semi-Analytisches Berechnungsverfahren

7.1 Ableitung materieller Kennwerte auf Basis von Indentation und Shore-Härten

Um den experimentellen Aufwand zur Bestimmung von Materialparametern an gummiartigen Werkstoffen möglichst gering zu halten, wurden in der Vergangenheit insbesondere Härte-Prüfungen aufgrund ihrer Einfachheit herangezogen und hierfür Berechnungsansätze entwickelt. Dabei wurden Äquivalenzbeziehungen aufgestellt, die eine Relation zwischen Steifigkeitskennwerten und den Parametern der Härte-Prüfung beschreiben [14].

In DIN ISO 48 1994 und [53] wird der Ansatz nach [54] beschrieben, bei dem sich die Indentationskraft F über den Indentationsweg δ , dem Radius der Indentationskugel r sowie dem E-Modul des Materials berechnen lässt (vgl. Gl. (7-1)).

$$F = 1,9 \cdot \delta^{1,35} \cdot r^{0,65} \cdot E \quad (7-1)$$

HAWLEY [55] fand jedoch heraus, dass in der oben beschriebenen Gleichung die Kontaktkraft bzw. Vorkraft, welche einen Einfluss auf den Steifigkeitsparameter hat, nicht berücksichtigt wurde, sodass der ursprünglich von SCOTT [54] vorgeschlagene Ansatz durch Gl. (7-2) ersetzt wurde [56]. Dieser modifizierte Ansatz fand dann anschließend Einzug in die Norm DIN ISO 48 [56].

$$D = 61,5 \cdot R^{-0,48} \left[\left(\frac{F}{E} \right)^{0,74} - \left(\frac{f}{E} \right)^{0,74} \right] \quad (7-2)$$

Unter Betrachtung von Gl. (7-2) berechnet sich die Indentationstiefe D aus dem E-Modul E , der Indentationskraft F , dem Radius der Indentationskugel sowie der Kontaktkraft bzw. Vorkraft f . Da bei den dargestellten Exponenten in der Literatur auch abweichende Werte existieren [57], untersuchte YEOH [58] diese Diskrepanz mit der Schlussfolgerung der uneinheitlichen Bestimmung des E-Moduls. Generell ist zu den Modellen, die die Indentation zur Materialparameteridentifikation verwenden, zu sagen, dass Abweichungen in der Bestimmung der Elastizitätskonstanten von mehr als 10 % vorliegen [35], sodass diese sehr einfachen Verfahren lediglich als erste Näherung bzw. eine Hilfsgröße verstanden werden sollte, um Materialparameter zu bestimmen.

Eine verbesserte Möglichkeit liefert die Bestimmung der Materialparameter über Indentationsversuche gekoppelt mit inversen numerischen Berechnungen. Hierbei können verschiedenste Kennwerte (hyperelastische Materialkonstanten, viskoelastische Materialkonstanten, Reibung, Adhäsion, Kontakt) parametrisiert werden und als Optimierungsaufgabe gelöst werden. Die dadurch generierten Materialparameter weisen eine höhere Genauigkeit vor, als die Materialparameter, die mit den oben beschriebenen klassischen Verfahren ermittelt werden [14, 45, 59, 60].

Eine alternative Möglichkeit zur Bestimmung des linearen Druck-E-Moduls wird in [1] vorgestellt. Hier wird in Abhängigkeit eines Geometriefaktors und der Shore-Härte auf einen konstanten Druck-E-Modul geschlossen. Da sich das in [1] vorgestellte Verfahren explizit auf die Bemessung von Brückenlagern bezieht, ist zu prüfen, inwieweit das Verfahren für kleinteilige Elastomerlager im Bauwesen anwendbar ist. Auch dieses Verfahren beschreibt einen linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung, sodass die Ergebnisse konservativ ausfallen (vgl. Abschnitt 7.2).

Ein weiteres Verfahren wird mit dem Federmodell nach [61] beschrieben, bei dem mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente konstante Federkennwerte ermittelt werden, die das Bauteilverhalten beschreiben sollen. Die ermittelten Ersatzfedern charakterisieren translatorische Bewegungen parallel (x) und senkrecht (y) zur Lagerfuge sowie die Verdrehung um die Normalenachse der X-Y-Ebene. Zur Bestimmung der Federkennwerte werden Einheitslasten auf ein Ersatzsystem aufgebracht, wobei die aufgebrachte Einheitslast einen verhältnismäßig großen Betrag annimmt, um das nichtlinear verlaufende Antwortverhalten der Klebung bei großen Dehnungen als Grundlage des Federkennwertes anzunehmen. Das vorgeschlagene Federmodell verwendet allerdings lineare Federelemente, sodass auch hier, ähnlich wie mit den linearen Elastizitätskonstanten aus Indentationsversuchen, das stark nichtlineare Verhalten gummiartiger Materialien nicht abbildbar ist.

7.2 Analyse des Modells nach BATTERMANN und KÖHLER für geklemmte Systeme

Um das Modell nach BATTERMANN und KÖHLER (vgl. Abschnitt 3.6) hinsichtlich der Eignung für die numerische Berechnungen von geklemmten Lagerungssystemen im Fassadenbau zu analysieren, werden im Folgenden numerische Vergleichsrechnungen eines Viertelmodells einer geklemmten Glasscheibe untersucht. Als Referenzkurven dienen Spannungs-Verschiebungs-Wertepaare, die mit einem hyperelastischen Materialmodell bzw. mit einem multilinearen, isotropen Elasto-Plastizität-Modell (MISO-Modell) generiert wurden. Die Beschreibung des MISO-Modells erfolgt im nächsten Abschnitt und wird hier nur zur Vollständigkeit aufgeführt. Die Glasscheibe weist die Dimensionen 1500 x 1500 x 8 mm auf. Die an der Ober- und Unterseite positionierten Lagerpads (35 x 35 x 2,5 bis 10 mm) sind jeweils um 35 mm eingerückt. Aus Symmetriegründen muss nur ein Viertel des Systems abgebildet werden. Es wird eine Flächenlast von 1.7 kN/m² angesetzt.

In Tabelle 7-1 ist eine Übersicht der unterschiedlichen Konfigurationen gegeben. Auffällig ist, dass die Berechnungen nach BATTERMANN bei dünnen Lagerpads eine deutliche Spannungsüberschätzung liefern, wohingegen die Verformungen in Feldmitte wiederum unterschätzt werden. Die geometrisch nichtlineare Rechnung nähert sich bei zunehmender Dicke des Elastomerlagers den Ergebnissen einer hyperelastischen Rechnung an. Bei sehr dünnen Lagerpads ($t = 2,5$ mm) ist die Materialantwort sehr steif und nahezu identisch für die unterschiedlichen BATTERMANN-Modelle. Im Vergleich zum OGDEN-Modell [62] werden auch hier die Spannungen deutlich überschätzt.

Tabelle 7-1: Ergebnisse nach BATTERMANN, OGDEN und dem MISO-Modell

	Ergebnisse BATTERMANN- LINEAR	Ergebnisse BATTERMANN-NONLI- NEAR	Ergebnisse OGDEN 4 Parameter	Bewertung
V-1 t = 2,5 mm	$\rightarrow E_D = 60,62$ [MPa] $S_{1,Glas} = +148,6$ [MPa] $S_{3,Glas} = -148,6$ [MPa] $u_z = +23,3$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +25 / -25$ [%]	$\rightarrow E_D = 60,62$ [MPa] $S_{1,Glas} = +139,9$ [MPa] $S_{3,Glas} = -118,2$ [MPa] $u_z = +17,7$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +17 / -33$ [%] *Fein vernetzt	$S_{1,Glas} = +114,2$ [MPa] $S_{3,Glas} = -111,6$ [MPa] $u_z = +22,8$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +33 / -93$ [%]	
V-2 t = 5,0 mm	$\rightarrow E_D = 21,00$ [MPa] $S_{1,Glas} = +86,3$ [MPa] $S_{3,Glas} = -86,3$ [MPa] $u_z = +33,9$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +62 / -62$ [%]	$\rightarrow E_D = 21,00$ [MPa] $S_{1,Glas} = +79,9$ [MPa] $S_{3,Glas} = -69,1$ [MPa] $u_z = +25,9$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +26 / -141$ [%] *Fein vernetzt	$S_{1,Glas} = +47,1$ [MPa] $S_{3,Glas} = -46,2$ [MPa] $u_z = +30,9$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +31 / -95$ [%]	
V-3 t = 7,5 mm	$\rightarrow E_D = 12,76$ [MPa] $S_{1,Glas} = +45,5$ [MPa] $S_{3,Glas} = -45,5$ [MPa] $u_z = +41,3$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +73 / -73$ [%]	$\rightarrow E_D = 12,76$ [MPa] $S_{1,Glas} = +42,0$ [MPa] $S_{3,Glas} = -46,1$ [MPa] $u_z = +31,2$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +25 / -101$ [%] *Grob vernetzt	$S_{1,Glas} = +38,7$ [MPa] $S_{3,Glas} = -50,5$ [MPa] $u_z = +34,16$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +32 / -90$ [%]	
V-4 t = 10,0 mm	$\rightarrow E_D = 9,55$ [MPa] $S_{1,Glas} = +42,6$ [MPa] $S_{3,Glas} = -42,6$ [MPa] $u_z = +44,7$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +71 / -71$ [%]	$\rightarrow E_D = 9,55$ [MPa] $S_{1,Glas} = +42,0$ [MPa] $S_{3,Glas} = -46,1$ [MPa] $u_z = +31,2$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +25 / -101$ [%] *Grob vernetzt	$S_{1,Glas} = +37,2$ [MPa] $S_{3,Glas} = -52,3$ [MPa] $u_z = +35,5$ [mm] $\varepsilon_{Pad} \cong +31 / -79$ [%]	

7.3 Entwicklung eines mechanischen Modells auf Basis von Druckversuchen

In diesem Abschnitt erfolgt die Beschreibung eines im Vergleich zur Hyperelastizität vereinfachten mechanischen Modells zur Beschreibung des Antwortverhaltens gummiartiger Materialien für das Anwendungsgebiet von Klemmhaltern im Glas- bzw. Fassadenbau.

Im Allgemeinen erfolgt die Bemessung von Klemmhaltern bzw. Glasscheiben über eine FEM-Berechnung, bei der die elastische Lagerung über lineare Federmodelle abgebildet wird. Nach [2] kann dabei der lineare E-Modul für Elastomere von 5 bis 200 MPa variiert werden, wobei typischerweise für EPDM-Lagerpads Werte von 10-40 MPa angesetzt werden [63].

Da es sich allerdings bei dem Lagermaterial um Elastomere handelt, treten starke nichtlineare Effekte auf, die bei einer linearen Berechnung unberücksichtigt bleiben. Ferner treten zusätzlich zu den physikalischen (materiellen) Nichtlinearitäten, geometrische nichtlineare Effekte auf, die bei der Auslegung der Elastomerlager bzw. der Bemessung der Glasscheibe vernachlässigt werden.

Daher wird im Folgenden ein mechanisches Modell sowie eine Prozedur zur Bestimmung von materiellen Parametern basierend auf experimentellen Versuchen vorgestellt. Die Ergebnisse sollen bei der Bemessung von geklemmten Glasscheiben helfen, deshalb wird auf eine mögliche Implementierung in gängige Statiksoftware geachtet.

Da in diesem Forschungsprojekt ein umfangreiches experimentelles Versuchsprogramm untersucht wird, beschränkt man sich im Folgenden auf die Versuchsserie KUBO-EPDM-SH60 unter uniaxialer Druckbelastung, wobei aus den drei untersuchten Geometrien nur das quadratische Elastomerlager mit den Dimensionen 35 x35 x10 mm für die Modellkalibrierung herangezogen wird.

7.3.1 Darstellung des mechanischen Modells

Das mechanische Modell (MISO-Modell: Multilineare, isotrope Elasto-Plastizität) ermöglicht nichtlinear-elastisches Materialverhalten von gummiartigen Materialien über FE-Simulationen bzw. nichtlineare Federgesetze abzubilden. Dabei greift das Modell auf ein multilinear-isotropes Verfestigungsgesetz zurück, welches über wahre Spannungs-Dehnungs-Werte definiert wird.

Da heutzutage in kommerzieller Bemessungssoftware das o. g. Materialmodell gängiger Weise definiert werden kann, allerdings seltener hyperelastische Stoffgesetze implementiert sind, ist die Vorgehensweise der Substitution von Hyperelastizität durch Plastizität zweckmäßig, wohlwissend dass eine derartige Beschreibung keinen physikalischen Bezug zum eigentlichen Materialverhalten mehr aufweist. Weiterhin ist das Modell eine Hilfsgröße, um realitätsnah die Spannungen im Glas bestimmen zu können, ohne die Beanspruchungen im Elastomer näher zu untersuchen.

Durch die Substitution der Hyperelastizität durch Plastizität müssen daher Kriterien für die Anwendung sowie entsprechende Restriktionen definiert werden. Diese Einschränkungen werden im Folgenden dargestellt:

- Beschreibung von nichtlinear-elastischem (Hyperelastizität) Materialverhalten gummiartiger Werkstoffe über multilineare-isotrope Plastizität möglich
- Mutlilineare Verfestigung wird über stückweise linear verbundene Spannungs-Dehnungs-Werte charakterisiert
- Grundlage der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung resultiert aus experimentellen Untersuchungen
- Spannungs-Dehnungs-Wertepaare beziehen sich dabei auf wahre Spannungen und wahre, totale Dehnungen $[\sigma_{Wahr} = \sigma_{techn.} (1 + \epsilon_{techn.}); \epsilon_{tot} = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl}]$
- Initiale Steifigkeit (Druck-E-Modul) sowie der Querdehnzahl wird basierend auf experimentellen Untersuchungen charakterisiert
- Beschreibung von Verfestigungsprozessen bei großen Dehnungen, wie sie in der Hyperelastizität häufig auftreten, ist nicht möglich
- Berechnung von zyklischen Beanspruchungen nicht möglich, da infolge der Plastizität plastische Dehnungen im Material verbleiben, sodass die Ergebnisse unphysikalisch sind
- Auswertung der Dehnungen im Elastomer nur über totale Dehnungen möglich

Wie oben beschrieben liegt die Ausgangslage des vereinfachten Materialmodells in der Durchführung von uniaxialen Druckversuchen sowie der Aufbereitung der experimentellen Daten hinsichtlich Spannungs-Dehnungs-Beziehungen sowie des Druck-E-Moduls. Für das Material Kubo-EPDM-ShA 60 sind die experimentellen Rohdaten in Abbildung 7-1 dargestellt.

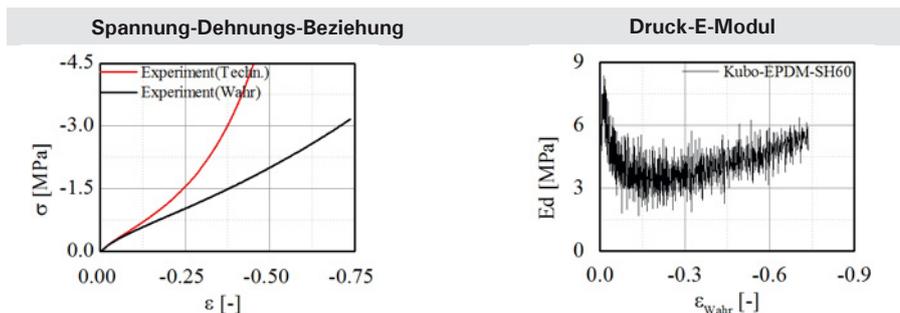


Abbildung 7-1: Auswertung der experimentellen Daten für Kubo-EPDM-ShA 60

Wohingegen links in Abbildung 7-1 die experimentellen Rohdaten in technische und wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aufbereitet wurden, ist auf der rechten Seite die wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung nach der Dehnung abgeleitet, um den Verlauf des Druck-E-Moduls in Abhängigkeit der wahren Dehnungen zu erhalten.

Eine wichtige Größe aus der abgeleiteten Beziehung ist der initiale Druck-E-Modul, welcher die Basis des Materialmodells bildet. Dieser liegt für das untersuchte Material bei $E_D = 6,56 \text{ MPa}$, wohingegen die Lösung nach BATTERMANN [1] einen Wert von $E_D = 9,55 \text{ MPa}$ angibt. Das Ergebnis nach BATTERMANN überschätzt also die Anfangssteifigkeit um ca. 46 %, woraus eine wirtschaftliche Dimensionierung des Fassadenelements erschwert wird.

Die Definition der Querdehnzahl kann zum einen entsprechend der Norm DIN 18008-3 [2] erfolgen, bei der für Kunststoffe pauschal eine Querdehnzahl von $\nu = 0,45$ angesetzt wird oder man bezieht sich auf experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Querdehnzahl. Für das Material Kubo-EPDM-ShA 60 kann eine Querdehnzahl von näherungsweise $\nu = 0,45 - 0,48$ ermittelt werden, sodass für die folgenden numerischen Berechnungen generell mit dem Norm-konformen Wert von $\nu = 0,45$ gerechnet wird.

Um das multilineare-isotrope Materialgesetz mit Datenwerten zu versehen, wird über eine geeignete Fitting-Funktion der Verlauf des nichtlinearen Druck-E-Moduls über die wahren Dehnungen approximiert, wobei hierbei eine exponentielle Wachstumsfunktion herangezogen wird, um den nichtlinearen Abfall im Anfangsbereich anzunähern. Ein weiteres Charakteristikum dieser Funktion ist der horizontale Verlauf bei moderaten bis großen Dehnungen (vgl. Abbildung 2-2). Diese Restriktion ist wichtig, um das Kriterium einhalten zu können, dass keine Verfestigungen im Material berücksichtigt werden können.

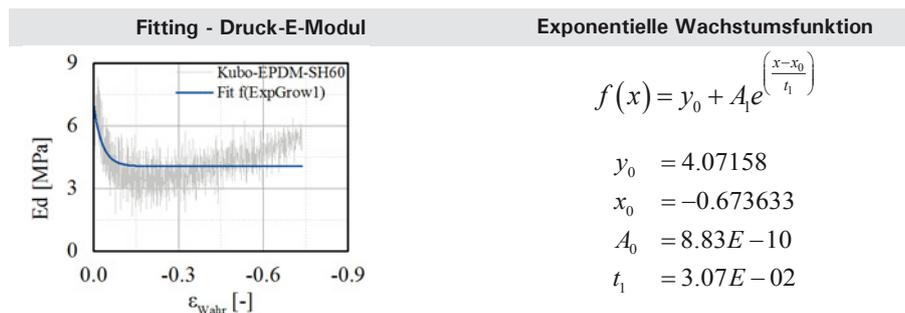


Abbildung 7-2: Fitting der experimentellen Daten für Kubo-EPDM-ShA 60

Zur Identifikation der Parameter können Standardverfahren wie die Minimierung der Fehlerquadrate bzw. für nichtlineare Problemstellungen der Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet werden (vgl. Kapitel 6.3.3). Diese Verfahren sind über MS Excel bzw. allen gängigen Mathematikprogrammen programmierbar.

Unter Integration der exponentiellen Wachstumsfunktion erhält man wiederum eine Stammfunktion, die das wahre Spannungs-Dehnungs-Verhalten widerspiegelt (vgl. Abbildung 7-3). Eine direkte Integration des wahren experimentell bestimmten Spannungs-Dehnungsverlaufes ist zwar denkbar, allerdings ist die Forderung des stetigen Abfalls des Druck-E-Moduls nicht zwingend eingehalten. Weiterhin ist das vorgeschlagene Verfahren sehr anschaulich, um das Materialverhalten zu verstehen.

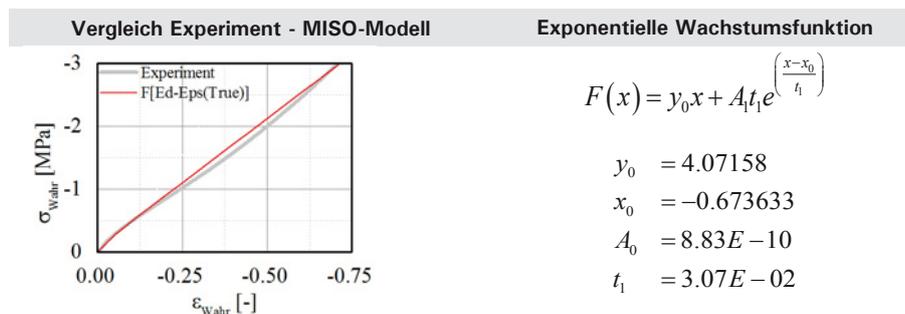


Abbildung 7-3: Analytische Validierung des mechanischen Modells und Integration der exponentiellen Wachstumsfunktion

Aus Abbildung 7-3 geht hervor, dass die angenommene Fitting-Funktion die experimentellen Ergebnisse sehr gut approximieren. Insbesondere wird der Verlauf bei kleinen Dehnungen bis ca. (10 % Dehnung) sehr gut abgebildet, sodass das Antwortverhalten in diesen Dehnungsbereichen mit den experimentell ermittelten Werten sehr gut übereinstimmt.

Auf Basis der gefitteten Parameter sowie der integrierten exponentiellen Wachstumsfunktion $F(x)$ werden nun Datenwerte in Form von wahren Spannungs-Dehnungs-Wertepaaren herausgeschrieben und an das kommerzielle Bemessungsprogramm übergeben.

Unter Verwendung der Finiten-Element-Software ANSYS FE-Code kann das nichtlineare Spannungs-Dehnungsverhalten über die Skripten-Sprache APDL oder in Form einer Eingabe in eine GUI erfolgen (vgl. Abbildung 7-4).

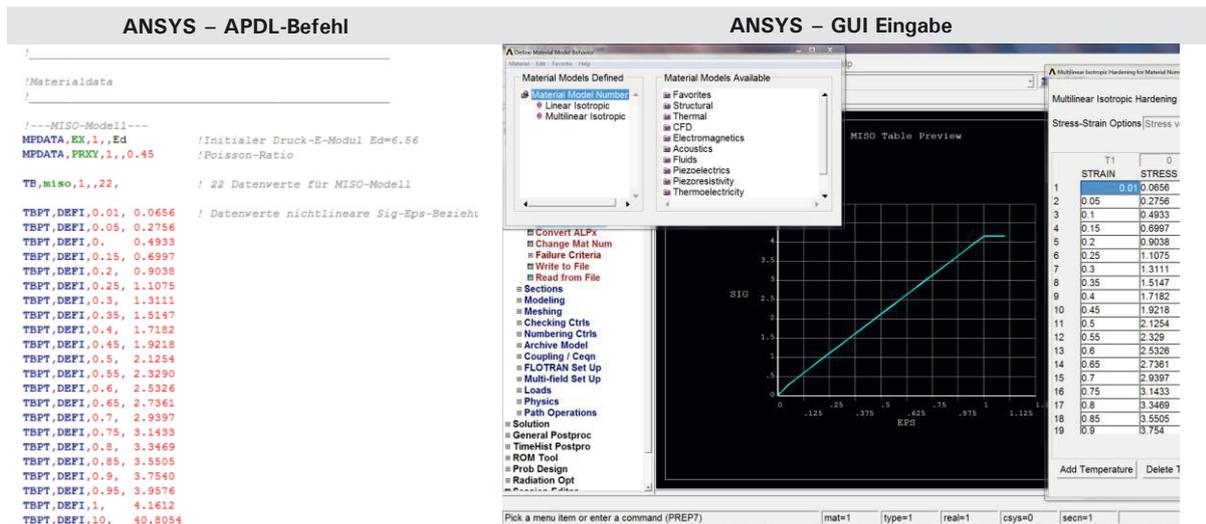


Abbildung 7-4: Implementierung der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung in ANSYS

Die Eingabe einer nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung kann in gängige Statiksoftware, wie bspw. RFEM von Dlubal oder SOFiSTiK, eingegeben werden.

Im Anschluss an die Eingabe des MISO-Modells erfolgt eine herkömmliche FE-Berechnung, bei der die zu untersuchende Geometrie, Randbedingungen, Lasten etc. programmiert werden.

Ein wichtiger Punkt, welcher zu erwähnen ist, ist die Durchführung der Berechnung unter Berücksichtigung geometrischer Nichtlinearitäten, da bei dem Bauteil durchaus große Deformationen und Verzerrungszustände auftreten. Bei geometrisch nichtlinearen Berechnungen wird die Steifigkeitsmatrix in Abhängigkeit der aufgetragenen Verformung für jeden Iterationsschritt neu aufgestellt und berechnet. Hieraus resultieren zwar längere Rechenzeiten und das Superpositionsprinzip ist nicht mehr anwendbar, allerdings werden bei dieser Berechnungsart große Verformungen, Rotationen, Dehnungen sowie das „stress stiffening“ und „spin softening“ berücksichtigt, wodurch die berechneten Ergebnisse realitätsnäher sind als bei einer geometrisch linearen Berechnung.

Da sich die Elemente des Lagerpads stark verzerren, muss die Änderung der Elementform mitberücksichtigt werden (Große Dehnungen). Unter Betrachtung der Durchbiegung der Glasscheibe treten im Glas zwar kleine Verzerrungen auf, allerdings große Verformungen, sodass auch dieser Effekt über eine geometrisch nichtlineare Berechnung mitberücksichtigt werden sollte.

7.3.2 Verifizierung des MISO-Material-Modells

Im Folgenden wird das MISO-Materialmodell über drei numerische Beispielrechnungen verifiziert. Als Vergleichsgrößen dienen dabei zum einen die experimentellen Ergebnisse für uniaxiale Zug- und Druckbeanspruchungen, zum anderen die numerische Nachrechnung der Beispiele mit einem hyperelastischen Stoffgesetz. Das hyperelastische Stoffgesetz ist ein 4-parametriges Gesetz nach OGDEN, bei dem die Materialparameter auf Basis der uniaxialen Druckversuche gefittet werden. Die gefitteten Materialparameter bleiben für die Beispielrechnungen für Druck, Zug und Schub unverändert.

Die Verifizierung erfolgt an einem Einheitselement, das uniaxial gezogen wird, sowie der Nachrechnung der uniaxialen Druckversuche. Zusätzlich erfolgt eine Beispielrechnung, bei der das Verhalten unter

Schub untersucht wird, wobei hier zu erwähnen ist, dass für den simplen Schubspannungszustand keine experimentellen Ergebnisse als Vergleich herangezogen werden können.

In Abbildung 7-5 ist der Vergleich zwischen den experimentellen Ergebnissen der uniaxialen Druckversuche, dem hyperelastischen Stoffgesetz sowie dem MISO-Materialgesetz dargestellt. Dabei werden die wahren Spannungen über die wahren Dehnungen aufgetragen. Hier wird der uniaxiale Druckversuch mit den Abmessungen 35 x 35 x 10 mm simuliert. Bei der numerischen Modellierung wird auf Grund von Symmetrieeigenschaften nur ein Viertel des Modells abgebildet. Reibeffekte zwischen Lagerplatte und Druckstempel werden vernachlässigt, sodass sich das Volumen frei in die lateralen Richtungen ausdehnen kann.

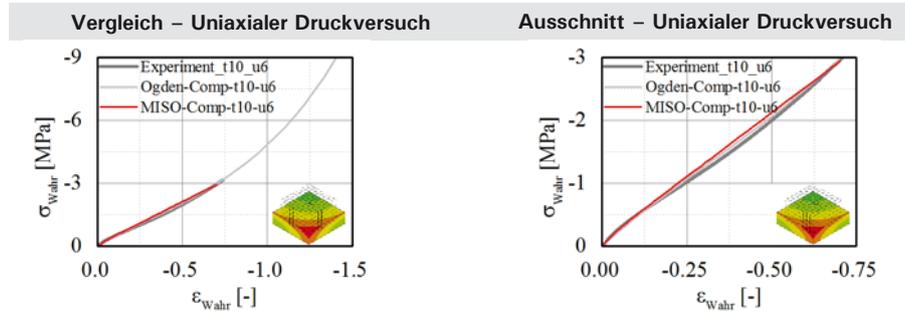


Abbildung 7-5: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung für die uniaxialen Druckversuch

Wie oben zu erkennen ist, zeigt das MISO-Modell sowie das OGDEN-Modell eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Insbesondere der stark nichtlinear verlaufende Anfangsbereich kann mit beiden Modellen sehr gut approximiert werden. Ab einer Dehnung von ca. 75 % treten jedoch deutliche Unterschiede zwischen dem hyperelastischen und dem plastischen Materialgesetz auf. Da die experimentellen Versuchsdaten nur bis zu einer wahren Grenzdehnung von $\epsilon_{Grenz} = -69\%$ reichen, wird über diesen Grenzwert hinaus die Materialantwort zwar mathematisch extrapoliert, inwieweit diese Ergebnisse physikalisch korrekt sind, ist nicht klar. Daher sollten bei allen numerischen Berechnungen eine experimentelle Grenzdehnung nicht überschritten werden. Hauptaugenmerk liegt bei der Dimensionierung der Glasscheibe, somit stellt diese Einschränkung keinen besonderen Nachteil dar.

Vergleicht man die Ergebnisse der linearen Annahme des Druck-E-Moduls nach BATTERMANN und KÖHLER und dem linearen, initialen Druck-E-Modul, basierend auf den experimentellen Daten, kann lediglich der Anfangsbereich approximiert werden. Bereits bei kleinen Dehnungen (ab $\epsilon_{techn.} = 5\%$) liefert das BATTERMANN und KÖHLER-Modell ein zu steifes Materialverhalten. Für größere Dehnungsbereiche (ab $\epsilon_{techn.} = 25\%$) ist die Materialantwort der Berechnungen mit initialem Druck-Elastizitäts-Modul zu weich im Vergleich zur Materialantwort der experimentellen Untersuchungen (vgl. Abbildung 7-6). Bei einer geometrisch linearen Rechnung gibt es keine Unterschiede mehr zwischen dem technischen und wahren Spannungs-Dehnungsverlauf (vgl. Abbildung 7-6 (d)), da aus kontinuumsmechanischer Sicht die Referenzkonfiguration der Deformation gleich der aktuellen Konfiguration ist [28].

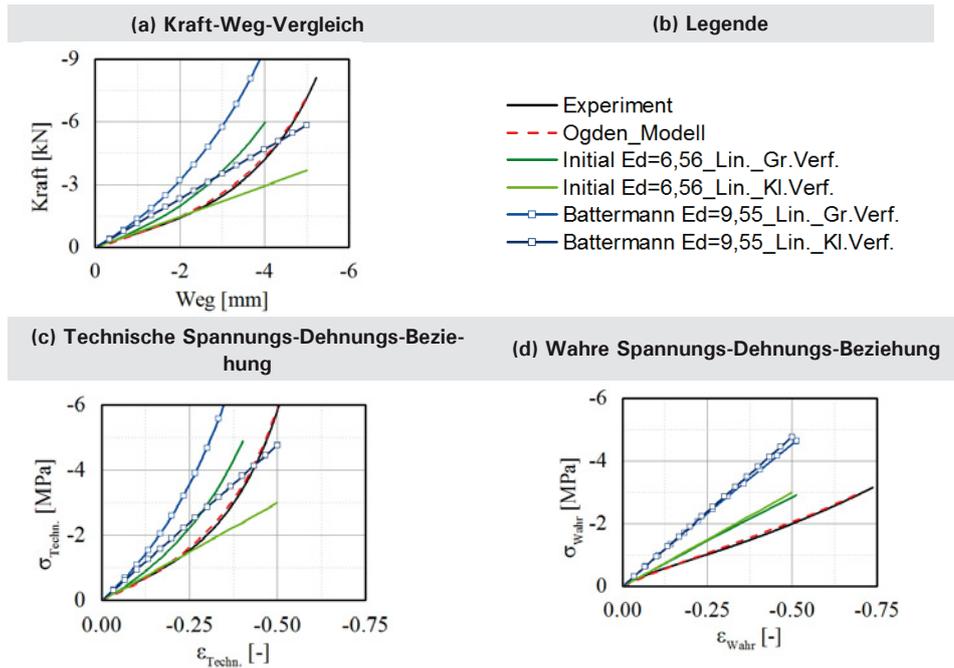


Abbildung 7-6: Vergleichsrechnungen unterschiedlicher Materialgesetze gekoppelt mit einer geometrisch linearen / nichtlinearen Berechnung

Die nächste numerische Beispielrechnung simuliert das Verhalten auf uniaxialen Zug, wobei die gefitteten Parameter bei beiden Modellen unverändert im Vergleich zu den uniaxialen Druckversuchen bleiben. Die Simulation erfolgt an einem Einheitsvolumenelement, welches auf Zug unter Einbezug von Symmetrieeigenschaften beansprucht wird.

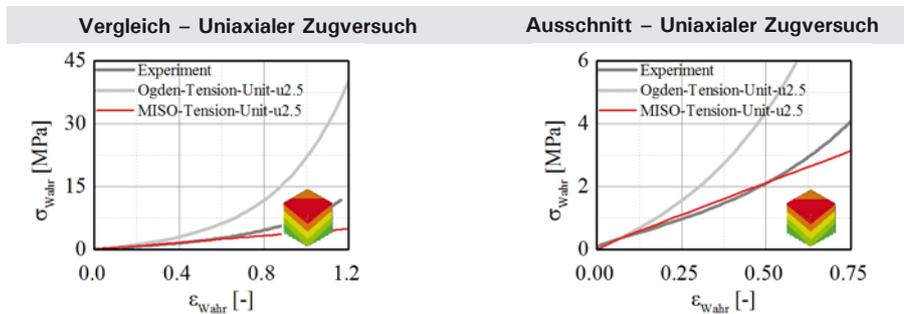


Abbildung 7-7: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den uniaxialen Zugversuch

In dieser Beispielrechnung werden die Anfangsdehnbereiche mit beiden Modellen sehr gut approximiert, allerdings ist beim OGDEN-Modell ab einer wahren Dehnung von ca. 10 % eine starke Versteifung in der Materialantwort zu sehen, welche nicht mit den experimentellen Daten übereinstimmt. Das MISO-Modell zeigt eine gute Approximation bis zu einer wahren Dehnung von 50 %. Ab der genannten Stelle beginnt die experimentell ermittelte Materialantwort zu versteifen, was aufgrund der gewählten Materialdefinition des MISO-Modells nicht abbildbar ist. Da in der Realität allerdings nur geringe Zugdehnungen im Material auftreten [35], kann auch mit beiden Modellen bis zu einer Grenzdehnung von 10 % das Strukturverhalten gut beschrieben werden. Bei größeren Dehnungen liefert das MISO-Modell realitätsnähere Ergebnisse.

In der letzten Beispielrechnung erfolgt die Auswertung des simplen bzw. einfachen Schubspannungszustandes. Dabei wird ein Volumen mit den Dimensionen 35 x 35 x 10 mm an der Unterseite fixiert gelagert, wohingegen die Oberseite um 10 mm auf Schub verzerrt wird. Dabei ist zu beachten, dass die Ober- und Unterseite stets parallel zueinander stehen. Da für diesen Spannungszustand keine experimentellen Daten vorliegen, sind die folgenden Ergebnisse nur qualitativ zu betrachten.

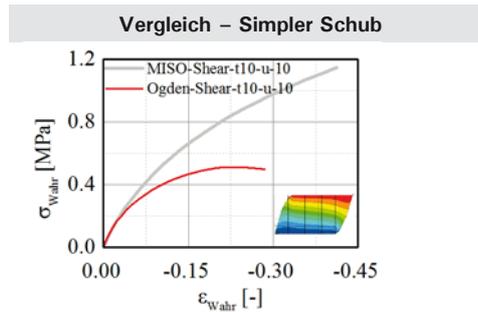


Abbildung 7-8: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung für einen Schubversuch

Die Ergebnisse beider Modelle zeigen im Anfangsdehnungsbereich eine identische Materialantwort, sodass der initiale Schubmodul bei beiden Modellen identisch ist. Ab einer Dehnung von ca. 5 % treten erhebliche Unterschiede zwischen den Modellen auf. Das MISO-Modell ist wesentlich weicher und geht ab einer Dehnung von ca. 22,5 % in einen horizontalen Verlauf über. Ob dieser Verlauf physikalisch korrekt ist, ist eher fraglich, da ein derartiger Verlauf für gummiartige Materialien untypisch ist. Typischerweise richten sich die elastomeren Moleküle infolge eines aufgebrachten Dehnungszustandes von einem ungerichteten in ein gerichteten Zustand aus. Hierdurch erfährt das gummiartige Material seine charakteristischen Eigenschaften, die bei einer Schubbeanspruchung zunächst einer sehr weichen Materialantwort entsprechen, bei moderaten Dehnungen eine Schwächung im Schubmodul erfahren und sobald die Moleküle ausgerichtet sind, ein immer steifer werdendes Verhalten zeigen, bis die Streckgrenze der Moleküle erreicht ist und so der Bruch des Materials erkennbar ist [35, 37]. Die Materialantwort mit dem Modell nach OGDEN zeigt eher einen typischen Verlauf für einen simplen Schubversuch, allerdings kann hier der Verlauf nicht über experimentelle Daten bestätigt werden.

7.3.3 Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (I)

Die Validierung des MISO-Modells erfolgt über eine numerische Vergleichsrechnung einer an vier Punkten geklemmten Glasscheibe. Dabei wird das MISO-Modell mit unterschiedlichen Materialgesetzen verglichen. Die Glasscheibe wird bei der numerischen Berechnung als linear-elastisch mit der Elastizitätskonstanten $E_{Glas} = 70.000 \text{ MPa}$ sowie der Poissonzahl $\nu = 0,23$ modelliert. Die Kontaktfläche zwischen Elastomerlager und Glasscheibe ist für die Validierung des MISO-Modells als voller Verbund modelliert. Diese Vorgehensweise ist zweckmäßig, um Sekundäreffekte aus Reibung völlig auszuschließen.

Bei den Materialgesetzen erfolgt eine Unterscheidung zwischen dem linearen Federgesetz nach BATTERMANN, wobei hier zusätzlich zwischen einer geometrisch linearen bzw. nichtlinearen Berechnung unterschieden wird. Weiterhin wird das 4-parametrische OGDEN-Modell untersucht, welches einerseits auf Zugbeanspruchung gefittete Materialkennwerte, zum anderen auf Druckbeanspruchung gefittete Materialkennwerte besitzt. Das MISO-Modell verfügt über die in Abschnitt 7.3.1 dargestellten Materialkennwerte, jedoch unterscheidet man hier zusätzlich noch zwischen einer fein- und einer grobvernetzten Variante des Elastomerlagers, was aus Gründen der numerischen Stabilität der Berechnung notwendig ist (vgl. Abbildung 7-9).

Ausschnitt - Fein-vernetztes Modell

Ausschnitt - Grob-vernetztes Modell

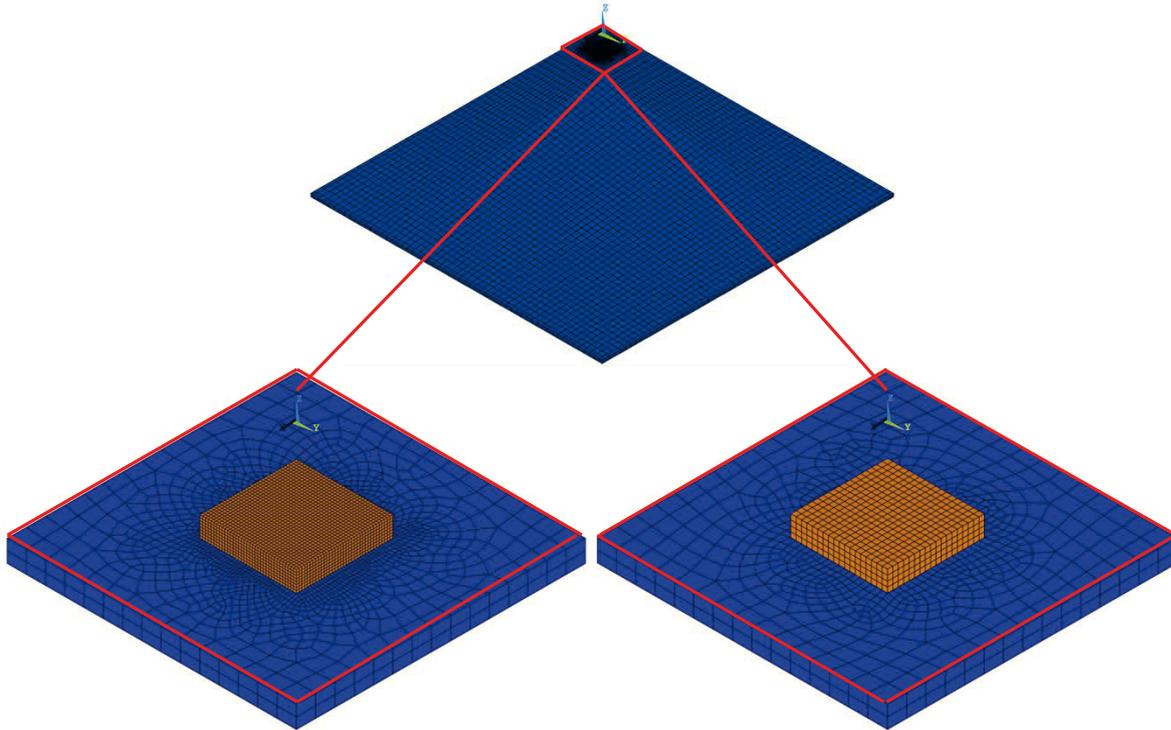
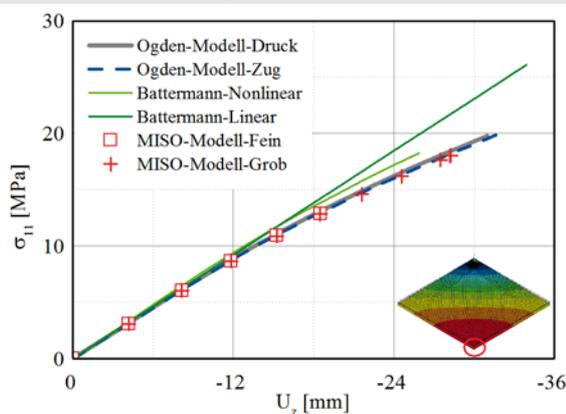


Abbildung 7-9: Ausschnitt der Struktur mit unterschiedlicher Netzfeinheit

Das Glaselement weist die Dimensionen 1500 x 1500 x 8 mm auf. Die an der Ober- und Unterseite positionierten Lagerpads (35 x 35 x 5 mm) sind jeweils um 35 mm eingerückt. Um die Rechenzeit gering ausfallen zu lassen, werden Symmetrieeigenschaften ausgenutzt. Die Belastung entspricht einer Flächenlast von 1.7 kN/m². Die Modellierung des Elastomerlagers erfolgt mit Volumenelemente (Solid-Elemente 186), um eine möglichst genaue Aussage hinsichtlich des mechanischen Verhaltens treffen zu können. Die Glasscheibe wird hingegen mit Volumen-Schalenelementen (SolSH-Elementen 190) modelliert, um eine hohe Effizienz bzgl. der Ergebnisse in Relation zu der zu erwartenden Rechenzeit zu generieren.

Unter der Verwendung von gängigen Statikprogrammen kann die Glasscheibe über konventionelle Schalen bzw. Plattenelemente modelliert und das Lagerdetail über flächig-verteilte nichtlineare Federn abgebildet werden, wobei die Federkennlinie in Anlehnung an das in Abschnitt 7.3.1 beschriebene Verfahren zu charakterisieren ist. Um die laterale Deformation des Lagers beschreiben zu können, sollten zusätzlich auf Schub gefittete Federn (entsprechend dem Modell nach [32]) im Modell verwendet werden.

(a) Validierung MISO-Modell – Version I



(b) Validierung MISO-Modell – Version I

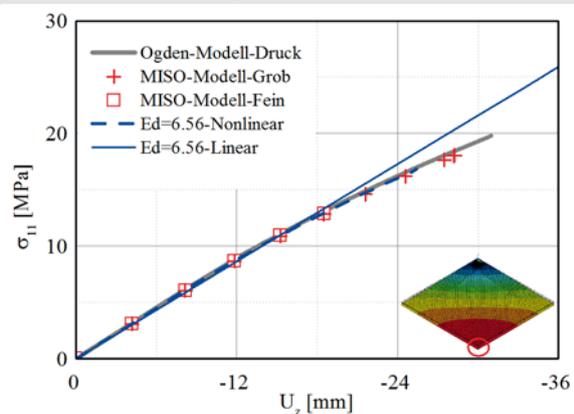


Abbildung 7-10: Spannungs-Verschiebungs-Plot in Feldmitte einer über vier Punkte gelagerten Glasscheibe in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialmodelle (Version I)

Abbildung 7-10 zeigt die Validierung des MISO-Modells im Vergleich zu anderen möglichen Varianten der Modellierung der Stoffgesetze. Wie zu sehen ist, bildet das MISO-Modell den Verlauf der Spannungs-Verschiebungs-Beziehung in Feldmitte bezugnehmend auf die Ergebnisse nach OGDEN sehr gut wieder. Auffällig ist, dass beim fein-vernetzten MISO-Modell ab einer Verschiebung von ungefähr 20 mm Konvergenzprobleme auftreten, sodass das Elastomerlager mit einem größeren Netz neu modelliert wird. Durch das grobe Netz können die Konvergenzprobleme umgangen werden, wobei keine Unterschiede im Antwortverhalten zwischen dem fein- bzw. grob-vernetzten Modell zu erkennen sind. Eine alternative Möglichkeit die Konvergenz zu verbessern bzw. die Rechnung bis zum Lastmaximum durchzuführen, liegt in der Formulierung von Kontaktbedingungen zwischen Elastomerlager und Glasscheibe (vgl. Abschnitt 7.3.5). Die lineare sowie die nichtlineare Berechnung nach BATTERMANN zeigen deutlich, dass die Anfangssteifigkeit zwar gut approximiert wird, jedoch erste Differenzen ab einer Verformung von 12 mm auftreten.

Vergleicht man die BATTERMANN-Modelle mit den übrigen Materialgesetzen, ist für die lineare Berechnung zu sagen, dass die wahren Spannungen im Glas um 30 % bei voller Lastaufbringung überschätzt werden, was zu sehr konservativen Ergebnissen hinsichtlich der Dimensionierung der Glasscheibe führt. Betrachtet man das geometrisch nichtlineare BATTERMANN-Modell unter Aufbringung der gesamten Last, wird das Antwortverhalten relativ gut approximiert, allerdings tritt eine Unterschätzung der wahren Spannungen im Glas von ca. 10 % auf. Weiterhin sind die berechneten Verschiebungen in Feldmitte um 10 % zu klein, was unter Betrachtung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit zu Problemen führen kann.

Betrachtet man die Berechnung mit der experimentell ermittelten initialen Anfangssteifigkeit (vgl. Abbildung 7-10 (b)), liefert die geometrisch lineare Berechnung eine gute Näherung für moderate Verformungen, wobei unter Betrachtung des Lastmaximums auch hier die wahren Spannungen um ca. 36 % überschätzt werden. Die geometrisch nichtlineare Berechnung bildet hingegen die Materialantwort unter der Voraussetzung, dass das hyperelastische Stoffgesetz die Grundlage bildet, nahezu exakt ab.

7.3.4 Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (II)

In einem zweiten Modell zur Validierung des MISO-Modells wird eine kleinere Glasscheibe (500 x 500 x 12 mm) modelliert, wobei das Lager die Dimensionen 35 mm x 35 mm 2 mm und 5 mm aufweist und jeweils um 35 mm eingerückt ist.

Die Ergebnisse der numerischen Vergleichsrechnungen sind in Abbildung 7-11 dargestellt.

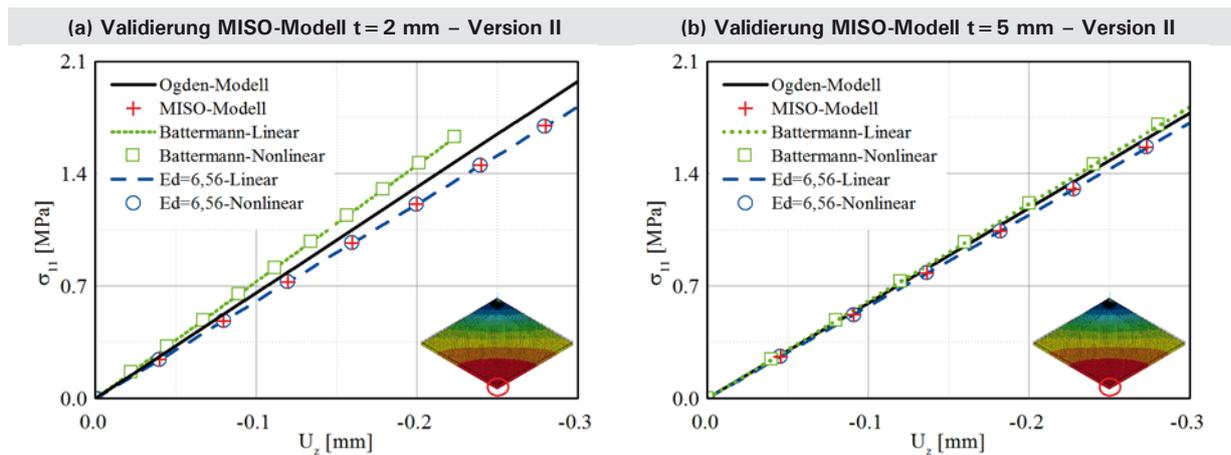


Abbildung 7-11: Spannungs-Verschiebungs-Plot in Feldmitte einer über vier Punkte gelagerten Glasscheibe in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialmodelle (Version II)

Die Ergebnisse zeigen, dass bei zunehmend kleiner werdenden Glasscheiben der Effekt der Nichtlinearität klein wird und sich kaum auf die Spannungs-Verschiebungs-Beziehung auswirkt. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn die Dicke des Elastomerlager größer wird. Hier ist nahezu kein Unterschied mehr zwischen geometrisch linearen / nichtlinearen und physikalisch linearen / nichtlinearen Berechnungen ersichtlich (vgl. Abbildung 7-11 (b)).

7.3.5 Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (III)

In einem weiteren Modell wird eine verhältnismäßig lange Scheibe simuliert. Die Glasscheibe weist die Dimensionen 3000 x 1000 x 12 mm auf, wobei das Lager die Dimensionen 35 x 35 x 5 mm aufweist und jeweils um 35 mm eingerückt ist.

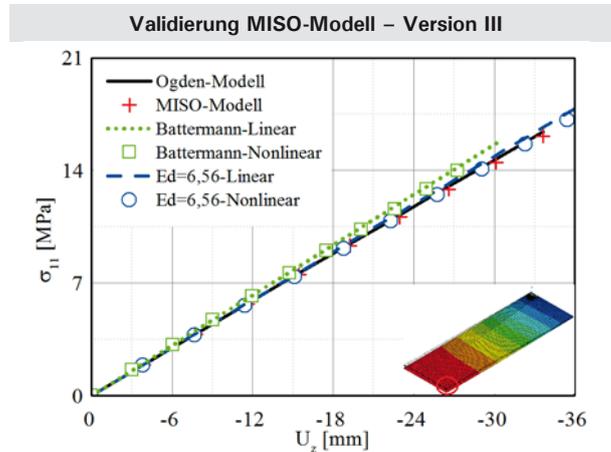


Abbildung 7-12: Spannungs-Verschiebungs-Plot in Feldmitte einer über vier Punkte gelagerten Glasscheibe in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialmodelle (Version III)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Modelle nach BATTERMANN die Spannungen bei maximaler Last für eine geometrisch lineare Berechnung um 3 % und für eine geometrisch nichtlineare Berechnung um 17 % unterschreiten, wobei generell die Verschiebungen zu gering ausfallen. Das MISO-Modell bildet hingegen das Antwortverhalten in Bezug zum OGDEN-Modell nahezu exakt ab. Für die geometrisch lineare bzw. nichtlineare Rechnung mit dem experimentell bestimmten initialen Druck-E-Modul werden die Spannungen um 4 % überschritten, was in Bezug auf die erhöhte Rechenzeit bei nichtlinearen Berechnungen vertretbar ist und eine Überdimensionierung der Glasscheibe ausgeschlossen werden kann.

7.3.6 Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (IV)

Das letzte Validierungsbeispiel untersucht eine Glasscheibe mit den Dimensionen aus Abschnitt 7.3.5, wobei das Elastomerlager nur einseitig um 35 mm eingerückt ist. Zusätzlich wird eine Kontaktformulierung zwischen den Lagerpads und der Glasscheibe implementiert. Der Reibungskoeffizient beträgt dabei $\mu = 0,2$.

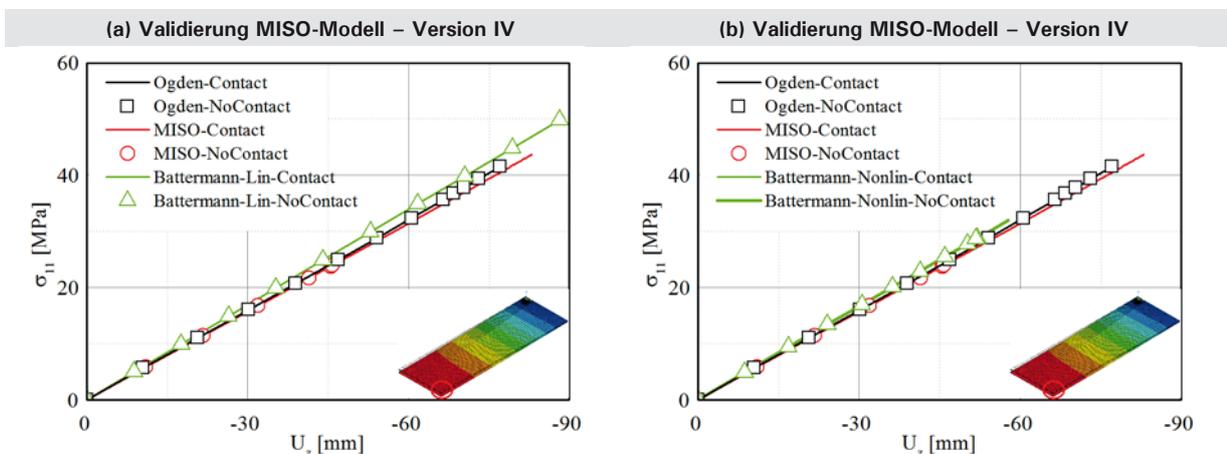


Abbildung 7-13: Spannungs-Verschiebungs-Plot in Feldmitte einer über vier Punkte gelagerten Glasscheibe in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialmodelle (Version IV)

Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass durch die Kontaktformulierung das Antwortverhalten unabhängig vom Materialgesetz nicht verändert wird. Die zusätzliche Kontaktformulierung ermöglicht lediglich, das Konvergenzverhalten bei der numerischen Simulation zu stabilisieren, da die Finiten-Elemente des Elastomerlagers nicht so stark verzerrt werden wie bei einer Berechnung mit vollem Verbund. Zum anderen erkennt man, dass auch hier bei einer linearen Rechnung nach BATTERMANN und KÖHLER die wahren Spannungen um über 20 % überschätzt werden. Die Berechnungen mit dem MISO-Modell zeigen zwar auch eine Überschreitung der Spannungen, jedoch ist diese mit 5 % als unwesentlich einzuschätzen. Die geometrisch nichtlineare Berechnung mit dem BATTERMANN-Modell zeigt bei Vernachlässigung der Kontaktbedingungen keine Konvergenz, jedoch tritt unter Berücksichtigung der Kontaktformulierung bei maximaler Last eine Spannungsunterschreitung von 30 % auf, was hinsichtlich der Bemessung als nicht vertretbar einzustufen ist.

7.4 Fazit zur Modellierung geklemmter Punkthalterssysteme im Glasbau

Das erstellte MISO-Modell konnte in verschiedenen Vergleichsrechnungen verifiziert werden. Es stellt für Tragwerksplaner eine schnelle und genaue Möglichkeit dar, Glasscheiben zu bemessen ohne komplexe hyperelastische Werkstoffmodelle zu verwenden (siehe Abbildung 7-14). Zudem gibt das MISO-Modell genauere Steifigkeitsverhältnisse wieder, als die Modelle nach BATTERMANN und KÖHLER. Die aufbereiteten Bemessungsdaten können in gängige Statiksoftware verwendet werden. Die Eingabedaten für die untersuchten Materialien können dem Anhang entnommen werden (vgl. Abschnitt 11.10). Weiter können folgende Punkte formuliert werden:

- Der von BATTERMANN und KÖHLER formulierte Formfaktor, der mit zunehmender Steigerung auch einen Zuwachs für die Steifigkeit bedeutet, konnte experimentell nicht bestätigt werden. Hier wurde eine entgegengesetzte Tendenz ersichtlich, die bei zunehmenden Formbeiwert eine Minderung der Steifigkeit mit sich bringt
- Bei der Verifizierung des MISO-Modells in Abschnitt 7.3.2 konnte das dieses die Materialantwort bis hin zu großen Deformationen nahezu exakt widerspiegeln. Dies liegt daran, dass das Modell anhand der experimentellen Daten gefittet wurde
- Die Berechnungen nach BATTERMANN und KÖHLER (geometrisch linear / nichtlinear) zeigen eine Überschätzung der Materialantwort (Spannungen) von über 100 % bereits bei technischen Dehnungen von $\varepsilon_{\text{techn.}} = 5\%$ (vgl. Abschnitt 7.3.2)
- Mit dem linear-elastischen Modell, welches den experimentell-bestimmten initialen Druck-E-Modul als Basis hat, wird bei einer geometrisch linearen Rechnung das technische Spannungs-Dehnungsverhalten bis $\varepsilon_{\text{techn.}} = 25\%$ sehr gut abgebildet. Unter Betrachtung der wahren Spannungs-Dehnungslinie werden die Spannungen bei einer wahren Dehnung von $\varepsilon_{\text{wahr}} = 50\%$ um 50 % überschätzt, jedoch ist dieser Sachverhalt in Anbetracht des simplen Modells als vertretbar einzustufen, da es in der Bemessung nicht um die Auslegung des Klemmhalters geht, sondern vielmehr um die Reduzierung der Spannungen im Glas. Nach BATTERMANN ergibt sich hier bereits eine Spannungsüberschätzung von 140 % (vgl. Abschnitt 7.3.2)
- Für die Validierung von kleinen Glasscheiben zeigt sich, dass sich nichtlineare Effekte für die wahren Spannungs-Verschiebungs-Beziehung kaum auswirken und gerade bei dickeren Lagerpads (>5 mm) keine Unterschiede zwischen den einzelnen Berechnungsmodellen ersichtlich sind
- Bei großen Scheiben bilden sich die nichtlinearen Effekte deutlicher aus. Hier ist die Modellierung mit dem MISO-Modell bzw. einem hyperelastischen Materialmodell einer linearen Berechnung vorzuziehen
- Für erste Näherungen kann auch das Modell der initialen Anfangssteifigkeit verwendet werden, allerdings unter der Berücksichtigung geometrisch nichtlinearer Effekte
- Um das Konvergenzverhalten der numerischen Untersuchungen zu steigern, können zwischen Lagerpad und Glasscheibe Kontaktelemente definiert werden, um große Verzerrungen und damit einhergehend dem Abbruch der Berechnung entgegenzuwirken

- Eine einfache Implementierung des MISO-Modells in Standardsoftware wie Dlubal RFEM / RStab bzw. SOFiSTiK ist über nichtlineare Federgesetze mittels Eingabe eines Kraft-Verschiebungsdiagramms oder einer multilinenen Spannungs-Dehnungslinie möglich. Die Basis der Kurven sollte dabei der uniaxiale Druckversuch sein
- Um das laterale Deformationsverhalten der Polymerlager über Federn beschreiben zu können, sollten im vereinfachten Feder-Berechnungsmodell auch laterale Federn implementiert werden, die anhand von Schubversuchen definiert werden

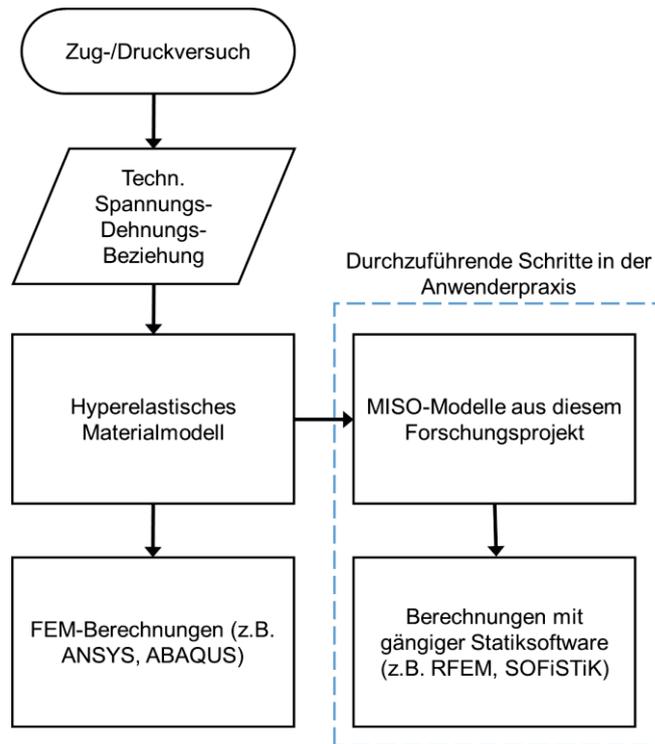


Abbildung 7-14 Vereinfachtes Vorgehen bei der Dimensionierung geklemmter Glasscheiben

8 Zusammenfassung

Infolge einer aus architektonischen Gründen verlangten Transparenz werden im Bauwesen zunehmend Glaskonstruktionen mit Klemmhaltersystemen verwendet. Dabei stehen für die Dimensionierung geklemmter Glasscheiben nur grobe Anhaltswerte zur Verfügung.

Eine realitätsnahe Abschätzung der Steifigkeitsverhältnisse der polymeren Zwischenschicht erlaubt eine genauere Bemessung und Dimensionierung der Glasscheiben. Es wurden neben den gängigen Zwischenschichtmaterialien Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk und Silikon auch Thermoplastisches Elastomer und Thermoplastisches Polyurethan untersucht. Für jedes Material wurden drei Härtegrade zwischen den Grenzen ShA 40 und 80 experimentell analysiert.

Zur Materialkennwertermittlung wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Das Versuchsprogramm bestand aus monotonen, uniaxialen Zug- und Druckversuchen, zyklischen uniaxialen Zugversuchen und einer Dynamisch-Mechanischen Thermoanalyse (DMTA). Um den baupraktischen Bereich besser abschätzen zu können, wurde eine Vorversuchsreihe durchgeführt. Dies half das Versuchsprogramm einzuschränken und sinnvolle Parameterkombinationen (Härte, Dicke etc.) zu identifizieren. Unter realen Last-Verformungsbedingungen konnte eine erste Abschätzung des Materialverhaltens erreicht werden.

Die monotonen, uniaxialen Zug- und Druckversuche dienten zur Ableitung hyperelastischer Materialparameter. Sie eignen sich aufgrund ihres einachsigen Spannungszustands für die Identifikation der Materialparameter. Zur Festlegung der Versuchsgeschwindigkeit wurde ein neuer Ansatz entwickelt, der für dehnratenabhängige Materialien sicherstellt, dass der Energieeintrag bei unterschiedlichen Versuchen gleich ist. Für die Druckversuche wurden die Prüfgeschwindigkeiten nach diesem neuen Ansatz bestimmt und über Vergleichsstudien mit der Finiten-Elemente-Methode verifiziert. Eine Vergleichbarkeit der Zug- und Druckversuche war somit stets gewährleistet. Zusätzlich wurden zyklische, uniaxiale Zugversuche durchgeführt, um Schädigungseffekte und Steifigkeitsminderungen zu erfassen.

Bei den uniaxialen Druckversuchen wurden unterschiedliche Probengeometrien (Kreis, Quadrat, Rechteck) und Probendicken verwendet. Diese Probengeometrien, ausgelegt auf eine möglichst breite Streuung des Formfaktors nach BATTERMANN und KÖHLER, zeigten, dass ein Einfluss des Formfaktors bei den im Glasbau üblichen Abmessungen so nicht bestätigt werden konnte. Hier wurde eine entgegengesetzte Tendenz ersichtlich, die bei zunehmendem Formbeiwert eine Minderung der Steifigkeit mit sich bringt. Die bekannten Untersuchungen zum Formfaktor wurden bei Elastomerlagern für Brücken vorgenommen, welche deutlich größere Abmessungen besitzen und für einen größeren Wertebereich der Formfaktoren ausgelegt werden.

Die Ergebnisse der DMTA geben Aufschluss auf das temperaturabhängige Verhalten der Kunststoffe unter statischen und dynamischen Lasten. Es konnte gezeigt werden, dass die Glasübergangstemperaturen weit unterhalb von -20°C liegen und somit alle Materialien für den Einsatz als Klemmhalter-zwischenschicht geeignet sind.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurde ein Ablauf entwickelt, der die Erstellung und Überprüfung von numerischen Modellen beinhaltet. Dabei wurden zunächst die technischen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus den uniaxialen Zug- und Druckversuchen aufbereitet und daraus hyperelastische Materialmodelle erstellt. Es wurden alle gängigen hyperelastischen Materialmodelle erstellt und auf ihre Anpassungsgüte hin untersucht. Neben der Verwendung von kommerziellen FEM-Programmen wurde eine EXCEL-Datei geschrieben, die die Erstellung hyperelastischer Materialmodelle ermöglicht und überprüfbar macht. Die Übereinstimmung der Materialmodelle und den Experimenten wurde über Determinationskoeffizienten quantitativ ermittelt. Die erstellten Materialmodelle zeigten sehr gute Übereinstimmung der technischen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen, sowohl für die Zug- als auch die Druckversuche.

Um die Ergebnisse der Anpassung zu verifizieren, wurden zahlreiche Zug- und Druckversuche mit verschiedenen hyperelastischen Materialmodellen in FEM-Simulationen nachgerechnet. Dabei wurden die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus der Simulation mit der wahren Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus den Experimenten verglichen. Die gebildeten Determinationskoeffizienten bestätigten die genaue Anpassung der hyperelastischen Materialmodelle. Alle gebildeten Determinationskoeffizienten

liegen im Bereich größer $R^2 = 0,95$, somit ist eine Steifigkeitsabschätzung über die ermittelten Materialmodelle hinreichend genau.

Die gewonnenen Ergebnisse wurden in einem ingenieurmäßig vereinfachten Bemessungsansatz gebündelt. Hierbei wurden die komplexen, hyperelastischen Materialmodelle soweit vereinfacht, dass sie in gängige Statiksoftware (RFEM, SOFiSTiK, SJ Mepla, etc.) implementiert werden können. Dabei ist es über ein multilineares, isotropes Elasto-Plasto Modell (MISO-Modell) möglich, das nichtlineare Materialverhalten der Kunststoffe abzubilden. Über eine einfache Wachstumsfunktion, bei der je nach Material, Härte und Geometrie die Parameter eingesetzt werden, können die Daten zur einfachen Modellierung erstellt werden. Das entwickelte MISO-Modell wurde in mehreren Vergleichsrechnungen verifiziert und hatte gegenüber den komplexen hyperelastischen Materialmodellen nur geringfügige Abweichungen.

9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Prinzipdarstellung eines Punkthalters/Tellerhalters im Schnitt (links) und in der Draufsicht (rechts) aus [2]	10
Abbildung 2-2: Prinzipdarstellung eines Klemmhalters im Schnitt (links) und in der Draufsicht (rechts) aus [2]	10
Abbildung 2-3: Gewellte Oberflächenausbildung des Zwischenmaterials eines Al-Wall Klemmhalter der Firma Längle Glas GmbH	12
Abbildung 3-1: Einteilung der Kunststoffe aus [7]	13
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung von verschiedenen Vernetzungen aus [5]	14
Abbildung 3-3: Qualitative Spannungs-Dehnungs-Beziehungen bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten aus [10]	15
Abbildung 3-4: Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Druck und Zugbelastungen aus [1]	15
Abbildung 3-5: Formfaktoren für Quader und Zylinder nach [1]	16
Abbildung 3-6: Elastizitätsmodul als Funktion des Formfaktors für verschiedene Härten aus [1]	16
Abbildung 3-7: Schematische Darstellung der Temperaturabhängigkeit des Schubmoduls von thermoplastischen Elastomeren (links) von Elastomeren (rechts) aus [11]	17
Abbildung 3-8 Eindrängkörper und Andruckplatte zur Shore A Härte Messung aus [5]	18
Abbildung 4-1: Skizzenhafte Darstellung einer Seilnetzkonstruktion im ausgelenkten Zustand aus [19]	20
Abbildung 4-2: Ansicht und Schnitt des entwickelten Versuchsaufbaus für die Schubversuche	21
Abbildung 4-3: Induktiver Wegaufnehmer WA/20 (links) und Kraftmessdose K-180 (rechts)	21
Abbildung 4-4: Versuchsaufbau eingespannt in die institutseigene Prüfmaschine Zwick 1474	22
Abbildung 4-5: Untersuchte Probekörpergeometrien im Schubversuch; Quadrat links; Rechteck mitte; Kreis rechts	22
Abbildung 4-6: Zustände vor und während des Schubversuches; a.) vor Versuchsbeginn; b.) Gleiten Stahl-Kunststoff; c.) Gleiten Kunststoff-Glas; d.) Kombination von b.) und c.) nach [23]	24
Abbildung 4-7: Einfluss der Pressung auf die Kraft-Weg-Beziehung der Versuchsreihe 1/2/3/5_R1_2_65_8	24
Abbildung 4-8: Einfluss der Härte auf die Kraft-Weg-Beziehung der Versuche 4_R2_2_25_4 und 2_R2_2_65_4	25
Abbildung 4-9: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Kraft-Weg-Beziehung der Versuchsreihe 2_R1_2/10/100_25_4	26
Abbildung 5-1: Vollständiges Versuchsprogramm gummiartiger Materialien	28
Abbildung 5-2: Triaxialität unter Parametrisierung des Hauptspannungstensors	30
Abbildung 5-3: Untersuchung der Triaxialität anhand unterschiedlicher numerischer Modelle	31
Abbildung 5-4: Freie Dehnlänge für uniaxialen Zugversuch	32
Abbildung 5-5: Verifikation des Verfahrens des Energieeintrags für Zug- und Druckversuche	33
Abbildung 5-6: Darstellung der Elementnetzabhängigkeit	33
Abbildung 5-7: Darstellung des Versuchsaufbaus einer Zugprüfung	34
Abbildung 5-8: Vergleich zwischen Standardabweichung, Standardfehler und einhüllende Spannungs-Dehnungs-Kurven	35
Abbildung 5-9: Unterschiedlich hergestellte Prüfkörper	37
Abbildung 5-10: Streuung der Probenbreiten am Beispiel von Silikon an drei unterschiedlichen Messstellen	37
Abbildung 5-11: Differenz zwischen einer 50 kN und einer 10 kN Kraftmessdose	38
Abbildung 5-12: Arbeitslinien der uniaxialen Zugversuche ($SH_{xx} \triangleq$ Shore-Härte)	39
Abbildung 5-13: Spannungs-Dehnungs-Verhalten uniaxiale Zugversuche	40
Abbildung 5-14: Poissonzahl in Abhängigkeit der wahren Längsdehnung	41
Abbildung 5-15: Vergleich der Spannungen ermittelt aus Versuchen und analytischen Berechnungen bei unterschiedlichen Querkontraktionszahlen	42
Abbildung 5-16: Schematische Darstellung des Mullins-Effekts für unterschiedliche Dehnung nach [20]	43
Abbildung 5-17: Arbeitslinien der zyklischen Versuche für unterschiedliche Materialien	44
Abbildung 5-18: Arbeitslinien der uniaxialen, zyklischen Versuche für EPDM und TPU	45

Abbildung 5-19: Arbeitslinien der uniaxialen, zyklischen Zugversuche für Silikon und TPE 45

Abbildung 5-20: Schematische Darstellung der Probegeometrien für die monotonen, uniaxialen Druckversuche 48

Abbildung 5-21: Herstellung der unterschiedlichen Probegeometrien für die uniaxialen Druckversuche 49

Abbildung 5-22: Oberflächenbeschaffenheit der Proben des Materials Kraiburg TPE nach der Probenherstellung. Kreisbohrer (links); Bandsäge (rechts) 50

Abbildung 5-23: Darstellung der Proben nach der Herstellung und der nach der Bearbeitung 50

Abbildung 5-24: Analyse des Querdehnungsverhaltens von gefetteten (dargestellt) und ungefetteten Proben (nicht dargestellt) im Druckversuch 51

Abbildung 5-25: Approximation der Maschinensteifigkeit über eine Polynomfunktion 7. Grades 51

Abbildung 5-26: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für EPDM 52

Abbildung 5-27: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für Silikon 53

Abbildung 5-28: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für TPE 53

Abbildung 5-29: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für TPU 54

Abbildung 5-30: Vergleich der unterschiedlichen Geometrien 54

Abbildung 5-31: Kraft-Weg-Verhalten von BASF-TPU-SH80-R und Kubo-Silikon-SH40-K 55

Abbildung 5-32: Beispiel eines Amplituden-sweeps (links) und eines Frequenz-sweeps (rechts) 56

Abbildung 5-33: Auswertung der Glasübergangstemperatur in unterschiedlichen Darstellungsweisen 56

Abbildung 5-34: Auswertung der Glasübergangstemperatur 57

Abbildung 5-35: Standard-Schereinsatz für DMA/SDTA861 57

Abbildung 5-36: Ergebnisse der DMTA für KUBO-EPDM 58

Abbildung 5-37: Ergebnisse der DMTA für KUBO-Silikon 59

Abbildung 5-38: Ergebnisse der DMTA für Kraiburg-TPE 59

Abbildung 5-39: Logarithmische Darstellung der DMTA 59

Abbildung 6-1: Ablaufdiagramm zum Vorgehen bei der Überprüfung eines numerischen Modells 61

Abbildung 6-2: Technische und wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch für EPDM ShA 70 67

Abbildung 6-3: Technische Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aus dem uniaxialen Zugversuch und der Materialmodelle aus ABAQUS 67

Abbildung 6-4: Determinationskoeffizienten der unterschiedlichen Formänderungsenergiegedichtefunktionen aus dem uniaxialen Zugversuch und den gefetteten Spannungs-Dehnungs-Beziehungen 68

Abbildung 6-5: Modellierte Zugprobe unbelastet (links) und belastet (rechts) 69

Abbildung 6-6: Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation unter Verwendung des OGDEN_N6 Ansatzes 70

Abbildung 6-7: Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze 71

Abbildung 6-8: Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze; Dehnung bis 0,5 [-] 72

Abbildung 6-9: Determinationskoeffizienten aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation (gesamter Dehnbereich: schwarz; Dehnbereich bis 0,5 [-]: grau) 73

Abbildung 6-10: Technische Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch (Quadratische Geometrie) EPDM ShA 60 und der erstellten Materialmodelle aus ABAQUS 74

Abbildung 6-11: Determinationskoeffizienten gebildet aus dem uniaxialen Druckversuch (Rechteckgeometrie) und den erstellten Materialmodellen 75

Abbildung 6-12: Modellierte Druckproben unbelastet (oben) und belastet (unten) 75

Abbildung 6-13: Modellierte Druckprobe (Quadratische Geometrie) mit den starren Platten zur Aufbringung der Verschiebung in Y-Richtung 76

Abbildung 6-14: Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch (Quadratische Geometrie) und der FEM-Simulation unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze. EPDM ShA60 .. 76

Abbildung 6-15: Determinationskoeffizienten aus dem uniaxialen Druckversuch (Quadratische Geometrie) und der FEM-Simulation unter Verwendung unterschiedlicher Ansätze 77

Abbildung 6-16: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch (Rechteckige Geometrie) und der FEM-Simulation mit dem Materialmodell OGDEN_N2 für EPDM ShA 60 78

Abbildung 6-17: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus dem uniaxialen Druckversuch (Kreis) und der FEM-Simulation mit dem Materialmodell OGDEN_N2 für EPDM ShA 60 78

Abbildung 7-1: Auswertung der experimentellen Daten für Kubo-EPDM-ShA 60	82
Abbildung 7-2: Fitting der experimentellen Daten für Kubo-EPDM-ShA 60.....	83
Abbildung 7-3: Analytische Validierung des mechanischen Modells und Integration der exponentiellen Wachstumsfunktion	83
Abbildung 7-4: Implementierung der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung in ANSYS	84
Abbildung 7-5: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung für die uniaxialen Druckversuch.....	85
Abbildung 7-6: Vergleichsrechnungen unterschiedlicher Materialgesetze gekoppelt mit einer geometrisch linearen / nichtlinearen Berechnung	86
Abbildung 7-7: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung für den uniaxialen Zugversuch.....	86
Abbildung 7-8: Wahre Spannungs-Dehnungs-Beziehung für einen Schubversuch.....	87
Abbildung 7-9: Ausschnitt der Struktur mit unterschiedlicher Netzfeinheit.....	88
Abbildung 7-10: Spannungs-Verschiebungs-Plot in Feldmitte einer über vier Punkte gelagerten Glasscheibe in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialmodelle (Version I)	88
Abbildung 7-11: Spannungs-Verschiebungs-Plot in Feldmitte einer über vier Punkte gelagerten Glasscheibe in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialmodelle (Version II)	89
Abbildung 7-12: Spannungs-Verschiebungs-Plot in Feldmitte einer über vier Punkte gelagerten Glasscheibe in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialmodelle (Version III)	90
Abbildung 7-13: Spannungs-Verschiebungs-Plot in Feldmitte einer über vier Punkte gelagerten Glasscheibe in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialmodelle (Version IV)	90
Abbildung 7-14 Vereinfachtes Vorgehen bei der Dimensionierung geklemmter Glasscheiben.....	92

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht untersuchter Serienklemmhalter	11
Tabelle 3-1: Einteilung der Kunststoffe nach [6].....	13
Tabelle 3-2: Anwendungsbereich der Shore Härte Skalen nach [13].....	18
Tabelle 3-3: Untersuchte Kunststoffe und deren Klassifizierung.....	18
Tabelle 4-1: Formfaktoren der untersuchten Geometrien	23
Tabelle 4-2: Vergleich der Soll- und Ist-Dicken der untersuchten Kunststoffe	23
Tabelle 5-1: Übersicht der untersuchten Werkstoffe	27
Tabelle 5-2: Gewählte Prüfkörper-Geometrien für uniaxiale Zug- und Druckversuche	29
Tabelle 5-3: Triaxialitätsbereich theoretisch / 10 % Abweichung vom ideellen Wert nach [32]	30
Tabelle 5-4: Prüfgeschwindigkeit v der Zug- und Druckversuche ermittelt nach der modifizierten Energieeintragungsmethode	33
Tabelle 5-5: Messmarkenanordnung für den uniaxialen Zugversuch und ableitbare Messgrößen	34
Tabelle 5-6: Mittlere Querkontraktionszahlen in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialien	41
Tabelle 5-7: Uniaxiale Druckprüfung von Kunststoffen: Vergleich Norm und Forschung	47
Tabelle 5-8: Übersicht der Formfaktoren für die monotonen uniaxialen Druckversuche	48
Tabelle 5-9 Prüfgeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Materialien	52
Tabelle 5-10: Prüfprogramm der verschiedenen Materialien für die DMTA	58
Tabelle 5-11: Glasübergangstemperaturen der verschiedenen Materialien	58
Tabelle 6-1: Invarianten des Verzerrungstensors	62
Tabelle 6-2: Darstellung des Zusammenhangs zwischen wahren und technischen Dehnung	63
Tabelle 6-3: Determinationskoeffizient für die verschiedenen Formänderungsenergiedichtefunktionen aus dem uniaxialen Zugversuch und den gefitteten Spannungs-Dehnungs-Beziehung.....	68
Tabelle 6-4: Determinationskoeffizienten EPDM ShA 70 aus dem uniaxialen Zugversuch und der FEM-Simulation.....	72
Tabelle 6-5: Determinationskoeffizient für die verschiedenen Formänderungsenergiedichtefunktionen aus dem uniaxialen Druckversuch (Rechteckgeometrie) und den erstellten Materialmodellen.....	74
Tabelle 6-6: Determinationskoeffizienten EPDM ShA 60 (Quadrat) aus dem uniaxialen Druckversuch und der FEM-Simulationen	77
Tabelle 7-1: Ergebnisse nach BATTERMANN, OGDEN und dem MISO-Modell	81
Tabelle 11-1: Beispielhafte Messergebnisse	102

10 Literatur

- [1] W. Battermann and R. Köhler, *Elastomere Federung, elastische Lagerungen: Grundlagen ingenieurmässiger Berechnung und Konstruktion*. Berlin: W. Ernst, 1982.
- [2] *Glas im Bauwesen – Bemessungs- und Konstruktionsregeln – Teil 3: Punktförmig gelagerte Verglasungen*, 18008-3:2013-07, 2013.
- [3] B. Weller, P. Kramer, S. Reich, Krampe, Philipp, Dipl.-Ing, Reich, Stefan, Dr.-Ing, and Weller, Bernhard, Prof. Dr.-Ing, *Glasbau-Praxis: Konstruktion und Bemessung // Konstruktion und Bemessung Band 1: Grundlagen*. Grundlagen, 3rd ed. Berlin: Beuth, 2013.
- [4] H. Czichos and M. Hennecke, *Hütte: Das Ingenieurwissen ; mit 340 Tabellen ; [Jubiläumsausgabe 150 Jahre Hütte]*, 33rd ed. Berlin [u.a.]: Springer, 2008.
- [5] W. Kaiser, *Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese bis zur Anwendung*, 2nd ed. München: Hanser, 2007.
- [6] B. Schroeder, *Kunststoffe für Ingenieure: Ein Überblick*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [7] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer, and T. Hirth, *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, 8th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer, 2012.
- [8] S. Koltzenburg, M. Maskos, and O. Nuyken, *Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*. Berlin [u.a.]: Springer Spektrum, 2014.
- [9] G. W. Ehrenstein, *Polymer-Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften - Anwendung*, 3rd ed. München: Hanser, Carl, 2010.
- [10] H. Domininghaus, P. Eyerer, and P. Elsner, *Die Kunststoffe Und Ihre Eigenschaften*. Dordrecht: Springer, 2004.
- [11] F. Röthemeyer and F. Sommer, *Kautschuk Technologie*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013.
- [12] *Kunststoffe und Hartgummi - Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Durometer (Shore-Härte) (ISO 868:2003); Deutsche Fassung EN ISO 868:2003*, 868, 2003.
- [13] *Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung der Eindringhärte - Teil 1: Durometer-Verfahren (Shore-Härte)*, 7619-1, 2012.
- [14] Austrell P.-E. and Ahadi A, "Hyperelastic constant from a modified hardness test using energy balance obtained from FE-analysis," in *Constitutive models for rubber VIII: Proceedings of the 8th European Conference on Constitutive Models for Rubber (ECCMR VIII), San Sebastian, Spain, 25-28 June 2013*, N. Gil-Negrete and A. Alonso, Eds, Leiden: CRC Press/Balkema, 2013.
- [15] W. Sobek, A. Schmid, and F. Heinlein, "Innovative Stahltragwerke für das Museo del Acero in Mexiko," (de), *Stahlbau*, vol. 77, no. 8, pp. 551–554, 2008.
- [16] BASF Polyurethane GmbH, "Technische Information Thermoplastische Polyurethan Elastomere (TPU): Elastollan® - Materialeigenschaften,"
- [17] W. Sobek and I. Weiss, "Eine Stahl-Glashalle als neuer zentraler Eingangsbereich der Universität Bremen," (de), *Stahlbau*, vol. 70, no. 5, pp. 309–313, 2001.
- [18] W. Sobek and F. Tarazi, "One step further towards the dematerialization of building envelopes - the new European Investment Bank building in Luxembourg," (en), *Steel Construction*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2010.
- [19] Blandini D. L, "Vorlesungsfolien zu Glaskonstruktion: aus dem Modul Nichtlineares Tragverhalten," Stuttgart, Wintersemester 2012/2013.
- [20] T. Block, "Verdrehwiderstände bewehrter Elastomerlager," Dissertation, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen, Ruhr-Universität, Bochum, 2010.
- [21] Iris Maniatis, "Numerical and Experimental Investigations on the Stress Distribution of Bolted Glass Connections uner In-Plane Loads," Dissertation, Institut für Baustoffe und Konstruktion, Technische Universität München, München, 2005.
- [22] Nils Albrecht, "Lastabtragungsmechanismen im Lochbereich punktgestützter Glastafeln," Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2004.
- [23] Christian Rebmann, "Experimentelle Analysen des Tragverhaltens von kleinteiligen Elastomerlagern im Glasbau," Masterarbeit, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2014.
- [24] R. De Borst, et al, R. d. Borst, and M. A. Crisfield, *Nonlinear finite element analysis of solids and structures*, 2nd ed. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons; Wiley, 2012.

- [25] Austrell, Per Erik and Ahadi, A, Ed, *Hyperealstic constants from a modified hardness test using energy balance obtained from FE-analysis VIII*. 8th European Conference on Constitutive Models for Rubbers (ECCMR): CRC Press-Taylor & Francis Group, 2013.
- [26] J. ILi and D. Mayau and F. Song, "A constitutive model for cavitation an cavity growth in rubber-like materials under arbitrary tri-axial loading," (en), *International journal of solids and structures*, vol. 44, no. 18, pp. 6080–6100, 2007.
- [27] F. Becker, "Entwicklung einer Beschreibungsmethodik für das mechanische Verhalten unverstärkter Thermoplaste bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten," Dissertation, Zentrum für Ingenieurwissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle-Wittenberg, 2009.
- [28] S. Kolling and M. R. Maneshkarimi, *Hyperelastodynamics in Physical and Material Space // A RANS-based CFD analysis of microprocesses in turbulent reactive spray configurations*, 14th ed. Darmstadt: Inst. für Mechanik, 2007 // 2006.
- [29] P. van den Bogert and R. de Borst, "On the behaviour of rubberlike materials in compression and shear," (en), *Archive of Applied Mechanics*, vol. 64, no. 2, pp. 136–146, 10.1007/BF00789105, 1994.
- [30] R. S. Rivlin, "The elasticity of rubber // The Elasticity of Rubber," (en), *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 65, no. 3, pp. 51–66, 1992.
- [31] J. Fréchet, et al, J. M. Fréchet, and C. J. Hawker, "Comprehensive Polymer Science 2nd suppl // Synthesis and Properties of Dendrimers and Hyperbranched Polymers," (en), *Comprehensive Polymer Science and Supplements*, pp. 71–132, 1996.
- [32] S. P. Sikora, "Materialcharakterisierung und -modellierung zur Simulation von Klebverbindungen mit Polyurethanklebstoffen,"
- [33] T. Scherer, *Werkstoffspezifisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten und Grenzen der Beanspruchbarkeit elastischer Klebungen: Dissertation*, 2014.
- [34] *Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012): Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012 ; Ersatz für DIN EN ISO 527-1:1996-04 = General principles (ISO 527-1:2012) = Principes généraux (ISO 527-1:2012)*, 2012nd ed. Berlin: Beuth, 2012.
- [35] A.N. Gent, Ed, *Engineering with rubber: How to design rubber components*, 3rd ed. München, Cincinnati, Ohio: Hanser; Hanser Publications, 2012.
- [36] O. H. Yeoh and P. D. Fleming, "A new attempt to reconcile the statistical and phenomenological theories of rubber elasticity," (en), *J. Polym. Sci. B Polym. Phys*, vol. 35, no. 12, pp. 1919–1931, 1997.
- [37] L. R. G. Treloar, *The physics of rubber elasticity*, 3rd ed. Oxford, New York: Clarendon Press; Oxford university press, 2005.
- [38] L. Crocker and B. Duncan, "Measurement Methods for Obtaining Volumetric Coefficients for Hyperelastic Modelling of Flexible Adhesives," PAJex2 Report No 3, Centre for Materials Measurement and Technology, National Physical Laboratory, Great Britain, 2001.
- [39] L. Mullins, "Effect of Stretching on the Properties of Rubber," (en), *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 21, no. 2, pp. 281–300, 1948.
- [40] J. Diani, B. Fayolle, and P. Gilormini, "A review on the Mullins effect," (en), *European Polymer Journal*, vol. 45, no. 3, pp. 601–612, 2009.
- [41] J. Li, D. Mayau, and V. Lagarrigue, "A constitutive model dealing with damage due to cavity growth and the Mullins effect in rubber-like materials under triaxial loading," (en), *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 56, no. 3, pp. 953–973, 2008.
- [42] G. CHAGNON, "On the relevance of Continuum Damage Mechanics as applied to the Mullins effect in elastomers," (en), *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 52, no. 7, pp. 1627–1650, 2004.
- [43] *DIN EN ISO 604 - Kunststoffe - Bestimmung von Druckeigenschaften*, 604, 2003.
- [44] Dias V, "Development of adhesives constitutive material laws for the assessment of bonded steel to glass partial composite beams," Dissertation, The Faculty of Sciences, Technology and Communication, Université du Luxembourg, Luxembourg, 2013.
- [45] J. Méndez Diez, *Thermoviscoplasticity of glassy polymers: Experimental characterization, parameter identification and model validation*. Stuttgart: Inst. für Mechanik (Bauwesen), 2010.
- [46] N.-H. Kim, *Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. Boston, MA: Springer International Publishing, 2015.
- [47] A. Rooch, *Statistik für Ingenieure: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Datenauswertung endlich verständlich*, 2014th ed. Berlin: Springer Berlin, 2014.

- [48] B. Kim, S. B. Lee, J. Lee, S. Cho, H. Park, S. Yeom, and S. H. Park, "A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for chloroprene rubber," (ca), *Int. J. Precis. Eng. Manuf*, vol. 13, no. 5, pp. 759–764, 2012.
- [49] P. P. Eckstein, *Repetitorium Statistik: Deskriptive Statistik - Stochastik - induktive Statistik; mit Klausuraufgaben und Lösungen*, 8th ed. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- [50] E. Cramer and U. Kamps, *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik: Ein Skript für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften*, 3rd ed. Berlin [u.a.]: Springer Spektrum, 2014.
- [51] T. Cleff, *Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, PASW (SPSS) und STATA*, 2nd ed. Wiesbaden: Gabler Verl, Springer Fachmedien, 2011.
- [52] Dassault Systèmes Simulia Corp, "Abaqus 6.12: Abaqus/CAE User's Manual," RisingSunMills, Providence, 2012.
- [53] R. Brown, *Physical testing of rubber*, 4th ed. New York, NY: Springer, 2006.
- [54] Scott, JR, "Improved method of expressing hardness of vulcanized rubber," in *J. Rubb. Rese-arch*, p. 145.
- [55] S. W. Hawley, "Anomalies in ISO 48, hardness of rubber," (af), *Polymer Testing*, vol. 16, no. 4, pp. 327–333, 1997.
- [56] *Elastomere und thermoplastische Elastomere - Bestimmung der Härte (Härte zwischen 10 IRHD und 100 IRHD)*, 48, 2009.
- [57] Stiehler, R. D, Decker, G. E, Bullman, G. W, "in," in *Proceedings of the International Rubber*, p. 277.
- [58] O. H. Yeoh, "On hardness and Young's modulus of rubber," in *Plastics and Rubber Processing and Applications*, p. 141.
- [59] G. Bles and et al, "Instrumented micro-hardness measurements used to identify the local visco-hyper-elastic parameters of Polyurethane elastomers," in *Constitutive Models for Rubber VIII*, A. Alonso, Ed.: CRC Press, 2013, p. 177.
- [60] Y. Marco and et al, "Identification of local constitutive model from micro-indentation testing," in *Constitutive Models of Rubber VII*, p. 177.
- [61] P. L. Geiß and M. Feldmann, *Vereinfachtes Bemessungsverfahren für elastische Klebfugen mit mehrachsigen Spannungszuständen unter Berücksichtigung nichtlinearen Materialverhaltens - KLAX: Schlussbericht der Forschungsstellen 1. TU Kaiserslautern, Arbeitsgruppe Werkstoff und Oberflächentechnik Kaiserslautern (AWOK), 2. RWTH Aachen, Lehrstuhl für Stahlbau (gemeinsamer Schlussbericht aller beteiligten Forschungsstellen) zu dem über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) ... geförderten Vorhaben 16842 N ; der AIF-Forschungsvereinigung DECHEMA e.V. ; (Bewilligungszeitraum: 01.08.2011 - 31.10.2013)*. Kaiserslautern, Hannover: AWOK [u.a.]; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2014.
- [62] R. W. Ogden, "Large Deformation Isotropic Elasticity - On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids," (en), *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 326, no. 1567, pp. 565–584, 1972.
- [63] D. Bohmann, "SJ MEPLA Kurzanteilung, Version 4.0: Software for Structural Glass Design," SJ Software GmbH, Aachen, 2015.

11 Anlagen

11.1 Beispielrechnung nach dem Gauß-Newton Verfahren

Gegeben sind die folgenden Messergebnisse:

Tabelle 11-1: Beispielhafte Messergebnisse

Dehnungen	[mm]	X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
Spannungen	[N/mm ²]	Y	0	-0,83	-2,8	-5,18	-7,2	-8,13	-7,2	-3,68	3,2	14,18
Dehnungen	[mm]	X	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	
Spannungen	[N/mm ²]	Y	30	51,43	79,2	114,08	156,8	208,13	268,8	339,58	421,2	

Als Ansatz soll ein dreigliedriger Polynomansatz gewählt werden

$$f(x) = a_1 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x + a_4 \quad (11-1)$$

1. Aufstellen der Residuumsfunktion

$$r_i = f_i(x) - y = a_1 \cdot x_i^3 + a_2 \cdot x_i^2 + a_3 \cdot x_i + a_4 - y_i \quad (11-2)$$

2. Berechnung der partiellen Ableitungen nach a_i

$$r_1 = \frac{\partial r}{\partial a_1} = x^3 \quad r_2 = \frac{\partial r}{\partial a_2} = x^2 \quad r_3 = \frac{\partial r}{\partial a_3} = x \quad r_4 = \frac{\partial r}{\partial a_4} = 1 \quad (11-3)$$

3. Aufstellen der Jacobi-Matrix (einsetzen der Werte aus der Tabelle), des Parametervektors und des Residuenvektors

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0,125 & 0,25 & 0,5 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3,375 & 2,25 & 1,5 & 1 \\ 8 & 4 & 2 & 1 \\ 15,625 & 6,25 & 2,5 & 1 \\ 27 & 9 & 3 & 1 \\ 42,875 & 12,25 & 3,5 & 1 \\ 64 & 16 & 4 & 1 \\ 91,125 & 20,25 & 4,5 & 1 \\ 125 & 25 & 5 & 1 \\ 166,375 & 30,25 & 5,5 & 1 \\ 216 & 36 & 6 & 1 \\ 274,625 & 42,25 & 6,5 & 1 \\ 343 & 49 & 7 & 1 \\ 421,875 & 56,25 & 7,5 & 1 \\ 512 & 64 & 8 & 1 \\ 614,125 & 72,25 & 8,5 & 1 \\ 729 & 81 & 9 & 1 \\ 857,375 & 90,25 & 9,5 & 1 \\ 1000 & 100 & 10 & 1 \end{bmatrix} \quad r = \begin{bmatrix} 1 \\ 2,7 \\ 6,8 \\ 13,3 \\ 22,2 \\ 33,5 \\ 47,2 \\ 63,3 \\ 81,8 \\ 102,7 \\ 126 \\ 151,7 \\ 179,8 \\ 210,3 \\ 243,2 \\ 278,5 \\ 316,2 \\ 356,3 \\ 398,8 \\ 443,7 \\ 491 \end{bmatrix} \quad a_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11-4)$$

4. Einsetzen und Auflösen der Gleichung

$$a_{i+1} = a_i - (D^T \cdot D)^{-1} \cdot D^T \cdot r = \begin{bmatrix} 1 \\ -3,8 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11-5)$$

5. Prüfung der Schranke. Falls die Schranke nicht eingehalten worden ist, beginnt eine erneute Iteration mit 1. Dieser Vorgang kann sich so lange wiederholen, bis sich ein befriedigendes Ergebnis einstellt.
6. Parameter in die Gleichung $f(x)$ einsetzen

$$f(x) = a_1 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x + a_4 = 1 \cdot x^3 + (-3,8) \cdot x^2 \quad (11-6)$$

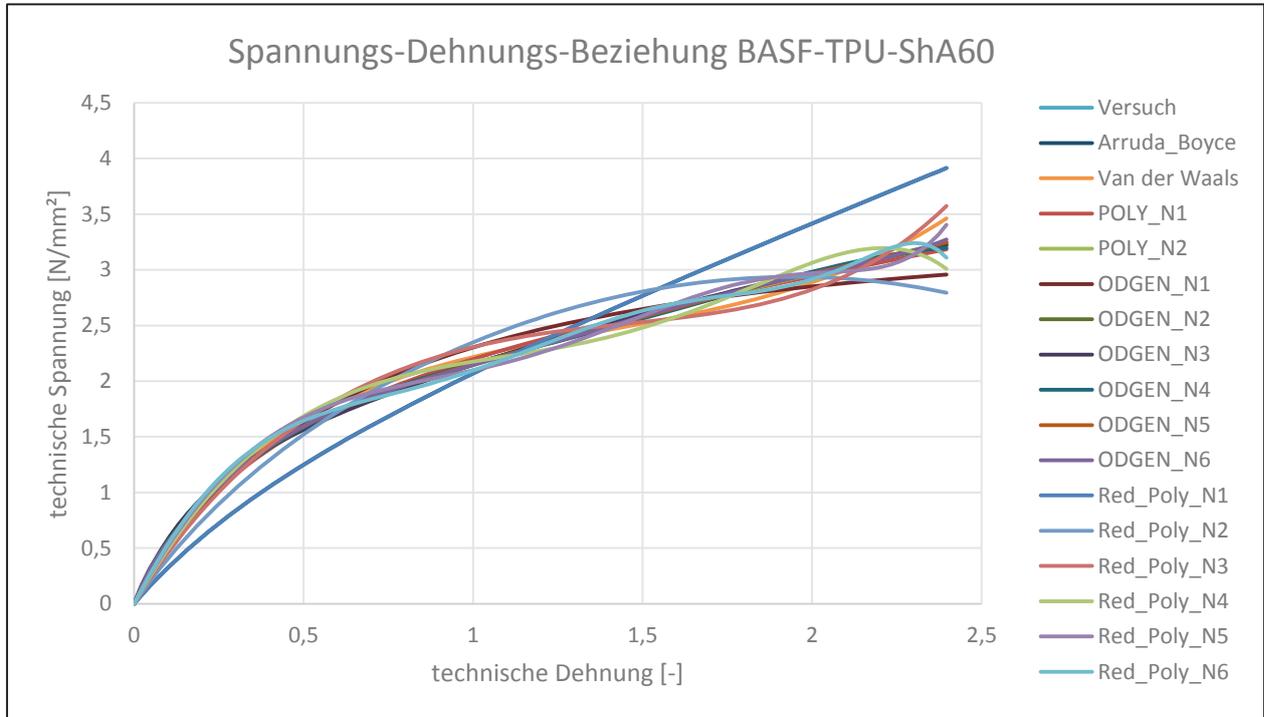
11.2 Erstellte Materialmodelle für TPU aus dem uniaxialen Zugversuch

Material: TPU

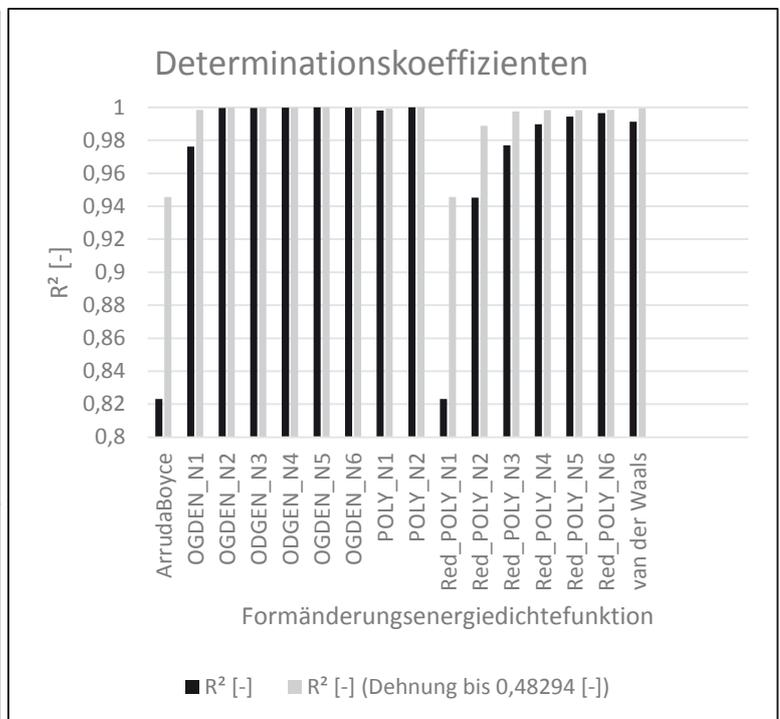
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R^2 [-]	R^2 [-] (Dehnung bis 0,48294 [-])
Arruda-Boyce	0,823177438	0,945641297
ODGEN_N1	0,976258748	0,998520359
ODGEN_N2	0,999617015	0,999847654
ODGEN_N3	0,999563604	0,999851283
ODGEN_N4	0,999689243	0,999874194
ODGEN_N5	0,999921761	0,999952046
ODGEN_N6	0,999765246	0,999919544
POLY_N1	0,998025872	0,99914698
POLY_N2	0,999966249	0,999986246
Red_POLY_N1	0,823177438	0,945641297
Red_POLY_N2	0,945317501	0,988722555
Red_POLY_N3	0,976927935	0,997500547
Red_POLY_N4	0,989711552	0,998271163
Red_POLY_N5	0,994313276	0,998159402
Red_POLY_N6	0,996437078	0,998400433
van der Waals	0,991218697	0,999307789



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

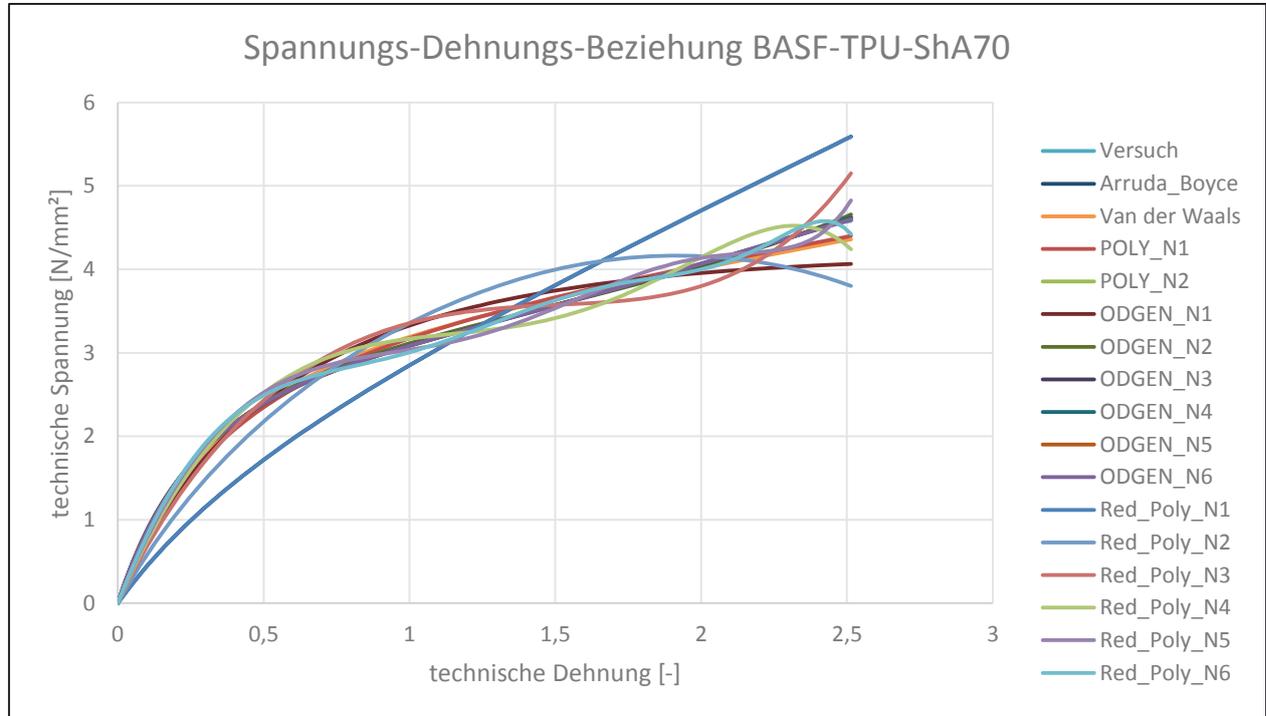
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,79950511	0,96071625											0
OGDEN_N2	-0,23346219	3,05411798	2,70826046	-4,27686819									0
OGDEN_N3	-0,07010306	2,33384444	-0,16575607	3,18251857	2,70726498	-4,24385097							0
OGDEN_N4	6,14379096	0,02202699	-2,08552935	4,96088877	-6,36771281	-3,74104972	5,04406100	-9,66234946					0
OGDEN_N5	2,35340731	-2,71011026	1,55041815	7,18326232	-2,12014819	11,78853640	-3,09160982	-14,36576810	4,24004258	-23,57715790			0
OGDEN_N6	11,87066770	5,03898689	-13,93856010	6,01005955	2,25881737	6,59793766	31,14139080	-7,13477910	-58,95492730	-8,79005165	30,46585700	-11,15869990	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,27051744	0,71502315											0
POLY_N2	-0,36867264	1,51432822	-0,00210383	0,00877434	0,17256038								0
Red_POLY_N1	0,59131223												0
Red_POLY_N2	0,74096425		-0,01746738										0
Red_POLY_N3	0,83924594		-0,05307117			0,00267767							0
Red_POLY_N4	0,90816079		-0,10485914			0,01254407	-0,00055059						0
Red_POLY_N5	0,95605931		-0,16698507			0,03408021	-0,00337176	0,00012519					0
Red_POLY_N6	0,99239344		-0,23992218			0,07377793	-0,01233112	0,00102273	-0,00003306				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,18262442	6313,75123											0
van der Waals	1,98711114	6,54589957	0,65127780	0									0

Material: TPU

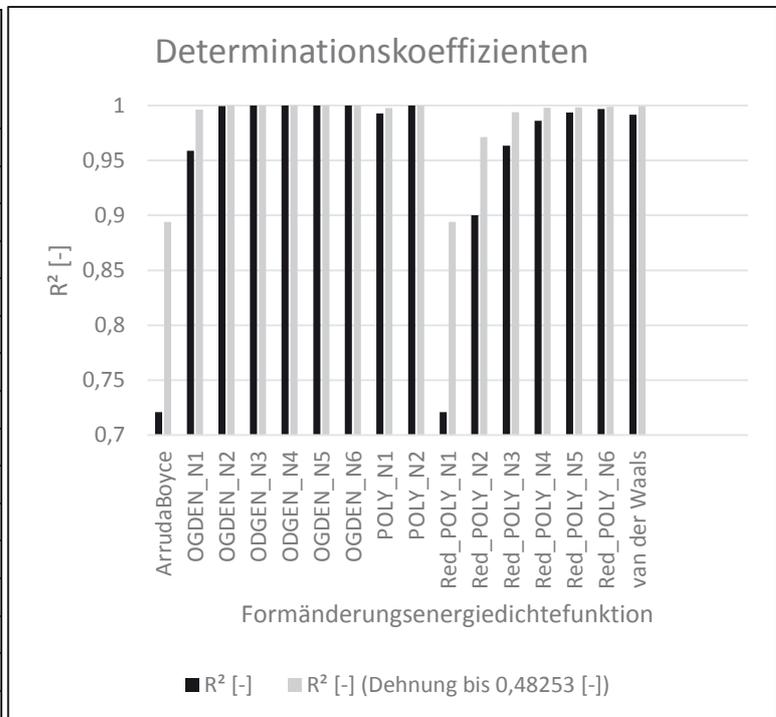
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (Dehnung bis 0,48253 [-])
Arruda-Boyce	0,721019303	0,893908969
OGDEN_N1	0,958663692	0,996273122
OGDEN_N2	0,999553336	0,99995827
ODGEN_N3	0,99993735	0,999987859
ODGEN_N4	0,999927401	0,99998654
OGDEN_N5	0,999981877	0,999990262
OGDEN_N6	0,999988364	0,999989792
POLY_N1	0,992726446	0,997613157
POLY_N2	0,999981592	0,999991452
Red_POLY_N1	0,721019303	0,893908969
Red_POLY_N2	0,900046739	0,971174526
Red_POLY_N3	0,963451102	0,993797025
Red_POLY_N4	0,986112577	0,99784822
Red_POLY_N5	0,993489251	0,99838071
Red_POLY_N6	0,996720673	0,998724565
van der Waals	0,991700302	0,999504345



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH
Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

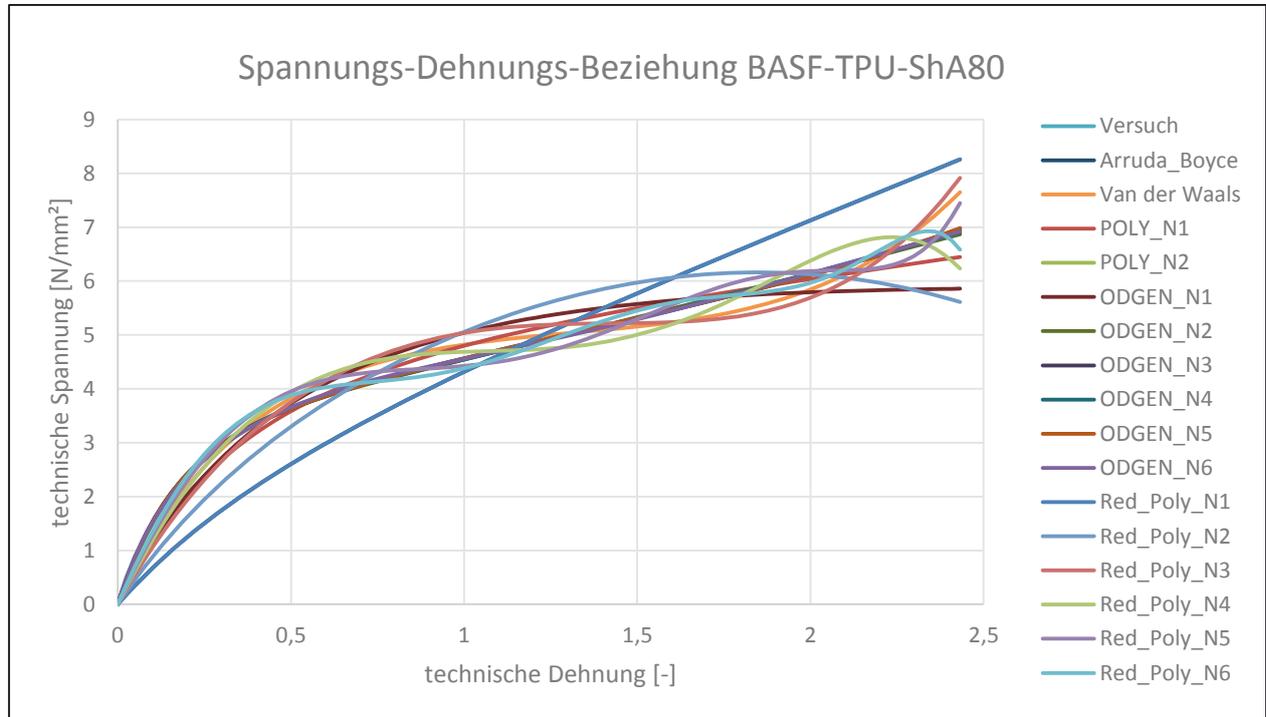
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	2,72409301	0,77332907											0
OGDEN_N2	0,00509022	5,82881117	3,46122677	-2,64807978									0
ODGEN_N3	-0,37987684	1,84533947	0,07651783	3,71848126	3,88085426	-2,77223742							0
ODGEN_N4	-0,40103081	1,9997072	0,04227562	3,99970063	2,36566163	-1,99998095	1,57933754	-4,00010213					0
OGDEN_N5	-0,51153832	2,00009216	0,10769602	4,00007107	-0,00402445	6,00003609	2,87084831	-1,9998932	1,10286363	-4,00004097			0
OGDEN_N6	-0,4478628	1,99999755	-0,36407415	4,00000292	0,00084043	5,99999988	7,96363719	-2,00000961	-8,75416829	-4,00000629	5,21594968	-6,00000589	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,28979558	1,23360084											0
POLY_N2	-0,28985435	2,05325355	-0,01337609	0,09991147	-0,02194151								0
Red_POLY_N1	0,81416823												0
Red_POLY_N2	1,06135328		-0,02560408			0,00391024							0
Red_POLY_N3	1,24433209		-0,08309765			0,01743149	-0,00068698						0
Red_POLY_N4	1,36596667		-0,16190151			0,04476113	-0,00394026	0,00013182					0
Red_POLY_N5	1,44445626		-0,24964884			0,09169281	-0,0135531	0,00101024	-2,9597E-05				0
Red_POLY_N6	1,49989165		-0,34573307										0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,62833645	6591,87788											0
van der Waals	3,23209357	10,462057	0,22589697	0,80030748									0

Material: TPU

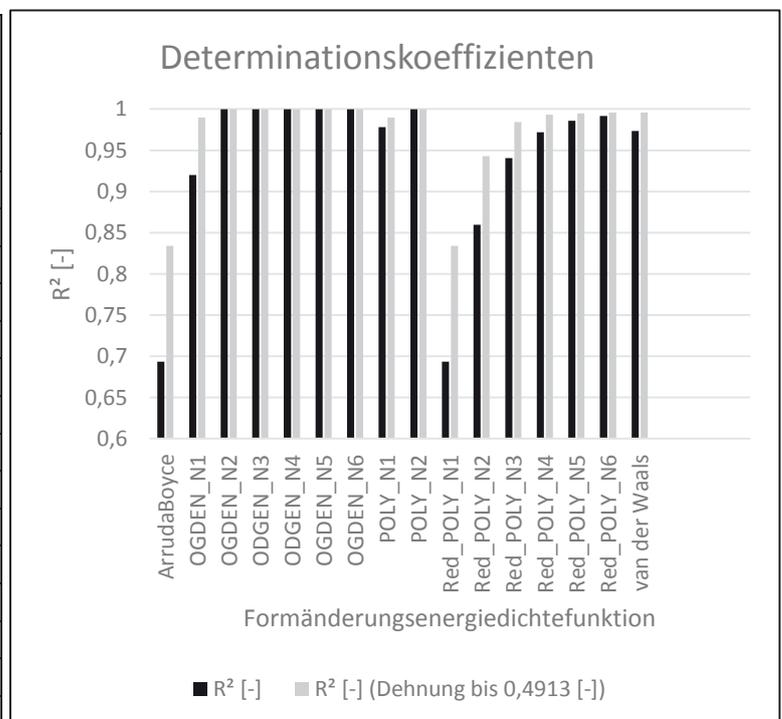
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA80

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (Dehnung bis 0,4913 [-])
Arruda-Boyce	0,693555753	0,834069937
OGDEN_N1	0,919851588	0,989596536
OGDEN_N2	0,999672825	0,999878595
OGDEN_N3	0,999852928	0,999896368
OGDEN_N4	0,999854395	0,999889901
OGDEN_N5	0,999832711	0,999893068
OGDEN_N6	0,999898355	0,99992273
POLY_N1	0,977964696	0,989887067
POLY_N2	0,9999455	0,999946028
Red_POLY_N1	0,693555753	0,834069937
Red_POLY_N2	0,859614402	0,942920229
Red_POLY_N3	0,940593877	0,984340455
Red_POLY_N4	0,971903256	0,993359374
Red_POLY_N5	0,985710877	0,994900531
Red_POLY_N6	0,9916027	0,995850303
van der Waals	0,973466566	0,996089179



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH
Härte: ShA80

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	4,30919227	0,59194031											0
OGDEN_N2	-2,73468939	1,89315775	9,47745839	-3,83259112									0
OGDEN_N3	-2,62722606	3,20118553	0,60016251	4,00430019	8,87112094	-4,6447075							0
OGDEN_N4	-2,63300359	2,00385235	0,0223686	4,00022476	0,9304332	-1,99988149	8,38682816	-4,00095858					0
OGDEN_N5	-2,23054883	2,0009744	-0,22344839	3,99967806	0,01550893	5,99971947	-0,91377998	-2,00009919	10,1394947	-4,00108109			0
OGDEN_N6	-1,74665511	1,99980577	-4,32736647	4,00142458	0,05734029	6,00033891	43,200298	-2,00067052	-75,3337576	-4,00038295	45,3973603	-6,00041439	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,39346264	1,95469851											0
POLY_N2	-3,24967286	6,55396881	0,02194789	-0,0864162	1,1056332								0
Red_POLY_N1	1,23343532												0
Red_POLY_N2	1,61032212		-0,041256										0
Red_POLY_N3	1,94363671		-0,14921923			0,00773318							0
Red_POLY_N4	2,19040949		-0,31067375			0,03673585	-0,00155438						0
Red_POLY_N5	2,37329362		-0,51411565			0,10277037	-0,00982764	0,00035407					0
Red_POLY_N6	2,50925377		-0,74627309			0,22053223	-0,03516634	0,00279678	-8,6998E-05				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	2,46687057	6442,37402											0
van der Waals	4,88094868	6,08477195	0,75570561	0									0

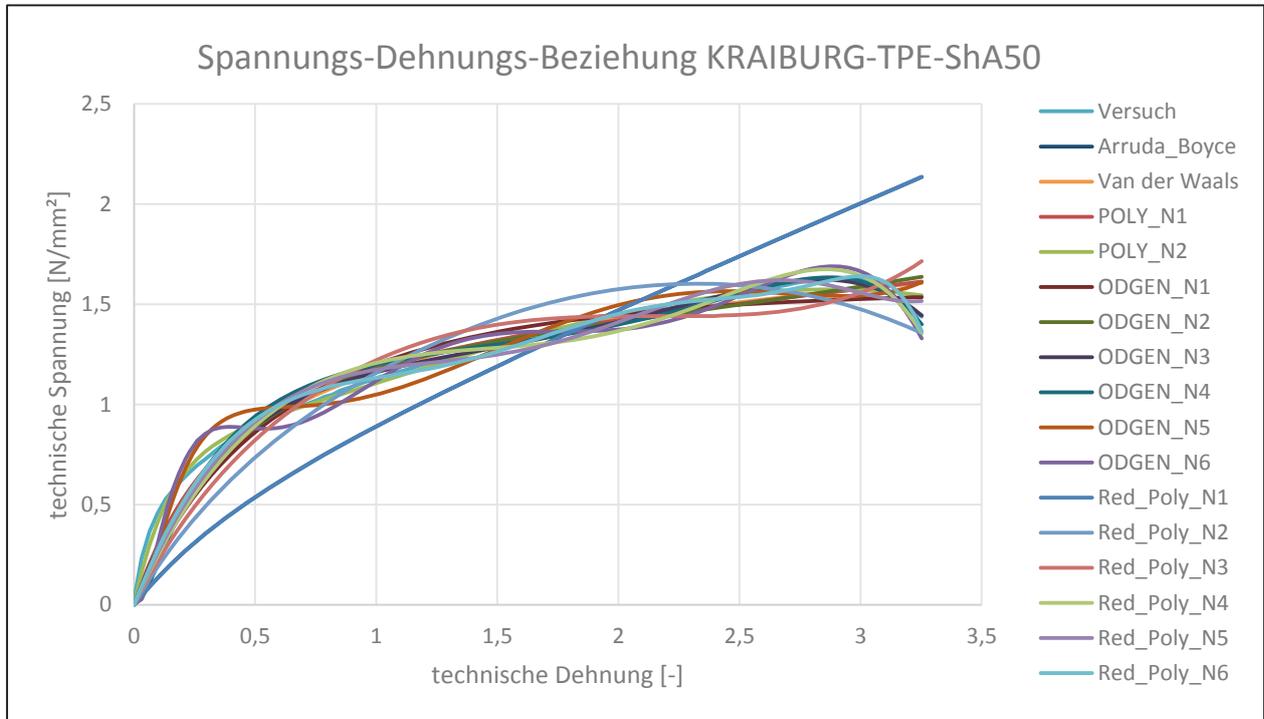
11.3 Erstellte Materialmodelle für TPE aus dem uniaxialen Zugversuch

Material: TPE

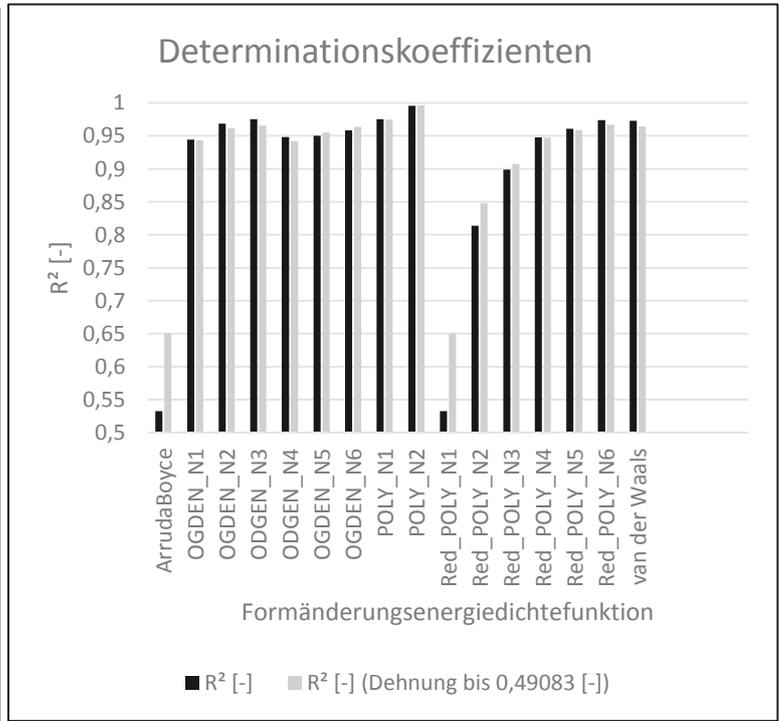
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (Dehnung bis 0,49083 [-])
Arruda-Boyce	0,532666849	0,650798855
OGDEN_N1	0,944569131	0,943663217
OGDEN_N2	0,968409614	0,962036913
OGDEN_N3	0,975456188	0,965740178
OGDEN_N4	0,948129858	0,942136381
OGDEN_N5	0,950219689	0,954922697
OGDEN_N6	0,958424609	0,963772409
POLY_N1	0,975427185	0,975084319
POLY_N2	0,995669084	0,996375399
Red_POLY_N1	0,532666849	0,650798855
Red_POLY_N2	0,81384853	0,847635274
Red_POLY_N3	0,899111796	0,907648823
Red_POLY_N4	0,947885108	0,947098011
Red_POLY_N5	0,960890715	0,958709543
Red_POLY_N6	0,974059162	0,967244477
van der Waals	0,972855659	0,96437814



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: Sha50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

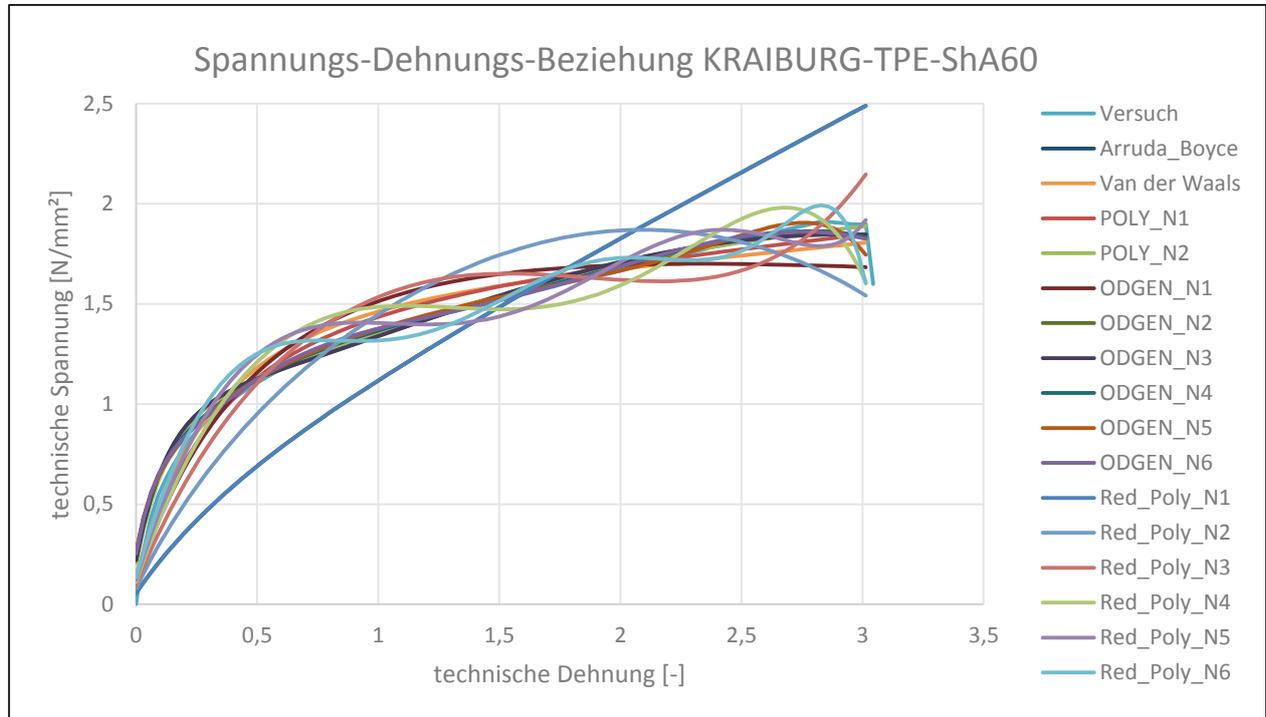
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,96519345	0,84668324											0
OGDEN_N2	0,09533984	2,58641447	0,98792944	-0,36814906									0
OGDEN_N3	0,00431514	8,01168754	-0,0031214	8,24697342	1,09976289	-0,03274084							0
OGDEN_N4	3,10477925	9,57052757	-1,67699639	9,57901408	1,37305012	-1,91906314	-2,85566143	-19,1208164					0
OGDEN_N5	-5,066297	2,35230903	3,89778193	6,68235399	1,25117122	6,67901011	9,90681159	-5,16765167	-10,3506164	-13,3568332			0
OGDEN_N6	-3,01696673	2,120746	14,3150215	4,21820603	-1,11737012	5,34838861	-134,360144	-2,11854454	269,232023	-4,10492292	-145,472942	-6,12213459	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,06349505	0,54731299											0
POLY_N2	-1,48521815	2,45868233	-0,00379431	-0,00427234	0,47743845								0
Red_POLY_N1	0,25440843												0
Red_POLY_N2	0,35585714		-0,00624202										0
Red_POLY_N3	0,40765447		-0,01587582			0,00040025							0
Red_POLY_N4	0,46406019		-0,03706757			0,00262067	-6,9843E-05						0
Red_POLY_N5	0,49116411		-0,05418722			0,00586488	-0,00030906	6,0499E-06					0
Red_POLY_N6	0,51900746		-0,08080905			0,01374248	-0,00130756	6,3005E-05	-1,2034E-06				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,50881684	7719,08375											0
van der Waals	1,14846022	12,7667149	0,32771927	0,58732501									0

Material: TPE

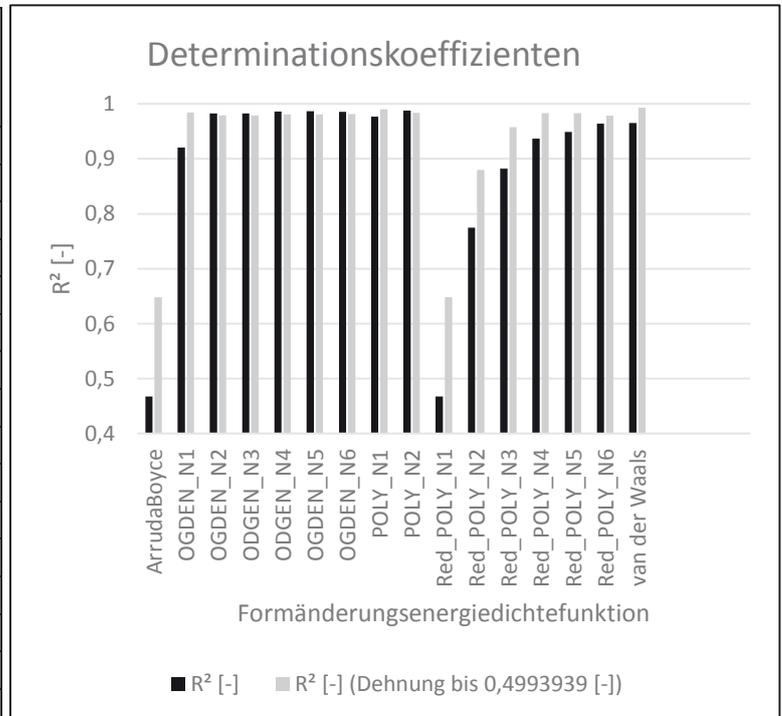
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (Dehnung bis 0,499393 [-])
Arruda-Boyce	0,467704571	0,648050811
OGDEN_N1	0,920798082	0,984355587
OGDEN_N2	0,982707756	0,979229816
OGDEN_N3	0,982743664	0,979244102
OGDEN_N4	0,986147397	0,980828995
OGDEN_N5	0,986694903	0,981160946
OGDEN_N6	0,98556672	0,981272392
POLY_N1	0,976880638	0,990497252
POLY_N2	0,987772988	0,984132869
Red_POLY_N1	0,467704571	0,648050811
Red_POLY_N2	0,774765942	0,879966911
Red_POLY_N3	0,882436305	0,957930925
Red_POLY_N4	0,936770234	0,983242494
Red_POLY_N5	0,94886798	0,983463425
Red_POLY_N6	0,963933866	0,978585594
van der Waals	0,965170597	0,992897686



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG
Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

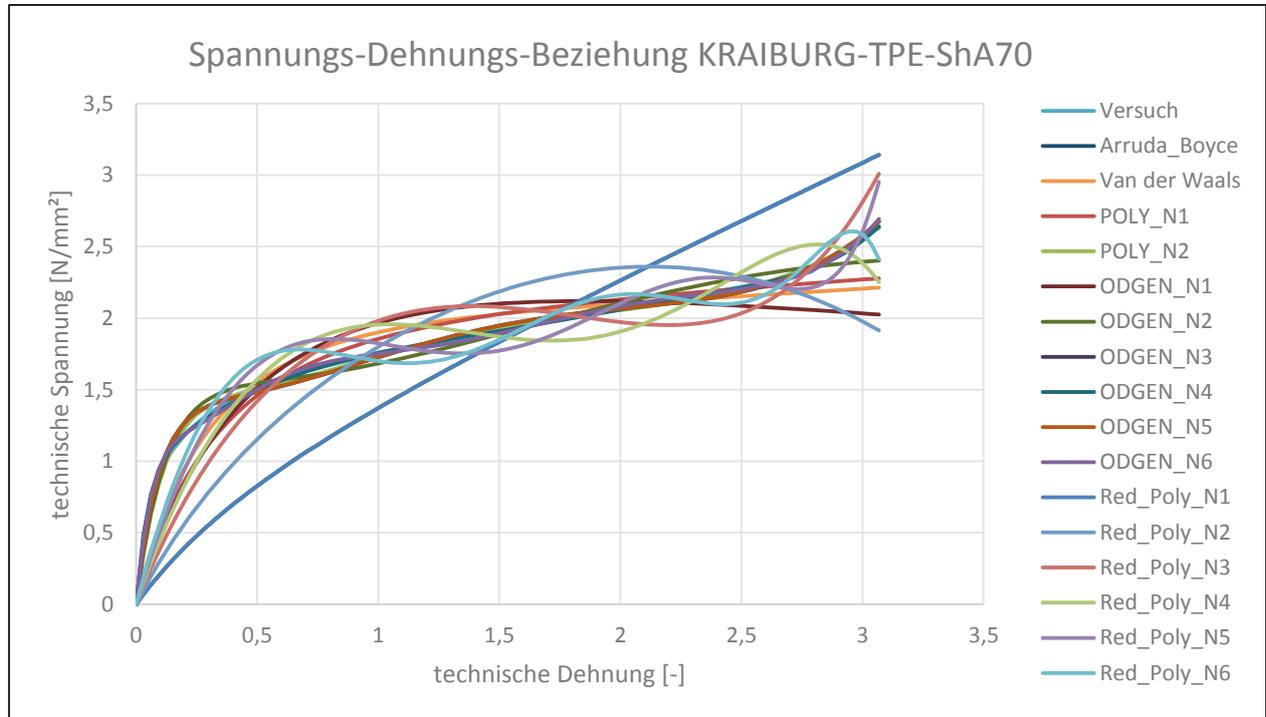
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,31082459	0,48917735											0
OGDEN_N2	-1,52872107	2,93263335	4,22893038	-5,45533288									0
OGDEN_N3	-0,43912024	2,92725034	-1,08860403	2,93336538	4,22719727	-5,45312619							0
OGDEN_N4	-2,81470855	6,47677584	0,67565842	6,47314175	1,17647715	0,12554666	4,29452859	-12,9503121					0
OGDEN_N5	-3,52847483	8,5559494	1,99720125	8,83273769	-0,65711015	9,01835423	1,37872575	-1,32903856	4,40554095	-16,8558643			0
OGDEN_N6	-0,27945028	2,12326964	-6,2893091	3,11109409	0,00542052	5,35572638	44,5485715	-1,35084533	-84,6966925	-3,16491722	50,0140636	-4,97246872	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,06149636	0,68944617											0
POLY_N2	-2,10695244	3,36095411	0,00819227	-0,07393671	0,75391992								0
Red_POLY_N1	0,31243894												0
Red_POLY_N2	0,44239691		-0,00898746										0
Red_POLY_N3	0,53468694		-0,02784456			0,00087914							0
Red_POLY_N4	0,62602525		-0,06516608			0,0052303	-0,00015326						0
Red_POLY_N5	0,68516219		-0,10561864			0,01372546	-0,00085216	1,9777E-05					0
Red_POLY_N6	0,75434991		-0,17707131			0,03710231	-0,00415236	0,00023011	-4,9738E-06				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,62487785	7509,95128											0
van der Waals	1,64642972	0,26018873	0,87396893	0									0

Material: TPE

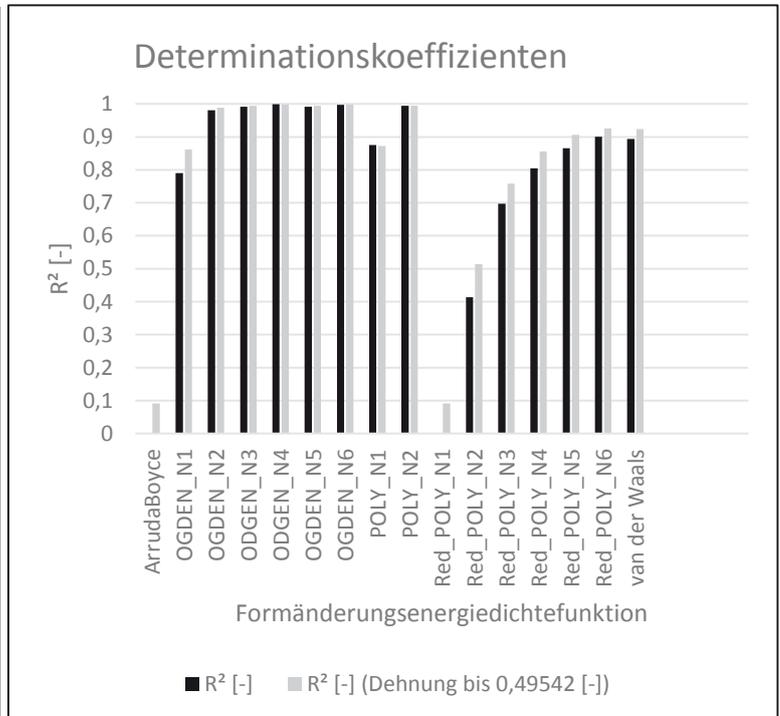
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R^2 [-]	R^2 [-] (Dehnung bis 0,49542 [-])
Arruda-Boyce	0	0,091004585
OGDEN_N1	0,790604033	0,862077653
OGDEN_N2	0,981356109	0,988575372
ODGEN_N3	0,991538923	0,994867643
ODGEN_N4	0,998925406	0,998732233
OGDEN_N5	0,991721532	0,99484722
OGDEN_N6	0,997348597	0,998125444
POLY_N1	0,875186453	0,872596773
POLY_N2	0,99413936	0,994511381
Red_POLY_N1	0	0,091004585
Red_POLY_N2	0,413474763	0,514411128
Red_POLY_N3	0,69765506	0,757970241
Red_POLY_N4	0,804771709	0,856475143
Red_POLY_N5	0,865836994	0,906117176
Red_POLY_N6	0,900410523	0,925779195
van der Waals	0,894053904	0,923580955



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG
 Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,832804	0,17176779											0
OGDEN_N2	-3,17222073	2,93627183	7,64426959	-5,65016505									0
OGDEN_N3	-4,93718737	4,27398679	1,24055224	4,75966946	8,88564341	-7,74553653							0
OGDEN_N4	-6,46160847	8,88351184	1,18882871	8,93230812	1,77135761	-0,66733618	10,5520173	-17,7432107					0
OGDEN_N5	-4,21140892	4,32585822	-2,04563393	4,32203032	2,5709065	4,6361335	-4,84983679	-7,4318381	13,7184681	-7,62814504			0
OGDEN_N6	-0,74971893	2,01069215	-13,0519457	3,83618873	0,18869674	5,77395236	111,799285	-1,91036126	-220,321129	-3,81718111	128,58792	-5,75158983	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,04624015	0,96764389											0
POLY_N2	-5,51105784	7,7238022	0,07817056	-0,49349338	2,35381065								0
Red_POLY_N1	0,39181162												0
Red_POLY_N2	0,55969489		-0,01142893										0
Red_POLY_N3	0,72105501		-0,04309958			0,00146229							0
Red_POLY_N4	0,84251027		-0,08985824			0,00679124	-0,00018561						0
Red_POLY_N5	0,96660525		-0,16879192			0,02286575	-0,00148437	3,6298E-05					0
Red_POLY_N6	1,07313866		-0,27015436			0,05485298	-0,00590071	0,00031329	-6,4672E-06				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,78362321	7413,29441											0
van der Waals	2,30982794	9,68312188	0,36282851	0,88222159									0

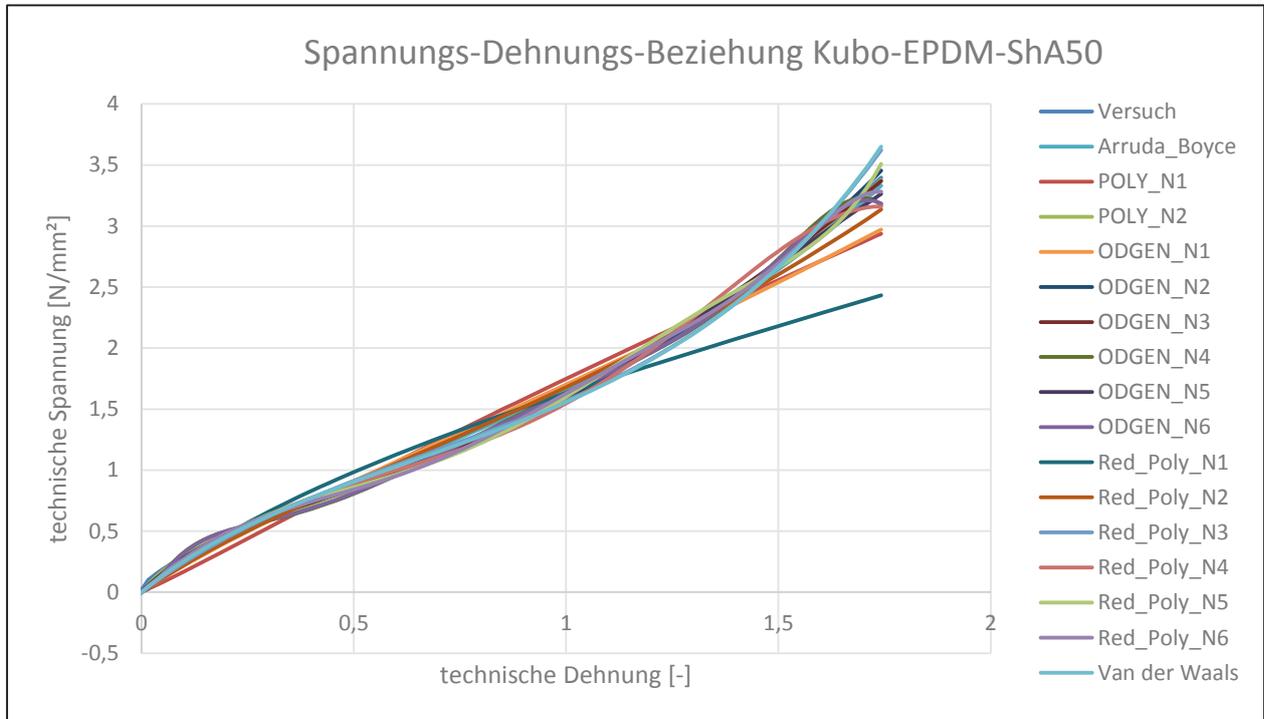
11.4 Erstellte Materialmodelle für EPDM aus dem uniaxialen Zugversuch

Material: EPDM

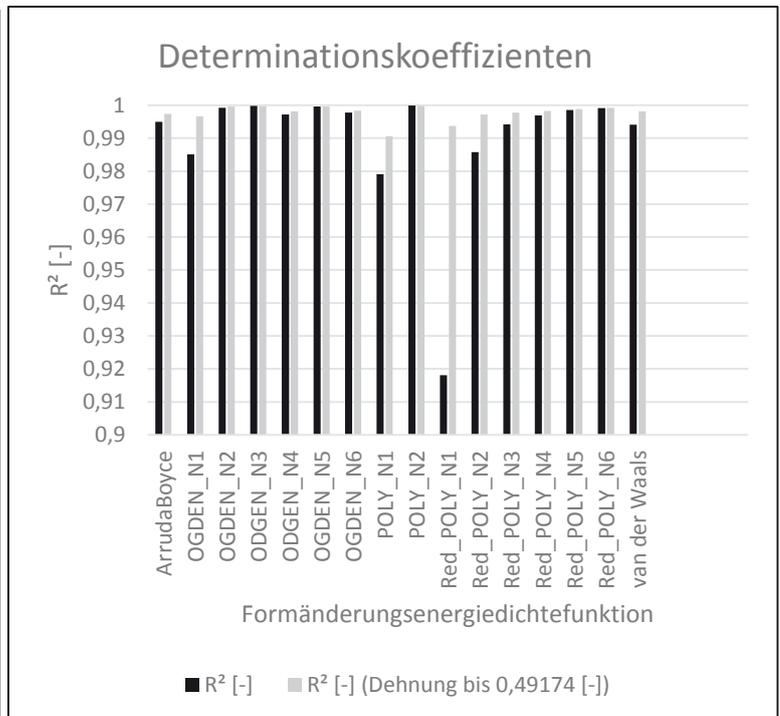
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (Dehnung bis 0,49174 [-])
Arruda-Boyce	0,995004121	0,997405361
ODGEN_N1	0,985082226	0,996635575
ODGEN_N2	0,999189019	0,99959198
ODGEN_N3	0,999848925	0,999708908
ODGEN_N4	0,997147463	0,998136207
ODGEN_N5	0,999618066	0,999602753
ODGEN_N6	0,997775954	0,998336604
POLY_N1	0,979134029	0,990562527
POLY_N2	0,999865496	0,999835587
Red_POLY_N1	0,918080207	0,993703608
Red_POLY_N2	0,985802154	0,997198707
Red_POLY_N3	0,994171367	0,997751283
Red_POLY_N4	0,996943106	0,998235867
Red_POLY_N5	0,998570168	0,99887366
Red_POLY_N6	0,999091044	0,999233509
van der Waals	0,994067808	0,998201541



Mate Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

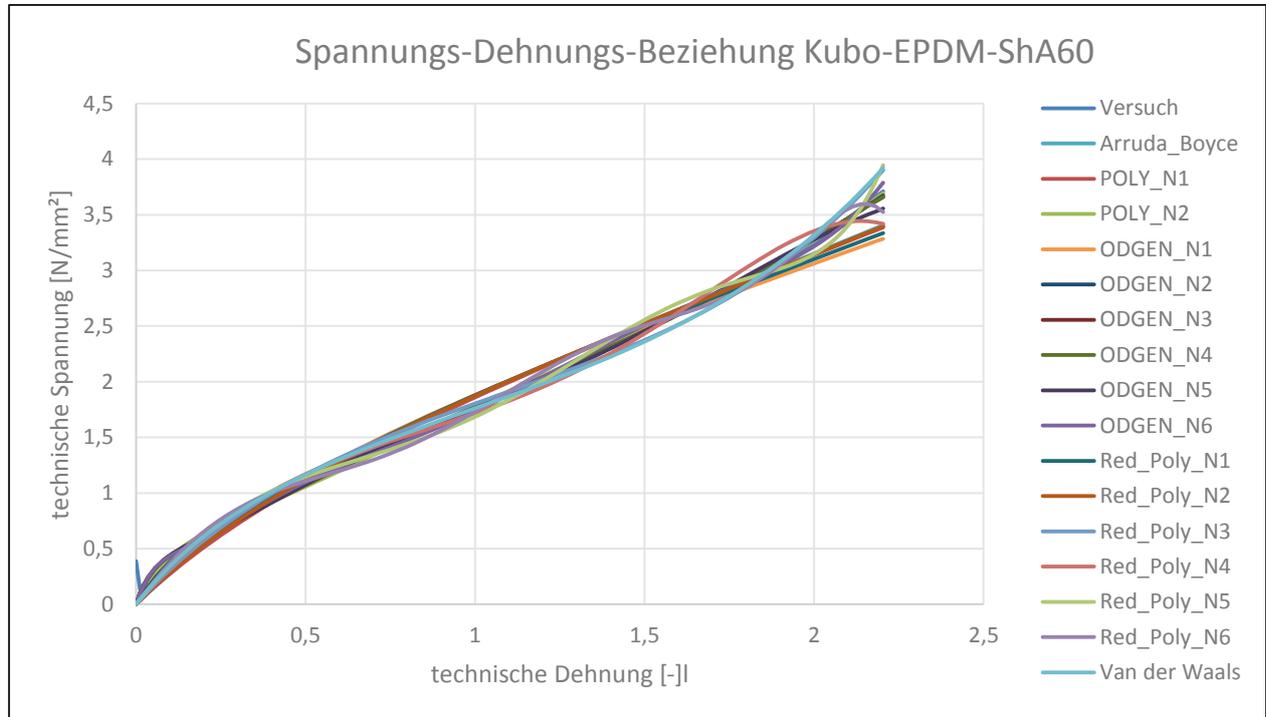
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,77858379	2,61172457											0
OGDEN_N2	0,0329357	5,72404069	1,12713944	-5,08932591									0
OGDEN_N3	-12,9303984	0,90695076	5,58520837	1,9458665	8,51769219	-0,40108612							0
OGDEN_N4	-5,85545473	7,98541417	6,42099544	12,4979987	12,2971176	-15,7520248	-12,8089456	-24,9999739					0
OGDEN_N5	-4,3312611	1,17400058	2,04877352	3,26260197	-0,07736375	5,45380495	6,48447155	-2,66732719	-3,015151				0
OGDEN_N6	-27,7295302	9,13181692	31,8875828	10,0406447	-3,69081716	10,1562573	-67,1544452	-17,6688546	113,121985	-17,7727426	-46,2892163	-20,1829718	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,73337991	-0,4673862											0
POLY_N2	-1,21989298	1,91733749	0,06107937	-0,18323211	0,71075114								0
Red_POLY_N1	0,46603742												0
Red_POLY_N2	0,40548348		0,01859875										0
Red_POLY_N3	0,44156521		-0,01207301			0,00459195							0
Red_POLY_N4	0,47360382		-0,06423948			0,02430213	-0,00207853						0
Red_POLY_N5	0,49746809		-0,12732084			0,06705087	-0,01264792	0,00086579					0
Red_POLY_N6	0,51343052		-0,18949847			0,13222394	-0,04029433	0,00597767	-0,00034314				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,69930767	0,82031292											0
van der Waals	0,96414354	4,15023431	0,67697406	0									0

Material: EPDM

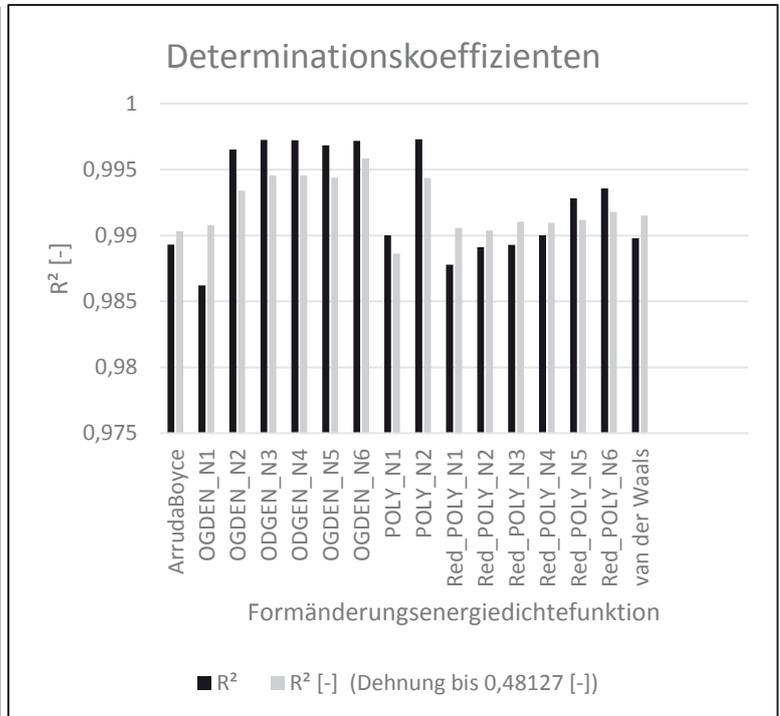
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (Dehnung bis 0,48127 [-])
Arruda-Boyce	0,989302708	0,990335145
OGDEN_N1	0,9862222	0,990786139
OGDEN_N2	0,996528798	0,993410548
OGDEN_N3	0,997239836	0,994556284
OGDEN_N4	0,997229044	0,994554494
OGDEN_N5	0,996828555	0,994392519
OGDEN_N6	0,997186032	0,995849119
POLY_N1	0,990007936	0,988626712
POLY_N2	0,997289949	0,994373038
Red_POLY_N1	0,987796102	0,990569388
Red_POLY_N2	0,989116782	0,990367855
Red_POLY_N3	0,989298587	0,99105909
Red_POLY_N4	0,990018901	0,990961946
Red_POLY_N5	0,992813599	0,991179531
Red_POLY_N6	0,993569858	0,99177021
van der Waals	0,989798449	0,991504279



Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

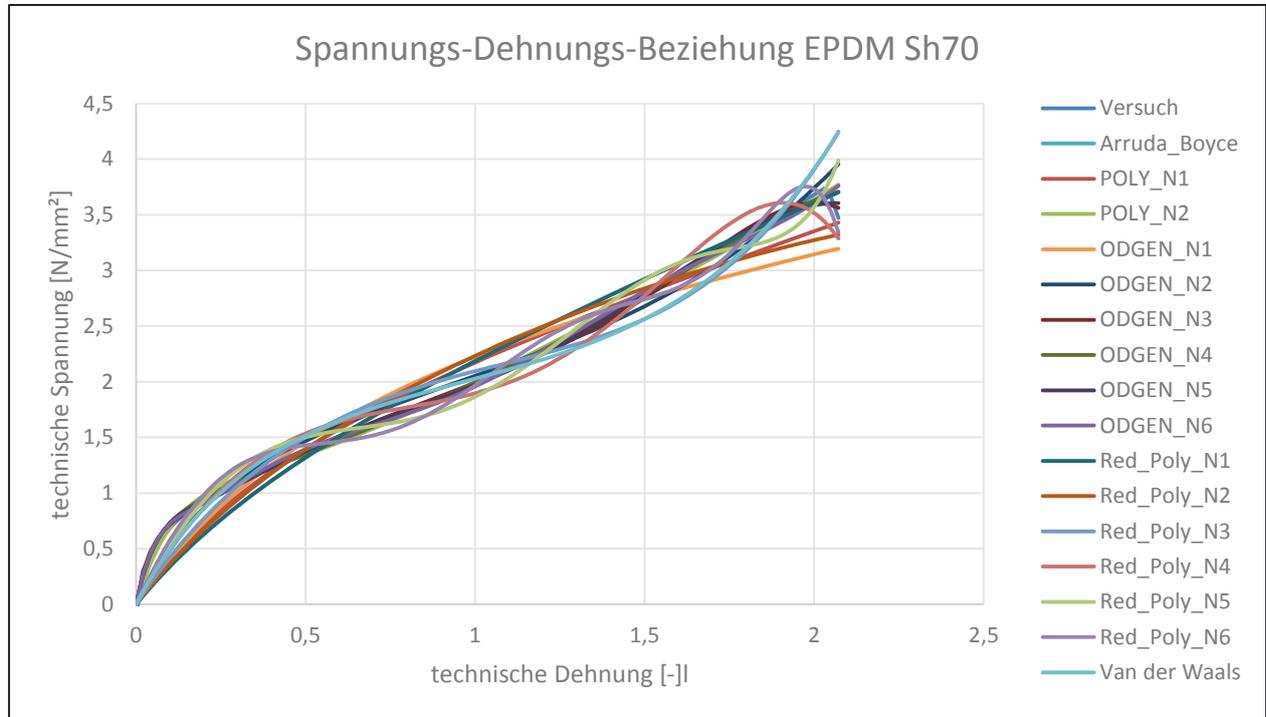
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,09219646	1,95463566											0
OGDEN_N2	0,00064521	7,34572863	1,60194816	-4,78695877									0
ODGEN_N3	0,98520634	2,06600337	-2,4401397	12,4993366	4,88035295	-24,9986487							0
ODGEN_N4	0,99669494	2,06826064	-2,45139063	12,4983194	-0,01737961	-5,7626023	4,90285807	-24,9966133					0
OGDEN_N5	9,63924286	0,80622083	-4,71277181	4,62108747	-0,80096463	5,15680837	-14,6430251	-4,38866067	13,4158345	-9,20592976			0
OGDEN_N6	0,67411622	2,03017231	-8,03347119	5,26085612	1,08993377	6,34696411	64,9193347	-2,54201617	-128,477198	-5,01793416	73,0129767	-7,55893321	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,56854608	-0,07507519											0
POLY_N2	-2,54177234	3,58378359	0,12928391	-0,64927126	1,76076277								0
Red_POLY_N1	0,53686588												0
Red_POLY_N2	0,5311394		0,00098518										0
Red_POLY_N3	0,57281729		-0,02029395			0,00200973							0
Red_POLY_N4	0,61111684		-0,05846097			0,01108861	-0,00061551						0
Red_POLY_N5	0,65363318		-0,12761731			0,04071782	-0,00532076	0,00025005					0
Red_POLY_N6	0,68931447		-0,21323125			0,09768012	-0,02085695	0,00211269	-8,1542E-05				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,04765144	7,04391598											0
van der Waals	1,29933983	5,52554945	0,59438534	0									0

Material: EPDM

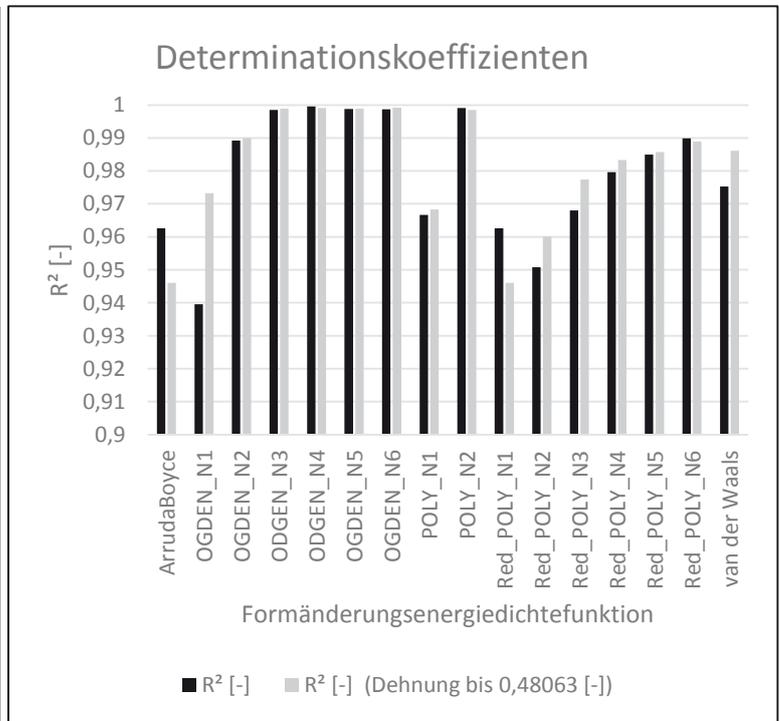
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (Dehnung bis 0,48063 [-])
Arruda-Boyce	0,96257638	0,946081358
OGDEN_N1	0,939557881	0,973269807
OGDEN_N2	0,989240661	0,990009446
OGDEN_N3	0,998531663	0,998864581
OGDEN_N4	0,9995607	0,999066087
OGDEN_N5	0,998795113	0,99886219
OGDEN_N6	0,99870179	0,999229129
POLY_N1	0,966659388	0,968336366
POLY_N2	0,999043774	0,998515107
Red_POLY_N1	0,96257638	0,946081358
Red_POLY_N2	0,950814757	0,960035584
Red_POLY_N3	0,967979253	0,977381273
Red_POLY_N4	0,979652835	0,983291742
Red_POLY_N5	0,984939219	0,985734689
Red_POLY_N6	0,989910371	0,988929136
van der Waals	0,975255693	0,986085341



Material: EPDM Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,50117767	1,48311411											0
OGDEN_N2	0,0044502	7,19056575	2,13148848	-3,2991812									0
ODGEN_N3	1,42931176	1,06252787	-4,43604438	11,2593331	8,87419678	-22,5182348							0
ODGEN_N4	-5,5088236	9,39973108	2,33625068	9,39252031	1,84986761	-4,35563596	6,34985366	-18,8086761					0
OGDEN_N5	10,9529623	0,84756971	-5,72292129	5,34124844	-2,19524151	5,35843499	-16,8845378	-5,04652055	18,9013242	-10,44106			0
OGDEN_N6	-1,58180783	1,93088367	-11,1222196	5,05300517	1,09647639	6,30326121	105,86837	-2,50793235	-205,199021	-4,81377092	116,20265	-7,1836654	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,49913341	0,24340291											0
POLY_N2	-4,36895083	6,09838731	0,07770477	-0,43295325	2,04353779								0
Red_POLY_N1	0,62410774												0
Red_POLY_N2	0,66857315		-0,00766571			0,00527157							0
Red_POLY_N3	0,77650907		-0,06028617			0,03279141	-0,00201378						0
Red_POLY_N4	0,89394892		-0,17029586			0,09577299	-0,01277776	0,0006228					0
Red_POLY_N5	0,98615879		-0,31090795			0,24171531	-0,05549325	0,0061895	-0,00026665				0
Red_POLY_N6	1,07953742		-0,52156032										0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,24821547	3271,91031											0
van der Waals	1,92154802	5,01894652	0,82629511	0									0

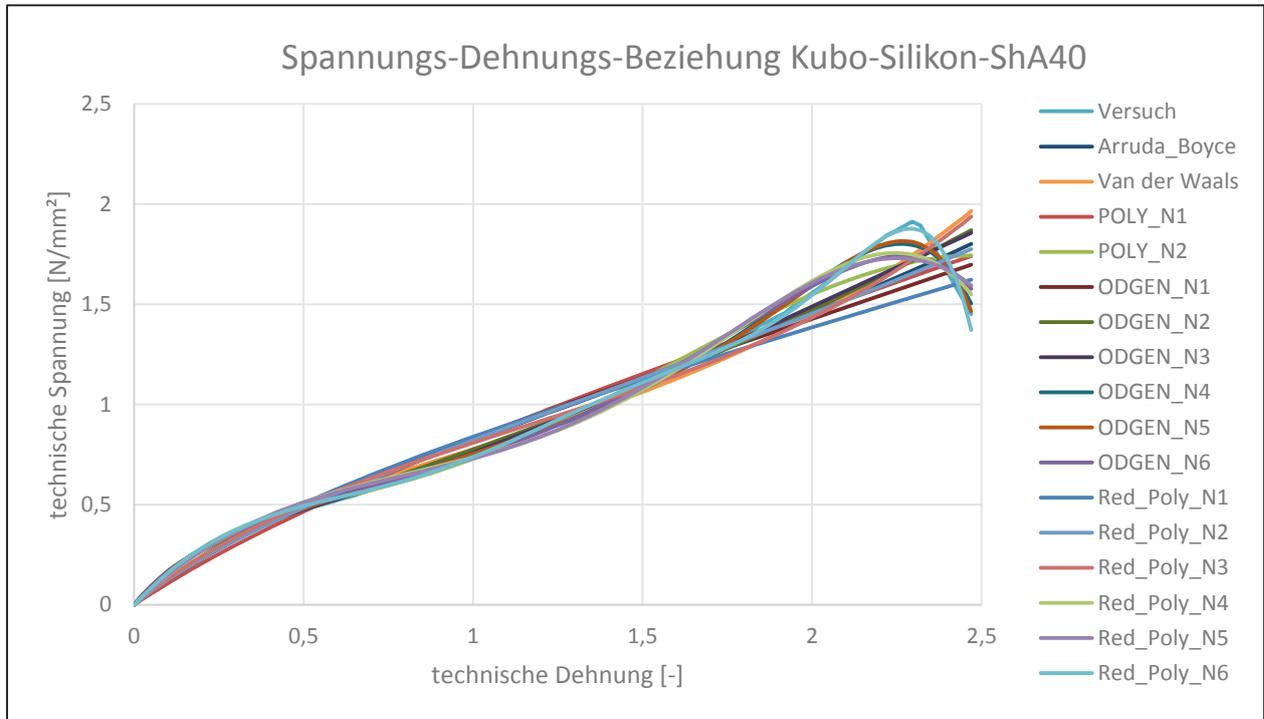
11.5 Erstellte Materialmodelle für Silikon aus dem uniaxialen Zugversuch

Material: Silikon

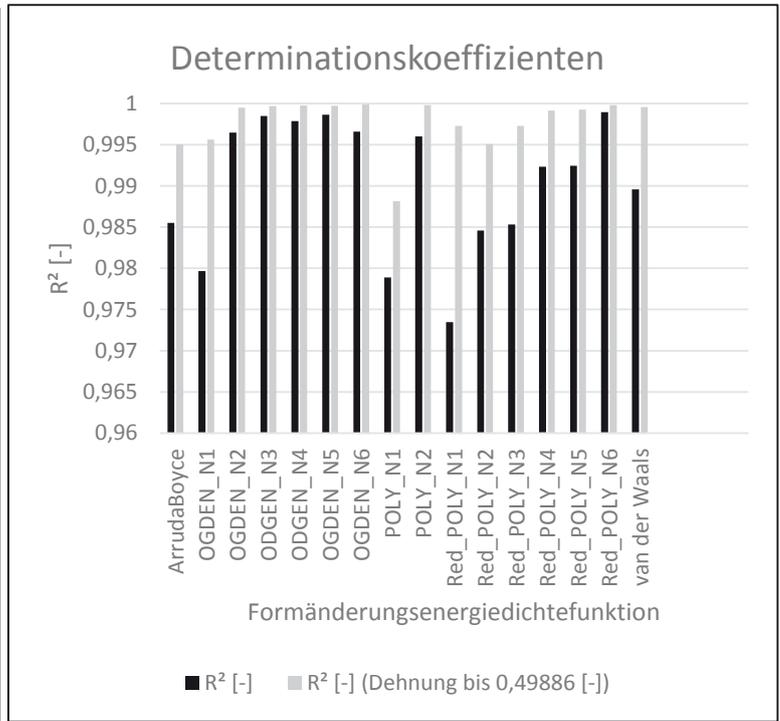
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA40

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (Dehnung bis 0,49886 [-])
Arruda-Boyce	0,985513835	0,995052761
OGDEN_N1	0,979663399	0,9956342
OGDEN_N2	0,99646304	0,999473879
ODGEN_N3	0,998479028	0,99966993
ODGEN_N4	0,997865571	0,999759458
OGDEN_N5	0,998644041	0,999737467
OGDEN_N6	0,996604516	0,999883406
POLY_N1	0,97888363	0,98816215
POLY_N2	0,996022025	0,999809502
Red_POLY_N1	0,973486645	0,997295767
Red_POLY_N2	0,984575718	0,995090032
Red_POLY_N3	0,985301235	0,997271691
Red_POLY_N4	0,992314092	0,99915477
Red_POLY_N5	0,992455513	0,999241411
Red_POLY_N6	0,998929851	0,999781466
van der Waals	0,989566146	0,99955458



Material: Siikon Hersteller: Kubo Tech AG
 Härte: ShA40
 Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch
 Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

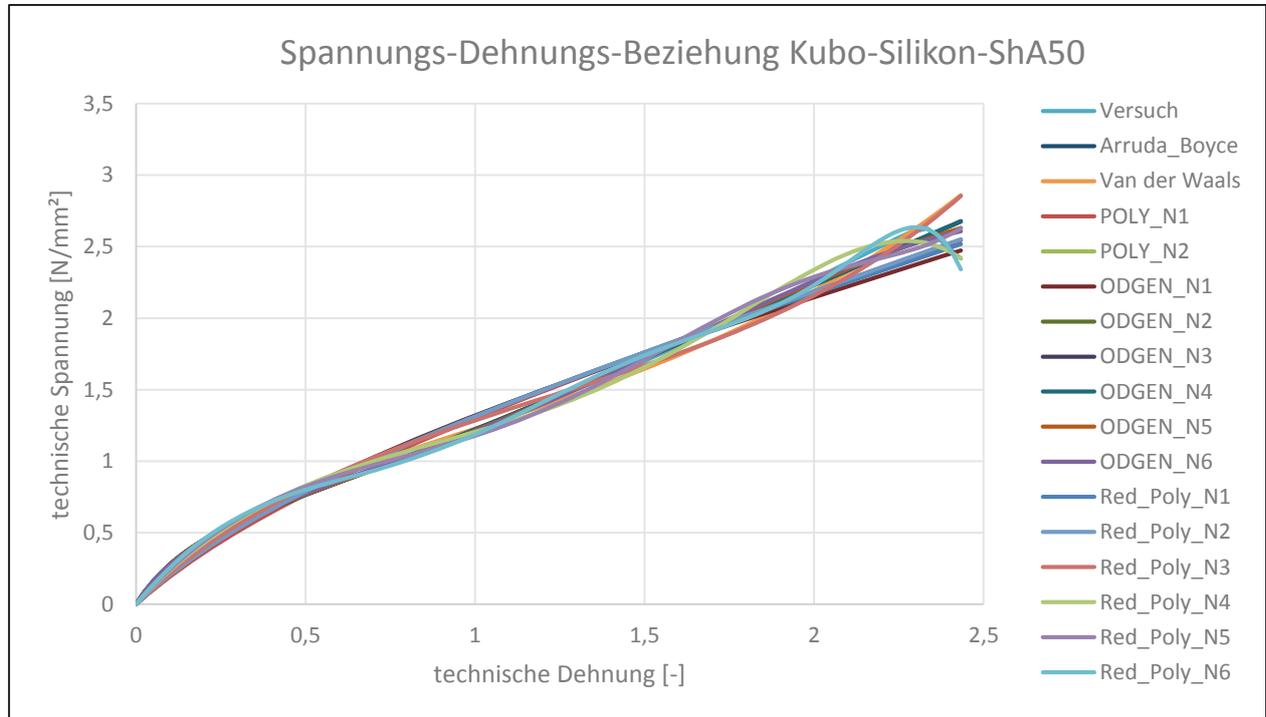
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,45678503	2,11675677											0
OGDEN_N2	0,00366159	4,81165336	0,67883019	-4,91848144									0
ODGEN_N3	-19,4449856	0,3758416	8,86720404	0,98052113	11,283473	-0,37160804							0
ODGEN_N4	-4,50535227	10,0764958	4,50464544	10,0772381	0,70100194	-4,92826241	-0,00138697	-22,7772557					0
OGDEN_N5	0,07737948	2,47891297	7,698E-06	13,6790851	-7,7264E-07	15,6426042	-1,03151795	-1,43829204	1,66267379	-3,06092097			0
OGDEN_N6	0,449884	2,64448597	-1,12729584	2,57298906	-6,2865E-08	15,9055747	8,25022861	-1,81397213	-12,8233802	-3,27111596	5,96205891	-5,00242299	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,28491582	-0,09642722											0
POLY_N2	0,69052809	-0,42248846	-0,0992136	0,52021704	-0,83564435								0
Red_POLY_N1	0,23965548												0
Red_POLY_N2	0,22765201		0,00180045			0,0004067							0
Red_POLY_N3	0,2400386		-0,00346692			0,00561224	-0,0002881						0
Red_POLY_N4	0,27174905		-0,02990759			0,00742294	-0,00052627	1,0404E-05					0
Red_POLY_N5	0,27539463		-0,03495898			0,02957182	-0,00555743	0,0005095	-1,7999E-05				0
Red_POLY_N6	0,29423938		-0,07447593										0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,43734869	3,95813148											0
van der Waals	0,59546432	4,14303886	0,32494516	0,74929365									0

Material: Silikon

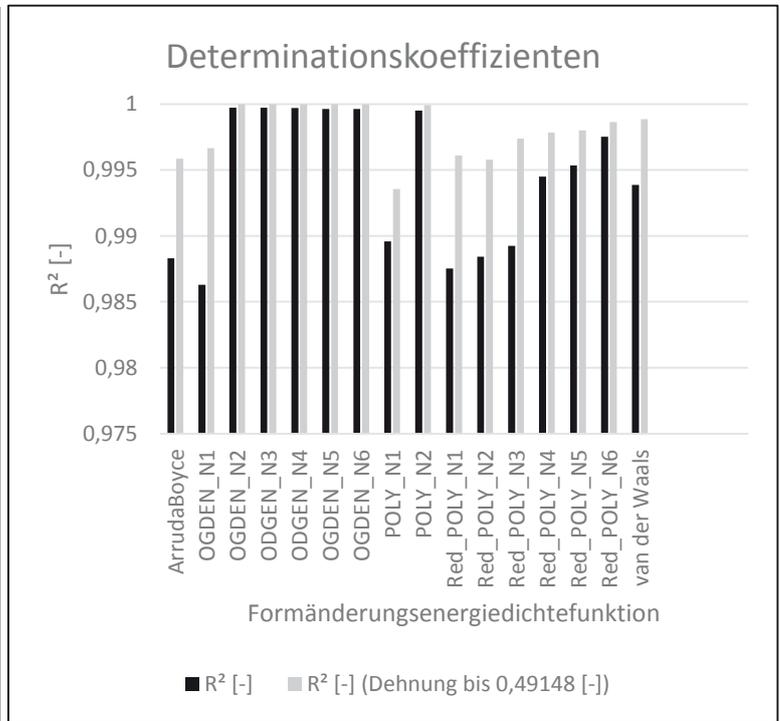
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (bis Dehnung 0,49148 [-])
Arruda-Boyce	0,988302402	0,995843816
OGDEN_N1	0,986287806	0,996645412
OGDEN_N2	0,999725727	0,99998929
ODGEN_N3	0,999717989	0,999992444
ODGEN_N4	0,999704408	0,999992449
OGDEN_N5	0,999640564	0,999980993
OGDEN_N6	0,999627196	0,999967138
POLY_N1	0,989596395	0,993559461
POLY_N2	0,999508133	0,999918043
Red_POLY_N1	0,987534866	0,996094133
Red_POLY_N2	0,988424838	0,995790131
Red_POLY_N3	0,989237201	0,997372465
Red_POLY_N4	0,994505806	0,997845752
Red_POLY_N5	0,995345508	0,998018375
Red_POLY_N6	0,99753303	0,998634488
van der Waals	0,993863222	0,998855538



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

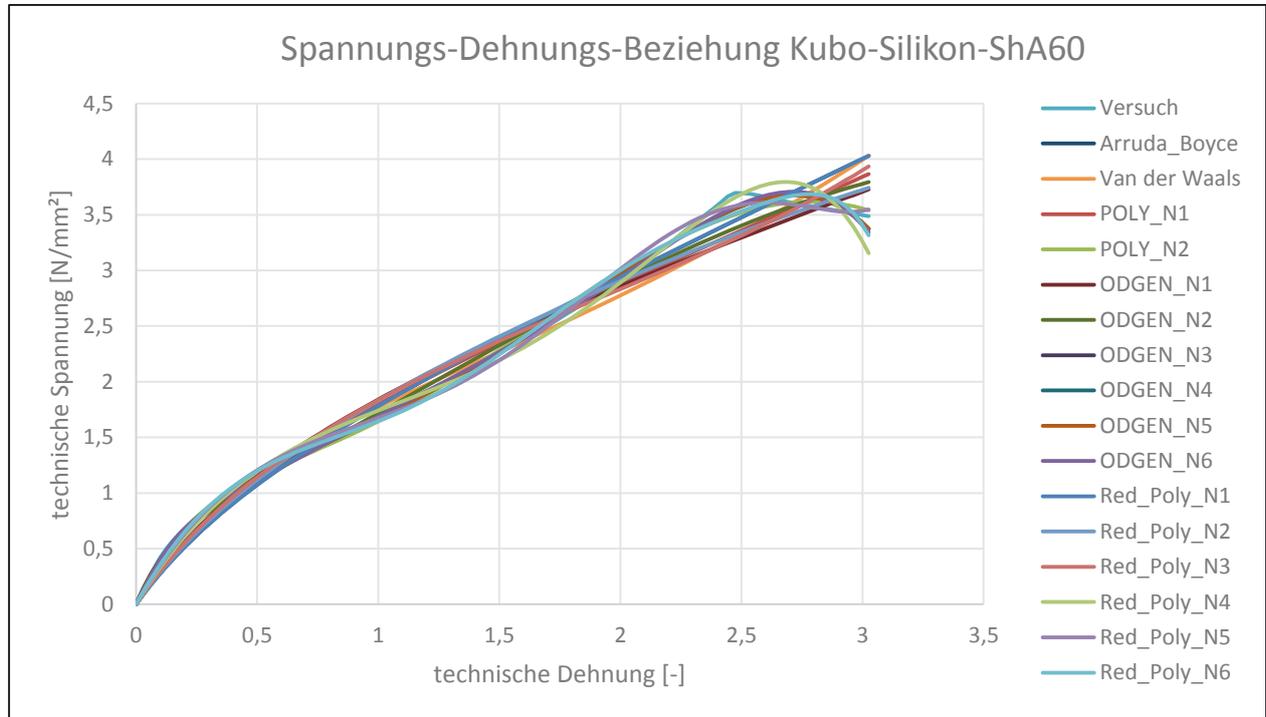
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,76671453	1,95191827											0
OGDEN_N2	-0,21608888	3,55337211	1,47009526	-5,89443352									0
OGDEN_N3	-1,60735097	0,23228486	0,64254427	1,27653791	2,1877402	-3,61150172							0
OGDEN_N4	-0,14646565	1,99930476	-0,00507147	4,00025226	-1,19594821	-2,00023285	2,58512022	-4,00127108					0
OGDEN_N5	-0,36835573	2,00116868	0,1146202	4,00139375	-0,00795897	6,00137517	-0,38349228	-2,00021687	1,85565593	-4,00088963			0
OGDEN_N6	-0,34298829	2,00040744	-0,61907521	3,99693622	-0,00280046	6,00023038	8,2298645	-1,99906576	-14,526225	-3,99971928	8,54472527	-6,00021977	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,39288113	-0,04328948											0
POLY_N2	-0,22672535	0,7937318	-0,0419508	0,21408591	-0,11111082								0
Red_POLY_N1	0,37584381												0
Red_POLY_N2	0,37283868		0,00043503										0
Red_POLY_N3	0,3970801		-0,00992101		0,00081621								0
Red_POLY_N4	0,43192279		-0,03929184		0,00668304	-0,00033268							0
Red_POLY_N5	0,44924584		-0,06344792		0,0154194	-0,00149936	5,2023E-05						0
Red_POLY_N6	0,47395992		-0,11506537		0,0445507	-0,00820297	0,00072852	-2,4894E-05					0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,7424466	10,2979175											0
van der Waals	0,99684682	4,01192638	0,34719671	0,81940114									0

Material: Silikon

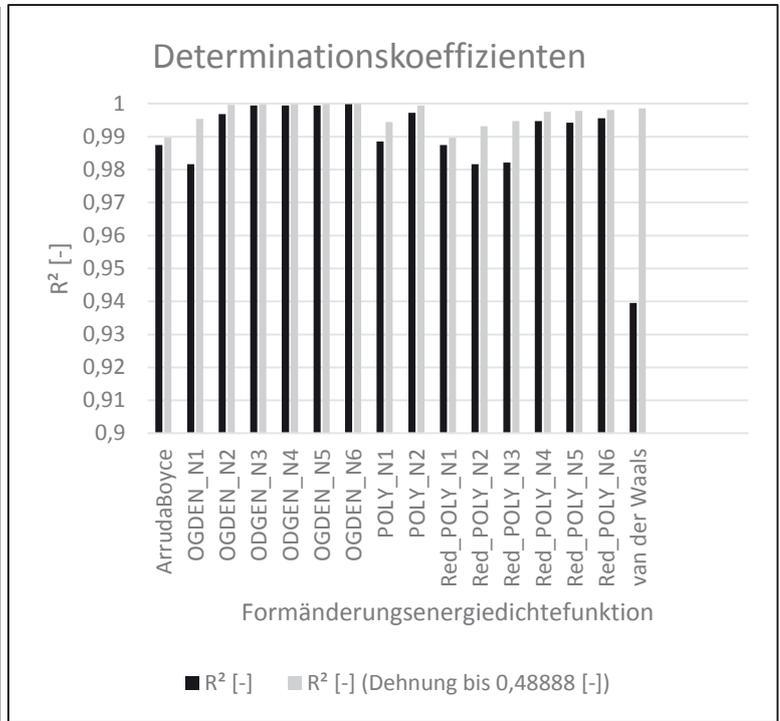
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]	R ² [-] (Dehnung bis 0,48888 [-])
Arruda-Boyce	0,987423508	0,989672189
OGDEN_N1	0,981624317	0,99541472
OGDEN_N2	0,996809697	0,999679119
OGDEN_N3	0,999442721	0,999754938
OGDEN_N4	0,999421435	0,999810618
OGDEN_N5	0,99943607	0,999815012
OGDEN_N6	0,999842903	0,999927104
POLY_N1	0,988539337	0,994444933
POLY_N2	0,997251891	0,999435765
Red_POLY_N1	0,987423508	0,989672189
Red_POLY_N2	0,981676272	0,993119813
Red_POLY_N3	0,98208347	0,994695087
Red_POLY_N4	0,994719796	0,997512821
Red_POLY_N5	0,994196573	0,997848327
Red_POLY_N6	0,995600292	0,998083485
van der Waals	0,939497808	0,998558491



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,12295192	1,80448991											0
OGDEN_N2	-0,29208832	3,6494112	2,10382296	-5,79464393									0
OGDEN_N3	0,19919044	7,48217476	-0,191056	7,51449947	1,63660701	-3,7358976							0
OGDEN_N4	-0,1275732	1,47651965	-1,3128E-05	10,857897	1,64131052	-3,27116307	0,15974571	-8,50321768					0
OGDEN_N5	-0,03822967	2,56896224	0,01067206	6,51104369	-0,00073428	8,58483617	-0,42528906	-2,12579257	2,12757652	-3,61824926			0
OGDEN_N6	0,27994491	2,125125	1,23443755	5,10418681	-0,06658514	6,61609647	-7,36666184	-1,15198843	15,5658389	-4,68655469	-8,12476929	-7,98342067	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,46296876	0,09922134											0
POLY_N2	0,62744456	0,11114231	-0,10387778	0,56463308	-0,85460841								0
Red_POLY_N1	0,50843865												0
Red_POLY_N2	0,53205232		-0,00219										0
Red_POLY_N3	0,54801656		-0,00666752		0,00023321								0
Red_POLY_N4	0,61030759		-0,04154955		0,00492677	-0,00017971							0
Red_POLY_N5	0,64199691		-0,0709162		0,01206655	-0,00082309	1,9417E-05						0
Red_POLY_N6	0,66154968		-0,09809762		0,02238821	-0,00242725	0,00012894	-2,731E-06					0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,01687726	4838,67943											0
van der Waals	1,3674729	6,7397371	0,14227234	0,66328944									0

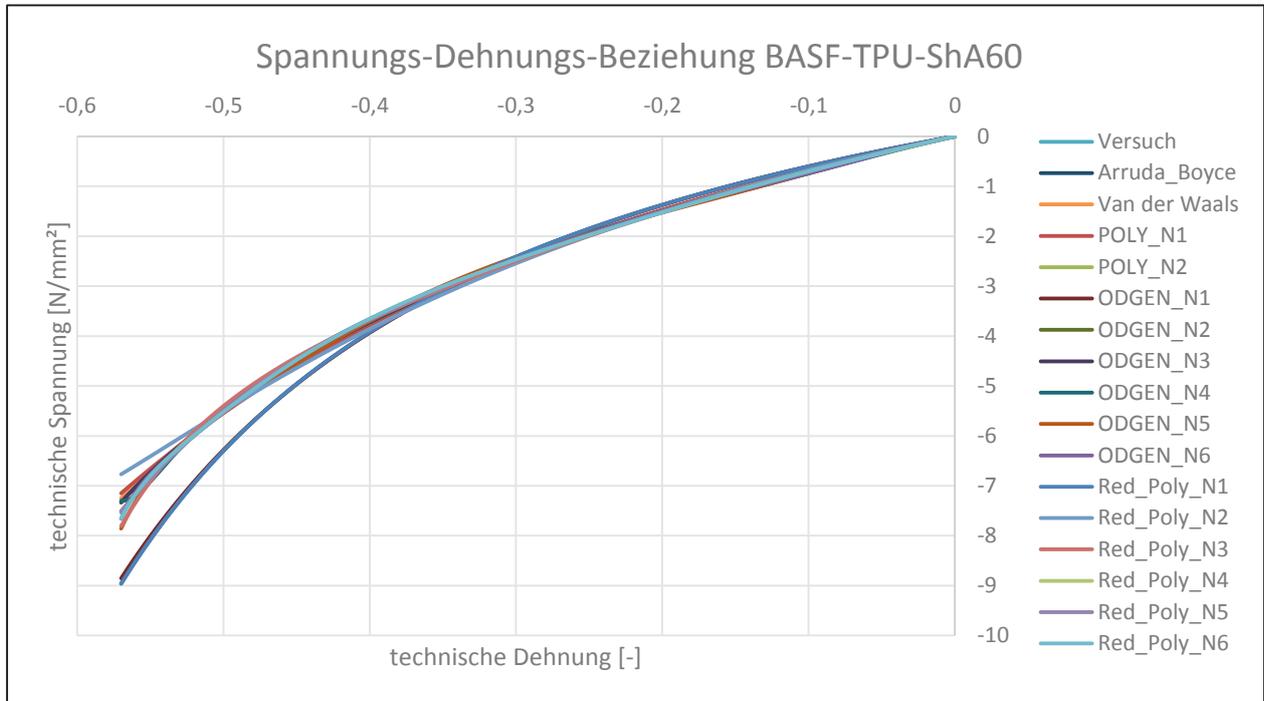
11.6 Erstellte Materialmodelle für TPU aus dem uniaxialen Druckversuch

Material: TPU

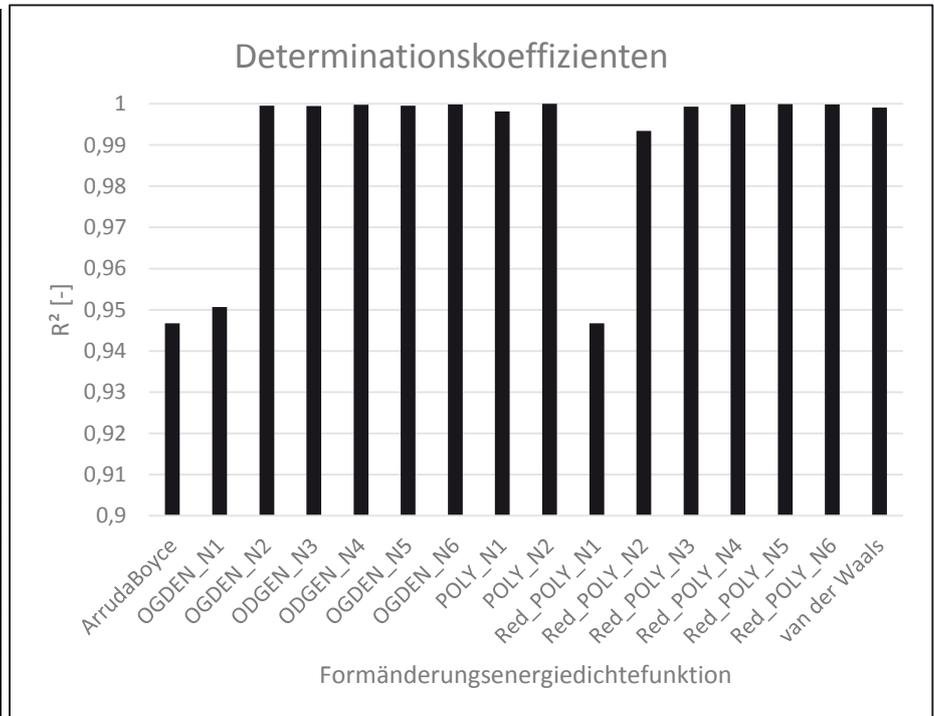
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,946697805
OGDEN_N1	0,950700794
OGDEN_N2	0,9995177
OGDEN_N3	0,99948069
OGDEN_N4	0,999768127
OGDEN_N5	0,999562734
OGDEN_N6	0,999886461
POLY_N1	0,998133223
POLY_N2	0,999985172
Red_POLY_N1	0,946697793
Red_POLY_N2	0,99345526
Red_POLY_N3	0,999312477
Red_POLY_N4	0,999887796
Red_POLY_N5	0,999942383
Red_POLY_N6	0,999883302
van der Waals	0,9991138



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH
 Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

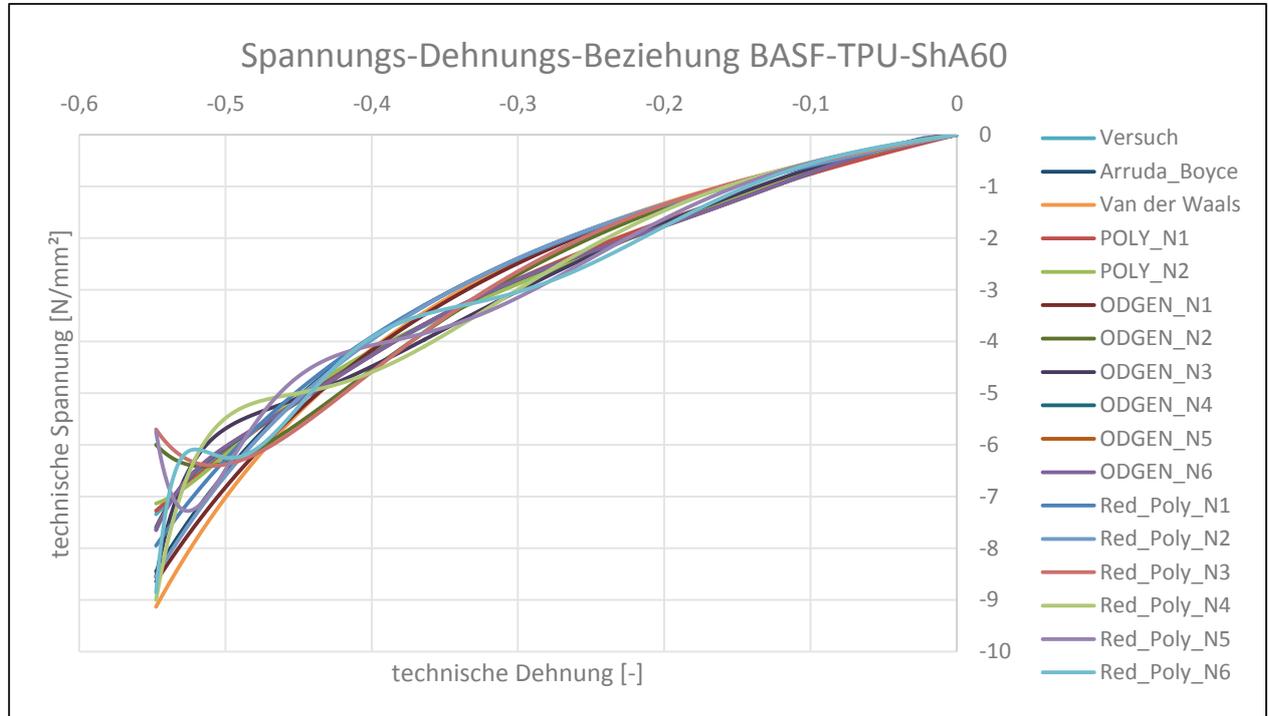
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,78709033	1,7282271											0
OGDEN_N2	9,52801151	1,01486157	-7,36434028	0,2745861									0
ODGEN_N3	26,1625348	1,6885015	-9,27328345	2,41471809	-14,7294474	0,97975014							0
ODGEN_N4	16,975319	13,5274338	-15,2723736	18,3358791	-11,0554379	-7,52965594	11,0602744	-8,96173105					0
OGDEN_N5	-54,4798736	10,3848804	77,3603292	10,6892583	-20,8296455	14,2749748	-25,8213319	-6,34587206	25,5407602	-6,87241219			0
OGDEN_N6	-106,260122	6,96942607	166,973277	11,1275681	-80,8672807	15,09333404	42,4000219	-0,79206843	-53,0254581	-5,60576947	32,4214611	-7,69179147	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	1,24744788	-0,22760888											0
POLY_N2	1,88855875	-0,7376135	-0,11365801	0,2452796									0
Red_POLY_N1	0,90000093												0
Red_POLY_N2	1,01158623		-9,03E-02										0
Red_POLY_N3	1,0511384		-0,19509436			4,44E-02							0
Red_POLY_N4	1,06268569		-0,25982736			0,114899	-2,11E-02						0
Red_POLY_N5	1,06452295		-0,2777585			0,15066135	-4,65E-02	5,92E-03					0
Red_POLY_N6	1,06085804		-0,22215945			-2,41E-02	0,16762422	-0,10737279	2,17E-02				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,80000189	2884,90711											0
van der Waals	2,16752099	10,0026618	0,50897153	0									0

Material: TPU

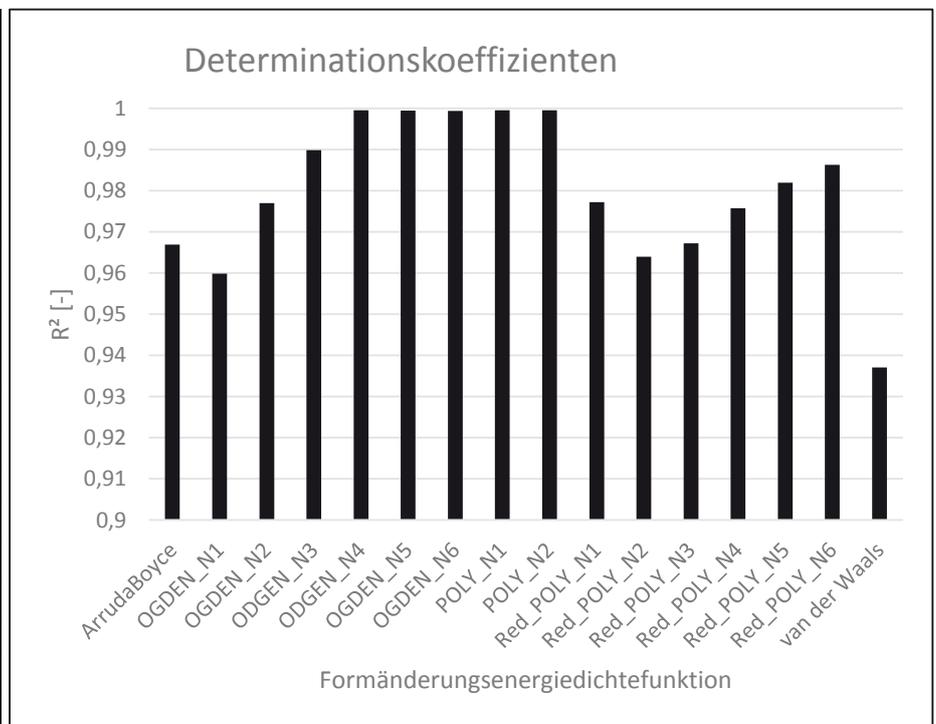
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,966871873
OGDEN_N1	0,959854331
OGDEN_N2	0,976989877
ODGEN_N3	0,989849921
ODGEN_N4	0,999537645
OGDEN_N5	0,999396135
OGDEN_N6	0,999356061
POLY_N1	0,999475405
POLY_N2	0,999472821
Red_POLY_N1	0,977163865
Red_POLY_N2	0,963948751
Red_POLY_N3	0,96721002
Red_POLY_N4	0,975750523
Red_POLY_N5	0,981904329
Red_POLY_N6	0,986221914
van der Waals	0,937043367



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH
 Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

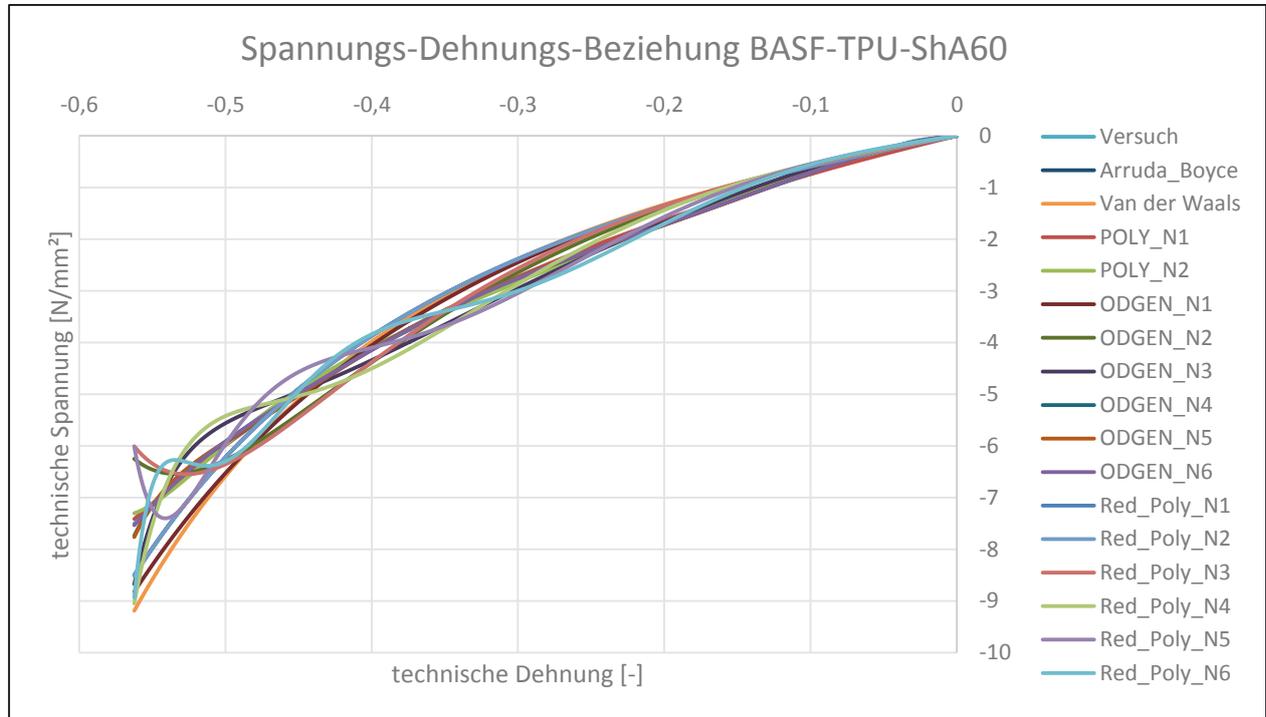
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,61272005	-0,09449969											0
OGDEN_N2	7,45656428	-3,23820181	-5,93016204	-3,58727541									0
OGDEN_N3	2,5736704	2,80219688	-3,50379923	20,4560762	1,71440583	-10,2572561							0
OGDEN_N4	42,5408402	5,69453819	-28,9682826	10,7399858	-21,2017485	0,1102443	8,20225879	-5,85924179					0
OGDEN_N5	-140,727615	2,5833452	269,293967	4,85697703	-141,114848	7,13700794	4,06380246	-1,91721582	9,06895215	-4,96557628			0
OGDEN_N6	-252,794532	2,55593599	430,828587	4,4932426	-208,68298	6,48149367	22,3353091	-0,38671456	4,35495006	-4,80328014	4,54557708	-4,90531892	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	1,44089126	-0,28062333											0
POLY_N2	-4,06160139	4,7627065	-7,03273635	5,12482226	-1,2574594								0
Red_POLY_N1	0,89691815												0
Red_POLY_N2	0,87175008		0,02821261			-0,16543771							0
Red_POLY_N3	0,79809762		0,35541974			-1,02798377							0
Red_POLY_N4	0,73640016		1,01050391			-1,02798377	0,29943176						0
Red_POLY_N5	0,68825064		1,97390658			-3,37693112	2,23325267	-0,51734577					0
Red_POLY_N6	0,64948544		3,2415602			-8,28466606	9,24544016	-4,77487115	0,9300657				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,54842647	2,33898878											0
van der Waals	1,60595872	330,102101	-0,31016086	0									0

Material: TPU

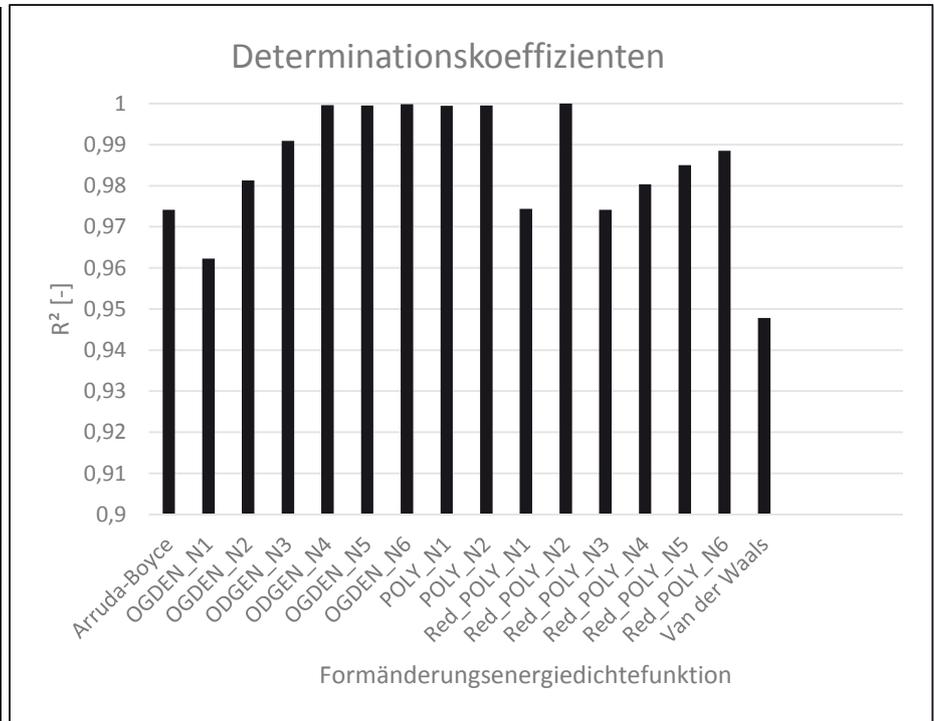
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch, rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,974160757
OGDEN_N1	0,962284259
OGDEN_N2	0,981249953
ODGEN_N3	0,990934118
ODGEN_N4	0,999644458
OGDEN_N5	0,999541326
OGDEN_N6	0,999865465
POLY_N1	0,999478115
POLY_N2	0,999513013
Red_POLY_N1	0,974376251
Red_POLY_N2	0,999966783
Red_POLY_N3	0,974112304
Red_POLY_N4	0,980327892
Red_POLY_N5	0,985043374
Red_POLY_N6	0,988541823
van der Waals	0,9477969



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Zugversuch, rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

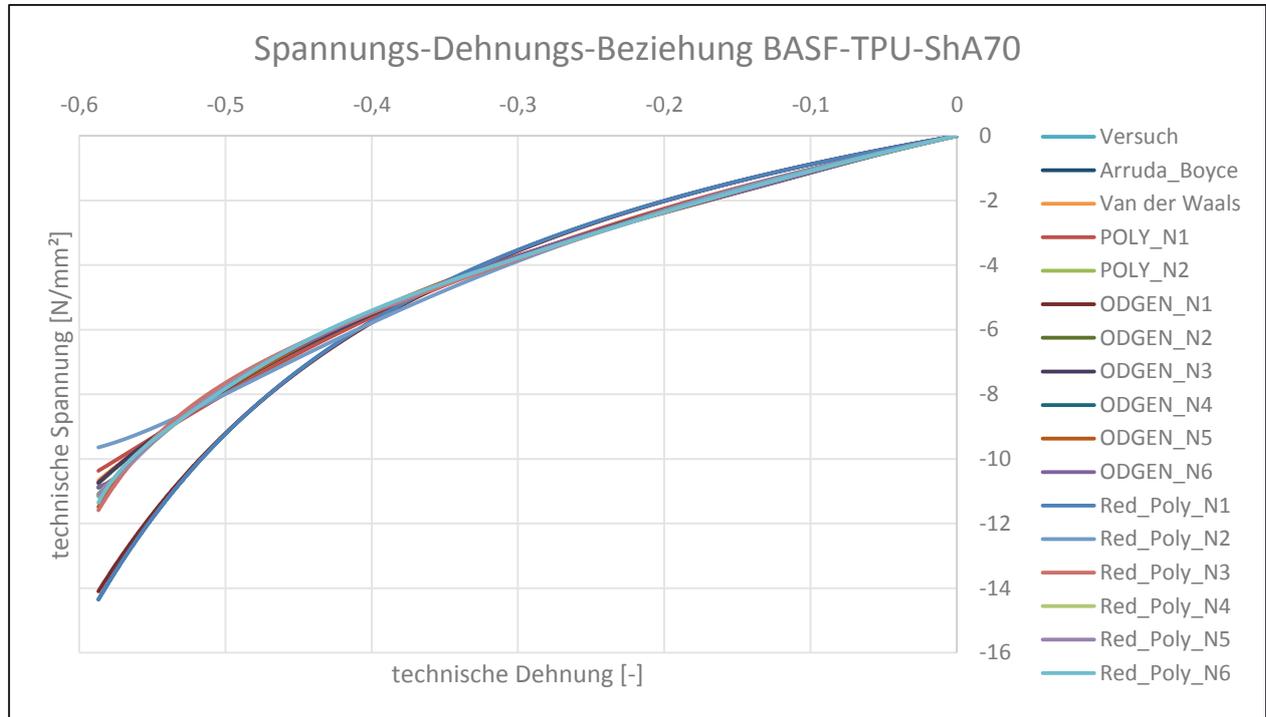
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,63765012	0,26617012											0
OGDEN_N2	6,15528227	-2,74268764	-4,59372953	-3,17488145									0
OGDEN_N3	2,82533448	3,14922352	-3,52965324	15,9140719	1,63367625	-8,05520383							0
OGDEN_N4	38,6139758	5,38887703	-26,1439075	10,1923104	-19,1486784	0,11209352	7,3688822	-5,56664871					0
OGDEN_N5	-115,844571	2,39821725	224,083316	4,65155695	-118,903005	6,88142423	3,27505798	-1,95745897	8,08891258	-4,74783154			0
OGDEN_N6	-185,801279	2,85281108	328,80015	4,88337744	-162,490132	6,97158253	15,6085164	-1,20248372	8,24904761	-6,47436592	-3,6856608	-7,05807066	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	1,41905726	-0,28198574											0
POLY_N2	-3,4469452	4,16207649	-5,64877353	3,89083064	-0,92630747								0
Red_POLY_N1	0,88799773												0
Red_POLY_N2	0,88757044		0,00042484										0
Red_POLY_N3	0,8226764		0,25248695			-0,11651509							0
Red_POLY_N4	0,76504198		0,78199692			-0,75362732	0,20312156						0
Red_POLY_N5	0,71913548		1,57093954			-2,51126506	1,53192064	-0,3269882					0
Red_POLY_N6	0,68169146		2,61746546			-6,21375973	6,39016152	-3,0402536	0,54562213				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,77119913	16,0922919											0
van der Waals	1,66845438	334,334495	-0,15681002	0									0

Material: TPU

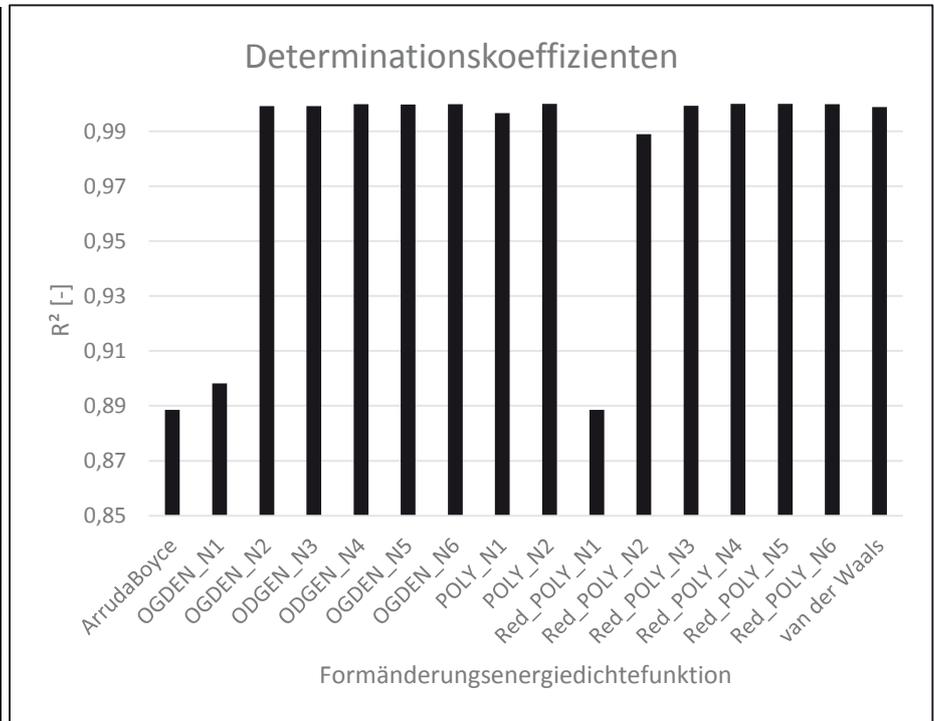
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,888581761
OGDEN_N1	0,898213326
OGDEN_N2	0,999198838
OGDEN_N3	0,999142045
OGDEN_N4	0,99987423
OGDEN_N5	0,999792988
OGDEN_N6	0,999838915
POLY_N1	0,996643933
POLY_N2	0,999982857
Red_POLY_N1	0,888581761
Red_POLY_N2	0,988923856
Red_POLY_N3	0,99931469
Red_POLY_N4	0,999928094
Red_POLY_N5	0,99994018
Red_POLY_N6	0,999883338
van der Waals	0,998864449



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

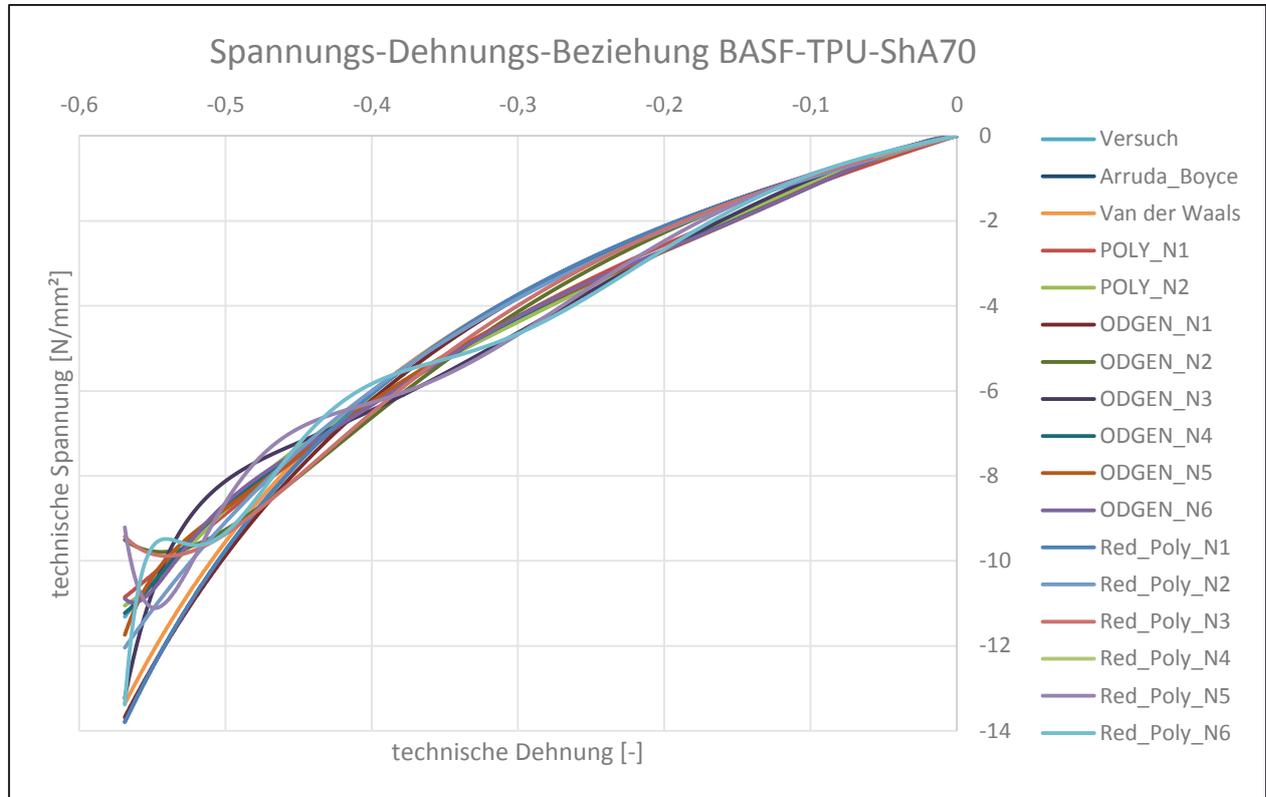
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	2,60959558	1,60574167											0
OGDEN_N2	18,2541182	0,84784863	-14,8655181	0,19850774									0
OGDEN_N3	47,9025317	1,55594162	-17,1245517	2,27281927	-27,3986307	0,86570576							0
OGDEN_N4	20,2300616	11,3671536	-17,4065321	16,1943698	-15,5820551	-6,69236243	15,5557908	-7,80412531					0
OGDEN_N5	-61,1723029	9,24763041	97,176211	9,4563018	-32,4959769	12,004899	-31,38954	-5,3537618	30,7545541	-5,86577443			0
OGDEN_N6	-90,1762879	6,32107374	174,398217	7,73823779	-81,172142	10,062409	-6,31346296	-3,64244045	11,0478345	-7,07271128	-4,93660944	-7,58786483	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	2,03452365	-0,44730835											0
POLY_N2	2,32900556	-0,58733688	-0,78731701	0,68234523	-0,14328017								0
Red_POLY_N1	1,31794323												0
Red_POLY_N2	1,56122777		-0,16797837										0
Red_POLY_N3	1,63661332		-0,3419096			0,0661422							0
Red_POLY_N4	1,6532146		-0,42418506			0,14637414	-0,02171449						0
Red_POLY_N5	1,65391822		-0,43030372			0,15731508	-0,02870336	0,00147741					0
Red_POLY_N6	1,64765476		-0,34536871			-0,08231186	0,23603075	-0,12525109	0,02202121				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	2,63588634	3227,39572											0
van der Waals	3,42067349	10,0138253	0,59352882	0									0

Material: TPU

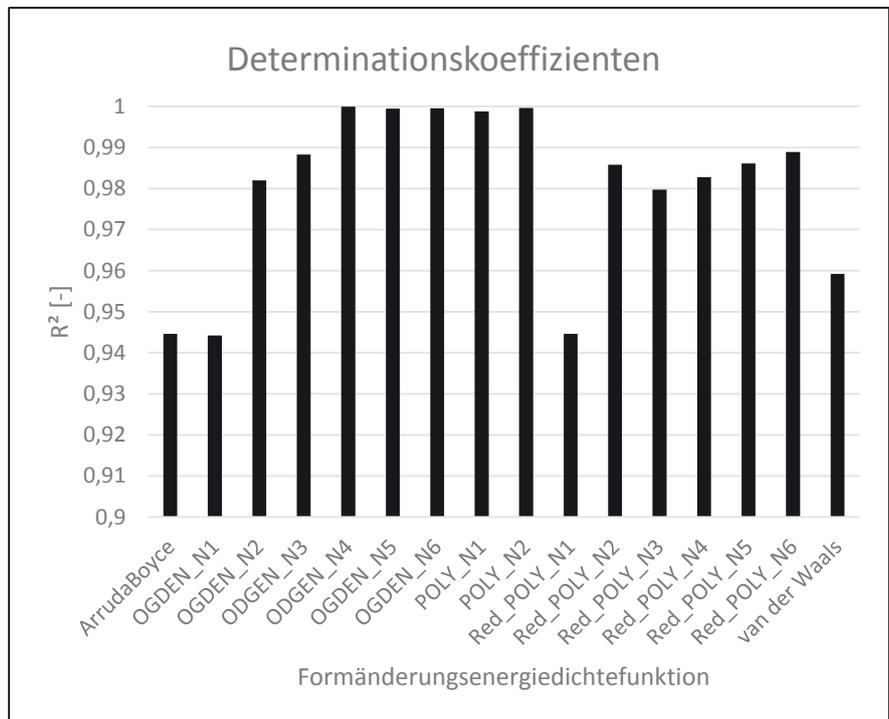
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,944610753
OGDEN_N1	0,944233901
OGDEN_N2	0,982010398
OGDEN_N3	0,988336764
OGDEN_N4	0,999939846
OGDEN_N5	0,99949483
OGDEN_N6	0,999535899
POLY_N1	0,998756754
POLY_N2	0,999629201
Red_POLY_N1	0,944610815
Red_POLY_N2	0,985816874
Red_POLY_N3	0,979784967
Red_POLY_N4	0,982807513
Red_POLY_N5	0,986144234
Red_POLY_N6	0,98894125
van der Waals	0,959242687



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

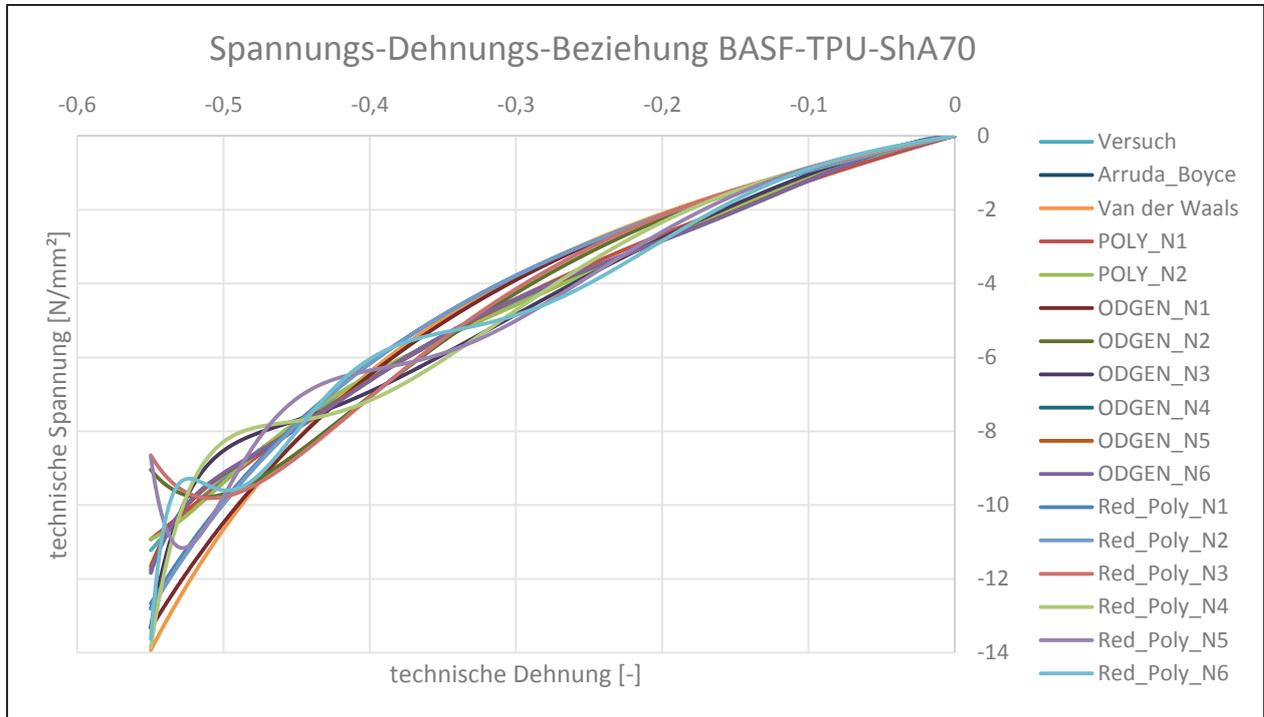
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	2,67410875	0,89016997											0
OGDEN_N2	9,9769389	-2,10299728	-7,34182311	-2,56730579									0
OGDEN_N3	20,6961966	5,98176447	-21,7786527	8,21455757	2,86170845	-5,21249856							0
OGDEN_N4	32,529569	12,0959175	-33,3578958	17,10586	-18,0950461	-6,61611239	19,9919013	-8,44454202					0
OGDEN_N5	-195,422459	11,936395	387,610223	12,0182961	-191,998787	12,9486023	-60,0760996	5,9830846	61,0185568	-6,61279951			0
OGDEN_N6	-344,338321	3,95208459	609,663453	5,97925028	-293,969555	8,2522116	19,0290539	0,69674531	19,0789162	-7,02280862	-8,32343942	-7,646142	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	2,36129792	-0,54519771											0
POLY_N2	-3,68453346	5,01398547	-7,16997613	4,86980443	-1,13442707								0
Red_POLY_N1	1,39374572												0
Red_POLY_N2	1,47559562		-0,07087177										0
Red_POLY_N3	1,39750355		0,1896103			-0,11382386							0
Red_POLY_N4	1,30978987		0,88337936			-0,90132876	0,23969454						0
Red_POLY_N5	1,23581716		1,98510495			-3,21608554	1,90876369	-0,39350057					0
Red_POLY_N6	1,17396785		3,49641979			-8,26185223	8,22156394	-3,76976317	0,65171829				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	2,78749108	1850,39367											0
van der Waals	2,86373578	338,626646	0,06389651	0									0

Material: TPU

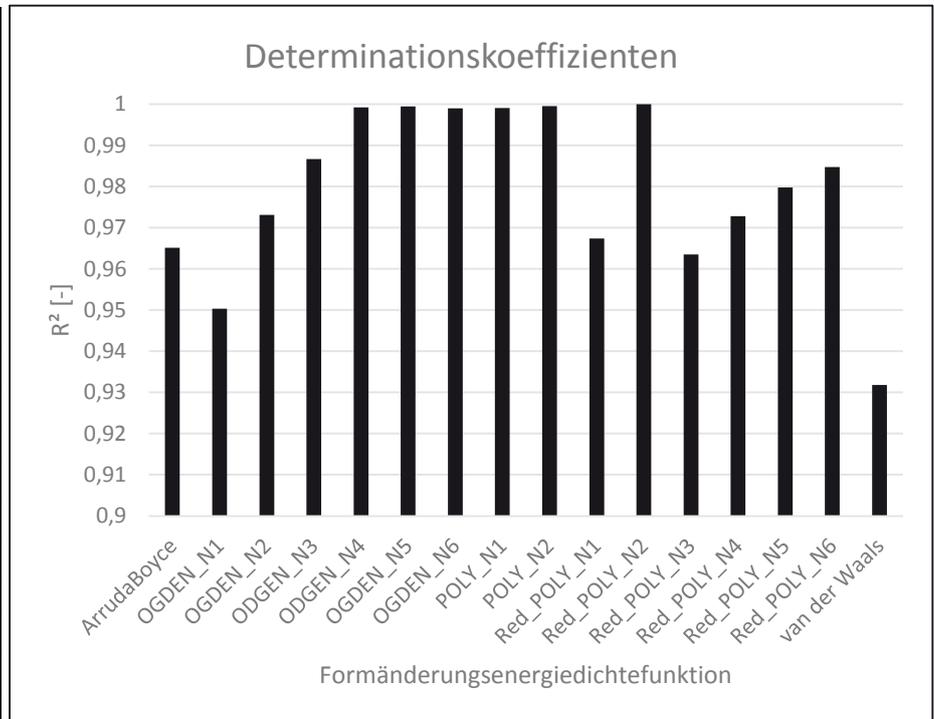
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,965119562
OGDEN_N1	0,950311844
OGDEN_N2	0,973086889
OGDEN_N3	0,986665764
OGDEN_N4	0,99921231
OGDEN_N5	0,999427302
OGDEN_N6	0,998986927
POLY_N1	0,999077373
POLY_N2	0,999490786
Red_POLY_N1	0,967386135
Red_POLY_N2	0,99997195
Red_POLY_N3	0,963524727
Red_POLY_N4	0,972810542
Red_POLY_N5	0,979791419
Red_POLY_N6	0,984691796
van der Waals	0,931807379



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

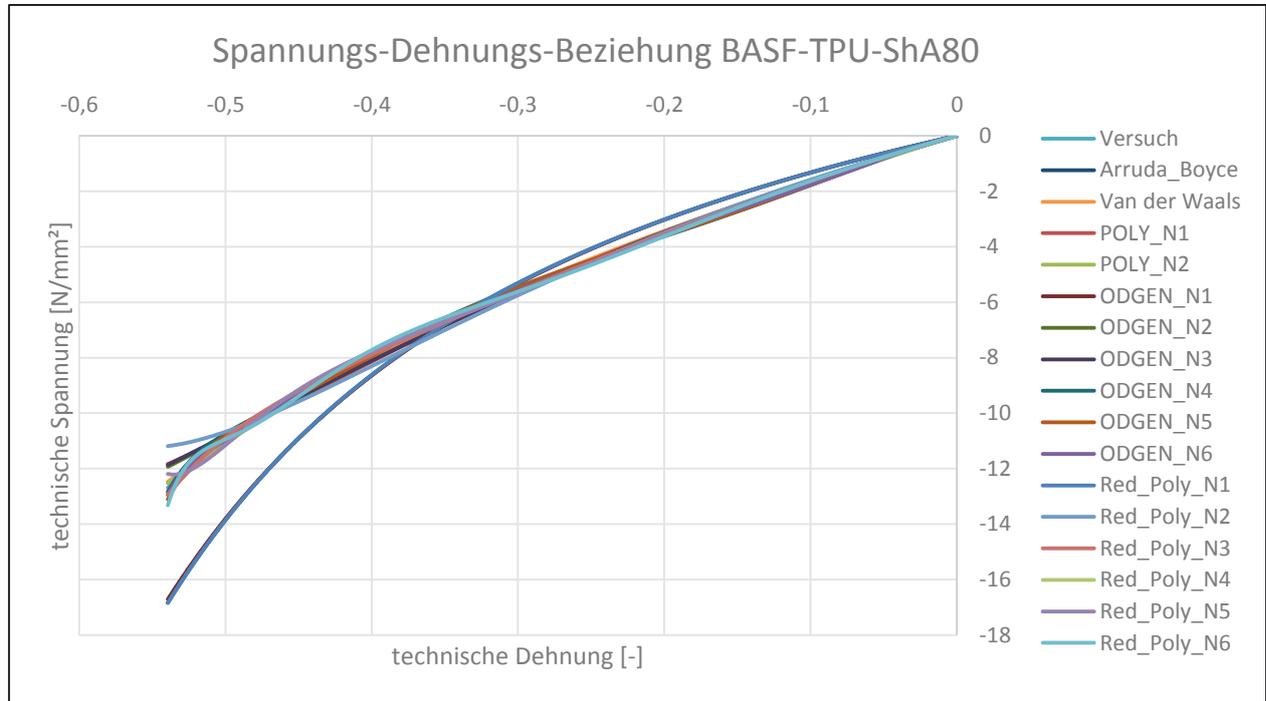
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	2,59060578	0,16826783											0
OGDEN_N2	10,0550289	-3,02499553	-7,58626986	-3,45988491									0
OGDEN_N3	4,5967416	3,18356199	-6,12064889	17,3133954	2,87494539	-8,73979859							0
OGDEN_N4	66,1153295	5,84452165	-45,8273342	11,1191501	-32,9794795	-0,11987709	13,6204159	-6,01489053					0
OGDEN_N5	-226,270356	5,94932355	453,944341	7,2410104	-226,796264	9,23640071	-40,7081369	-3,91309758	40,7409474	-5,20238735			0
OGDEN_N6	-430,585991	2,77134039	732,999433	4,66555227	-354,05369	6,64584045	36,362568	0,35086853	7,94172178	-4,86903539	8,2894934	-4,87809814	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	2,4219882	-0,54167956											0
POLY_N2	-6,24912436	7,4189057	-10,9626253	7,86601949	-1,90464816								0
Red_POLY_N1	1,41325471												0
Red_POLY_N2	1,40638104		0,00722931										0
Red_POLY_N3	1,29228471		0,49032564			-0,23914634							0
Red_POLY_N4	1,19013576		1,53994171			-1,59031721	0,46062726						0
Red_POLY_N5	1,11036527		3,10144802			-5,31288732	3,468295	-0,79130626					0
Red_POLY_N6	1,04658592		5,15939804			-13,1102499	14,4017451	-7,31811795	1,40351942				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	2,75073353	5,13333965											0
van der Waals	2,61605821	338,148135	-0,20357997	0									0

Material: TPU

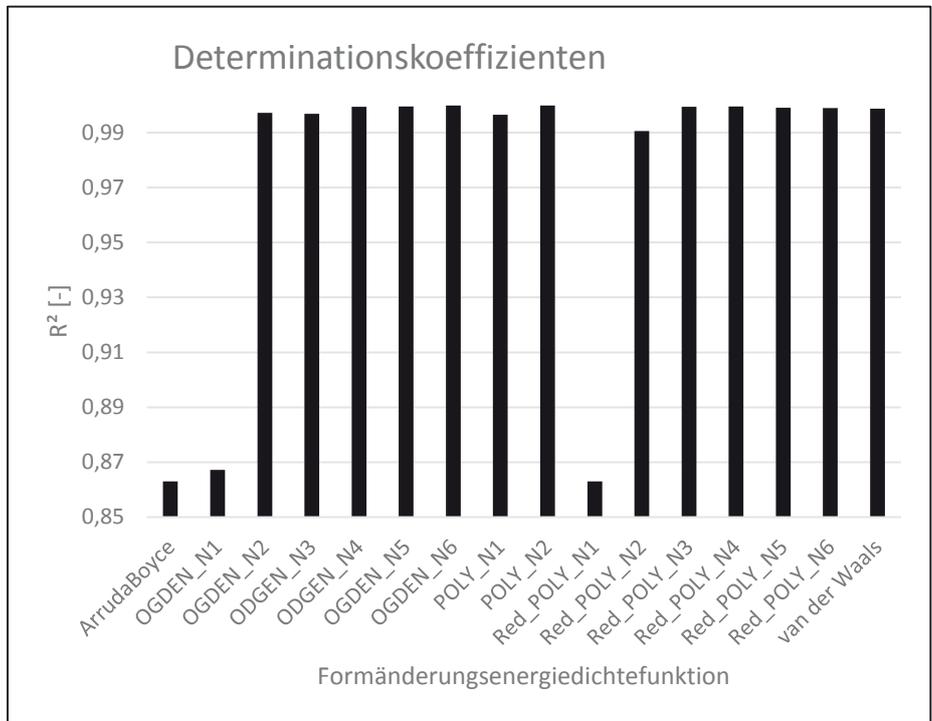
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA80

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,862984299
OGDEN_N1	0,867171824
OGDEN_N2	0,997168006
OGDEN_N3	0,996845474
OGDEN_N4	0,999375102
OGDEN_N5	0,999566655
OGDEN_N6	0,999883831
POLY_N1	0,996509568
POLY_N2	0,999899433
Red_POLY_N1	0,862984299
Red_POLY_N2	0,99054638
Red_POLY_N3	0,999379724
Red_POLY_N4	0,999478152
Red_POLY_N5	0,999103334
Red_POLY_N6	0,998972707
van der Waals	0,998774172



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA80

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

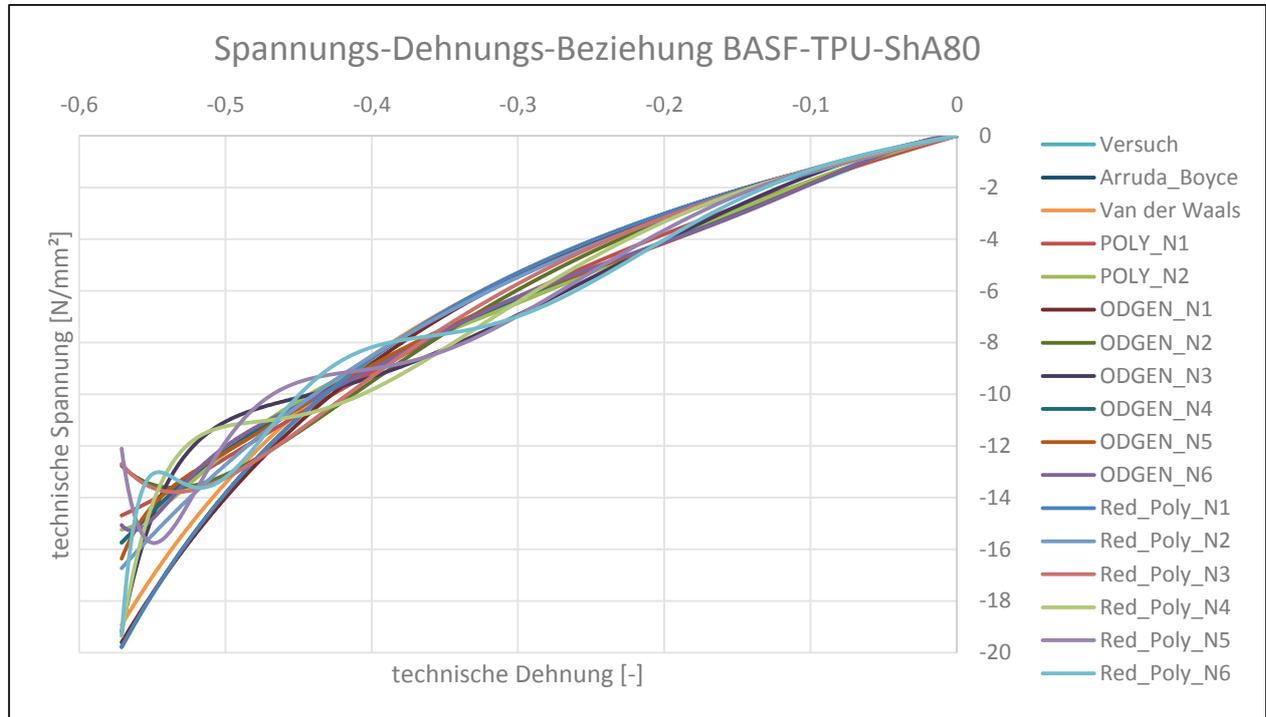
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	3,7971858	0,90362347											0
OGDEN_N2	15,227828	-2,19042915	-11,4446202	-2,63113574									0
OGDEN_N3	32,4276503	5,7127597	-34,7059611	8,05074343	4,65797567	-5,14903324							0
OGDEN_N4	58,3443123	11,8287227	-59,8205584	16,7062086	-30,7279788	-6,29106858	33,3947853	-8,28686802					0
OGDEN_N5	-355,670367	12,1180365	707,975409	12,1729517	-352,28698	13,0436336	-99,7144282	-5,98707875	100,966009	-6,67470264			0
OGDEN_N6	-599,65515	3,55529239	1063,03943	5,67746982	-518,912459	7,95148646	38,4250924	-0,1392713	29,0982658	-6,8514178	-10,6890965	-7,6039884	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	3,68562523	-0,95168937											0
POLY_N2	-6,5381305	8,53821344	-13,175803	9,18505103	-2,14747329								0
Red_POLY_N1	1,97605557												0
Red_POLY_N2	2,12600824		-0,12313233										0
Red_POLY_N3	2,00292682		0,27848266			-0,17248087							0
Red_POLY_N4	1,85818052		1,44677546			-1,47646698	0,39055851						0
Red_POLY_N5	1,73538596		3,38046122			-5,47073588	3,22158248	-0,65689562					0
Red_POLY_N6	1,63410771		6,06852455			-14,2936754	14,0622341	-6,35816087	1,08338014				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	3,9521113	1962,77048											0
van der Waals	4,10704874	354,462039	0,0864832	0									0

Material: TPU

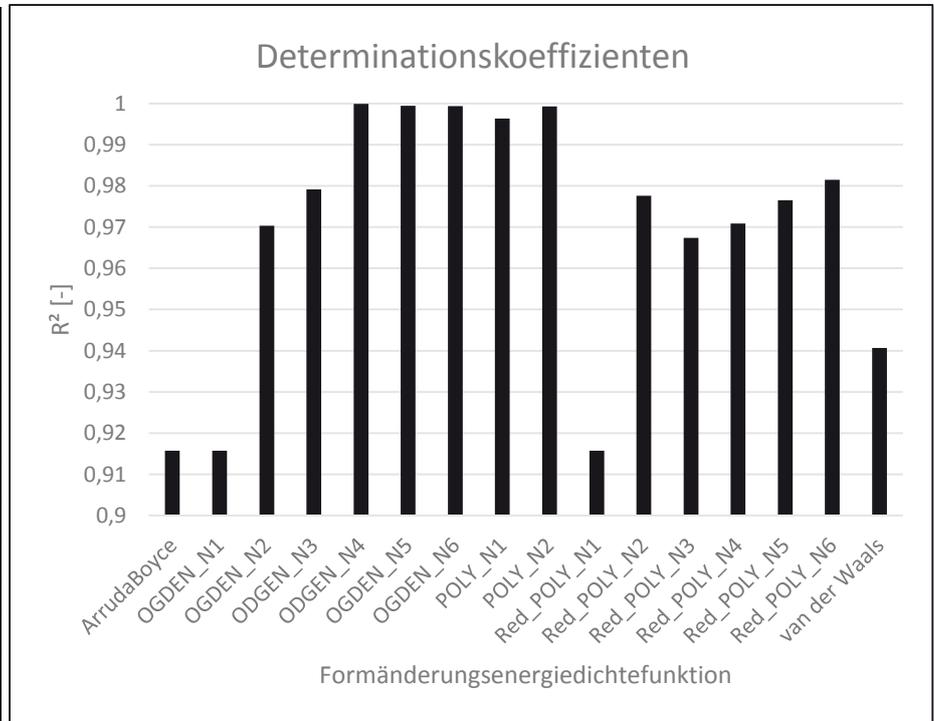
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA80

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,915729637
OGDEN_N1	0,915711245
OGDEN_N2	0,9702924
ODGEN_N3	0,979140439
ODGEN_N4	0,999922492
OGDEN_N5	0,99942075
OGDEN_N6	0,999369218
POLY_N1	0,99635355
POLY_N2	0,999285358
Red_POLY_N1	0,915729522
Red_POLY_N2	0,977612149
Red_POLY_N3	0,96735781
Red_POLY_N4	0,970891454
Red_POLY_N5	0,976532189
Red_POLY_N6	0,981454618
van der Waals	0,940691258



Material: Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH
 Härte: ShA80
 Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie
 Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

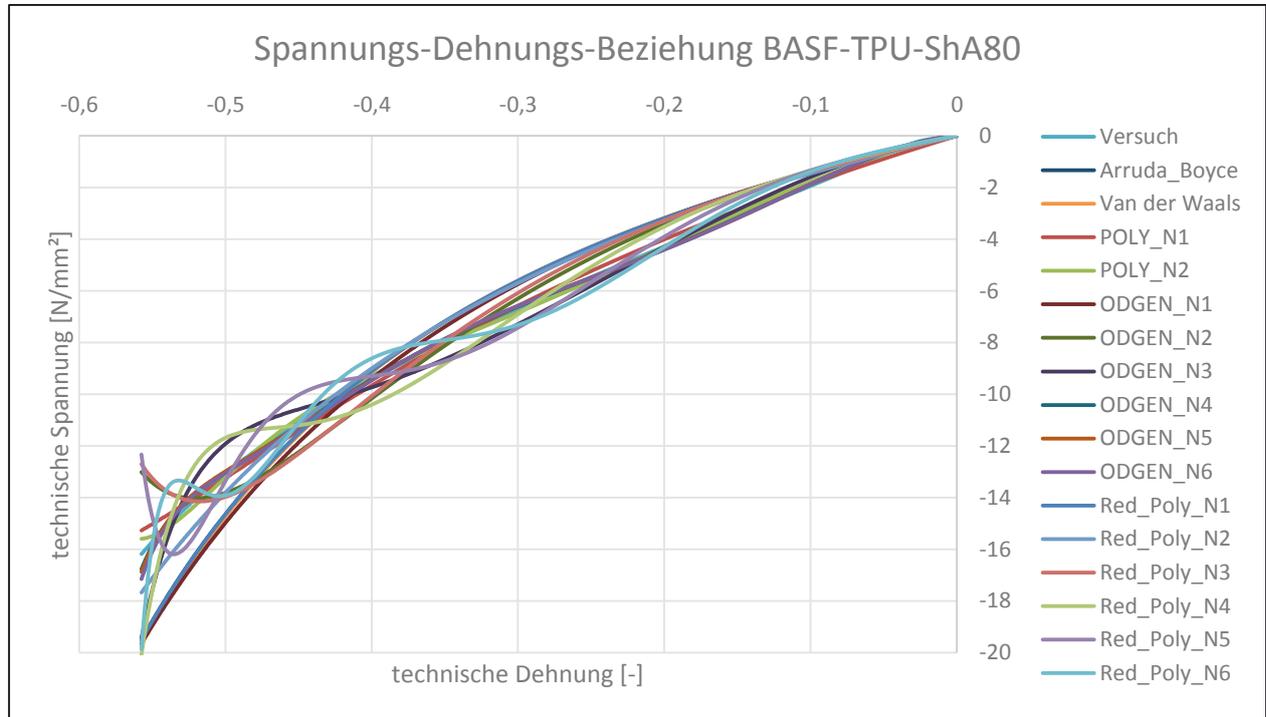
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	3,7971858	0,90362347											0
OGDEN_N2	15,227828	-2,19042915	-1,1,4446202	-2,63113574									0
ODGEN_N3	32,4276503	5,7127597	-34,7059611	8,05074343	4,65797567	-5,14903324							0
ODGEN_N4	58,3443123	11,8287227	-59,8205584	16,7062086	-30,7279788	-6,29106858	33,3947853	-8,28686802					0
OGDEN_N5	-355,670367	12,1180365	707,975409	12,1729517	-352,28698	13,0436336	-99,7144282	-5,98707875	100,966009	-6,67470264			0
OGDEN_N6	-599,65515	3,55529239	1063,03943	5,67746982	-518,912459	7,95148646	38,4250924	-0,1392713	29,0982658	-6,8514178	-10,6890965	-7,6039884	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	3,68562523	-0,95168937											0
POLY_N2	-6,5381305	8,53821344	-13,175803	9,18505103	-2,14747329								0
Red_POLY_N1	1,97605557												0
Red_POLY_N2	2,12600824		-0,12313233										0
Red_POLY_N3	2,00292682		0,27848266			-0,17248087							0
Red_POLY_N4	1,85818052		1,44677546			-1,47646698	0,39055851						0
Red_POLY_N5	1,73538596		3,38046122			-5,47073588	3,22158248	-0,65689562					0
Red_POLY_N6	1,63410771		6,06852455			-14,2936754	14,0622341	-6,35816087	1,08338014				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	3,9521113	1962,77048											0
van der Waals	4,10704874	354,462039	0,0864832	0									0

Material: TPU

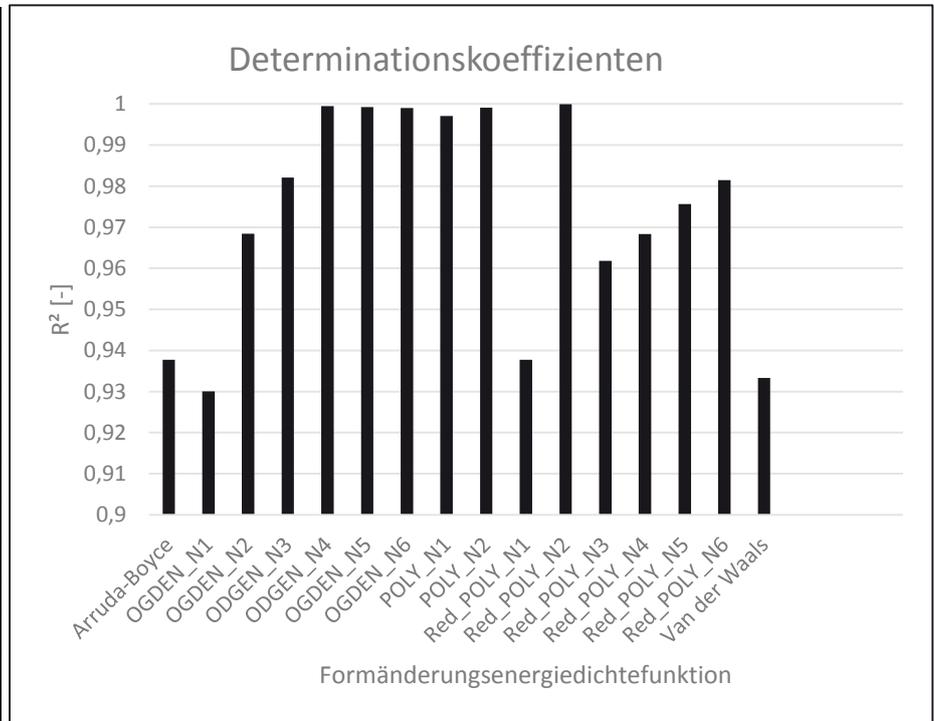
Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA80

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,937713313
OGDEN_N1	0,930051374
OGDEN_N2	0,968386488
ODGEN_N3	0,98211071
ODGEN_N4	0,99946194
OGDEN_N5	0,999275422
OGDEN_N6	0,999000693
POLY_N1	0,997063503
POLY_N2	0,999112679
Red_POLY_N1	0,937713289
Red_POLY_N2	0,999963956
Red_POLY_N3	0,961827209
Red_POLY_N4	0,968308295
Red_POLY_N5	0,975667493
Red_POLY_N6	0,981432554
van der Waals	0,933315582



Material: TPU Hersteller: BASF Polyurethanes GmbH

Härte: ShA80

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	3,96189579	0,66867523											0
OGDEN_N2	15,6060401	-2,55740558	-11,7442218	-3,00158124									0
ODGEN_N3	34,6390172	5,89803459	-37,5112547	8,3191267	5,19655123	-5,2908078							0
ODGEN_N4	99,5709597	5,48575773	-68,5187467	10,8134349	-51,2911598	-0,28661513	21,6855178	-5,79442951					0
OGDEN_N5	-360,119075	2,64292158	702,104967	4,77549211	-366,723503	7,00526486	-1,06611933	-1,90656341	27,2811833	-4,73954815			0
OGDEN_N6	-579,537818	2,13845212	1020,37864	4,12479869	-503,566273	6,13222888	43,428897	-1,73463469	18,141862	-4,33785699	2,65761019	-5,73695044	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	3,85204607	-0,980346											0
POLY_N2	-10,2071471	12,018295	-18,5823249	13,3741135	-3,20852364								0
Red_POLY_N1	2,09104875												0
Red_POLY_N2	2,18143744		-0,08362537										0
Red_POLY_N3	2,03351871		0,469783			-0,25869689							0
Red_POLY_N4	1,8781206		1,91544054			-2,01393366	0,56867088						0
Red_POLY_N5	1,75065538		4,22166681			-7,19171932	4,53775361	-0,9942973					0
Red_POLY_N6	1,64714915		7,35110738			-18,3469969	19,3588293	-9,40931035	1,72489944				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	4,18209638	1267,9389											0
van der Waals	4,15254618	346,588398	-0,01320513	0									0

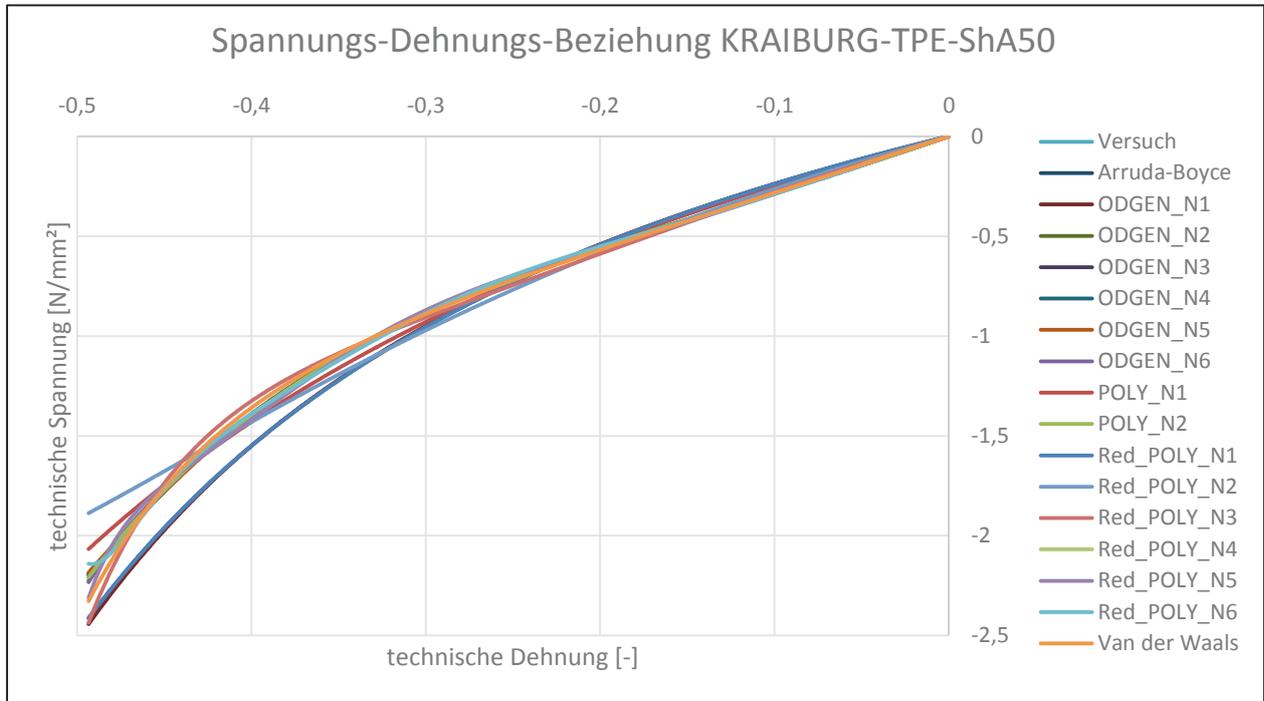
11.7 Erstellte Materialmodelle für TPE aus dem uniaxialen Druckversuch

Material: TPE

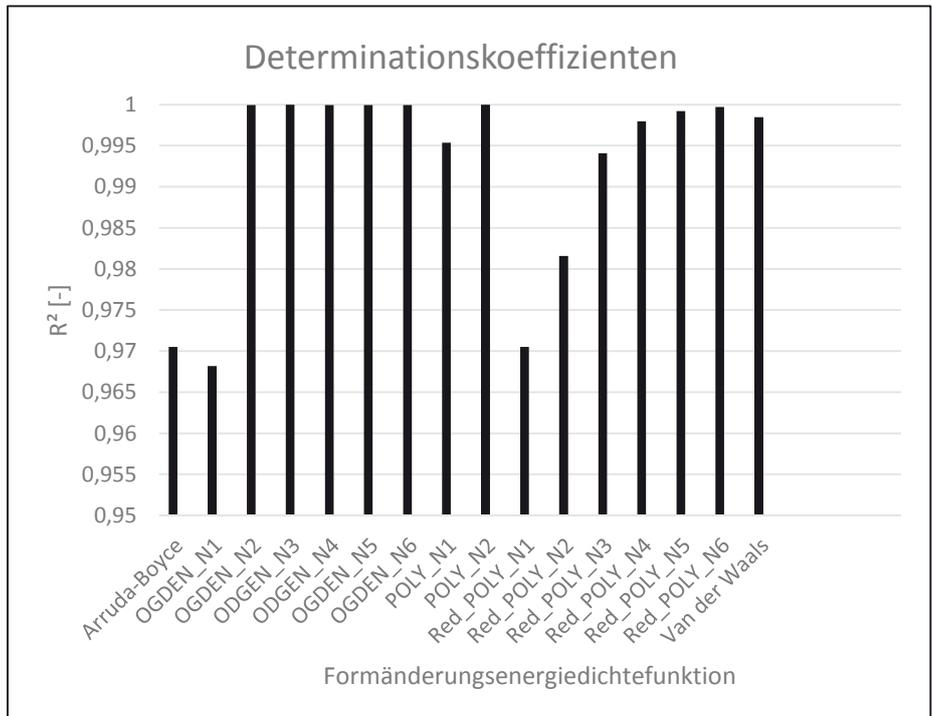
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,970520122
OGDEN_N1	0,968171317
OGDEN_N2	0,999953316
OGDEN_N3	0,999969277
OGDEN_N4	0,999955189
OGDEN_N5	0,999933365
OGDEN_N6	0,999954632
POLY_N1	0,995380217
POLY_N2	0,99999293
Red_POLY_N1	0,970520099
Red_POLY_N2	0,981575707
Red_POLY_N3	0,99409911
Red_POLY_N4	0,997951292
Red_POLY_N5	0,999218425
Red_POLY_N6	0,999702189
Van der Waals	0,998479262



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG
 Härte: ShA50
 Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie
 Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

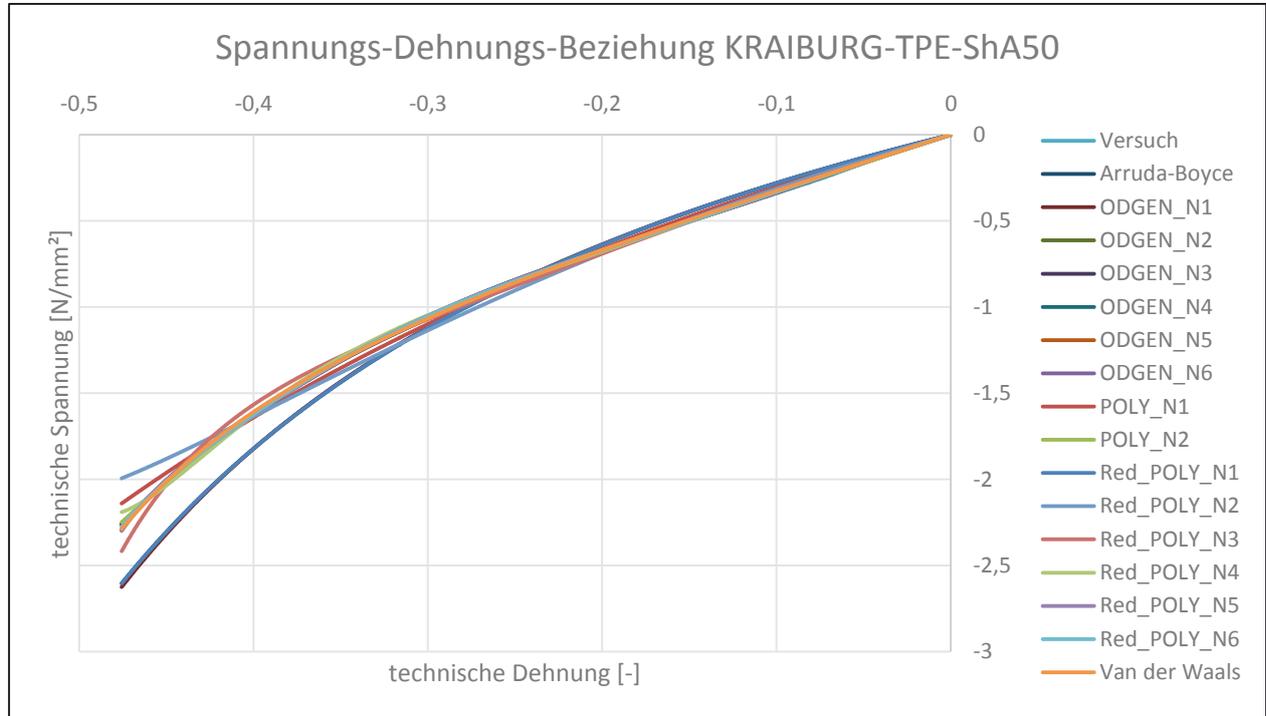
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,71870292	2,39062622											0
OGDEN_N2	1,46485332	5,37260533	-0,46566541	-2,96860081									0
ODGEN_N3	-3,72499938	1,05546606	4,74129162	2,59177961	-0,02304355	-5,89402775							0
ODGEN_N4	-4,67042527	-0,01432368	4,58067578	2,19350348	1,22957941	-2,05058168	-0,14863657	-4,57318524					0
OGDEN_N5	-6,46425304	2,00230376	11,5722088	4,00137836	-4,25088396	6,00119108	0,0082861	-1,99997448	0,11893026	-4,00148411			0
OGDEN_N6	-27,5266593	2,00127384	40,221522	4,00134737	-15,7953774	6,00161926	5,77411976	-1,99874128	-2,10012937	-3,99900648	0,4004381	-5,99869224	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,45557854	-0,07638995											0
POLY_N2	1,52897385	-1,01853159	0,58161866	-0,21754319	0,04490654								0
Red_POLY_N1	0,35569952												0
Red_POLY_N2	0,39618729		-0,04896769										0
Red_POLY_N3	0,42946561		-0,17297642			0,07950412							0
Red_POLY_N4	0,44902301		-0,32272126			0,32416653	-0,11142884						0
Red_POLY_N5	0,46075134		-0,47637752			0,78111232	-0,60150275	0,17409543					0
Red_POLY_N6	0,46799607		-0,62223609			1,46113727	-1,85933189	1,18475078	-0,29481993				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,71139899	2494,87789											0
van der Waals	0,95468958	2,84724566	1,5789839	0									0

Material: TPE

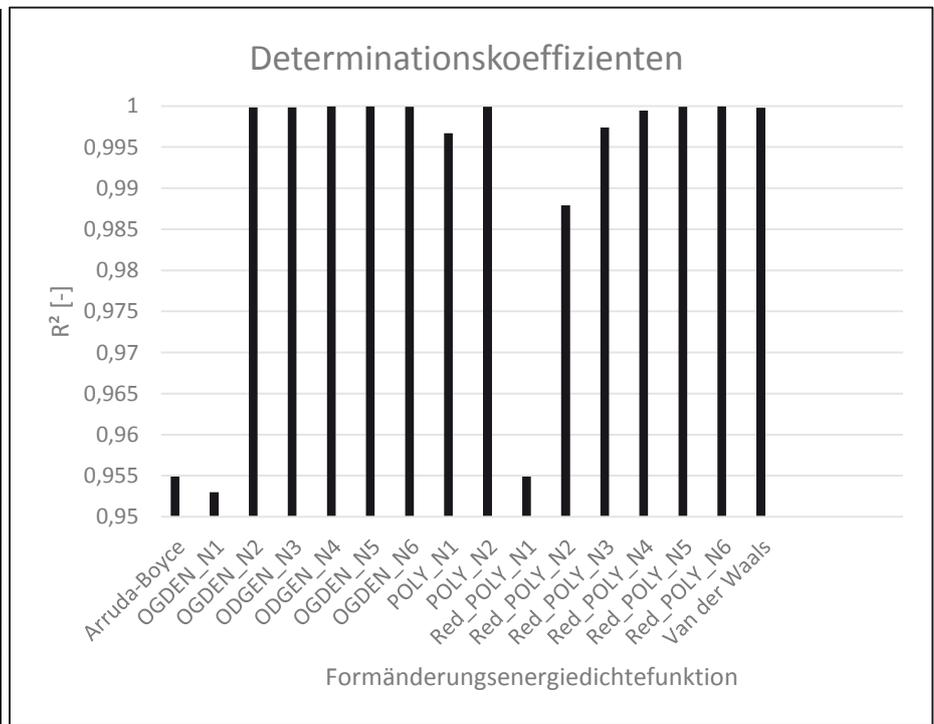
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,9549092
OGDEN_N1	0,952979825
OGDEN_N2	0,999822974
OGDEN_N3	0,999826234
OGDEN_N4	0,999943834
OGDEN_N5	0,999934864
OGDEN_N6	0,99991356
POLY_N1	0,996668722
POLY_N2	0,999925259
Red_POLY_N1	0,9549092
Red_POLY_N2	0,987899849
Red_POLY_N3	0,997382405
Red_POLY_N4	0,99945815
Red_POLY_N5	0,99990989
Red_POLY_N6	0,999947556
Van der Waals	0,999799448



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

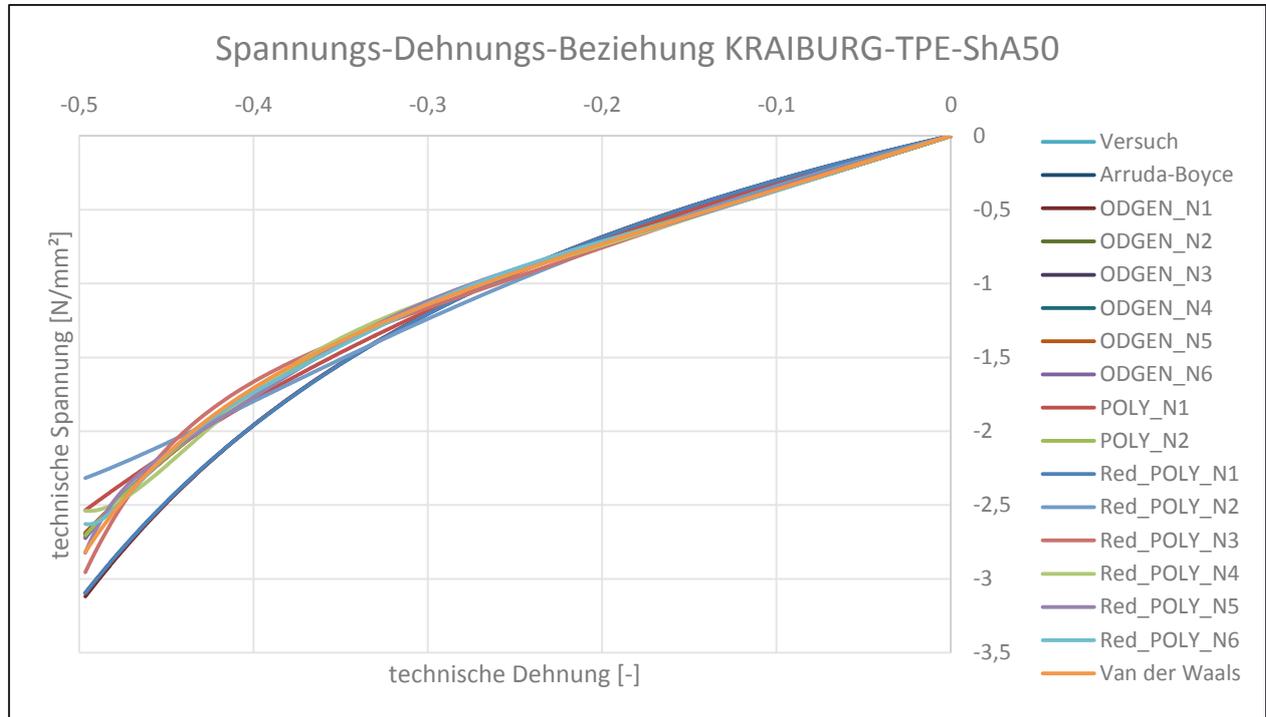
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,84420221	2,33557981											0
OGDEN_N2	5,0886819	1,67971159	-4,01499674	0,56722576									0
ODGEN_N3	15,1524245	2,28608833	-5,0027496	3,17883574	-9,07697937	1,38715499							0
ODGEN_N4	12,2188745	6,50328012	-6,59211952	11,0292247	-5,6361051	1,32232999	0,98835929	-6,68164302					0
OGDEN_N5	-26,3984575	2,81473293	46,6497742	5,4268246	-22,0303173	8,05405463	2,00757163	-1,70720394	0,75211863	-6,31033787			0
OGDEN_N6	-77,8697485	2,00139421	115,362116	4,00157338	-48,8071122	6,00182452	16,3411245	-1,99827681	-5,16899046	-3,99853371	1,12650971	-5,99850323	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,60590472	-0,13749622											0
POLY_N2	1,01558292	-0,46810223	-0,77577317	1,03974511	-0,30862191								0
Red_POLY_N1	0,41822695												0
Red_POLY_N2	0,47146301		-0,06937834										0
Red_POLY_N3	0,49997112		-0,18868293			0,08409425							0
Red_POLY_N4	0,51276715		-0,30169354			0,28819704	-0,10244589						0
Red_POLY_N5	0,51774879		-0,37849925			0,54196687	-0,40292734	0,11773624					0
Red_POLY_N6	0,51848719		-0,39625143			0,63426605	-0,59170801	0,28515196	-0,05388538				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,83645385	2517,97688											0
van der Waals	1,07241802	3,16551464	1,30693425	0									0

Material: TPE

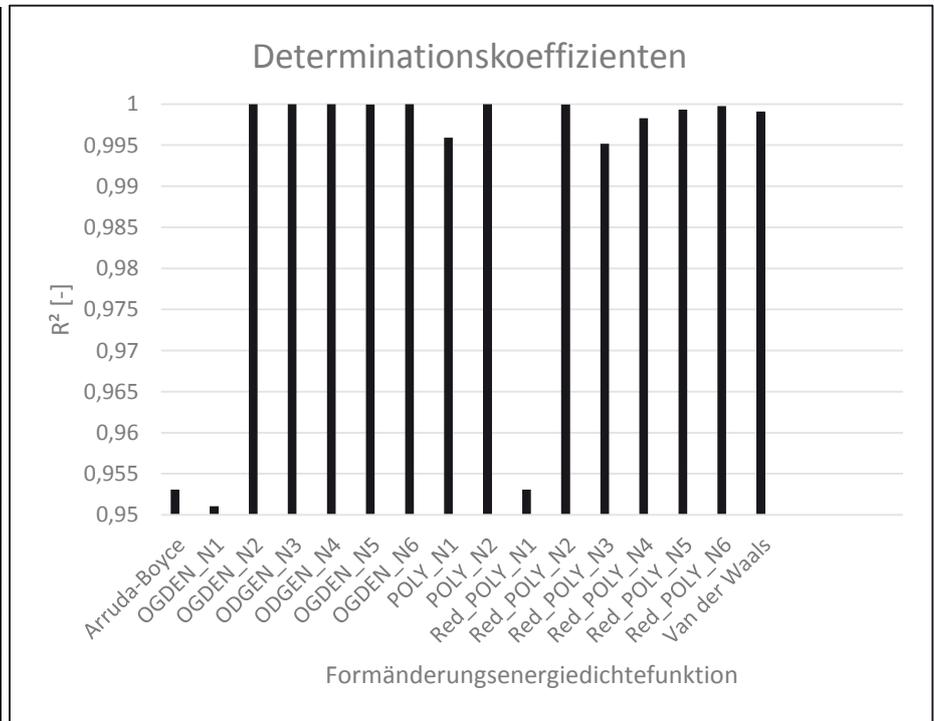
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch, rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,953068981
OGDEN_N1	0,951049931
OGDEN_N2	0,99998258
OGDEN_N3	0,999979347
OGDEN_N4	0,999985491
OGDEN_N5	0,99996558
OGDEN_N6	0,999980885
POLY_N1	0,995924889
POLY_N2	0,999992314
Red_POLY_N1	0,953068981
Red_POLY_N2	0,999962248
Red_POLY_N3	0,995179179
Red_POLY_N4	0,99827361
Red_POLY_N5	0,999323208
Red_POLY_N6	0,999741589
van der Waals	0,99909336



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: Sha50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch, rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

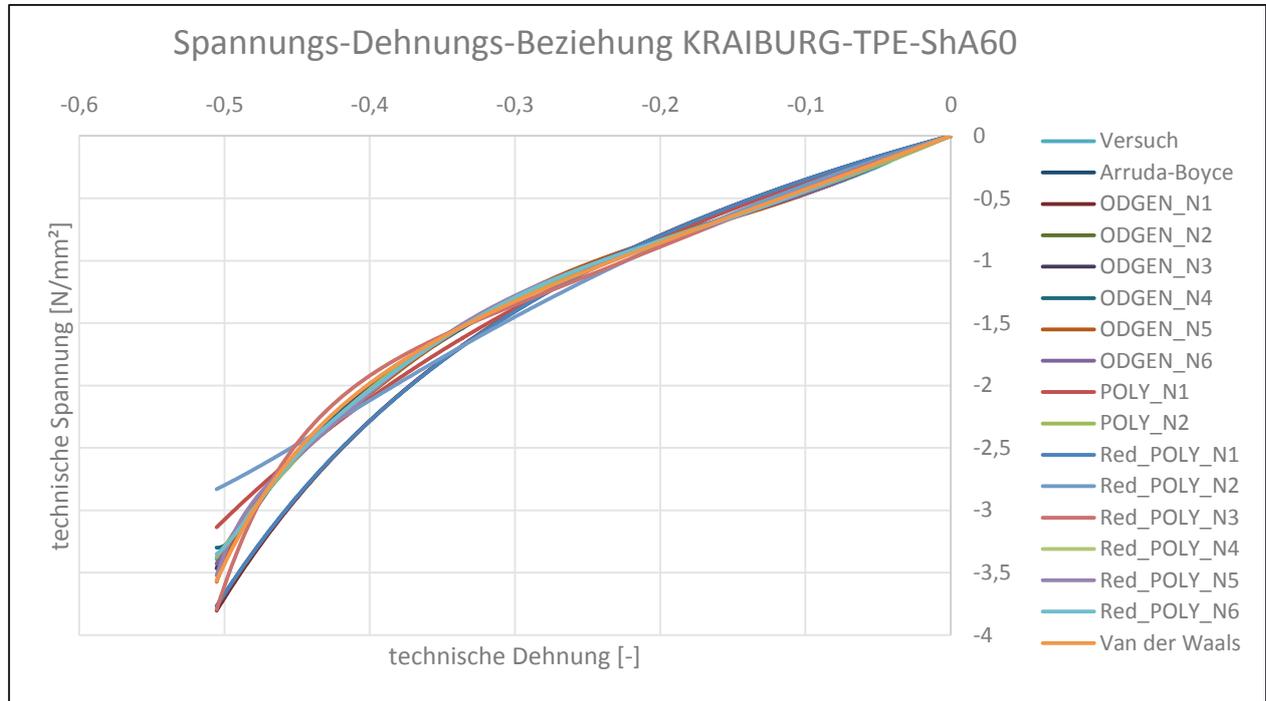
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,90600422	2,25225655											0
OGDEN_N2	1,86290318	4,92153658	-0,59671893	-2,75936647									0
OGDEN_N3	-3,07724714	1,08996154	4,48474216	2,90278193	-0,14606835	-3,86455131							0
OGDEN_N4	-0,86462309	1,99909972	2,73325022	3,99733943	-0,51765287	-1,99877062	-0,08643517	-4,00064543					0
OGDEN_N5	-3,97444094	2,00071244	8,01713105	4,00047959	-2,50095429	6,00027263	-0,32903602	-2,00042386	0,04364857	-4,00026764			0
OGDEN_N6	-19,6570665	2,00030524	29,4738011	4,00026704	-11,1864082	6,00028967	3,87408177	-1,99972357	-1,54469252	-3,99975345	0,28843189	-5,99963961	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,62989183	-0,13167939											0
POLY_N2	1,77332995	-1,13173026	0,61141769	-0,24123312	0,05505376								0
Red_POLY_N1	0,44986624												0
Red_POLY_N2	0,511718		-0,07141375										0
Red_POLY_N3	0,55164258		-0,21625024			0,09051864							0
Red_POLY_N4	0,57388018		-0,38335003			0,35692206	-0,11863533						0
Red_POLY_N5	0,58738037		-0,5575662			0,86336452	-0,64997341	0,18485074					0
Red_POLY_N6	0,59583785		-0,72556406			1,63012523	-2,03821023	1,27741219	-0,3123916				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,89973243	2625,48613											0
van der Waals	1,22094227	2,97271445	1,50097416	0									0

Material: TPE

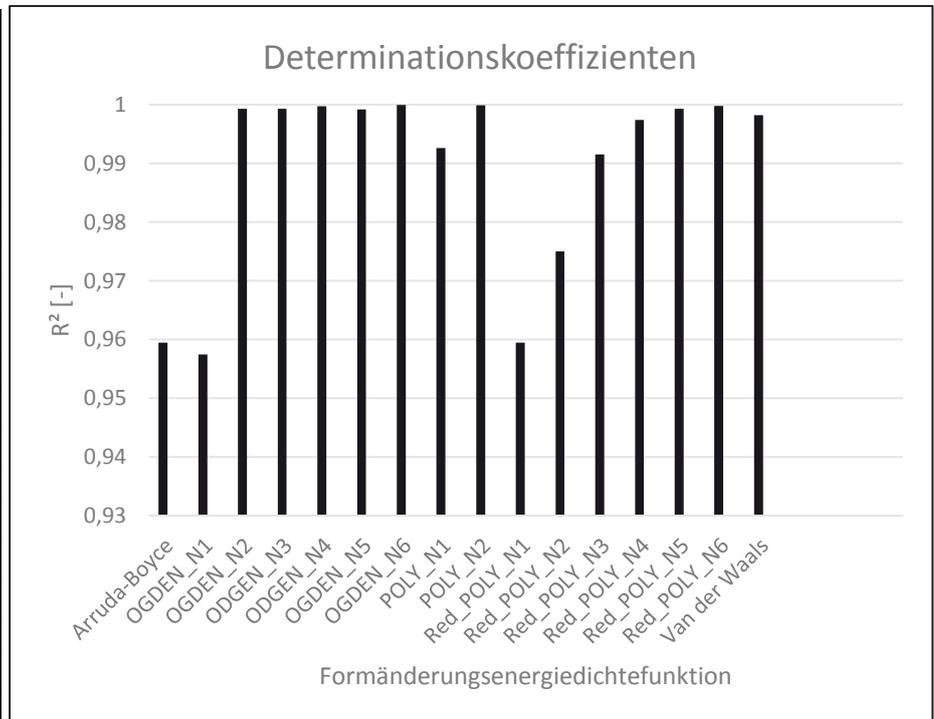
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: Sha60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,959466864
OGDEN_N1	0,957440364
OGDEN_N2	0,999338639
OGDEN_N3	0,999338313
OGDEN_N4	0,999753245
OGDEN_N5	0,999190477
OGDEN_N6	0,999956148
POLY_N1	0,992632682
POLY_N2	0,999914519
Red_POLY_N1	0,959466864
Red_POLY_N2	0,975017928
Red_POLY_N3	0,991531967
Red_POLY_N4	0,997426765
Red_POLY_N5	0,999303349
Red_POLY_N6	0,99979639
Van der Waals	0,998233179



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG
 Härte: ShA60
 Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie
 Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

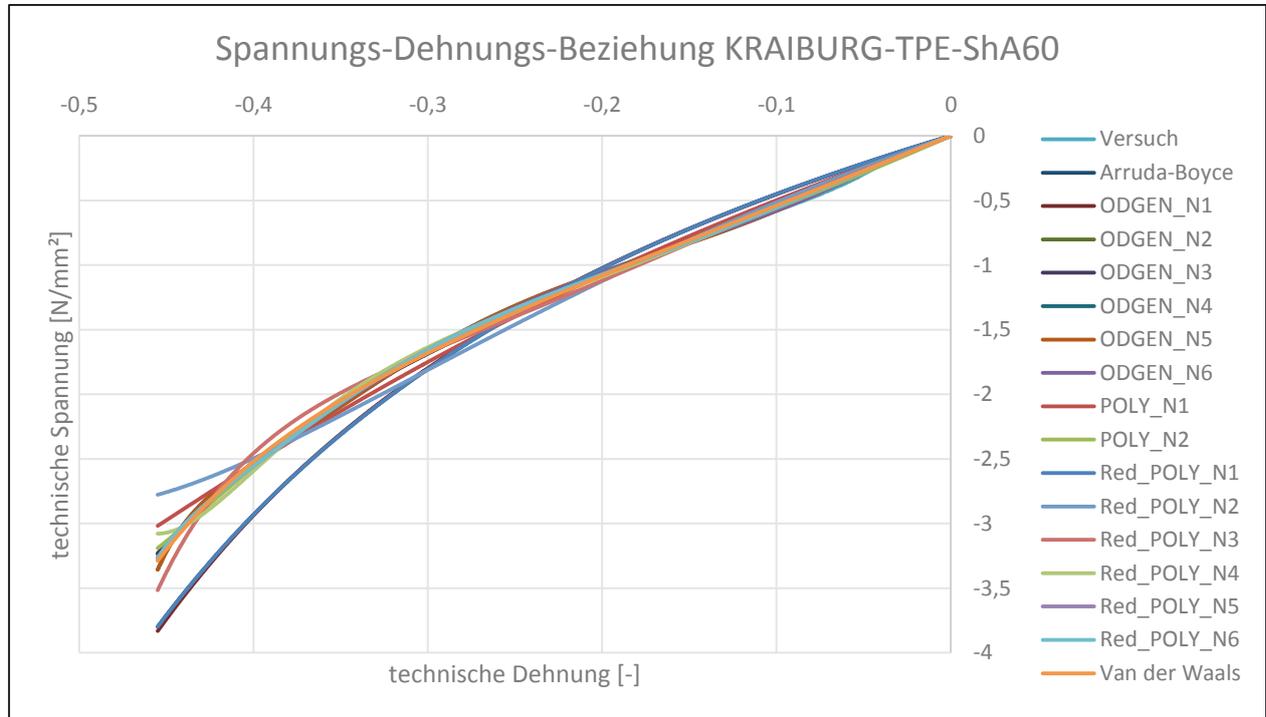
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,05661521	2,26892228											0
OGDEN_N2	8,69827742	1,84821226	-7,2274217	0,72612025									0
OGDEN_N3	4,10513276	1,82591668	4,97438952	1,82069482	-7,60868646	0,7527369							0
OGDEN_N4	16,7736299	18,2278608	-15,3512851	23,4317486	-9,2989941	-9,52702332	8,97635667	-11,6087098					0
OGDEN_N5	-60,5962379	17,1377621	90,1707768	17,1802786	-28,0027516	19,8152509	-25,6619375	-9,03940008	25,2205719	-9,70733508			0
OGDEN_N6	-191,595671	8,4420339	290,203593	11,3654534	-118,397818	15,0154665	47,1042661	-1,03558177	-59,4979523	-5,59055014	33,2635919	-7,88562983	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,70391019	-0,13229377											0
POLY_N2	2,80503999	-1,97008517	1,00873771	-0,26867598	0,03653315								0
Red_POLY_N1	0,52454675												0
Red_POLY_N2	0,59502305		-0,07806503										0
Red_POLY_N3	0,65284966		-0,27410652			0,11683104							0
Red_POLY_N4	0,68610044		-0,5071552			0,47121246	-0,15064759						0
Red_POLY_N5	0,70297315		-0,71267294			1,04141881	-0,72195445	0,18970875					0
Red_POLY_N6	0,70973299		-0,84198557			1,60562999	-1,69784103	0,92296162	-0,200043				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,04909343	2624,42699											0
van der Waals	1,44905372	2,90540776	1,57354276	0									0

Material: TPE

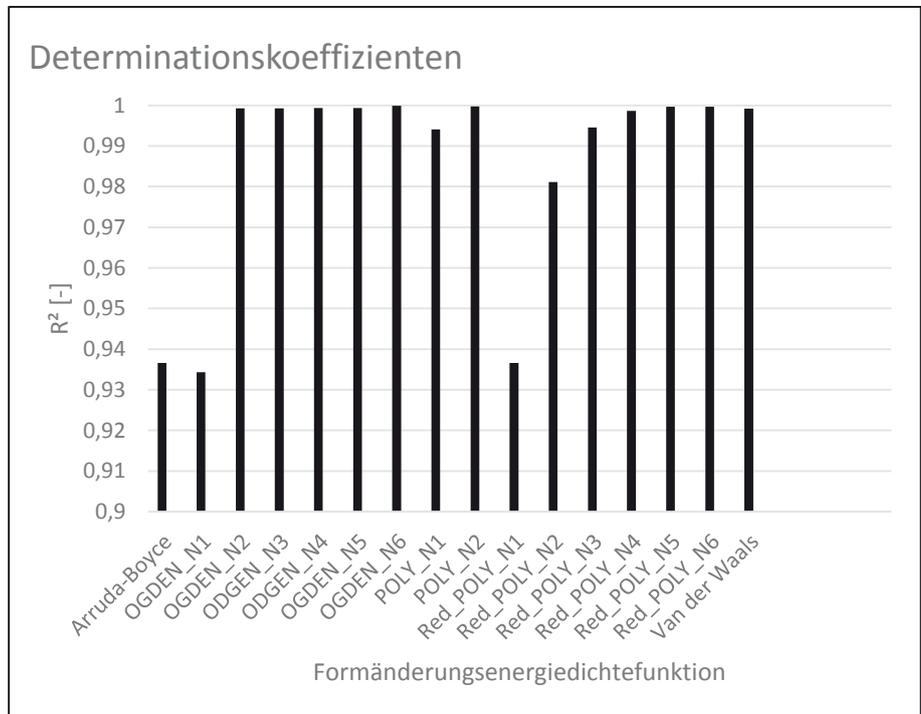
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,936569202
OGDEN_N1	0,934315437
OGDEN_N2	0,999294407
OGDEN_N3	0,999293515
OGDEN_N4	0,999364744
OGDEN_N5	0,99932944
OGDEN_N6	0,999906641
POLY_N1	0,994108999
POLY_N2	0,999739423
Red_POLY_N1	0,936569189
Red_POLY_N2	0,981095393
Red_POLY_N3	0,994603414
Red_POLY_N4	0,998640141
Red_POLY_N5	0,999639363
Red_POLY_N6	0,999655311
Van der Waals	0,999178184



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

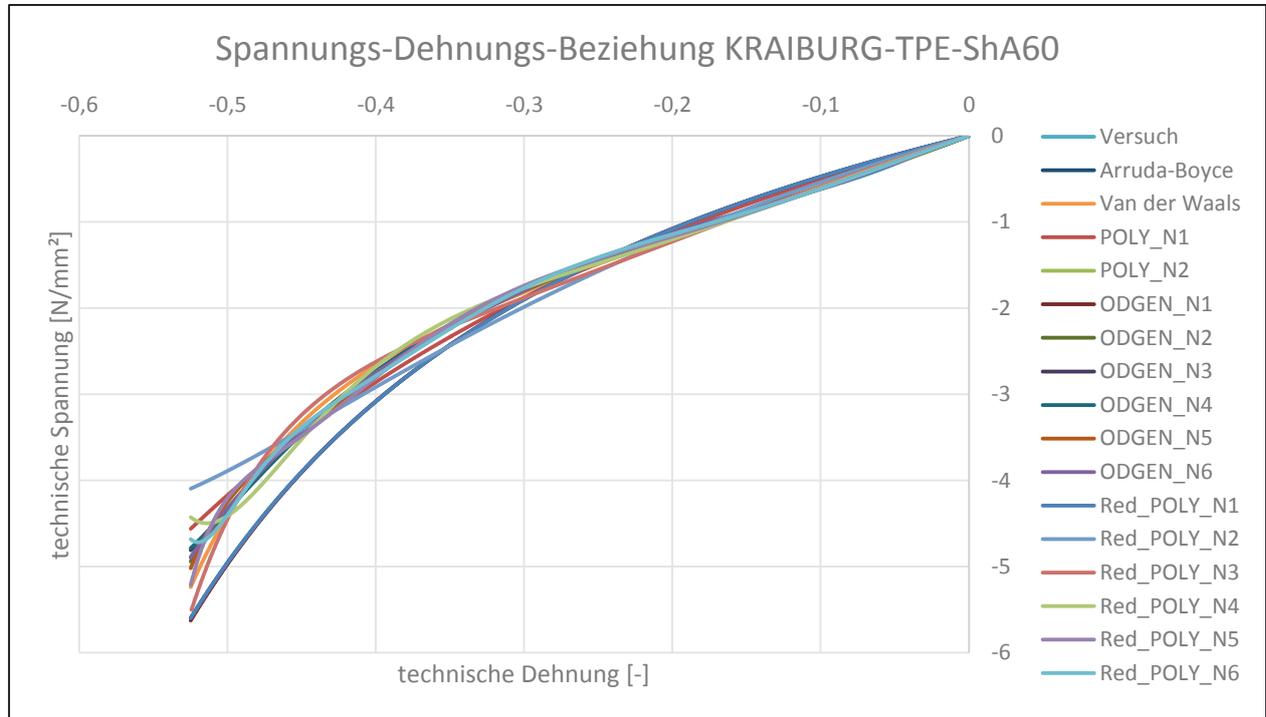
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,36308619	2,44456528											0
OGDEN_N2	11,817745	1,65540494	-9,99484091	0,72207509									0
ODGEN_N3	5,55215851	1,72970261	4,70890288	1,73343748	-8,43808488	0,64105704							0
ODGEN_N4	24,2077017	7,66275299	-13,7013334	14,444055	-12,4338494	0,28064908	3,41997781	-8,02304797					0
OGDEN_N5	-104,415654	3,97184302	179,203131	6,44968558	-81,1268162	9,34463832	3,9492292	0,61180311	3,88899259	-6,7614627			0
OGDEN_N6	-415,888995	6,49633803	576,476943	8,98875284	-237,762924	11,4981775	106,701751	1,37481928	-55,7820498	-4,09391481	27,6899678	-6,6147766	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	1,06643938	-0,28971261											0
POLY_N2	2,53838899	-1,55116748	-1,25532732	2,21870895	-0,72344969								0
Red_POLY_N1	0,67313934												0
Red_POLY_N2	0,77842538		-0,14809295										0
Red_POLY_N3	0,83877532		-0,41851183			0,2117576							0
Red_POLY_N4	0,86870064		-0,7023553			0,78159284	-0,320069						0
Red_POLY_N5	0,88014645		-0,8943271			1,48808285	-1,25667829	0,41181677					0
Red_POLY_N6	0,8804352		-0,90201908			1,53272551	-1,35896099	0,51361333	-3,68E-02				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,34627852	1907,5445											0
van der Waals	1,81904125	2,92466141	1,54623667	0									0

Material: TPE

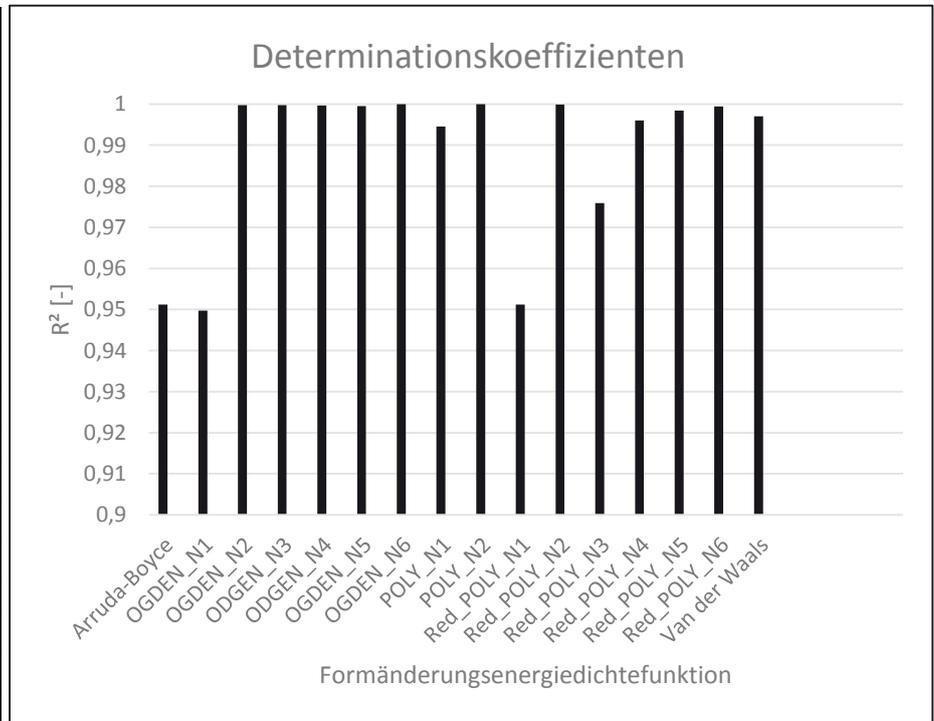
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,951164749
OGDEN_N1	0,949697186
OGDEN_N2	0,999770558
OGDEN_N3	0,999764291
OGDEN_N4	0,999686873
OGDEN_N5	0,999513532
OGDEN_N6	0,99998762
POLY_N1	0,994573255
POLY_N2	0,99996417
Red_POLY_N1	0,951164749
Red_POLY_N2	0,999912349
Red_POLY_N3	0,975921827
Red_POLY_N4	0,995999798
Red_POLY_N5	0,998389929
Red_POLY_N6	0,999426587
van der Waals	0,996984378



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: Sha60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

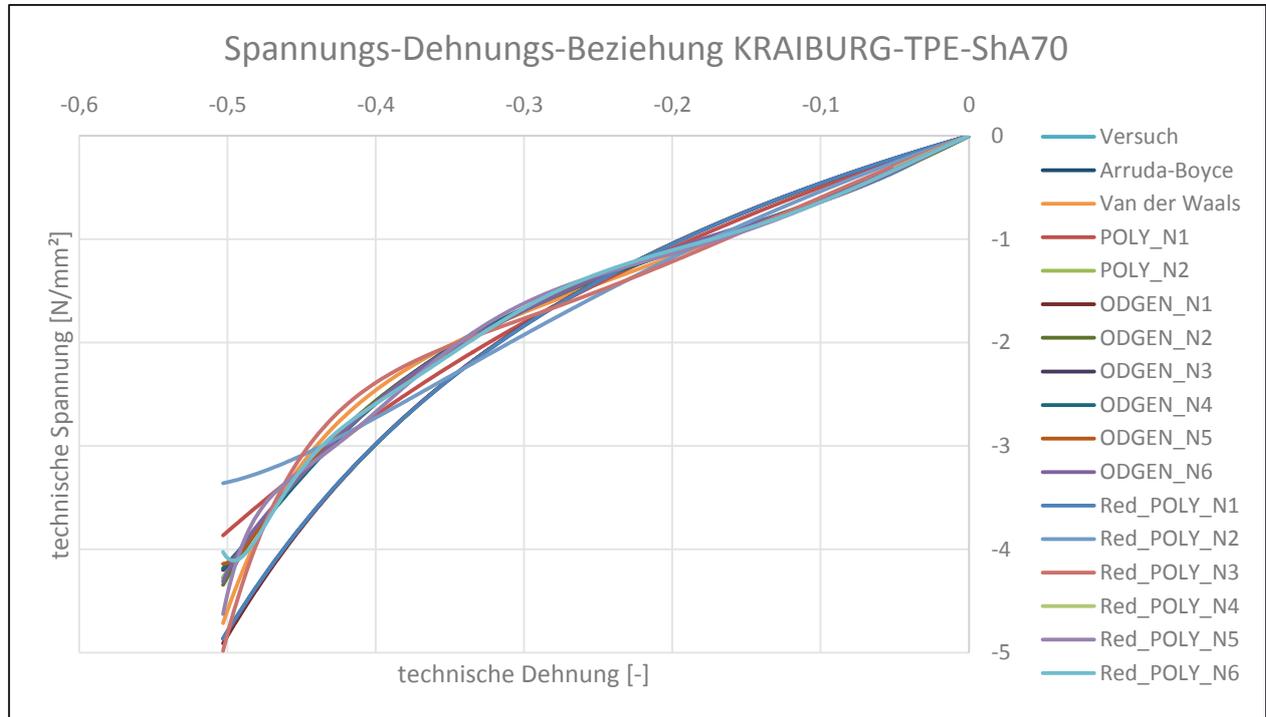
	μ_{11}	α_{11}	μ_{12}	α_{12}	μ_{13}	α_{13}	μ_{14}	α_{14}	μ_{15}	α_{15}	μ_{16}	α_{16}	D
OGDEN_N1	1,42068435	2,1343625											0
OGDEN_N2	3,22266259	5,40186388	-1,09193039	-2,99539995									0
OGDEN_N3	-10,5612081	0,98533369	12,6990868	2,26399513	-2,38E-02	-6,71612575							0
OGDEN_N4	-16,0523107	-0,41246179	13,2976969	1,5458515	6,39222784	-2,40080076	-1,53212994	-3,79853558					0
OGDEN_N5	-24,6096226	4,39884808	48,4146929	6,80805456	-21,1999249	10,3485184	-3,93248172	-3,43980635	3,29403223	-6,11674859			0
OGDEN_N6	-113,145193	7,20008496	166,413997	10,569693	-69,3118659	14,5173422	37,0050788	-0,711170419	-43,3452833	-5,28110098	24,2200488	-7,493341405	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,95944827	-0,18179147											0
POLY_N2	4,08093089	-2,93516806	2,28850561	-1,26561824	0,29764509								0
Red_POLY_N1	0,70781633												0
Red_POLY_N2	0,81134843		-0,10228719										0
Red_POLY_N3	0,88984544		-0,33984031			0,12648546							0
Red_POLY_N4	0,94177144		-0,66067774			0,56167734	-0,16546615						0
Red_POLY_N5	0,97552343		-1,01767412			1,44407776	-0,955592446	0,23499779					0
Red_POLY_N6	0,99617654		-1,35548317			2,75499223	-2,98244328	1,59804117	-0,33313713				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,41563258	2754,94942											0
van der Waals	2,01034262	2,98329271	1,55123653	0									0

Material: TPE

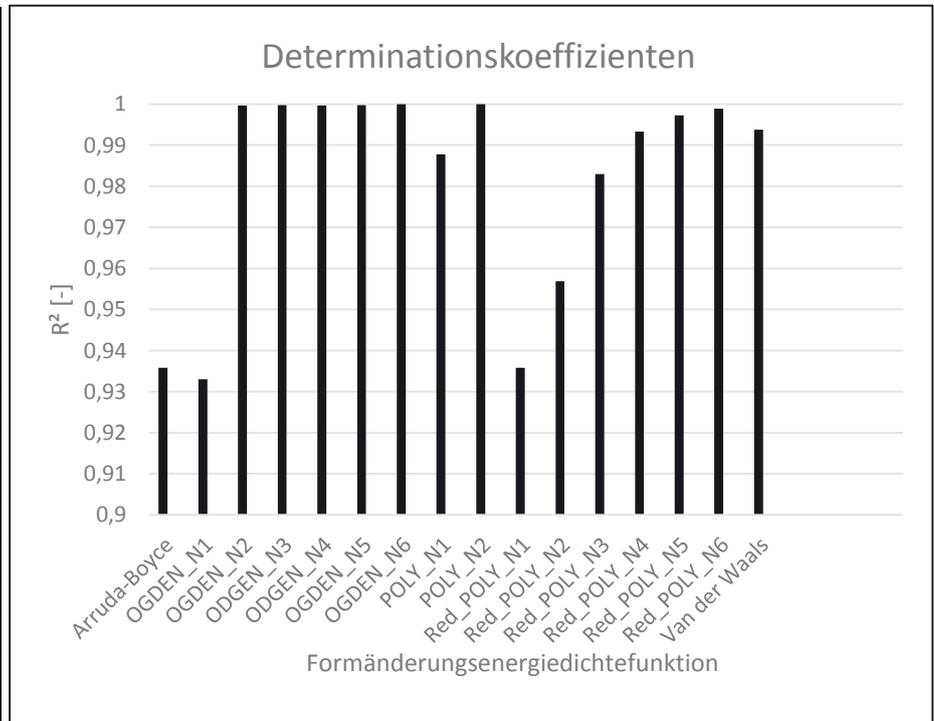
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,935783445
OGDEN_N1	0,932991363
OGDEN_N2	0,999688348
OGDEN_N3	0,999757357
OGDEN_N4	0,999692691
OGDEN_N5	0,999771313
OGDEN_N6	0,999954614
POLY_N1	0,987780324
POLY_N2	0,999966796
Red_POLY_N1	0,935783445
Red_POLY_N2	0,956905022
Red_POLY_N3	0,982964064
Red_POLY_N4	0,993310328
Red_POLY_N5	0,997236867
Red_POLY_N6	0,998863113
van der Waals	0,9937453



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

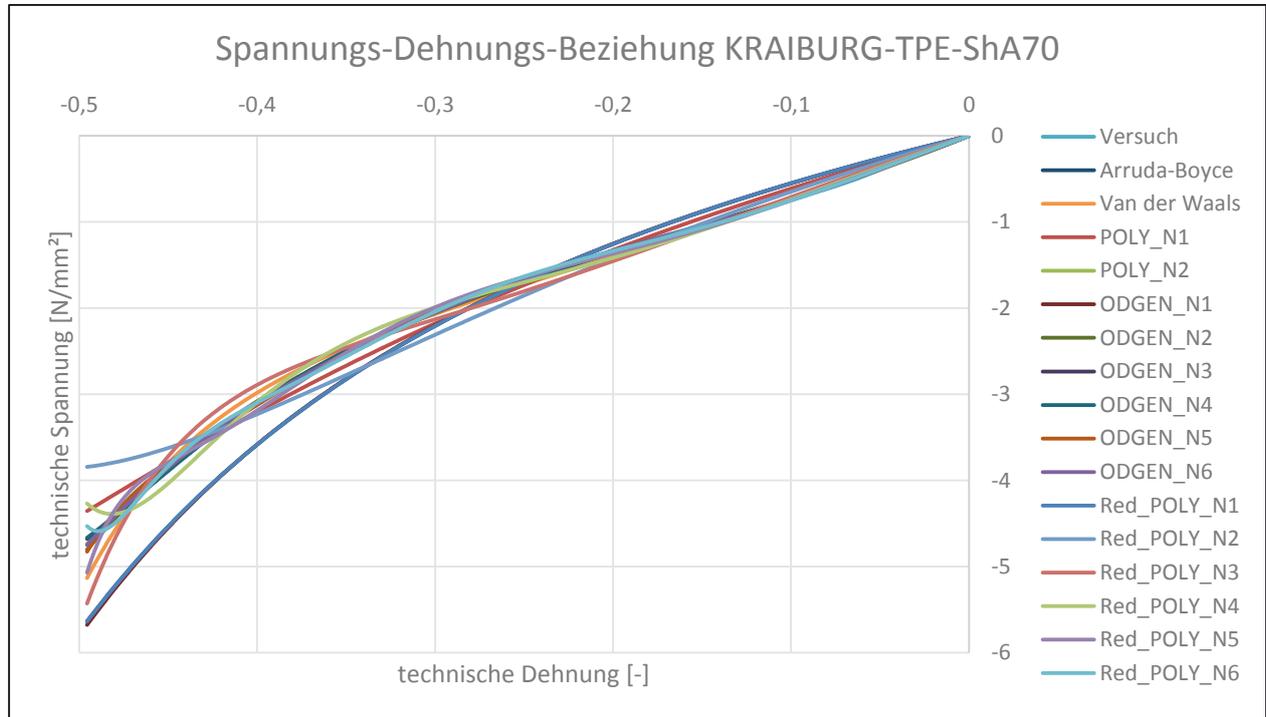
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,37977608	2,27790254											0
OGDEN_N2	3,85286882	6,42943117	-1,49109657	-3,39736832									0
OGDEN_N3	-10,2611601	0,92666226	12,6641419	2,78357905	-6,88E-02	-6,16317855							0
OGDEN_N4	-16,457691	-0,14090537	14,48575	2,1358383	5,96927138	-2,41905611	-1,67136185	-3,87694046					0
OGDEN_N5	-30,2638321	14,5787035	48,7661758	15,376192	-15,4113109	21,815732	-12,9004534	-9,02637571	11,858112	-10,6360199			0
OGDEN_N6	-143,074914	8,37243217	205,347678	11,9450053	-80,6489627	16,5904322	42,9546559	-0,85066561	-52,0555535	-6,0597348	29,471927	-8,53165259	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,98799637	-0,22057096											0
POLY_N2	5,23771744	-3,97639084	3,14208572	-1,74506083	0,41424153								0
Red_POLY_N1	0,68470761												0
Red_POLY_N2	0,80923851		-0,13224041										0
Red_POLY_N3	0,92148588		-0,48862031			0,21085868							0
Red_POLY_N4	0,99570124		-0,96780222			0,92966922	-0,30574864						0
Red_POLY_N5	1,04293494		-1,48987213			2,35179761	-1,72773208	0,47420195					0
Red_POLY_N6	1,07296969		-2,00386483			4,54598888	-5,50756168	3,32250452	-0,78203435				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,36941509	2073,46465											0
van der Waals	2,15718548	2,73701152	1,90843763	0									0

Material: TPE

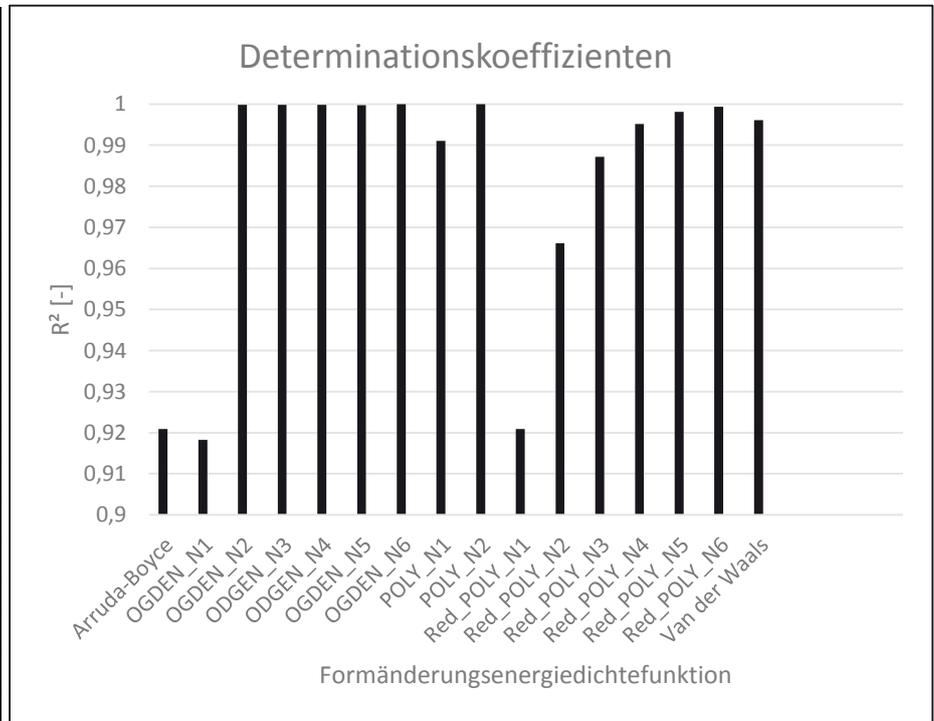
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,920884104
OGDEN_N1	0,918290101
OGDEN_N2	0,999790951
OGDEN_N3	0,999820729
OGDEN_N4	0,999781621
OGDEN_N5	0,999763161
OGDEN_N6	0,999987048
POLY_N1	0,991035697
POLY_N2	0,999959702
Red_POLY_N1	0,920884104
Red_POLY_N2	0,966128127
Red_POLY_N3	0,987154444
Red_POLY_N4	0,995136883
Red_POLY_N5	0,998091679
Red_POLY_N6	0,999335005
van der Waals	0,9960601



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG
Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

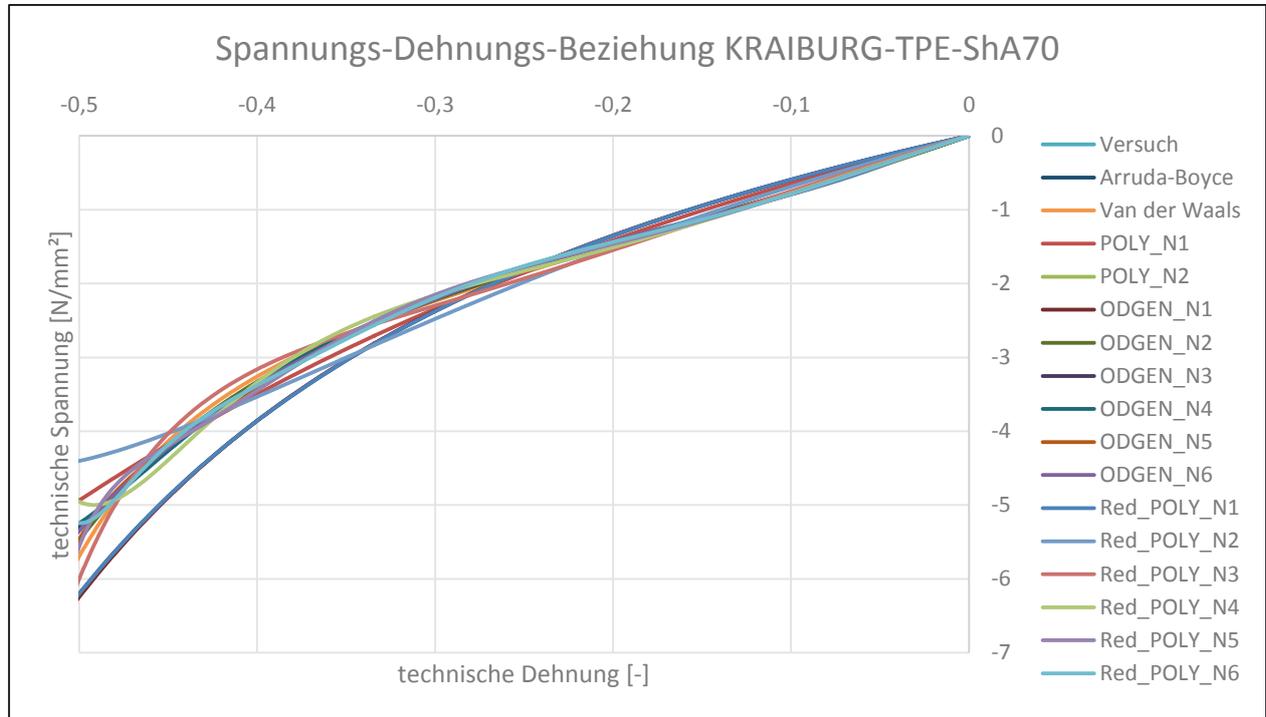
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,65638908	2,2427636											0
OGDEN_N2	4,29195524	5,98549604	-1,58755479	-3,23911868									0
ODGEN_N3	-11,8729041	0,91818593	14,6044287	2,59511183	-5,44E-02	-6,5599893							0
ODGEN_N4	-15,7455388	-0,22567945	14,4284988	2,13609621	4,94539256	-2,4217321	-0,95870566	-4,34657693					0
OGDEN_N5	-27,7801781	4,46217444	52,8127166	6,82353276	-21,509846	10,4511719	-3,49047107	-3,14621232	2,51608916	-6,46534348			0
OGDEN_N6	-135,88607	6,8317987	196,482878	9,61696641	-78,0238324	12,9425659	38,5981876	-0,24186726	-39,547415	-4,69326386	20,8467692	-6,84641078	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	1,26611736	-0,31799747											0
POLY_N2	5,22778449	-3,8138659	2,6339479	-1,29144749	0,28971965								0
Red_POLY_N1	0,82262135												0
Red_POLY_N2	0,98033077		-0,17202846										0
Red_POLY_N3	1,09569655		-0,55829572			0,23722754							0
Red_POLY_N4	1,16944177		-1,06622357			1,03087706	-0,35090191						0
Red_POLY_N5	1,21504867		-1,60745456			2,57148531	-1,95427766	0,55615019					0
Red_POLY_N6	1,24301092		-2,1227939			4,87466898	-6,08828359	3,7981269	-0,9261268				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,64524276	2092,00767											0
van der Waals	2,52245176	2,79953205	1,81124411	0									0

Material: TPE

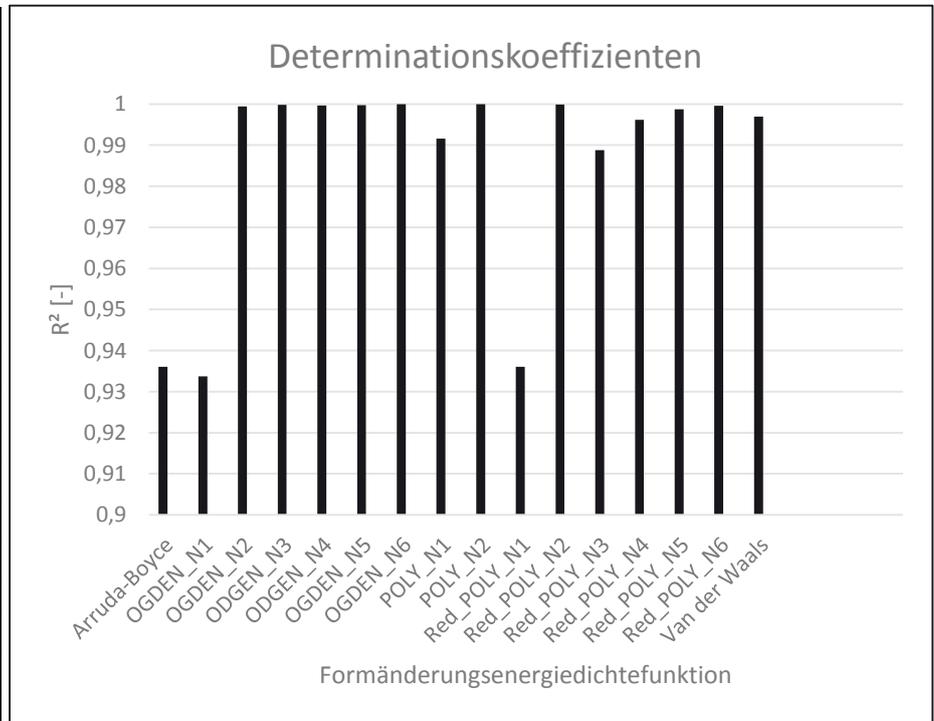
Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,936049058
OGDEN_N1	0,93370416
OGDEN_N2	0,999466267
OGDEN_N3	0,999797721
OGDEN_N4	0,999647153
OGDEN_N5	0,999741524
OGDEN_N6	0,999991329
POLY_N1	0,991556114
POLY_N2	0,999951231
Red_POLY_N1	0,936049058
Red_POLY_N2	0,999896219
Red_POLY_N3	0,988784381
Red_POLY_N4	0,996143926
Red_POLY_N5	0,998692497
Red_POLY_N6	0,999603606
van der Waals	0,996976005



Material: TPE Hersteller: KRAIBURG Holding GmbH & Co. KG
Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,78312141	2,2343117											0
OGDEN_N2	4,658104	4,71048524	-1,9163778	-2,24447366									0
OGDEN_N3	-17,9655594	0,93302626	20,7025777	1,99777141	-1,77E-03	-10,6664317							0
OGDEN_N4	-18,4885844	-1,08065355	15,4647997	1,21002076	6,38676733	-3,10572556	-0,65158777	-5,44083853					0
OGDEN_N5	-51,5982118	9,58259263	81,7185148	10,5193242	-26,1233202	14,4731096	-22,1004008	-6,37380018	20,5833583	-7,16582467			0
OGDEN_N6	-182,723252	7,3010687	272,303632	10,0716463	-110,967939	13,3853656	48,1218032	-0,43972259	-53,3022573	-4,9070808	28,9724826	-7,08744382	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	1,29263649	-0,29368009											0
POLY_N2	5,04649985	-3,58151349	1,94530072	-0,64036782	0,11210204								0
Red_POLY_N1	0,88587589												0
Red_POLY_N2	1,03776938		-0,16352765										0
Red_POLY_N3	1,15340934		-0,54500906			0,22750975							0
Red_POLY_N4	1,22437277		-1,02763337			0,96050609	-0,31362606						0
Red_POLY_N5	1,26549227		-1,5108618			2,29782919	-1,66093922	0,45149043					0
Red_POLY_N6	1,28834815		-1,929244			4,11616264	-4,82074279	2,84583457	-0,6601549				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,77175185	2064,6796											0
van der Waals	2,62522212	2,84316964	1,72501212	0									0

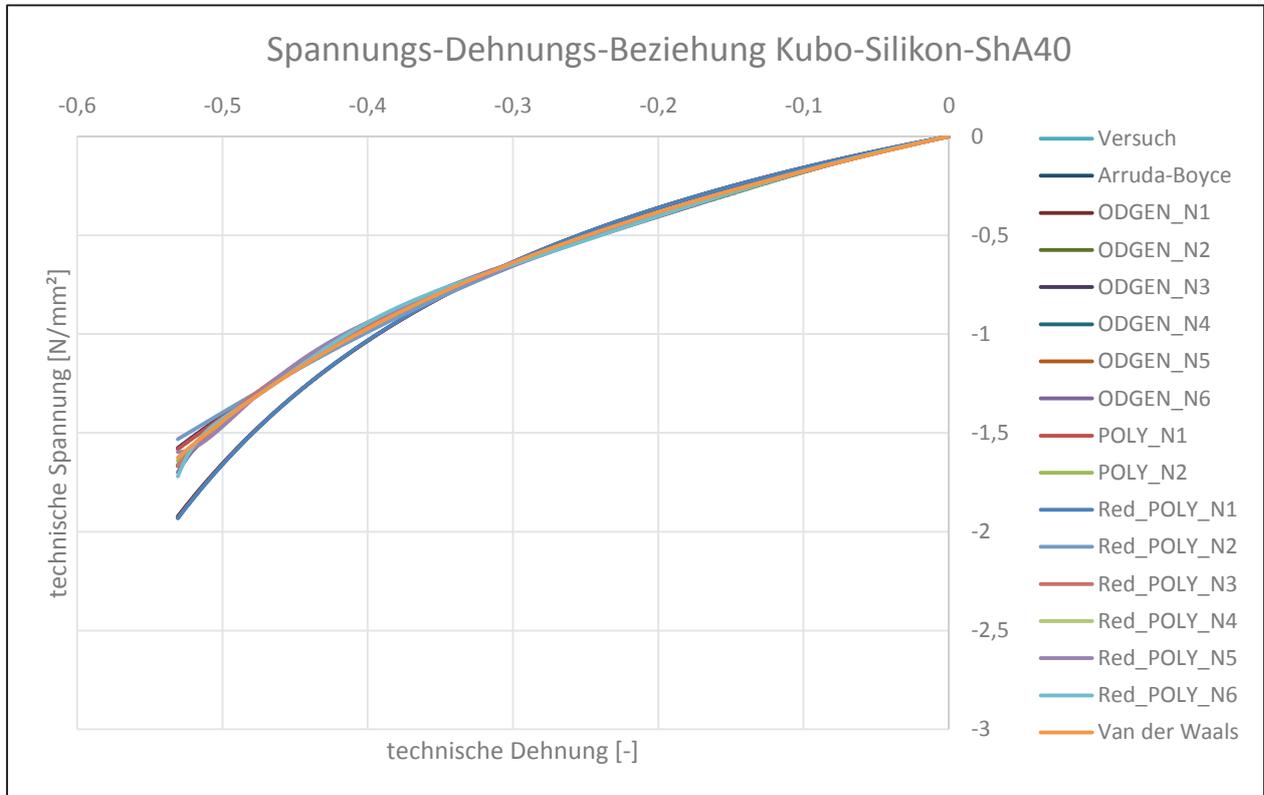
11.8 Erstellte Materialmodelle für Silikon aus dem uniaxialen Druckversuch

Material: Silikon

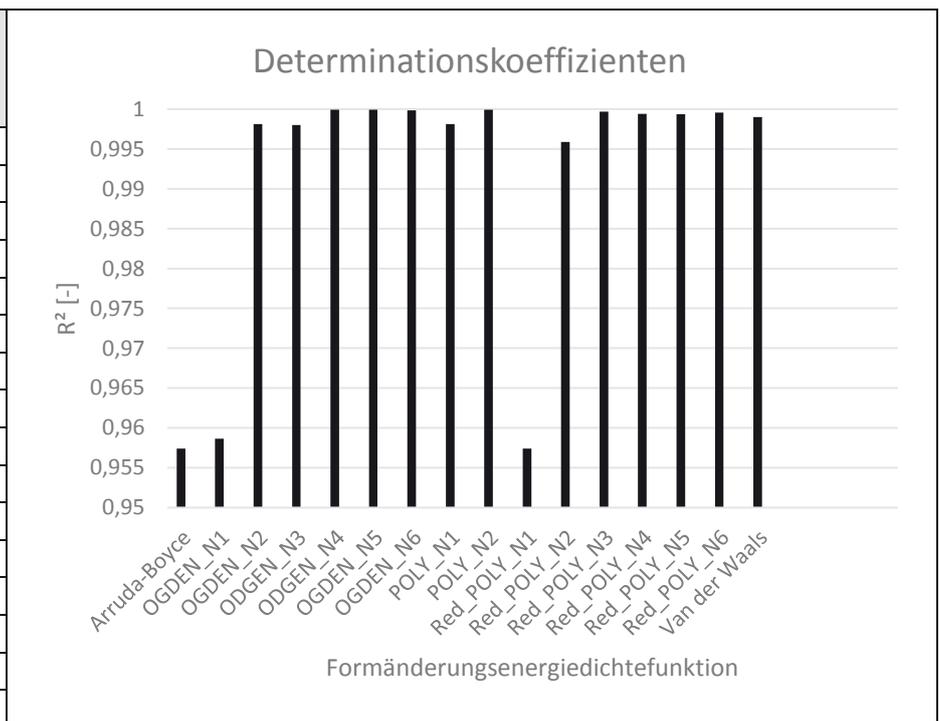
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA40

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,957411462
ODGEN_N1	0,958621386
ODGEN_N2	0,998123213
ODGEN_N3	0,998021589
ODGEN_N4	0,999936592
ODGEN_N5	0,999931759
ODGEN_N6	0,999862875
POLY_N1	0,99810851
POLY_N2	0,999922658
Red_POLY_N1	0,957411423
Red_POLY_N2	0,995871837
Red_POLY_N3	0,999681648
Red_POLY_N4	0,999395755
Red_POLY_N5	0,999372559
Red_POLY_N6	0,999573058
Van der Waals	0,999019336



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA40

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

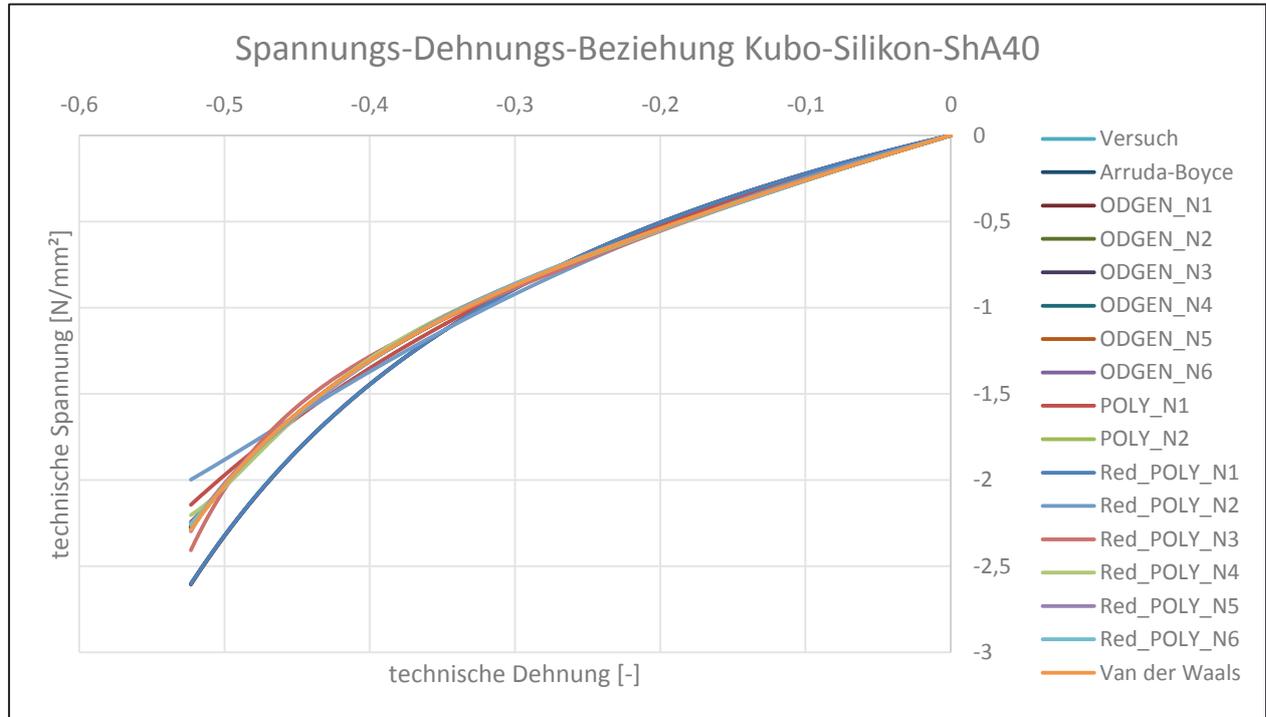
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,4721328	1,847473											0
OGDEN_N2	2,58048452	0,57370995	-2,04499304	0,04069582									0
OGDEN_N3	6,62279919	1,6684	-2,72702762	2,38982782	-3,36260886	0,97569658							0
OGDEN_N4	10,8627912	2,03116802	-4,08564952	4,74839692	-11,384945	-0,25918641	5,09866478	-1,54779186					0
OGDEN_N5	-4,40804559	0,29316243	9,87003223	2,67525913	-5,06504549	4,78992356	-2,10196575	-0,7499057	2,19575075	-2,16045078			0
OGDEN_N6	11,4642305	3,74901175	-11,0842367	9,58694877	4,59446793	15,1505321	-7,96429093	-1,15765685	6,63131161	-5,0313846	-3,11851543	-7,33287998	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,33536447	-0,06618894											0
POLY_N2	-0,19840807	0,44065944	-1,00913991	0,8221189	-0,20655015								0
Red_POLY_N1	0,23708644												0
Red_POLY_N2	0,26163392		-0,02480823										0
Red_POLY_N3	0,26753295		-0,04487988			0,01061019							0
Red_POLY_N4	0,26595687		-0,03326631			-0,00516424	0,00587328						0
Red_POLY_N5	0,26246563		0,01178691			-0,11713753	0,10423058	-0,028465					0
Red_POLY_N6	0,25897875		0,08120282			-0,38864801	0,51636993	-0,29850924	0,06409012				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,47417289	2633,97131											0
van der Waals	0,54892059	91,7060297	0,33235055	0									0

Material: Silikon

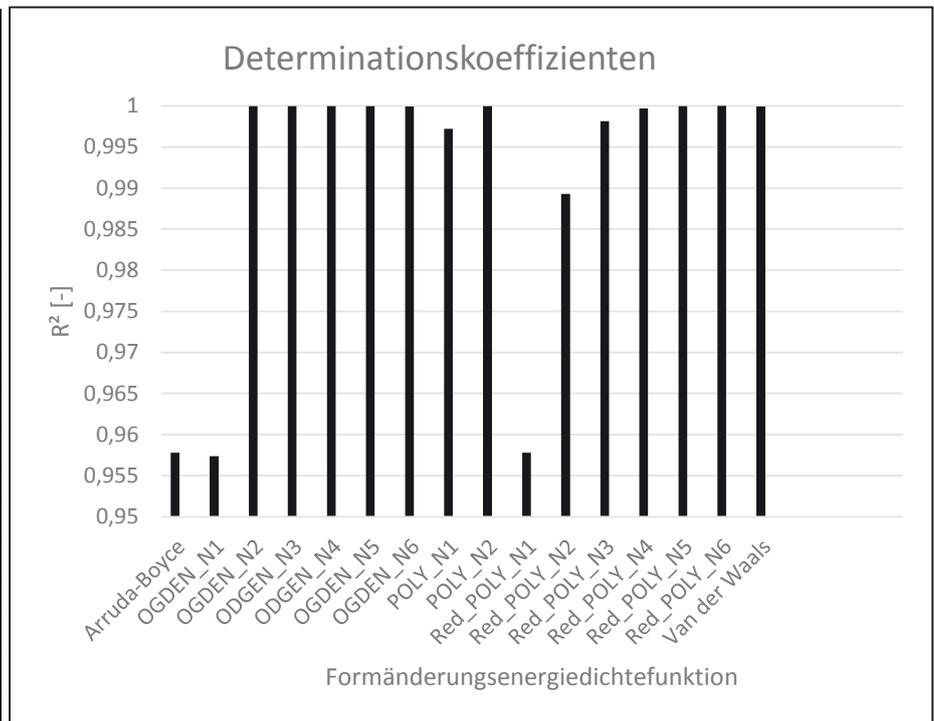
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA40

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,95779203
OGDEN_N1	0,957378724
OGDEN_N2	0,999953784
OGDEN_N3	0,999953827
OGDEN_N4	0,999974865
OGDEN_N5	0,999971445
OGDEN_N6	0,99993458
POLY_N1	0,997214356
POLY_N2	0,999973092
Red_POLY_N1	0,95779203
Red_POLY_N2	0,989282974
Red_POLY_N3	0,998153251
Red_POLY_N4	0,999682574
Red_POLY_N5	0,99995313
Red_POLY_N6	0,99999105
Van der Waals	0,999927696



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA40

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

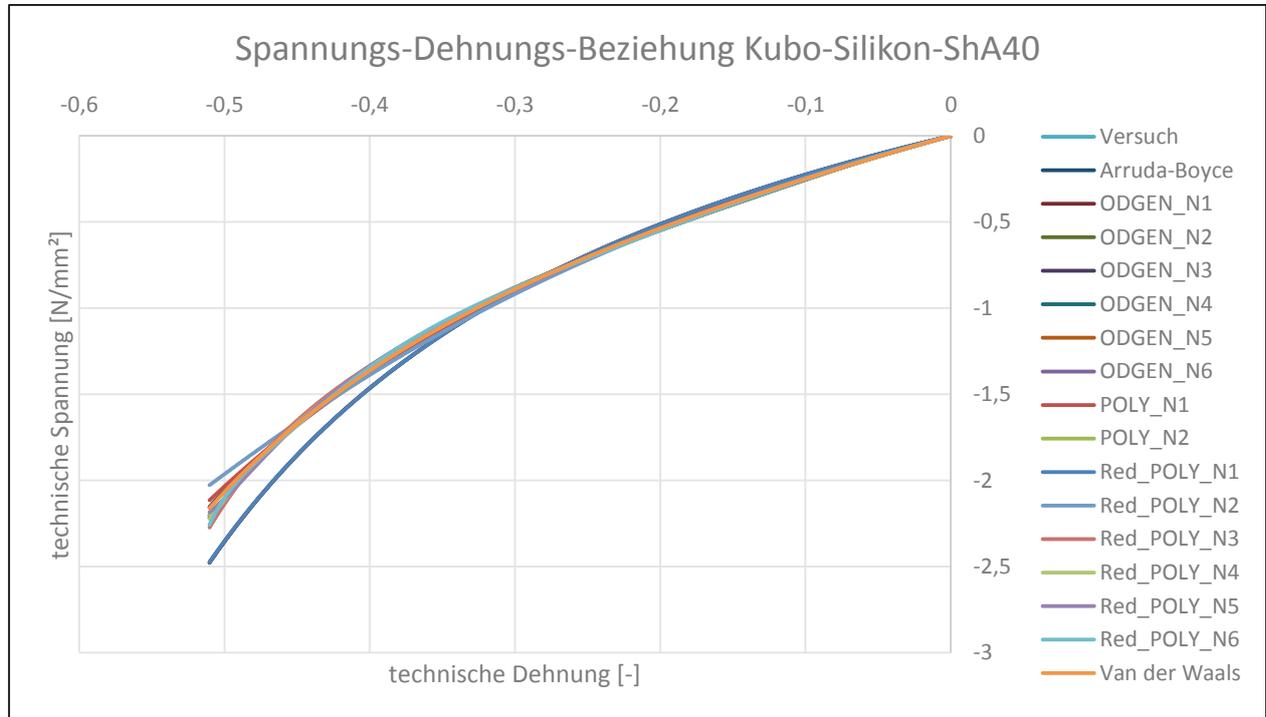
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,66466169	2,04503581											0
OGDEN_N2	3,20522595	1,6615286	-2,36180704	0,37869559									0
OGDEN_N3	3,21290404	1,67276748	-0,00909035	4,07590316	-2,36040233	0,38442767							0
OGDEN_N4	4,48146961	2,95965093	-1,70539106	5,0925647	-2,39580498	-0,00224898	0,45252992	-2,41370635					0
OGDEN_N5	-1,96891116	1,9989416	5,43328584	3,99868195	-2,40987702	5,99907091	-0,44171851	-1,99846687	0,21933199	-3,99650156			0
OGDEN_N6	7,23891365	2,00111659	-7,59815861	4,00100804	3,00039814	6,00069466	-2,59572022	-1,99856059	0,92978119	-3,99869677	-0,13687183	-5,99845255	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,45271477	-0,08548531											0
POLY_N2	0,58645967	-0,1741272	-0,44445182	0,48501112	-0,12737084								0
Red_POLY_N1	0,33192457												0
Red_POLY_N2	0,37198789		-0,0412148										0
Red_POLY_N3	0,39264005		-0,10941227			0,03719788							0
Red_POLY_N4	0,40122688		-0,16901328			0,12039613	-0,03215853						0
Red_POLY_N5	0,40471682		-0,21086762			0,22703221	-0,12931234	0,02925795					0
Red_POLY_N6	0,40599819		-0,23449311			0,32154387	-0,27794084	0,13053455	-0,02503412				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,6638491	2668,26938											0
van der Waals	0,84242882	3,49904687	1,12899489	0									0

Material: Silikon

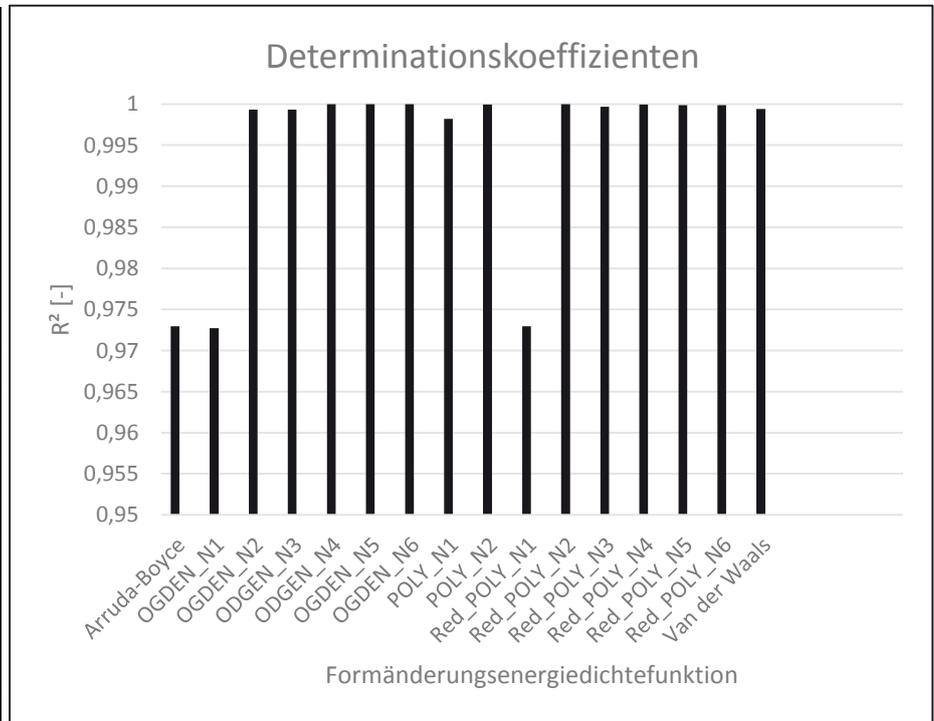
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA40

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch, rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,972945357
OGDEN_N1	0,972716586
OGDEN_N2	0,999345758
OGDEN_N3	0,999329616
OGDEN_N4	0,999980205
OGDEN_N5	0,999988465
OGDEN_N6	0,999972289
POLY_N1	0,998198136
POLY_N2	0,999961398
Red_POLY_N1	0,972945357
Red_POLY_N2	0,999999844
Red_POLY_N3	0,999663222
Red_POLY_N4	0,999939564
Red_POLY_N5	0,99988361
Red_POLY_N6	0,999878686
van der Waals	0,999398392



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA40

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch, rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

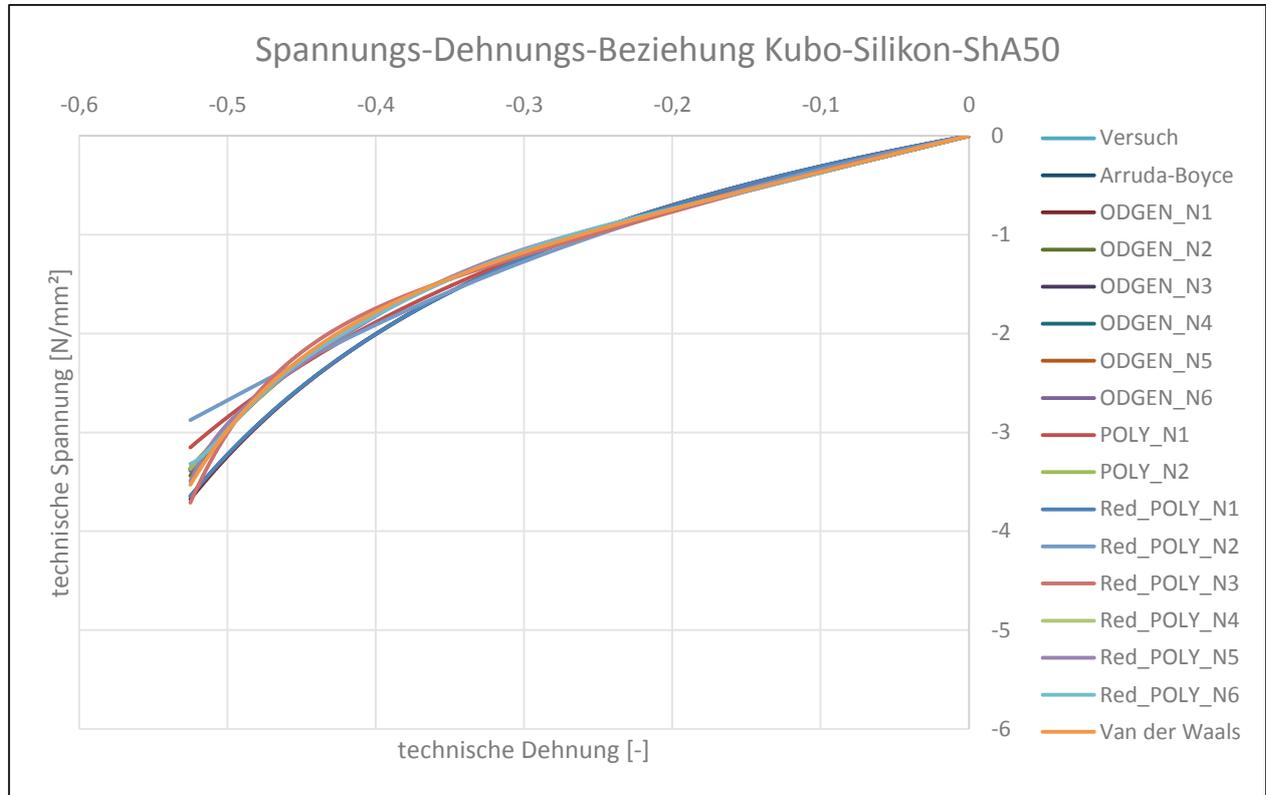
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,67322567	2,04482996											0
OGDEN_N2	3,45176211	1,16518904	-2,6757278	0,44131965									0
OGDEN_N3	8,77530612	1,77950491	-3,01996729	2,48995098	-4,98027993	1,07075017							0
OGDEN_N4	6,18709375	3,27199306	-2,95314218	6,63308515	-4,44938041	-0,702065	1,94314253	-2,82608586					0
OGDEN_N5	-8,03315051	1,99801805	16,8004656	3,99809813	-8,48860777	5,99790348	-0,25509401	-1,99967379	0,70208443	-3,99662054			0
OGDEN_N6	-3,44955612	1,9996329	10,4553427	3,99937096	-5,89954692	5,9991042	-1,42226865	-1,9995611	1,12141147	-3,99926652	-0,07728115	-5,99958527	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,44537503	-0,0773598											0
POLY_N2	0,1456719	0,22538134	-1,01623463	0,93606781	-0,24592247								0
Red_POLY_N1	0,3361918												0
Red_POLY_N2	0,36605974		-0,03423202										0
Red_POLY_N3	0,37815074		-0,07962132			0,02691237							0
Red_POLY_N4	0,38015262		-0,09560019			0,05121754	-0,01015291						0
Red_POLY_N5	0,37879902		-0,07682728			-0,00098737	0,04129599	-0,01670673					0
Red_POLY_N6	0,37649856		-0,02765384			-0,21601074	0,40739703	-0,28586022	0,07166226				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,67238356	2456,83585											0
van der Waals	0,7800483	5,05196174	0,69741713	0									0

Material: Silikon

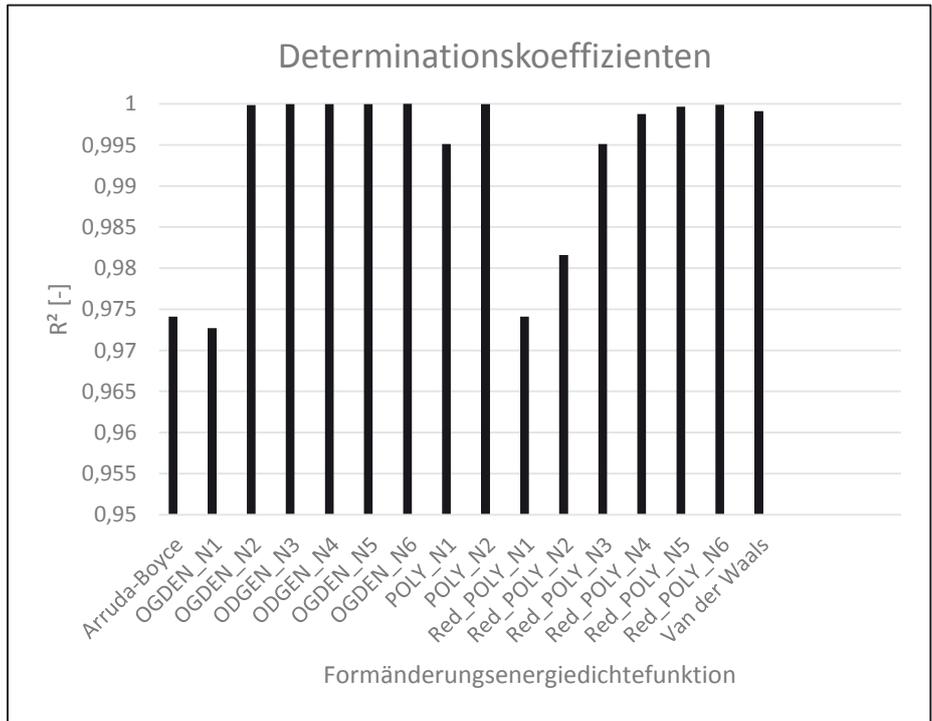
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,974112957
ODGEN_N1	0,972713639
ODGEN_N2	0,999854476
ODGEN_N3	0,999975703
ODGEN_N4	0,999975659
ODGEN_N5	0,999982121
ODGEN_N6	0,999996215
POLY_N1	0,995128403
POLY_N2	0,999985568
Red_POLY_N1	0,974112957
Red_POLY_N2	0,981588044
Red_POLY_N3	0,995112362
Red_POLY_N4	0,998746672
Red_POLY_N5	0,999664437
Red_POLY_N6	0,999895418
Van der Waals	0,999102182



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

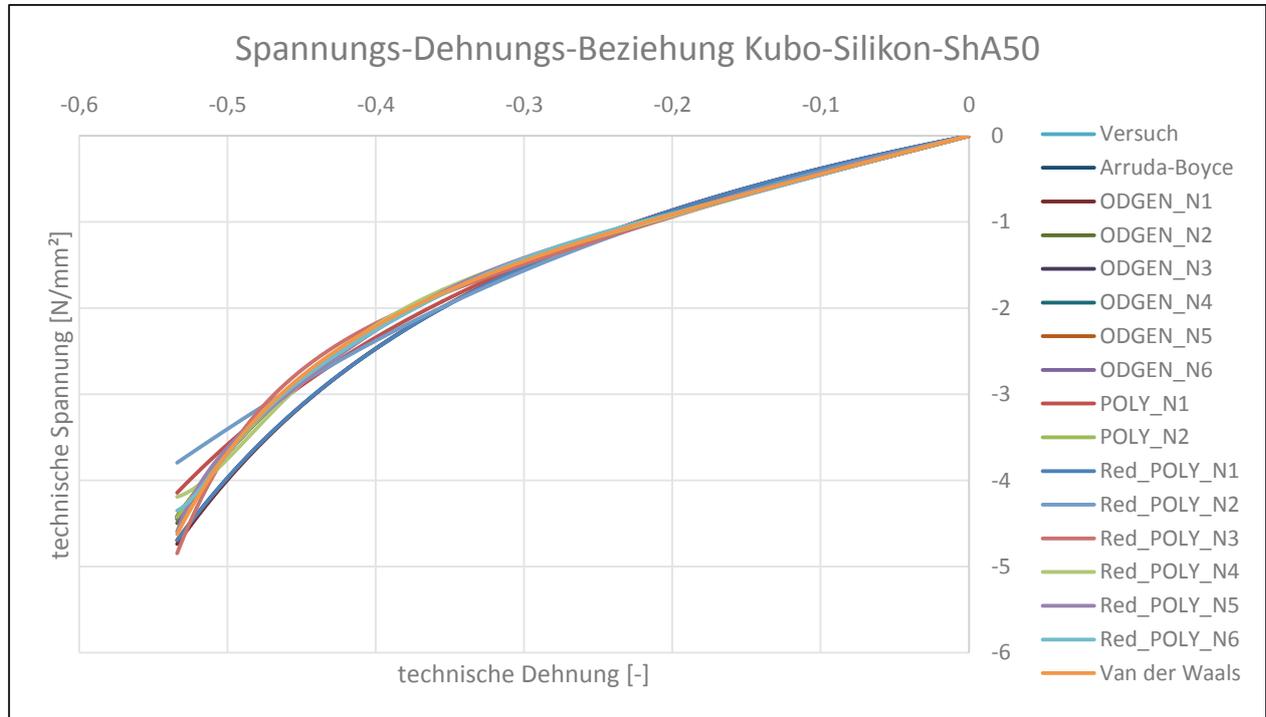
	μ_{11}	α_1	μ_{12}	α_2	μ_{13}	α_3	μ_{14}	α_4	μ_{15}	α_5	μ_{16}	α_6	D
OGDEN_N1	0,92582547	2,20158001											0
OGDEN_N2	2,40752834	3,20863668	-1,16967558	-0,85892244									0
OGDEN_N3	-11,1925544	1,05541886	12,4312449	1,64240884	-2,3766E-05	-13,6860735							0
OGDEN_N4	2,9820864	1,63196936	9,99036337	1,62908996	-11,7337666	1,06856228	-2,3701E-05	-13,6903788					0
OGDEN_N5	-8,38540524	2,001028	16,4936226	4,00065509	-6,98317048	6,00030493	-0,34911701	-2,00035982	0,44233765	-4,00227772			0
OGDEN_N6	-14,5178828	1,99992088	25,1895408	3,99989987	-10,5996017	5,99985755	1,07474627	-2,00001407	-0,02290591	-4,00000054	0,0901441	-6,00000977	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,56415242	-0,0788337											0
POLY_N2	1,44210619	-0,81619004	-0,06742082	0,35754992	-0,10343746								0
Red_POLY_N1	0,46052712												0
Red_POLY_N2	0,50939197		-0,05089791										0
Red_POLY_N3	0,55040104		-0,18237987			0,07144706							0
Red_POLY_N4	0,57192843		-0,3249536			0,26900114	-0,07594995						0
Red_POLY_N5	0,58297202		-0,45052305			0,58548521	-0,36240668	0,08572239					0
Red_POLY_N6	0,58879399		-0,55228959			0,98729347	-0,9893712	0,51000265	-0,1041441				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,92105418	2569,79546											0
van der Waals	1,21277501	3,03159712	1,40891907	0									0

Material: Silikon

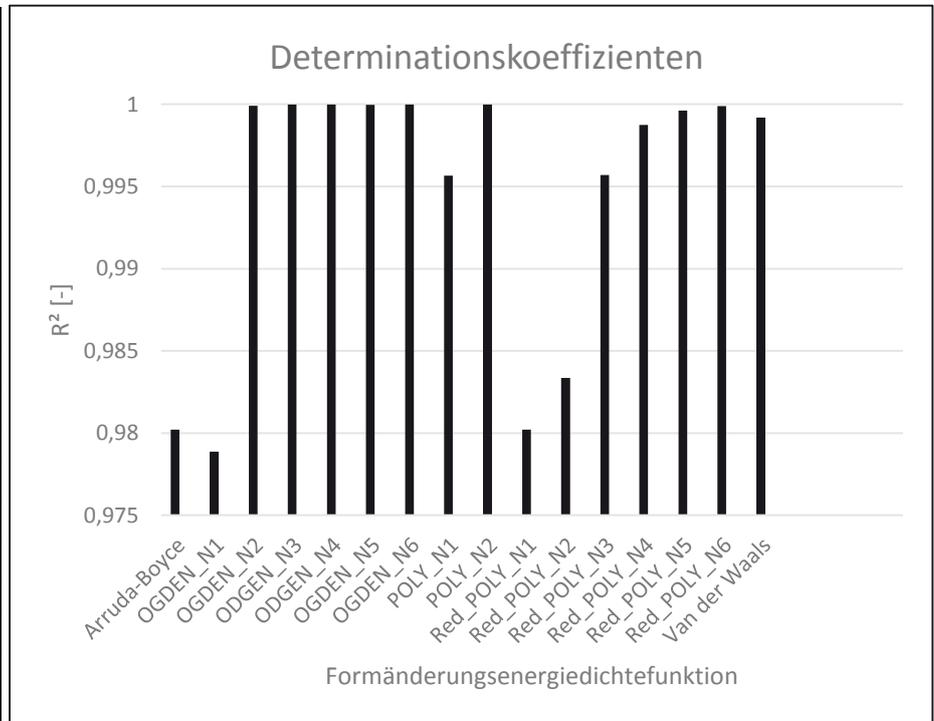
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,980198598
OGDEN_N1	0,978865814
OGDEN_N2	0,99990783
OGDEN_N3	0,999980721
OGDEN_N4	0,999980583
OGDEN_N5	0,999979205
OGDEN_N6	0,999995288
POLY_N1	0,995657268
POLY_N2	0,999988081
Red_POLY_N1	0,980198598
Red_POLY_N2	0,983350628
Red_POLY_N3	0,995704433
Red_POLY_N4	0,998751698
Red_POLY_N5	0,999629984
Red_POLY_N6	0,999887329
Van der Waals	0,999192563



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

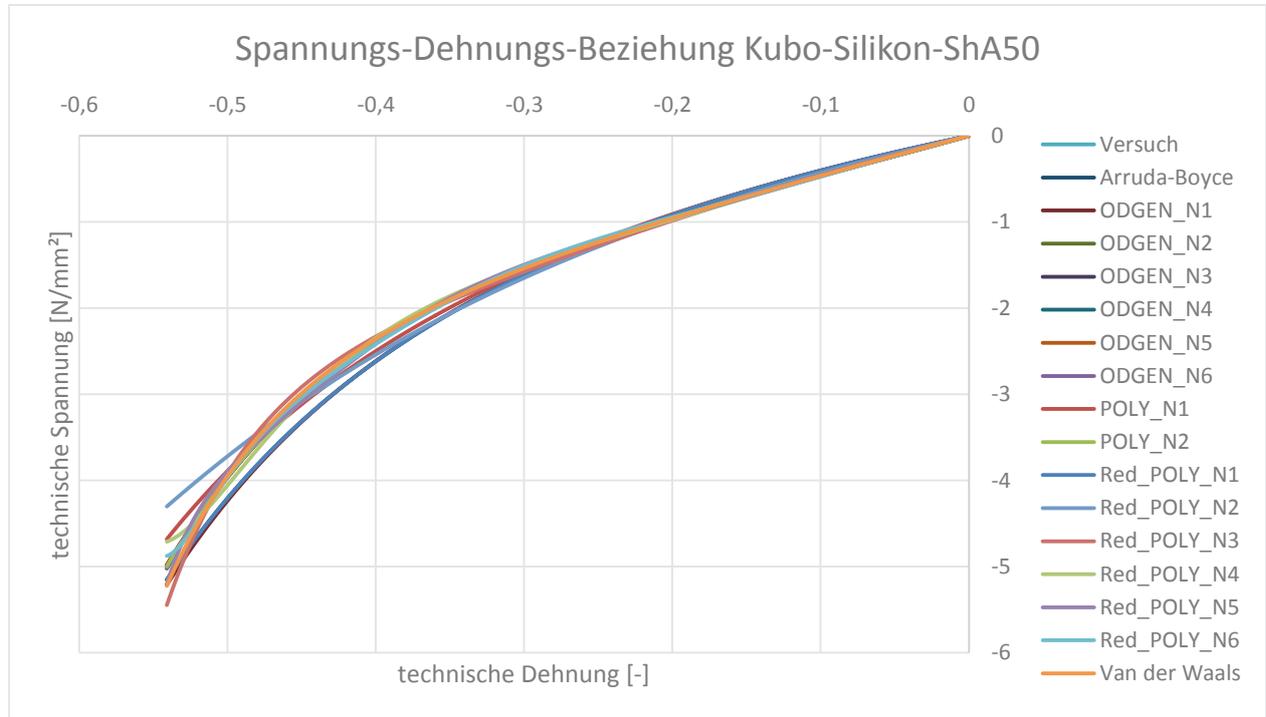
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,14011423	2,20669152											0
OGDEN_N2	2,50681714	3,48015475	-1,10830937	-1,20626029									0
OGDEN_N3	-11,3591973	1,04732984	12,8575968	1,71379193	-0,00036269	-9,94142253							0
OGDEN_N4	-5,222266195	1,06049553	13,3782699	1,69971872	-6,65725835	1,06122448	-0,00034598	-10,0049841					0
OGDEN_N5	-7,59381045	2,00089828	15,5074861	4,00058528	-6,34763192	6,00014158	-0,49393727	-2,00052193	0,40860333	-4,0022488			0
OGDEN_N6	-14,9712764	1,99987521	26,0849865	3,99984737	-10,7827777	5,99978681	1,13926758	-2,00002351	-0,09575726	-4,00000373	0,10073065	-6,00001985	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,66448771	-0,0764065											0
POLY_N2	1,76696775	-1,00783146	0,12739693	0,21330308	-0,06298755								0
Red_POLY_N1	0,56714467												0
Red_POLY_N2	0,61990821		-0,05353808										0
Red_POLY_N3	0,66723969		-0,20088739			0,07677301							0
Red_POLY_N4	0,69210104		-0,36005743			0,28816027	-0,07768553						0
Red_POLY_N5	0,7056317		-0,50831485			0,64628102	-0,38759636	0,0885572					0
Red_POLY_N6	0,71305712		-0,6331151			1,11838168	-1,09189519	0,54371245	-0,10661551				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,13428937	2525,53457											0
van der Waals	1,46492357	3,0762774	1,34960568	0									0

Material: Silikon

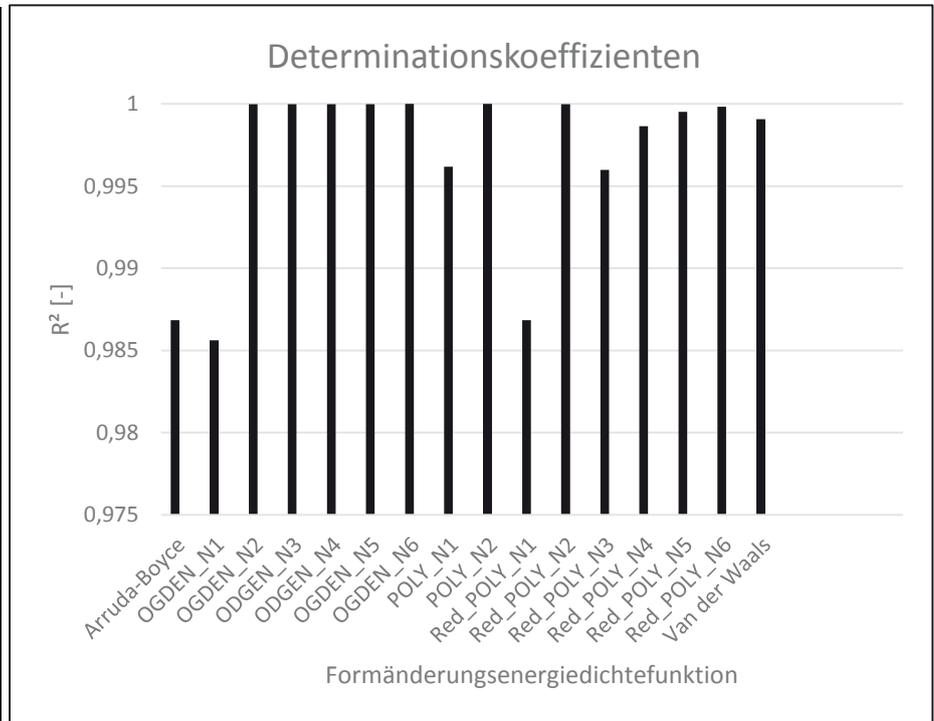
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,986834374
OGDEN_N1	0,985624215
OGDEN_N2	0,999985118
OGDEN_N3	0,999989597
OGDEN_N4	0,999986583
OGDEN_N5	0,999985054
OGDEN_N6	0,99999562
POLY_N1	0,996170341
POLY_N2	0,999995056
Red_POLY_N1	0,986834374
Red_POLY_N2	0,999978164
Red_POLY_N3	0,995989581
Red_POLY_N4	0,998644562
Red_POLY_N5	0,999512728
Red_POLY_N6	0,999821778
Van der Waals	0,99907552



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

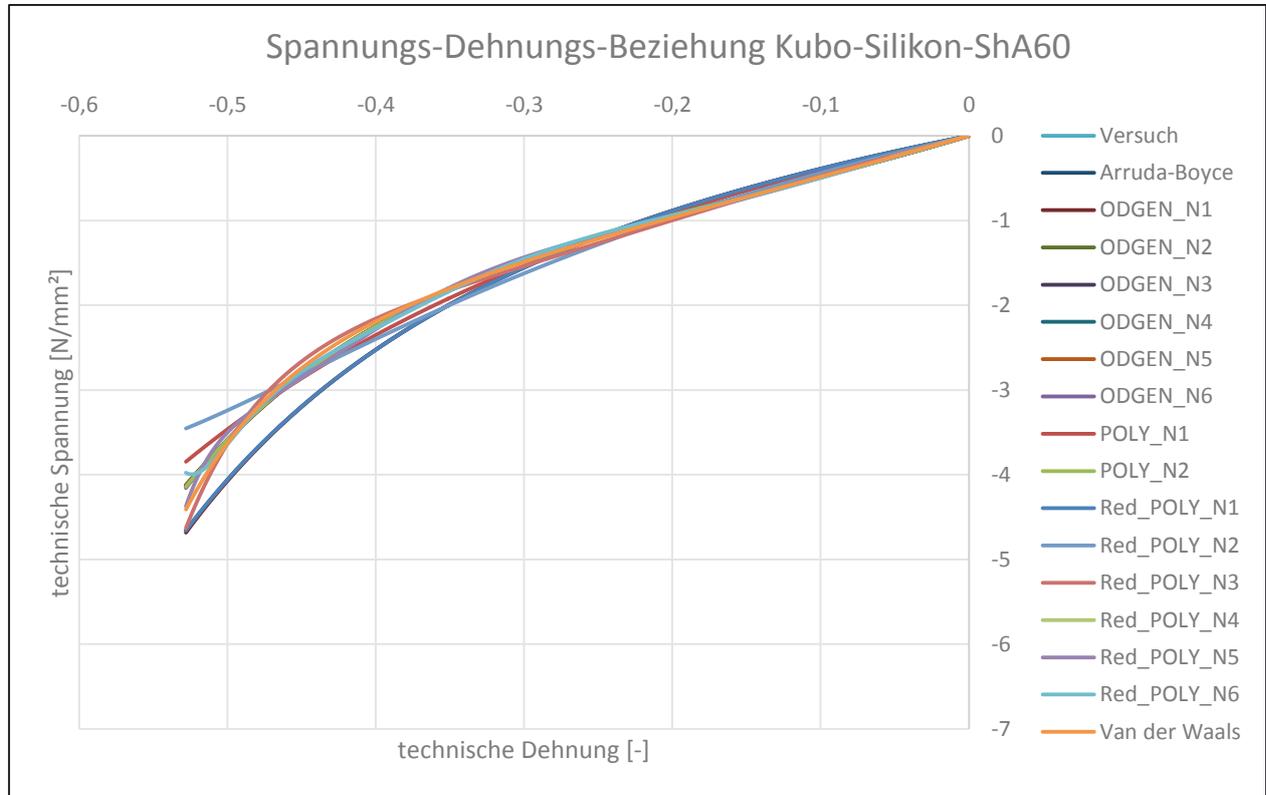
	μ_{11}	α_1	μ_{12}	α_2	μ_{13}	α_3	μ_{14}	α_4	μ_{15}	α_5	μ_{16}	α_6	D
OGDEN_N1	1,20886419	2,24172049											0
OGDEN_N2	2,28710494	4,4895254	-0,70786027	-2,3499767									0
OGDEN_N3	-4,92225287	1,10744266	6,59808527	2,47052343	-0,10283754	-3,69835225							0
OGDEN_N4	-4,66289491	0,85220597	6,19472378	2,4170555	0,09660778	-1,04876379	-0,056639332	-4,31854319					0
OGDEN_N5	-3,73206404	2,00045544	8,45086807	4,00035175	-2,72532972	6,00005318	-0,56787189	-2,00061402	0,14176174	-4,0008113			0
OGDEN_N6	-10,3600301	2,00001216	18,0290354	3,99999883	-6,76483203	5,99998559	0,84891046	-1,99998824	-0,27663403	-3,99998729	0,08564785	-5,99995892	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,66263528	-0,05348353											0
POLY_N2	1,94951678	-1,15319292	0,43423092	-0,04645132	0,00575581								0
Red_POLY_N1	0,60096965												0
Red_POLY_N2	0,64709412		-0,04631978										0
Red_POLY_N3	0,69463456		-0,19170075			0,0735104							0
Red_POLY_N4	0,72044955		-0,35286847			0,28106399	-0,07376556						0
Red_POLY_N5	0,735723		-0,51510916			0,66082729	-0,39159702	0,08772196					0
Red_POLY_N6	0,74499373		-0,66549417			1,21168226	-1,18623747	0,58376253	-0,11214937				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,20193922	2436,77731											0
van der Waals	1,52325817	3,08163789	1,3160479	0									0

Material: Silikon

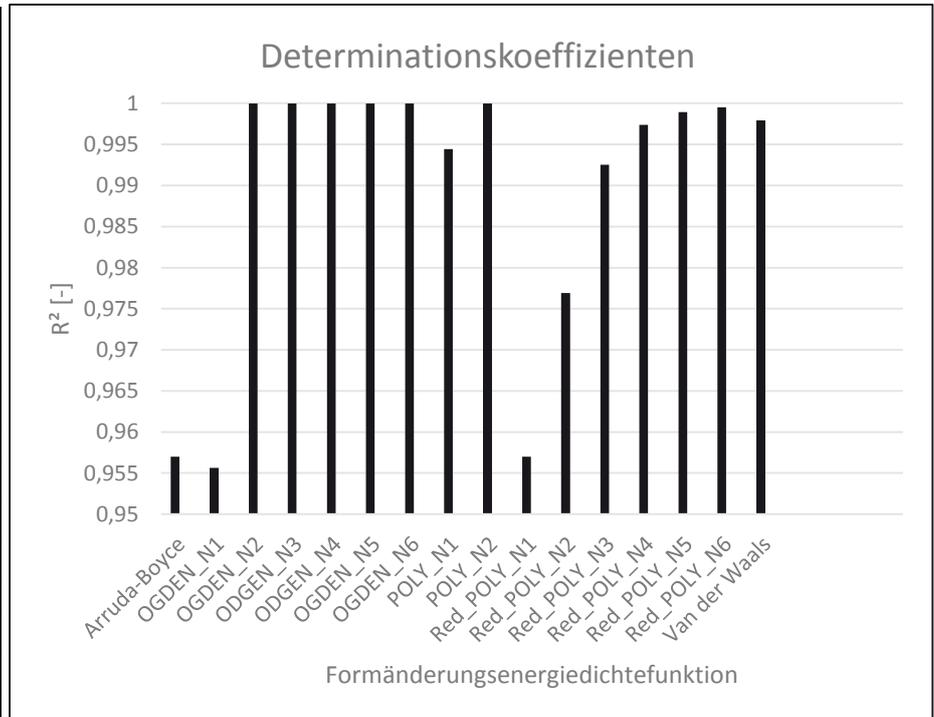
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R^2 [-]
Arruda-Boyce	0,957007676
ODGEN_N1	0,955616384
ODGEN_N2	0,99999624
ODGEN_N3	0,999993897
ODGEN_N4	0,99998763
ODGEN_N5	0,999990404
ODGEN_N6	0,999995667
POLY_N1	0,994436064
POLY_N2	0,999998892
Red_POLY_N1	0,957007676
Red_POLY_N2	0,976916442
Red_POLY_N3	0,992532445
Red_POLY_N4	0,997370076
Red_POLY_N5	0,998938372
Red_POLY_N6	0,999509004
Van der Waals	0,997912756



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

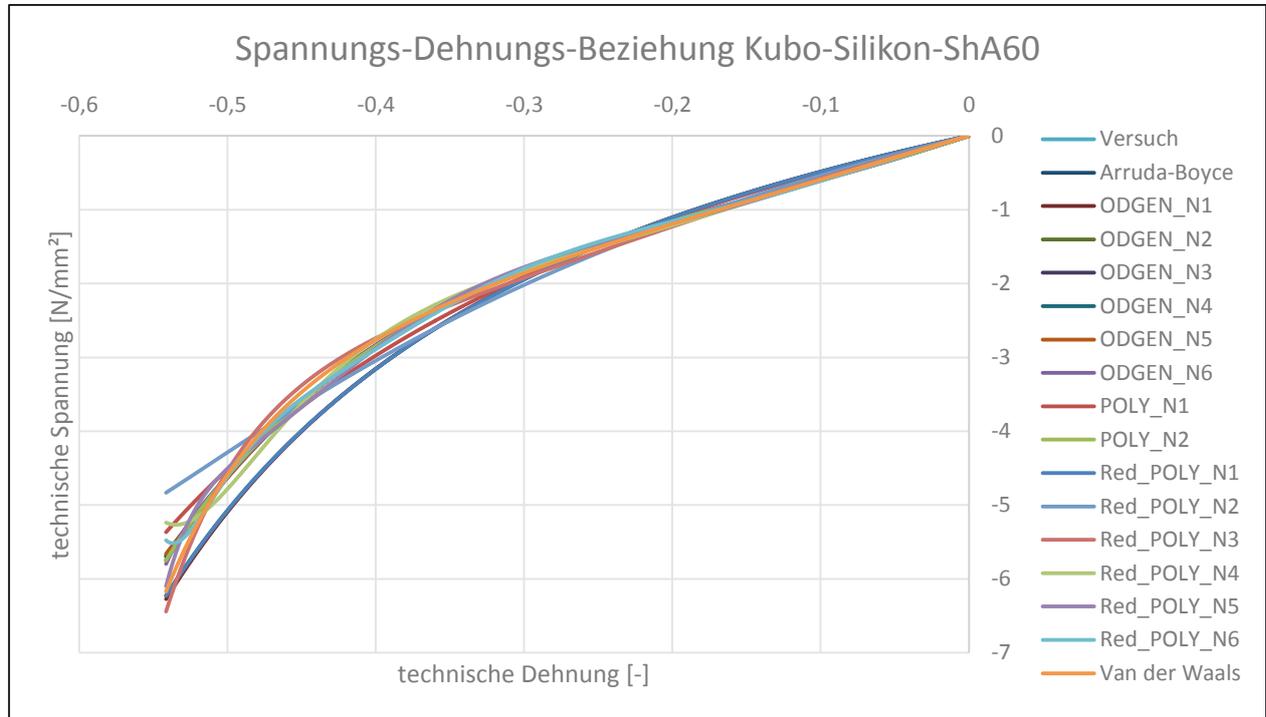
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,16341228	2,13638552											0
OGDEN_N2	2,58526708	5,52682961	-0,85394713	-3,10071865									0
OGDEN_N3	-1,88670488	1,99587057	4,31159685	4,15654662	-0,69957861	-2,98746973							0
OGDEN_N4	-1,86040452	2,00054807	4,43150366	4,0008109	-0,68681531	-2,0010468	-0,16128163	-3,99886684					0
OGDEN_N5	-1,4209931	2,00017233	3,6620035	4,00021707	0,37342868	5,9999821	-0,70546978	-2,00067007	-0,18442126	-3,99912272			0
OGDEN_N6	-9,09973704	2,00018267	14,6394958	4,00014722	-4,22188175	6,0001322	1,02299911	-1,99992371	-0,73022972	-3,9998709	0,10805392	-5,99984112	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,76428679	-0,1348176											0
POLY_N2	2,56865249	-1,69906455	0,86600048	-0,28748049	0,05882996								0
Red_POLY_N1	0,57963179												0
Red_POLY_N2	0,65980085		-0,07878481			0,09883597							0
Red_POLY_N3	0,72204951		-0,26650196			0,4065381	-0,11531506						0
Red_POLY_N4	0,75914815		-0,4960841			0,99266794	-0,63219505	0,15119715					0
Red_POLY_N5	0,78191055		-0,73665148			1,90925002	-2,02542406	1,07263662	-0,22143543				0
Red_POLY_N6	0,7967408		-0,97683606										0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,15926361	2733,46543											0
van der Waals	1,62708809	2,99379879	1,52736438	0									0

Material: Silikon

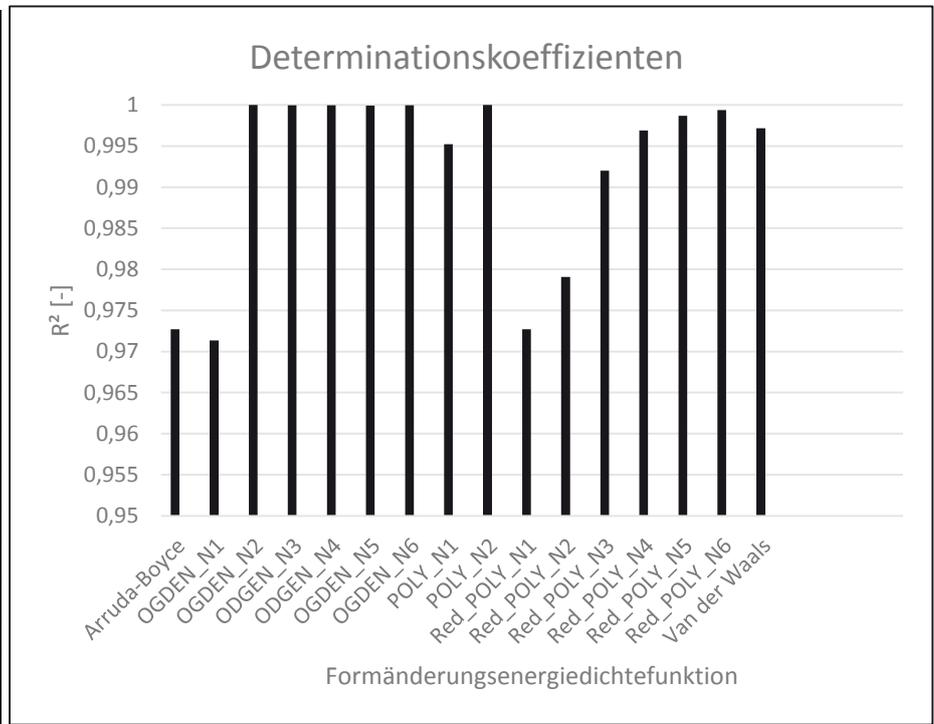
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,972707422
OGDEN_N1	0,971357381
OGDEN_N2	0,999981472
OGDEN_N3	0,999955508
OGDEN_N4	0,999969602
OGDEN_N5	0,999915044
OGDEN_N6	0,999948875
POLY_N1	0,995218014
POLY_N2	0,999996637
Red_POLY_N1	0,972707422
Red_POLY_N2	0,979061677
Red_POLY_N3	0,99201635
Red_POLY_N4	0,996895864
Red_POLY_N5	0,998685081
Red_POLY_N6	0,999394605
Van der Waals	0,997147878



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

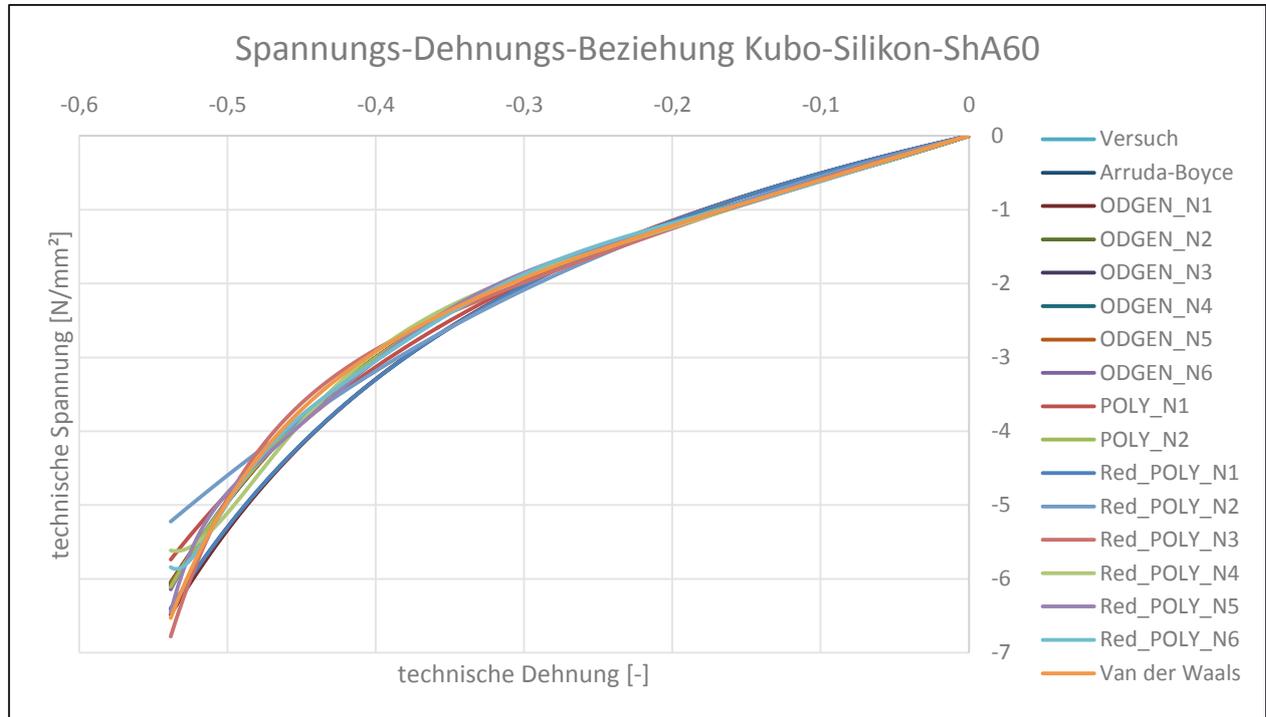
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,45506792	2,15211421											0
OGDEN_N2	3,13472945	5,75700241	-1,00090772	-3,25924132									0
ODGEN_N3	-5,5693876	1,4732462	8,09226034	3,24297933	-0,40503827	-3,58049498							0
ODGEN_N4	-2,68459988	1,99760769	5,76121337	3,99535836	-0,72749983	-1,99914832	-0,22623365	-4,00031135					0
OGDEN_N5	-7,09657988	2,00332579	13,566778	4,00214501	-3,81716893	6,00085474	-0,5680527	-2,00206693	0,02134686	-4,00038667			0
OGDEN_N6	-43,8566672	5,87974222	57,1217051	11,7904551	-27,3667923	16,7500402	26,669522	-0,07498715	-21,1989981	-5,6044914	10,5999429	-8,5616548	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,87351836	-0,11421147											0
POLY_N2	3,50538311	-2,41024878	1,55784094	-0,70651386	0,15719732								0
Red_POLY_N1	0,72478166												0
Red_POLY_N2	0,80657246		-0,07771114										0
Red_POLY_N3	0,88145598		-0,29267061			0,10632028							0
Red_POLY_N4	0,92977263		-0,57424442			0,4607078	-0,12424431						0
Red_POLY_N5	0,96075346		-0,88067985			1,16118456	-0,70223294	0,15789502					0
Red_POLY_N6	0,98124638		-1,19040443			2,26911177	-2,27785488	1,13125911	-0,21823348				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,44956323	2656,21152											0
van der Waals	1,9853048	3,0141063	1,4780239	0									0

Material: Silikon

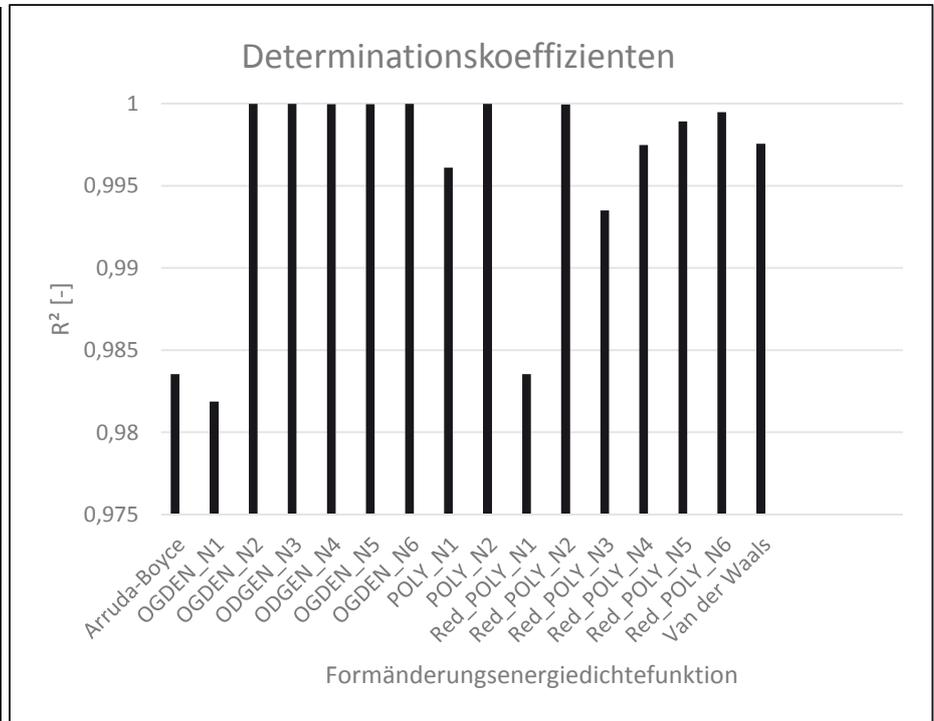
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,983535811
OGDEN_N1	0,981881992
OGDEN_N2	0,999994312
OGDEN_N3	0,999981515
OGDEN_N4	0,999965888
OGDEN_N5	0,999976146
OGDEN_N6	0,999983114
POLY_N1	0,996096928
POLY_N2	0,999997816
Red_POLY_N1	0,98353588
Red_POLY_N2	0,999951866
Red_POLY_N3	0,993495268
Red_POLY_N4	0,997479279
Red_POLY_N5	0,998918154
Red_POLY_N6	0,999485998
Van der Waals	0,997566035



Material: Silikon Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,52336362	2,2616795											0
OGDEN_N2	3,0456082	5,89047243	-0,90460289	-3,40728472									0
ODGEN_N3	-2,58274951	2,27048089	5,45097148	4,30908047	-0,736037	-3,23274661							0
ODGEN_N4	-2,83651522	2,00145544	5,77869139	4,00190968	-0,56615527	-2,00150896	-0,24825547	-3,99695235					0
OGDEN_N5	-1,67917815	2,00033323	3,74010272	4,00037753	0,99350816	5,99922216	-0,61092632	-2,0009619	-0,31153729	-3,99754307			0
OGDEN_N6	-17,3021211	2,00069924	26,2867335	4,0005616	-8,50857781	6,00054093	2,75561118	-1,99956127	-1,31729336	-3,99948551	0,20509663	-5,99932864	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,85173193	-0,0800268											0
POLY_N2	3,27218225	-2,19054785	1,38062461	-0,5968634	0,13121017								0
Red_POLY_N1	0,75693062												0
Red_POLY_N2	0,82375878		-0,06677049										0
Red_POLY_N3	0,89298407		-0,27519039			0,10597857							0
Red_POLY_N4	0,93740342		-0,54599449			0,45649052	-0,12578119						0
Red_POLY_N5	0,96591464		-0,84016062			1,14783483	-0,70982117	0,16301828					0
Red_POLY_N6	0,98498661		-1,13993542			2,24980644	-2,31429725	1,17591083	-0,23180957				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,51386113	2501,30758											0
van der Waals	1,992971	2,99701737	1,43220055	0									0

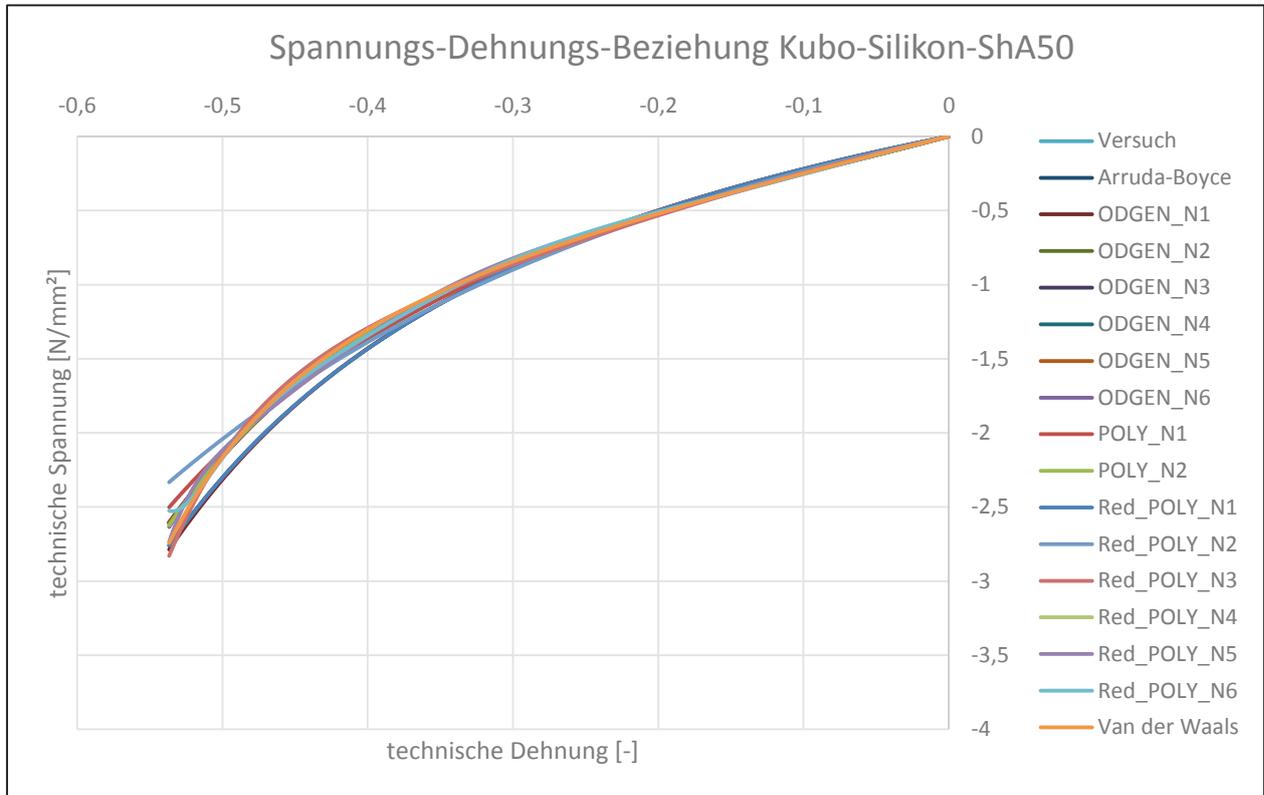
11.9 Erstellte Materialmodelle für EPDM aus dem uniaxialen Druckversuch

Material: EPDM

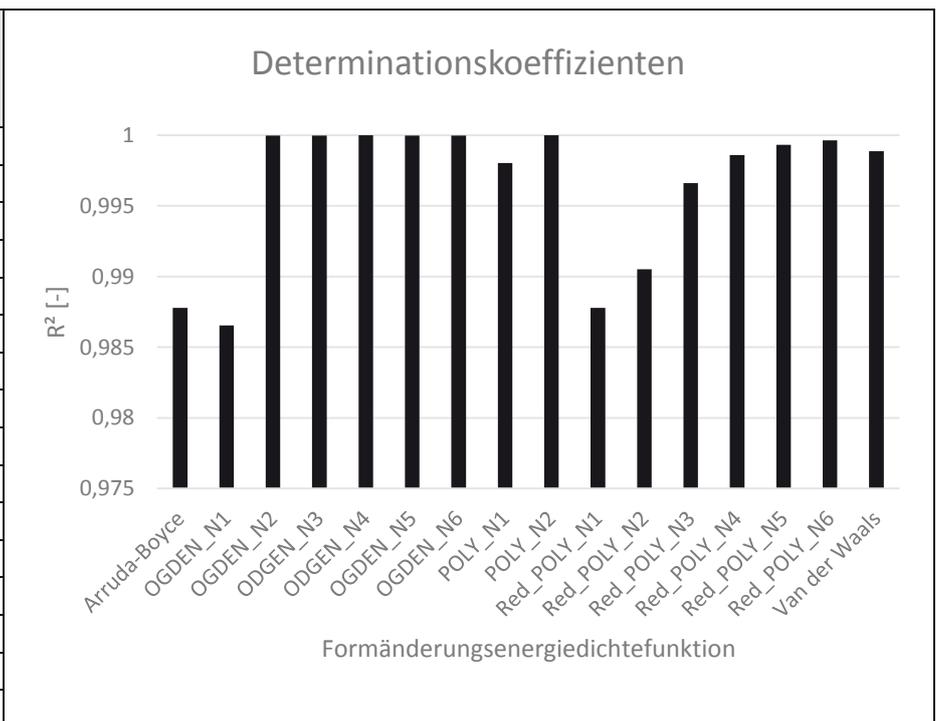
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,987778869
ODGEN_N1	0,986553232
ODGEN_N2	0,999982431
ODGEN_N3	0,999982828
ODGEN_N4	0,999991513
ODGEN_N5	0,999986472
ODGEN_N6	0,999980752
POLY_N1	0,998035751
POLY_N2	0,999994666
Red_POLY_N1	0,987778869
Red_POLY_N2	0,990518235
Red_POLY_N3	0,996608001
Red_POLY_N4	0,99860142
Red_POLY_N5	0,999320856
Red_POLY_N6	0,999648264
Van der Waals	0,998877613



Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

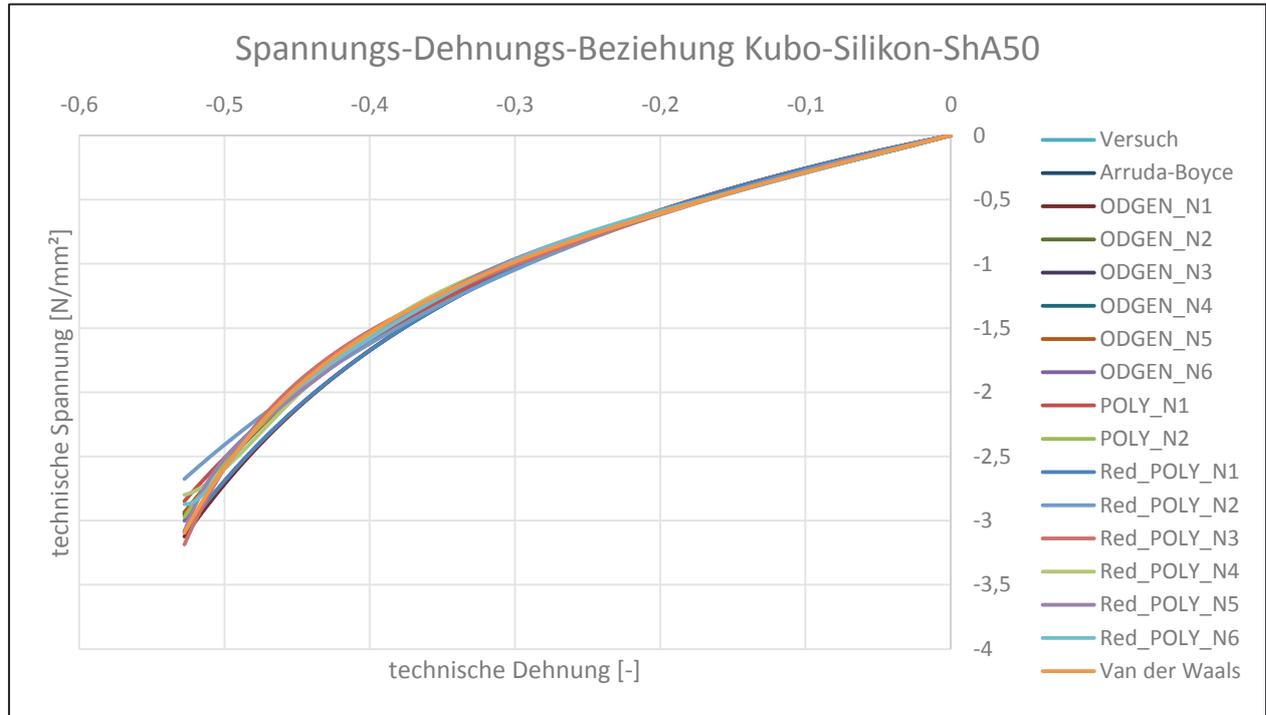
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,66102058	2,21732596											0
OGDEN_N2	1,12568789	5,34749186	-0,27020056	-3,35218437									0
ODGEN_N3	0,00623543	2,42269083	1,11988285	5,35899182	-0,27067201	-3,35138884							0
ODGEN_N4	-0,43557827	2,38568204	1,36567966	5,21612105	1,03982083	-1,72306746	-1,11296394	-2,49545687					0
OGDEN_N5	0,63582873	1,99974614	-0,56331382	3,99986946	1,16818245	5,99977326	-0,22595521	-2,00068391	-0,15779954	-3,99766446			0
OGDEN_N6	-4,97213759	2,00055894	7,48995151	4,0004633	-2,21181019	6,00038026	1,00601008	-1,99958522	-0,53473716	-3,9994709	0,07549029	-5,9993732	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,36830067	-0,03248745											0
POLY_N2	1,14979021	-0,71750689	0,51879249	-0,2699745	0,06387805								0
Red_POLY_N1	0,3287628												0
Red_POLY_N2	0,35228624		-0,02426986										0
Red_POLY_N3	0,37341277		-0,09128834			0,03458245							0
Red_POLY_N4	0,38670105		-0,17697259			0,14740865	-0,04094875						0
Red_POLY_N5	0,39551999		-0,27307049			0,37767266	-0,23794369	0,05555862					0
Red_POLY_N6	0,40175243		-0,37623838			0,76492784	-0,80960246	0,42047082	-0,08434442				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,65752554	2394,7327											0
Van der Waals	0,81336968	3,1610885	1,22986795	0									0

Material: EPDM

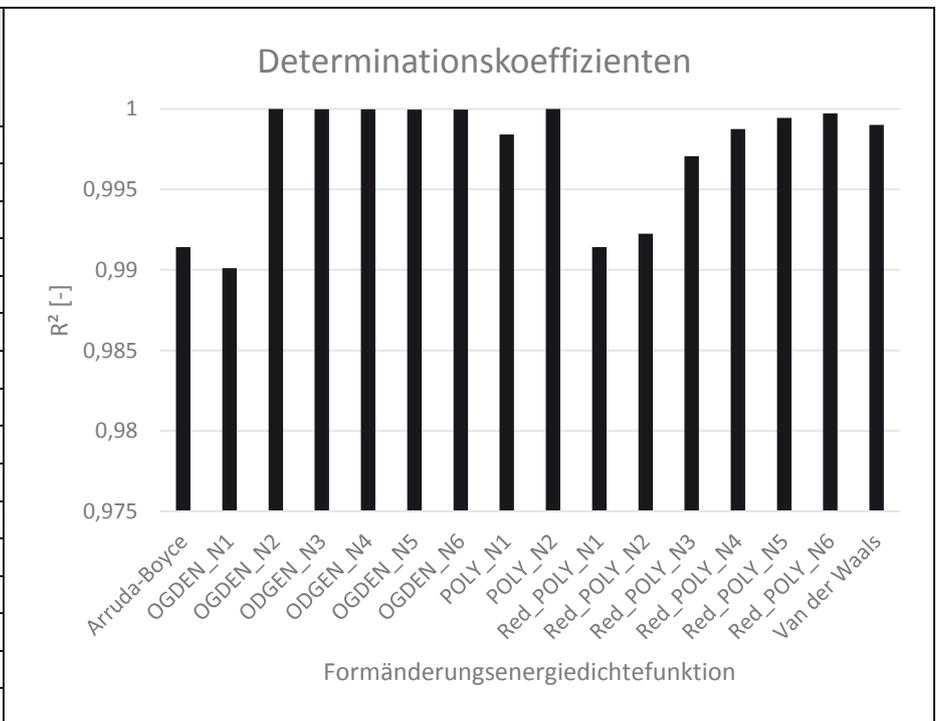
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,991411222
OGDEN_N1	0,990111915
OGDEN_N2	0,999988512
OGDEN_N3	0,999973319
OGDEN_N4	0,999975228
OGDEN_N5	0,999952752
OGDEN_N6	0,999946183
POLY_N1	0,998398193
POLY_N2	0,99999519
Red_POLY_N1	0,991411222
Red_POLY_N2	0,992252348
Red_POLY_N3	0,997051
Red_POLY_N4	0,998751194
Red_POLY_N5	0,999430577
Red_POLY_N6	0,999722519
Van der Waals	0,998996866



Mate Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG
Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

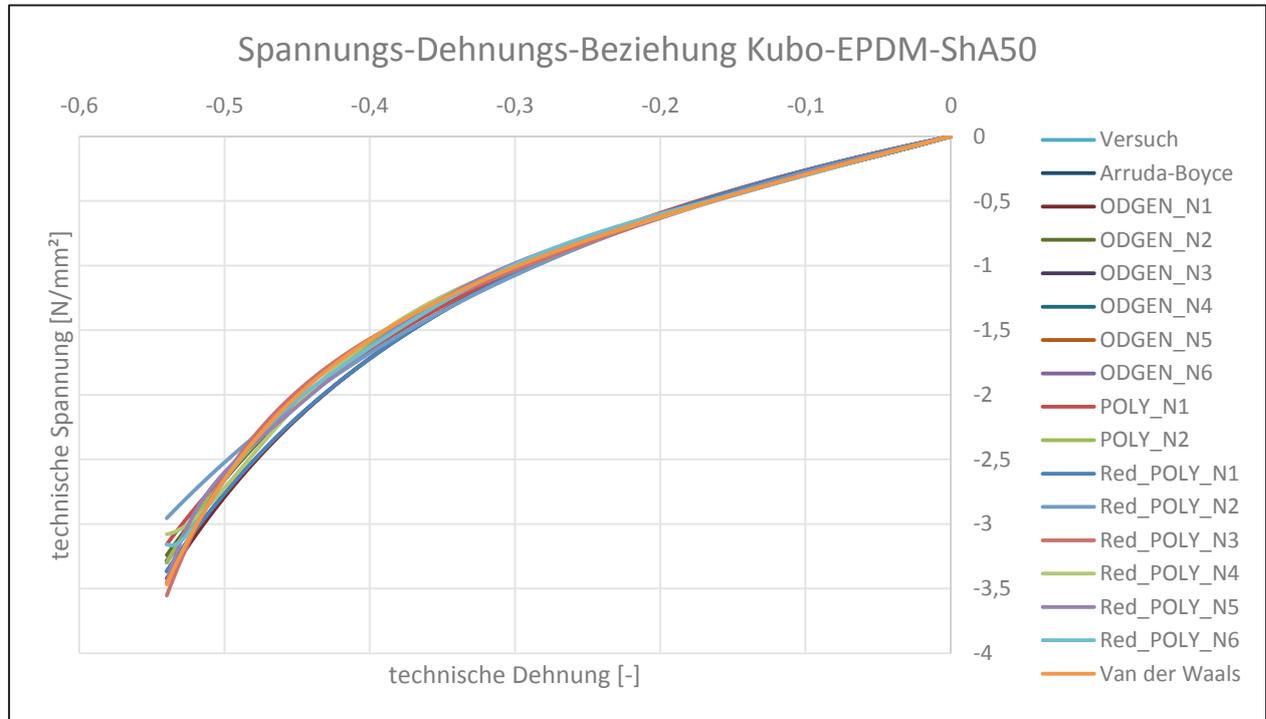
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,77486269	2,30649598											0
OGDEN_N2	1,24499614	5,26072984	-0,27327509	-3,38322499									0
OGDEN_N3	-1,58470168	1,90121577	2,70730558	3,53347197	-0,15386074	-3,62651578							0
OGDEN_N4	-0,81812145	1,99960002	2,0338396	3,99852919	-0,14880807	-2,00009508	-0,09756722	-3,99938244					0
OGDEN_N5	-2,03344539	2,00123505	4,14687671	4,00103326	-1,01786101	6,00036721	-0,09347529	-2,00040759	-0,03651303	-3,99922658			0
OGDEN_N6	-16,1522266	2,00214102	24,1324185	4,00203761	-9,31296494	6,00230895	3,19972316	-1,99827563	-1,11868444	-3,99853212	0,2081847	-5,99786651	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{12}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,41951508	-0,030355											0
POLY_N2	1,34566521	-0,84775073	0,69055746	-0,39278388	0,09460058								0
Red_POLY_N1	0,38457946												0
Red_POLY_N2	0,40768543		-0,02539246			0,04090682							0
Red_POLY_N3	0,42990835		-0,1005344										0
Red_POLY_N4	0,44420496		-0,19873956			0,17746208	-0,05222779						0
Red_POLY_N5	0,45370717		-0,309016			0,4565959	-0,30395247	0,07476836					0
Red_POLY_N6	0,46019861		-0,4234431			0,91039761	-1,01027166	0,54971535	-0,11558151				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,76915894	2270,01577											0
Van der Waals	0,92968479	3,13862234	1,2009637	0									0

Material: EPDM

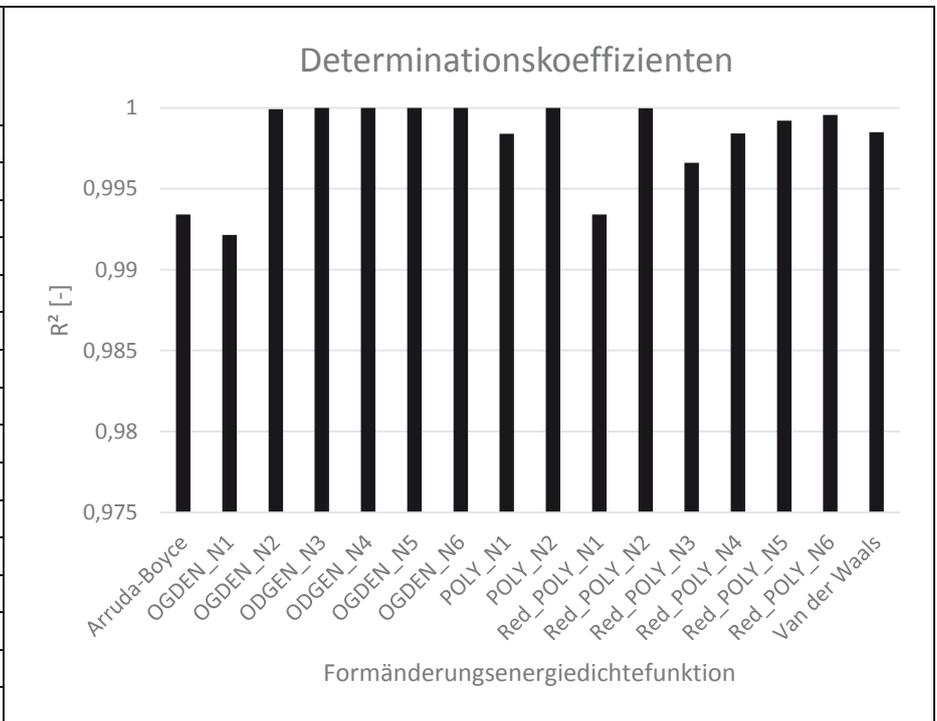
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch, rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R² [-]
Arruda-Boyce	0,993403766
ODGEN_N1	0,992136718
ODGEN_N2	0,999916387
ODGEN_N3	0,999998219
ODGEN_N4	0,999995194
ODGEN_N5	0,999998079
ODGEN_N6	0,99999818
POLY_N1	0,998386267
POLY_N2	0,999994891
Red_POLY_N1	0,993403766
Red_POLY_N2	0,999975774
Red_POLY_N3	0,996600056
Red_POLY_N4	0,99841107
Red_POLY_N5	0,99919752
Red_POLY_N6	0,99955346
Van der Waals	0,99849568



Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha50

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch, rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

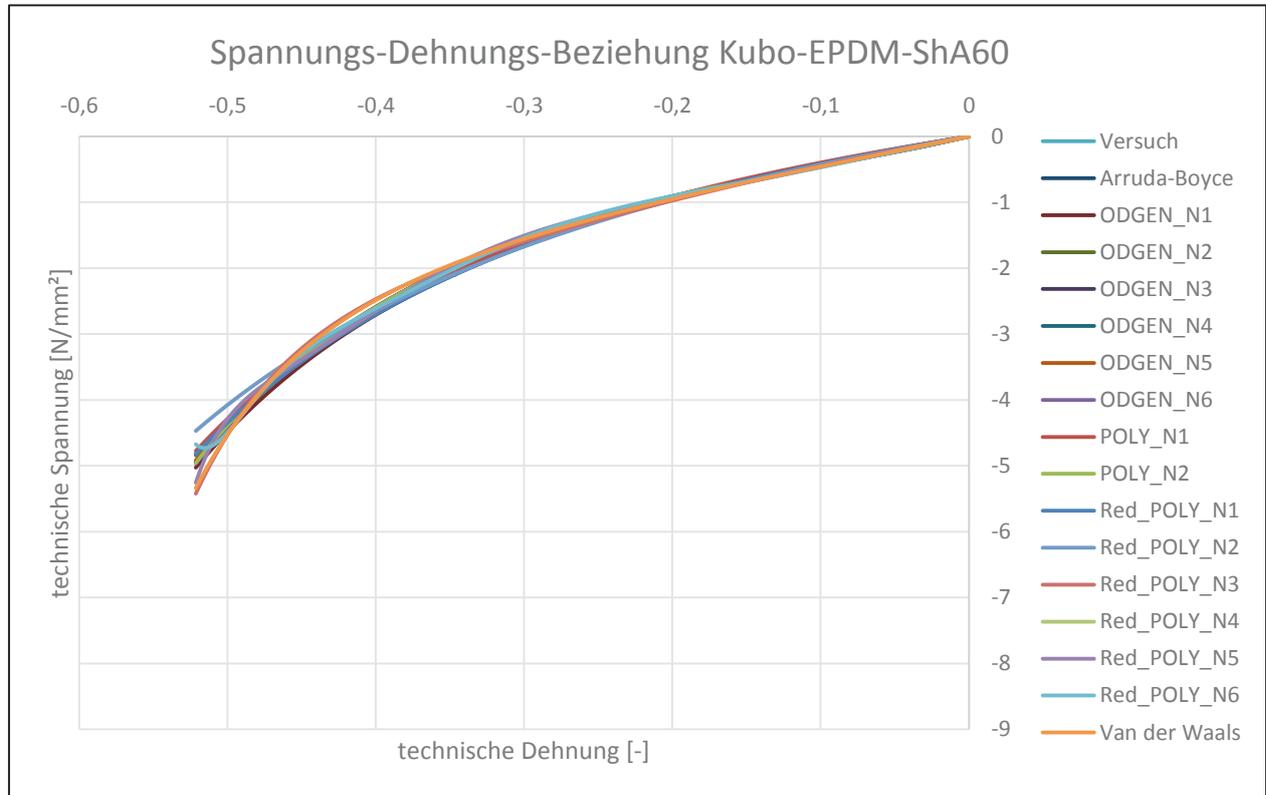
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	0,79586592	2,32650996											0
OGDEN_N2	1,33213548	5,94498847	-0,30630315	-3,77733114									0
OGDEN_N3	0,56770819	0,52671977	0,8954527	9,67283682	-0,4211789	-4,88134777							0
OGDEN_N4	-2,07848742	2,85532381	2,28159867	6,21898893	2,9576733	-1,10209075	-2,12189685	-2,57404057					0
OGDEN_N5	4,99143481	1,99980527	-8,57274139	3,99976961	5,43004735	5,99983255	-0,31387116	-2,00008172	-0,49337942	-3,99940952			0
OGDEN_N6	4,34670239	1,99993769	-7,64372167	3,99991096	5,03913145	5,99988237	-0,17458357	-2,00000822	-0,53502973	-3,99993997	0,00848399	-5,99999258	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,41310184	-0,01959075											0
POLY_N2	1,40902124	-0,89709823	0,73248125	-0,41166737	0,09810415								0
Red_POLY_N1	0,39497585												0
Red_POLY_N2	0,41635357		-0,0223379										0
Red_POLY_N3	0,44034015		-0,098625			0,03902082							0
Red_POLY_N4	0,45655075		-0,20259855			0,17470651	-0,04866931						0
Red_POLY_N5	0,46797541		-0,32568245			0,46670293	-0,29553031	0,0687144					0
Red_POLY_N6	0,4762884		-0,46105986			0,9692561	-1,02847145	0,53049473	-0,10526928				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	0,78995163	2247,72529											0
Van der Waals	0,95927514	3,12296323	1,21878774	0									0

Material: EPDM

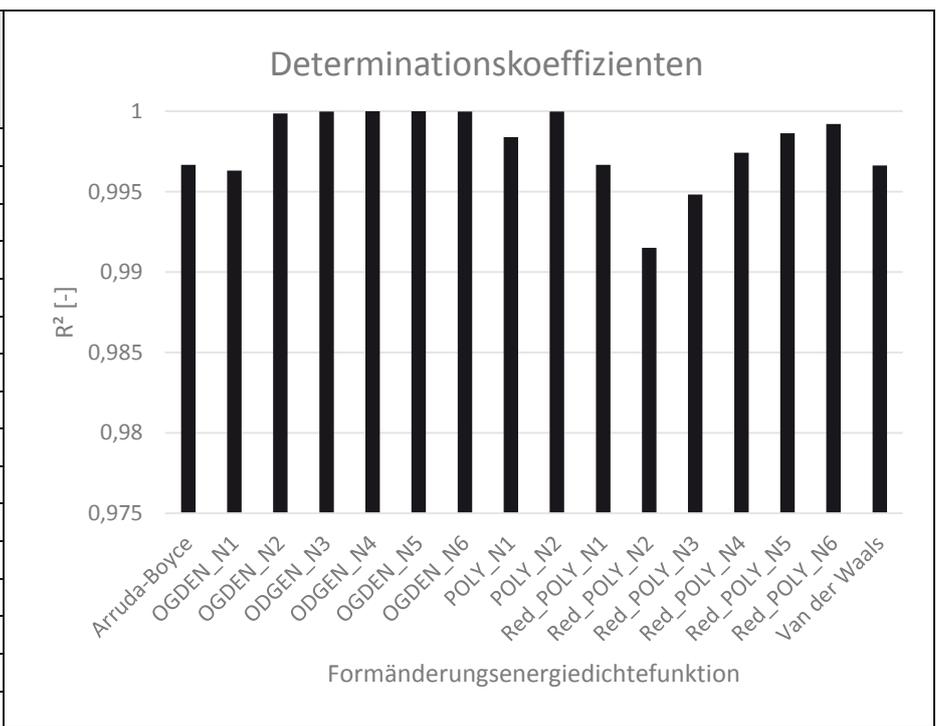
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,996660749
ODGEN_N1	0,996315038
ODGEN_N2	0,999855326
ODGEN_N3	0,999985626
ODGEN_N4	0,999994064
ODGEN_N5	0,999991482
ODGEN_N6	0,999983294
POLY_N1	0,998395289
POLY_N2	0,99998516
Red_POLY_N1	0,996660749
Red_POLY_N2	0,991497727
Red_POLY_N3	0,994821671
Red_POLY_N4	0,997412389
Red_POLY_N5	0,998623382
Red_POLY_N6	0,999197676
Van der Waals	0,996617846



Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

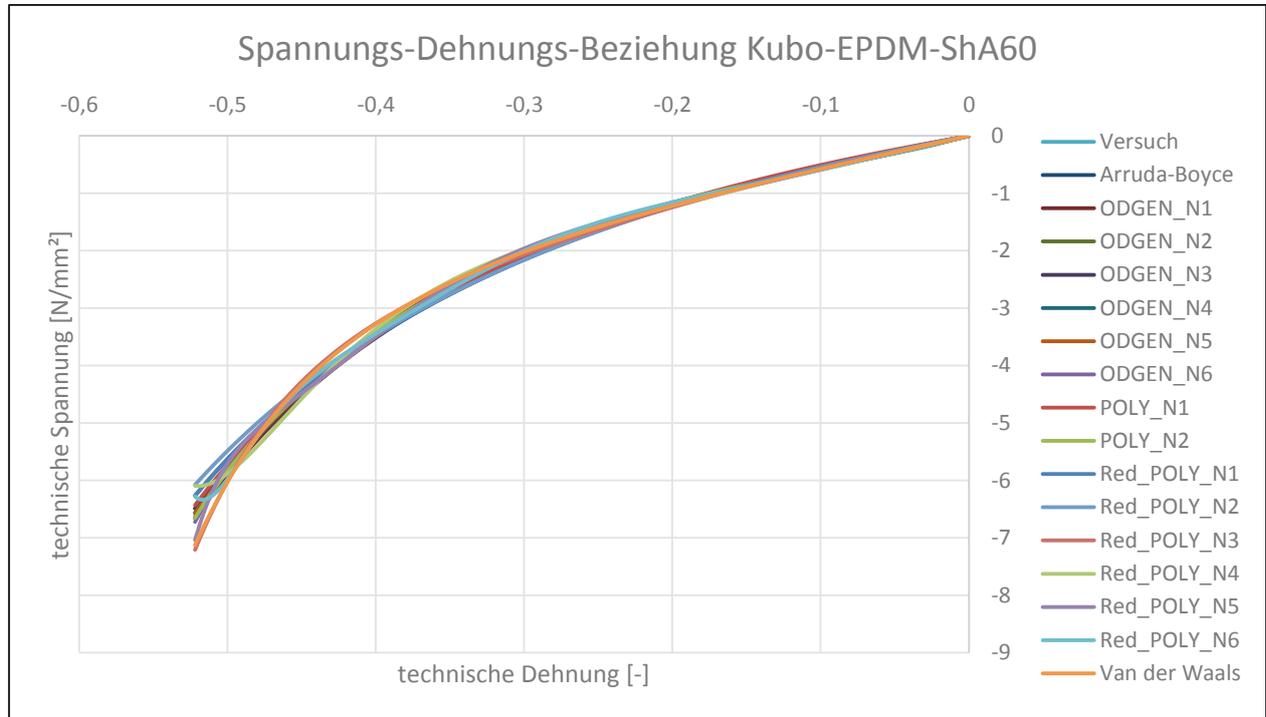
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,26004888	2,76907134											0
OGDEN_N2	2,22037841	7,41334999	-0,55602468	-4,53278669									0
OGDEN_N3	0,90816748	-2,31625716	1,93376319	9,6323167	-1,15321482	-4,70121252							0
OGDEN_N4	-7,23977402	2,95948725	6,40358316	5,88604772	6,68385581	-0,9360424	-4,16283688	-2,65270869					0
OGDEN_N5	9,17400564	1,99841912	-17,7383023	3,99792233	11,559639	5,99840419	-0,12982147	-2,00013677	-1,17705667	3,99516918			0
OGDEN_N6	-1,92556664	2,00010801	-2,16045244	3,9999062	5,13333992	5,99958689	2,5521767	-1,99954642	-2,09125769	-3,99916901	0,17310298	-5,99943638	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,57155345	0,02047857											0
POLY_N2	2,89072456	-2,0532798	2,13104527	-1,35974413	0,3291615								0
Red_POLY_N1	0,6205278												0
Red_POLY_N2	0,63995692		-0,02305722										0
Red_POLY_N3	0,68085278		-0,16708351			0,08190494							0
Red_POLY_N4	0,71367437		-0,39671566			0,41482119	-0,13257118						0
Red_POLY_N5	0,73771165		-0,67671926			1,15129911	-0,82366206	0,21339286					0
Red_POLY_N6	0,7557131		-0,99209638			2,44684419	-2,91969308	1,6782256	-0,37024559				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,24105536	1430,57714											0
Van der Waals	1,49884131	2,88173587	2,88173587	0									0

Material: EPDM

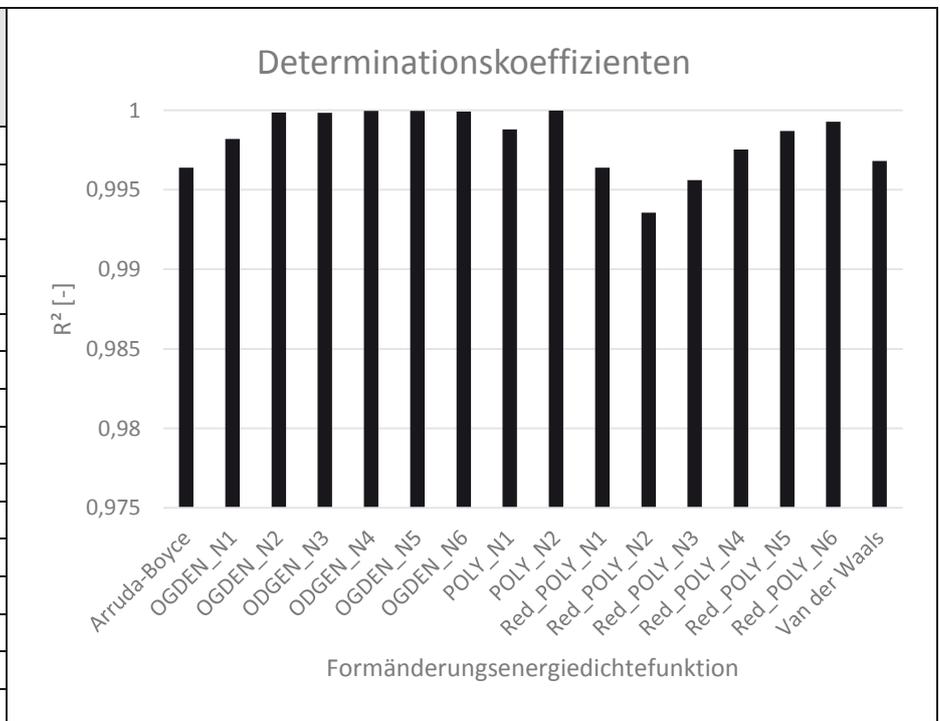
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,996393692
OGDEN_N1	0,998203471
OGDEN_N2	0,999851939
OGDEN_N3	0,999842784
OGDEN_N4	0,999966797
OGDEN_N5	0,999965001
OGDEN_N6	0,99991412
POLY_N1	0,998796298
POLY_N2	0,99998363
Red_POLY_N1	0,996393692
Red_POLY_N2	0,993564674
Red_POLY_N3	0,995603125
Red_POLY_N4	0,997539883
Red_POLY_N5	0,998704809
Red_POLY_N6	0,999272744
Van der Waals	0,99681774



Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

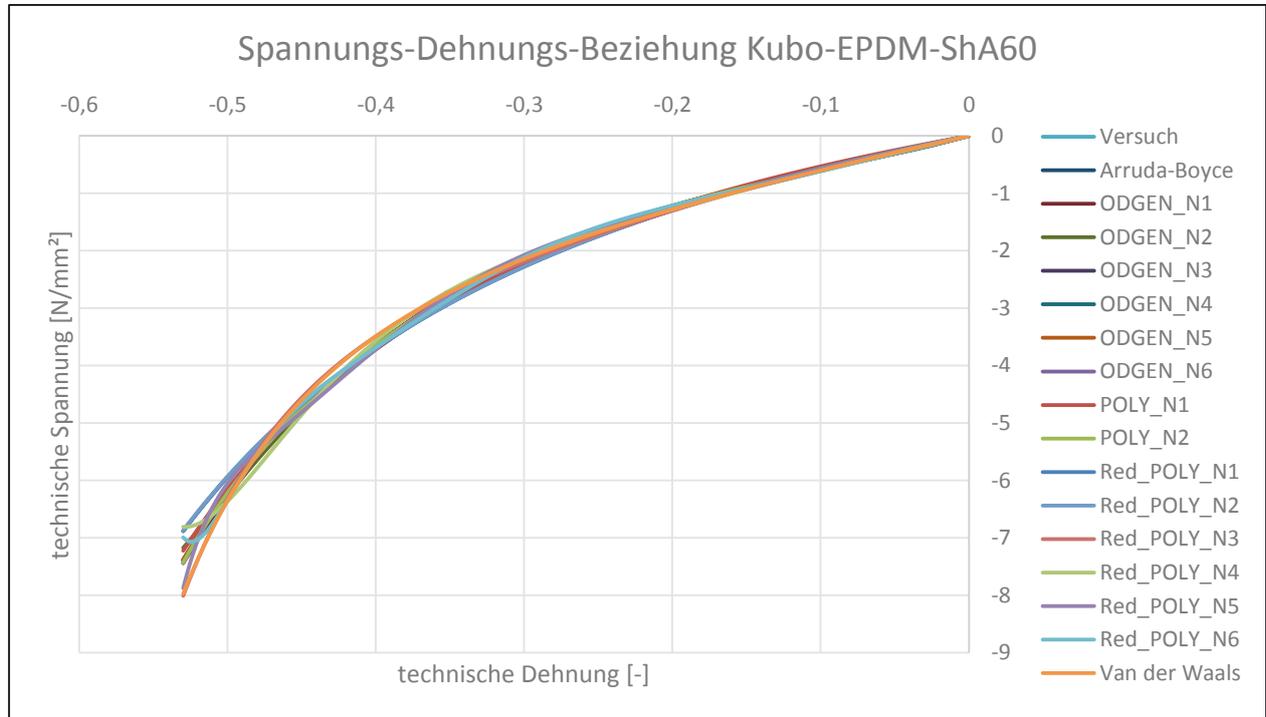
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,63569842	3,01441176											0
OGDEN_N2	2,67353539	7,34095202	-0,60396957	-4,61174521									0
OGDEN_N3	-0,74172758	4,42212987	3,39973769	6,69308259	-0,59046734	-4,49472393							0
OGDEN_N4	-14,862201	2,05804735	10,230803	4,67480156	14,1597196	-0,66070669	-7,44702215	-2,06946691					0
OGDEN_N5	-0,68476407	1,92022242	-11,4108118	2,74221562	10,6324185	4,83314926	9,2688257	-0,94621286	-5,72391553	-2,33693193			0
OGDEN_N6	-36,839432	2,0033765	47,5817939	4,00277332	-15,1458158	6,00243453	10,4347545	-1,99656203	-4,62826472	-3,99668947	0,65473589	-5,99627019	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,68092422	0,06886661											0
POLY_N2	3,81236884	-2,74557038	3,19533716	-2,1681321	0,53508494								0
Red_POLY_N1	0,80385321												0
Red_POLY_N2	0,81375363		-0,0121193										0
Red_POLY_N3	0,85973504		-0,17829789										0
Red_POLY_N4	0,89861324		-0,45598177										0
Red_POLY_N5	0,92827251		-0,80754401										0
Red_POLY_N6	0,95024583		-1,19855141										0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,60770666	1138,14576											0
Van der Waals	1,87506781	2,88373666	1,29469952	0									0

Material: EPDM

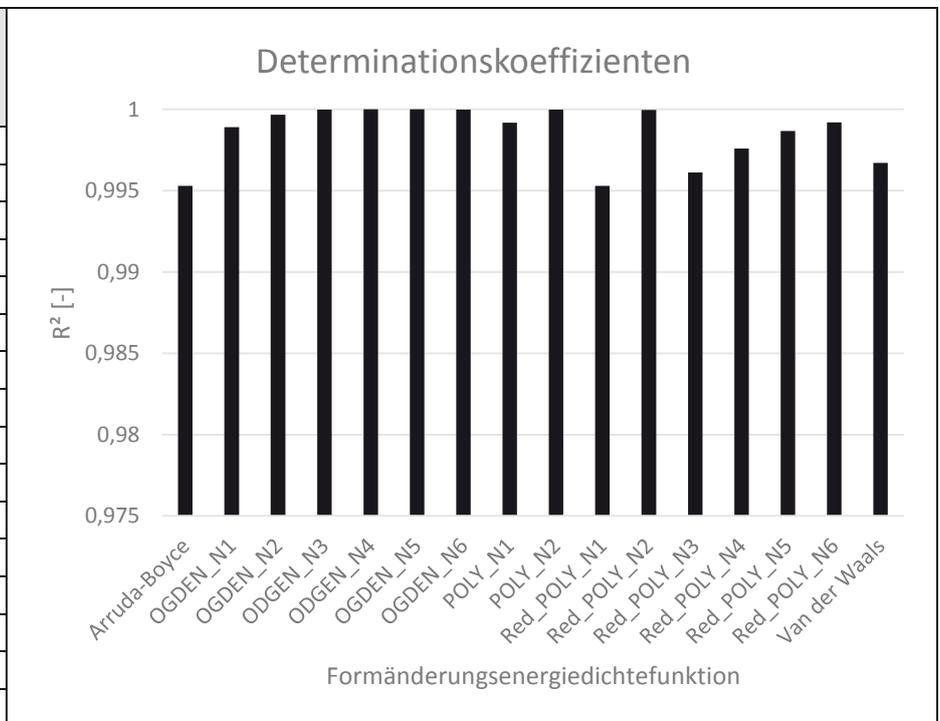
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,995296766
OGDEN_N1	0,998911023
OGDEN_N2	0,999673705
OGDEN_N3	0,999990845
OGDEN_N4	0,999994727
OGDEN_N5	0,999993753
OGDEN_N6	0,999983171
POLY_N1	0,999174469
POLY_N2	0,999984357
Red_POLY_N1	0,995296399
Red_POLY_N2	0,999966206
Red_POLY_N3	0,996116412
Red_POLY_N4	0,997595884
Red_POLY_N5	0,998669052
Red_POLY_N6	0,999208182
Van der Waals	0,996697918



Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha60

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

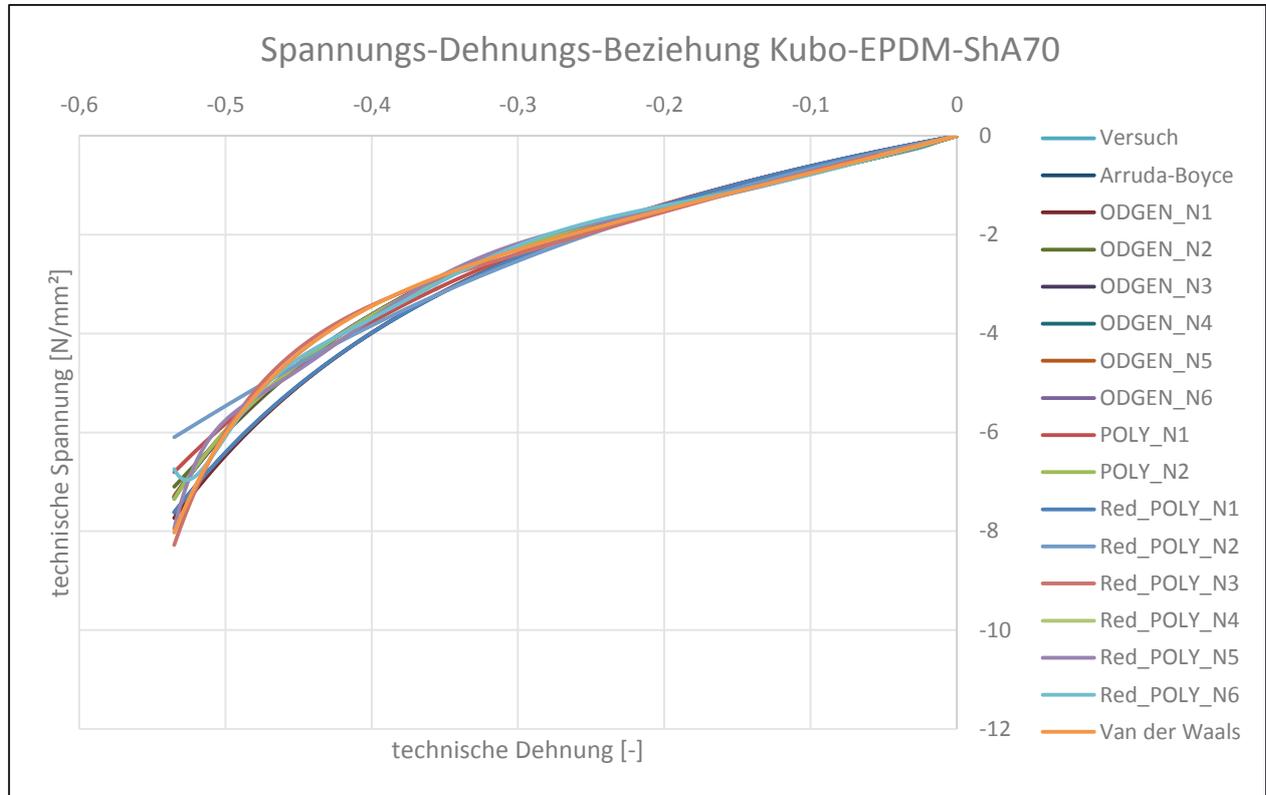
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,72634612	3,15267325											0
OGDEN_N2	2,77721898	7,55961206	-0,613338	-4,7685876									0
OGDEN_N3	2,74199174	-3,5760973	2,43341042	10,6199114	-2,96052399	-4,72548086							0
OGDEN_N4	-11,2797612	3,056936	9,09970042	6,14764952	10,3019466	-0,89192233	-5,91331224	-2,75030913					0
OGDEN_N5	16,6118503	1,61903134	-32,532369	3,49472233	19,6178775	5,50619558	2,23996983	-1,87744654	-3,72515374	-3,20998872			0
OGDEN_N6	-0,53169951	2,00002811	-7,8059296	3,99967364	9,45849673	5,99932838	4,05628227	-1,99933331	-3,23100942	-3,99883755	0,25714365	-5,99922133	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	0,68379221	0,09735821											0
POLY_N2	3,81036078	-2,71602204	3,21850579	-2,17825605	0,53323842								0
Red_POLY_N1	0,84872075												0
Red_POLY_N2	0,84935366		-0,00076153										0
Red_POLY_N3	0,8920541		-0,15189985			0,08330088							0
Red_POLY_N4	0,93072552		-0,42104384			0,46195222	-0,14521942						0
Red_POLY_N5	0,96168317		-0,77692153			1,37032368	-0,96671893	0,24365089					0
Red_POLY_N6	0,98536088		-1,18366397			2,99062832	-3,49387794	1,9408567	-0,41146373				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,69743488	322,041744											0
Van der Waals	1,93746313	2,92412732	1,2219294	0									0

Material: EPDM

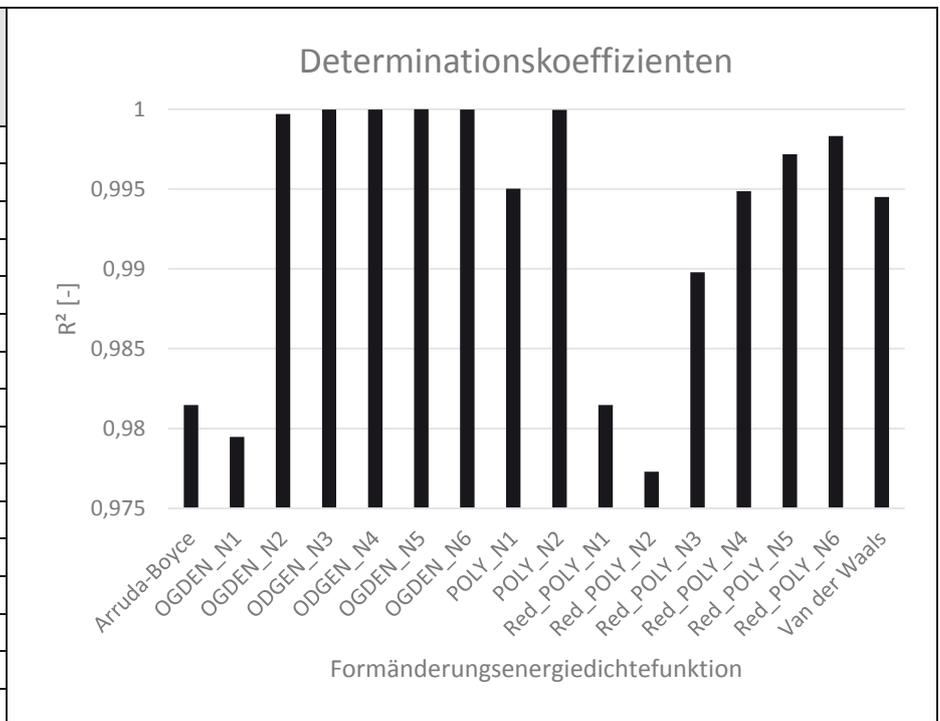
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,981479415
ODGEN_N1	0,979477411
ODGEN_N2	0,999700666
ODGEN_N3	0,999963848
ODGEN_N4	0,999976729
ODGEN_N5	0,999984551
ODGEN_N6	0,999967601
POLY_N1	0,995018458
POLY_N2	0,999947979
Red_POLY_N1	0,981479415
Red_POLY_N2	0,977295005
Red_POLY_N3	0,989782563
Red_POLY_N4	0,994864228
Red_POLY_N5	0,997179552
Red_POLY_N6	0,998319236
Van der Waals	0,994489344



Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; Kreisgeometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

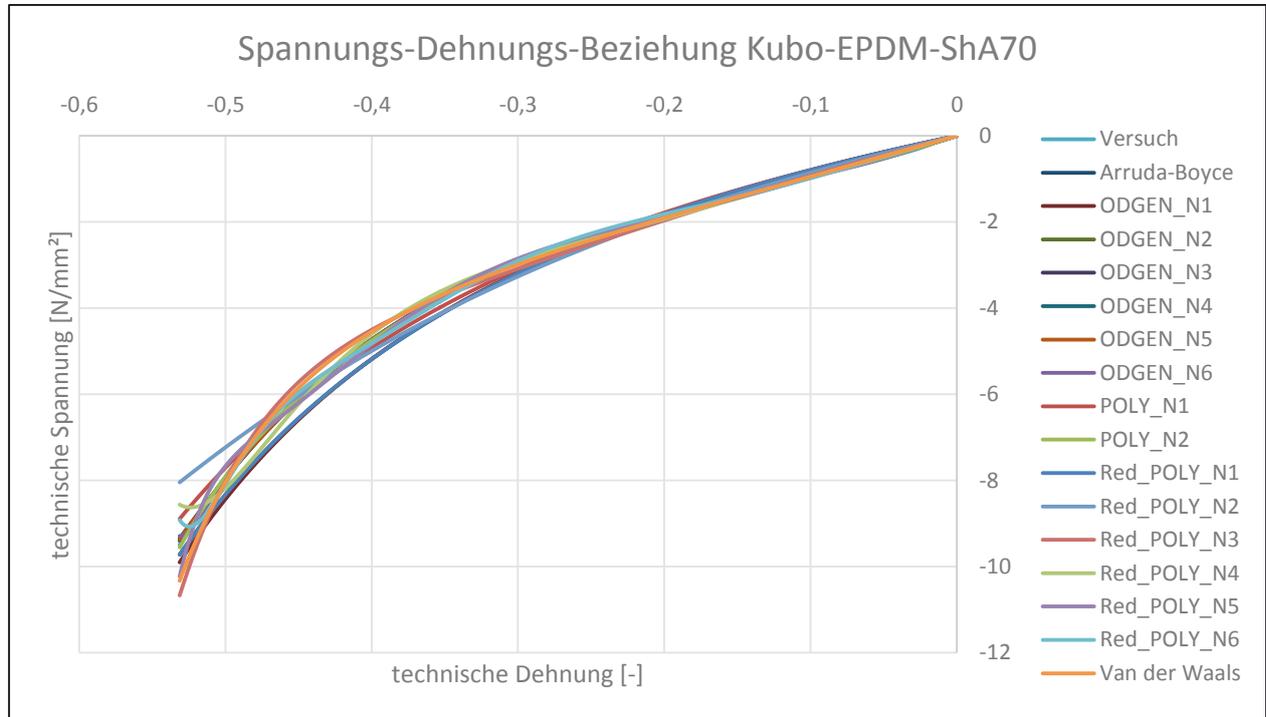
	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	1,84453853	2,30908633											0
OGDEN_N2	4,42859174	7,61977165	-1,49207173	-4,26450065									0
OGDEN_N3	1,18897707	-1,59087844	3,85903596	10,0819883	-2,05006101	-4,98027738							0
OGDEN_N4	-13,0063638	3,08918222	11,9021673	6,23757493	12,1481163	-0,925555835	-8,05536295	-2,76352997					0
OGDEN_N5	23,2129966	1,62337315	-43,6175599	3,55797047	27,0852303	5,56345754	0,13363169	-2,03762175	-3,82013744	-3,40592125			0
OGDEN_N6	8,42525737	1,99944148	-22,1835908	3,9988697	18,0286344	5,99845769	1,97533572	-1,9995851	-3,45725015	-3,99842976	0,19890678	-5,99922205	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	1,02778245	-0,0977017											0
POLY_N2	5,85028845	-4,37469489	4,11693396	-2,56778851	0,6267097								0
Red_POLY_N1	0,91545868												0
Red_POLY_N2	1,00545096		-0,08985238										0
Red_POLY_N3	1,10959773		-0,39705796			0,15778391							0
Red_POLY_N4	1,18513884		-0,84068992			0,7352672	-0,20993326						0
Red_POLY_N5	1,24139514		-1,39231855			2,03476593	-1,32035716	0,31446621					0
Red_POLY_N6	1,28451857		-2,02993501			4,37814058	-4,76734957	2,52072809	-0,51275539				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	1,83091714	1899,8628											0
Van der Waals	2,55093751	2,872616	1,6141932	0									0

Material: EPDM

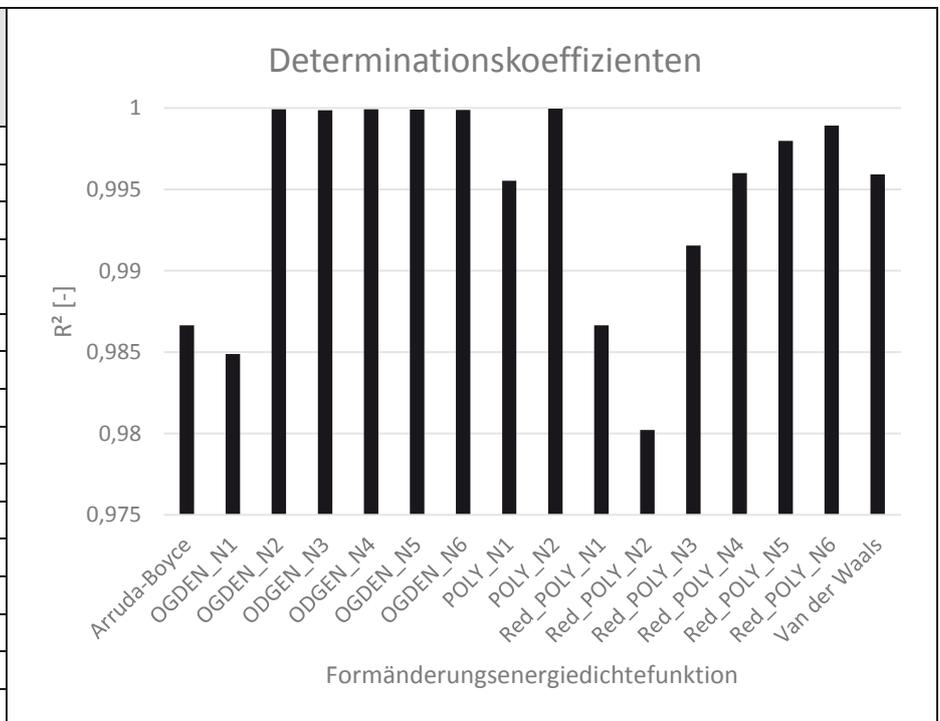
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,986650499
OGDEN_N1	0,984886521
OGDEN_N2	0,999934826
ODGEN_N3	0,999877986
ODGEN_N4	0,999933838
OGDEN_N5	0,999903781
OGDEN_N6	0,999882687
POLY_N1	0,995527908
POLY_N2	0,999972543
Red_POLY_N1	0,986650499
Red_POLY_N2	0,980215002
Red_POLY_N3	0,991552082
Red_POLY_N4	0,99600107
Red_POLY_N5	0,997980523
Red_POLY_N6	0,998919753
Van der Waals	0,99593138



Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; quadratische Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

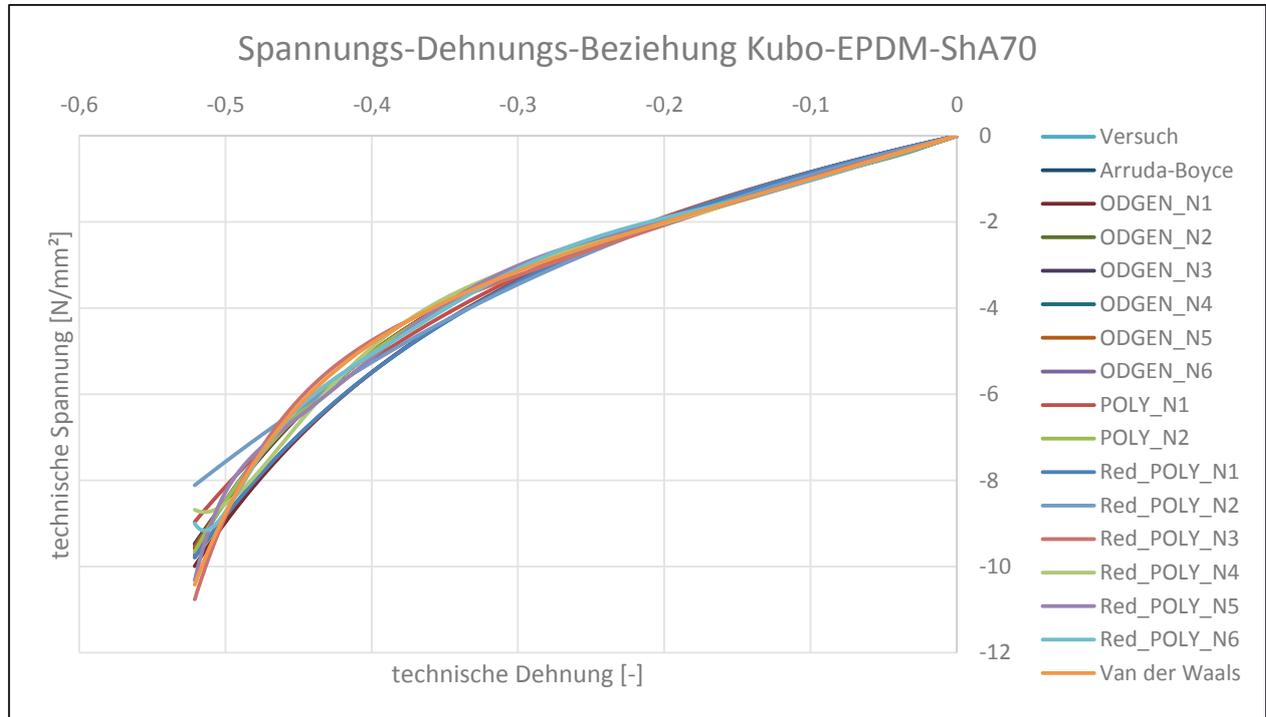
	μ_{11}	α_{11}	μ_{12}	α_{12}	μ_{13}	α_{13}	μ_{14}	α_{14}	μ_{15}	α_{15}	μ_{16}	α_{16}	D
OGDEN_N1	2,40147875	2,379566857											0
OGDEN_N2	5,1571751	6,88887727	-1,6165685	-3,92655561									0
OGDEN_N3	-4,48875038	3,04130431	9,45973978	5,08907268	-1,44789878	-3,59258158							0
OGDEN_N4	-12,389907	2,25983163	13,7441839	4,54566819	9,45770654	-1,152135	-7,27770364	-2,34283697					0
OGDEN_N5	-0,68663604	2,00207108	-1,13346332	3,99159184	6,87035104	5,95811929	0,07714167	-2,01721961	-1,59463671	-3,70954356			0
OGDEN_N6	-96,976654	8,08089225	114,553256	16,7378111	-54,1231886	24,9999507	53,6205591	1,20297031	-43,4976951	-9,14637613	29,4521184	-12,4360516	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	1,28152077	-0,09045088											0
POLY_N2	6,90969607	-5,07687286	4,67367949	-2,86907819	0,70017								0
Red_POLY_N1	1,19010459												0
Red_POLY_N2	1,28797552		-0,10197488										0
Red_POLY_N3	1,40995777		-0,47853078			0,19892533							0
Red_POLY_N4	1,49509928		-1,00383814			0,90334764	-0,26261277						0
Red_POLY_N5	1,55578035		-1,63174665			2,42915019	-1,60071427	0,38810365					0
Red_POLY_N6	1,59976393		-2,32127159			5,0461753	-5,55400791	2,98073184	-0,61665204				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	2,380209	2423,14422											0
Van der Waals	3,19241125	2,87643388	1,55424771	0									0

Material: EPDM

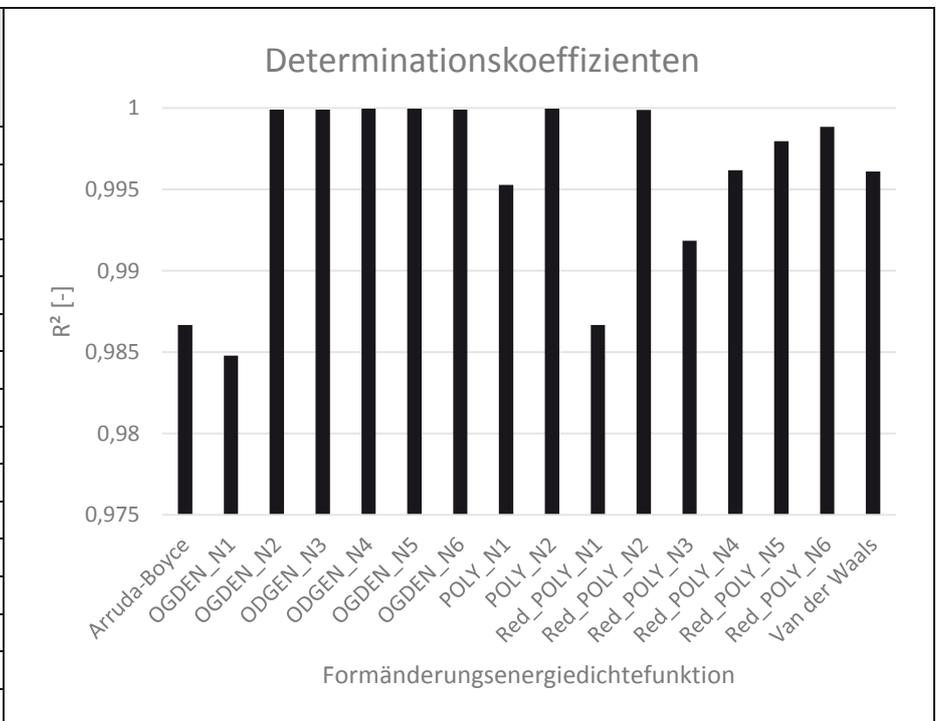
Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: ShA70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie



Formänderungsenergie-dichtefunktion nach	R ² [-]
Arruda-Boyce	0,986662577
OGDEN_N1	0,984773803
OGDEN_N2	0,999906282
OGDEN_N3	0,999919447
OGDEN_N4	0,999973832
OGDEN_N5	0,999968629
OGDEN_N6	0,999910703
POLY_N1	0,995277501
POLY_N2	0,999966285
Red_POLY_N1	0,986662577
Red_POLY_N2	0,999886302
Red_POLY_N3	0,991839066
Red_POLY_N4	0,996183298
Red_POLY_N5	0,997970181
Red_POLY_N6	0,998841725
Van der Waals	0,996103712



Material: EPDM Hersteller: Kubo Tech AG

Härte: Sha70

Messwerte aus: monotoner uniaxialer Druckversuch; rechteckige Geometrie

Tabelle: Materialparameter [N/mm²]

	μ_1	α_1	μ_2	α_2	μ_3	α_3	μ_4	α_4	μ_5	α_5	μ_6	α_6	D
OGDEN_N1	2,54882682	2,4551628											0
OGDEN_N2	5,49067344	7,15014195	-1,72250957	-4,07666958									0
ODGEN_N3	0,47255382	3,49018314	5,0290562	7,54390364	-1,72934955	-4,18654846							0
ODGEN_N4	-19,3067315	2,30246638	15,715531	5,08022853	19,2476334	-0,7048078	-11,8721158	-2,1617372					0
OGDEN_N5	8,91162711	1,61125761	-22,3803764	3,21452767	18,0508952	5,32270688	6,15852838	-1,59143862	-6,95477199	-2,75623242			0
OGDEN_N6	-42,0048265	2,00242957	53,2639024	4,00173444	-13,8133592	6,00131461	11,651725	-1,99764524	-6,15999047	-3,99743423	0,81529968	-5,99722546	0
	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}	C_{30}	C_{40}	C_{50}	C_{60}				D
POLY_N1	1,35939169	-0,09790095											0
POLY_N2	7,24970584	-5,32677468	5,12107098	-3,27191041	0,81703844								0
Red_POLY_N1	1,26084935												0
Red_POLY_N2	1,36422517		-0,11345863										0
Red_POLY_N3	1,49434084		-0,53728786			0,23679254							0
Red_POLY_N4	1,58324494		-1,11668367			1,05796405	-0,32377402						0
Red_POLY_N5	1,64675875		-1,8105004			2,83930391	-1,97562235	0,50679014					0
Red_POLY_N6	1,69416478		-2,59428366			5,98236525	-6,99561529	3,98892401	-0,87619604				0
	μ	λ_m	A	β									D
Arruda-Boyce	2,52169878	2385,83212											0
Van der Waals	3,38587891	2,82239702	1,6026303	0									0

11.10 Daten zur Vereinfachten Modellierung von Klemmhaltern

Material	Härte	Geometrie	Parameter			
			y0	x0	A1	t1
Kubo EPDM	ShA50	Q	1.73356	-0.71572	1.41432E-05	0.06218
		K	1.44851	-0.72968	2.54628E-05	0.06738
		R	2.36545	-1.13841	6.44200E-02	0.24498
	ShA60	Q	4.07158	-0.67363	8.83441E-10	0.03074
		K	3.01248	-0.48267	1.16124E-06	0.03279
		R	3.25514	-0.80921	4.57060E-01	0.25045
	ShA70	Q	5.31462	-0.65321	4.87647E-06	0.04619
		K	3.93313	-0.60553	5.63083E-07	0.03692
		R	3.82182	-0.74846	7.63660E-01	0.22969

Kubo Silikon	ShA40	Q	1.17532	-0.92669	2.08000E-03	0.14120
		K	0.69970	-1.77797	8.71207E-04	0.25095
		R	1.23230	-3.29790	2.71120E-09	0.16537
	ShA50	Q	2.43326	-0.79890	7.51205E-05	0.07708
		K	1.90079	-0.84298	5.57156E-05	0.07981
		R	2.69261	-0.84034	9.35627E-06	0.06757
	ShA60	Q	2.98226	-0.80989	2.53337E-05	0.06770
		K	2.23068	-0.74502	2.13160E-04	0.07681
		R	3.28617	-0.81734	7.19420E-06	0.06229

Kraiburg TPE	ShA50	Q	4.11614	-0.32368	1.36459E-04	0.03273
		K	3.42822	-0.16119	1.04500E-02	0.03069
		R	4.45893	-0.23038	2.27000E-03	0.03360
	ShA60	Q	6.25973	-0.23770	6.85887E-04	0.02478
		K	5.01016	-0.51907	3.36797E-07	0.03172
		R	6.89694	-0.20256	2.95770E-04	0.01885
	ShA70	Q	7.46288	-0.52195	4.66507E-08	0.02700
		K	6.33951	-0.30567	1.30813E-04	0.02772
		R	8.18648	-0.25194	3.50014E-04	0.02363

BASF TPU	ShA60	Q	2.73423	-0.88217	1.11080E-01	0.21463
		K	3.11155	-0.71386	2.17500E-02	0.13045
		R	2.35224	-0.97238	1.27560E-01	0.24501
	ShA70	Q	2.27251	-0.89602	6.00260E-01	0.30792
		K	3.09894	-0.66611	4.55960E-01	0.22842
		R	3.25514	-0.80921	4.57060E-01	0.25045
	ShA80	Q	3.29734	-0.81671	5.43820E-01	0.22905
		K	3.36323	-0.95331	1.91940E-01	0.21597
		R	3.82182	-0.74846	7.63660E-01	0.22969