

Werkstoffspezifisches Spannungs-Dehnungs- Verhalten und Grenzen der Beanspruchbarkeit elastischer Klebungen

vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Herrn

Dipl.-Ing. Thomas Scherer

aus Birkenfeld

Kaiserslautern, 2014

D 386

Dekan: Prof. Dr.-Ing. C. Schindler

Promotionskommission:

Vorsitzender: Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. H.-J. Bart

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. P. L. Geiß

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M. Maier

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Juni 2014

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand der Arbeitsgruppe Werkstoff- und Oberflächentechnik Kaiserslautern (AWOK) der Technischen Universität Kaiserslautern. Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr.-Ing. P. L. Geiß, der mir die Durchführung der Arbeit ermöglichte und mir mit fachlichem Rat zur Seite stand, Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Maier für das Anfertigen des Gutachtens und die anregenden Diskussionen zum Themengebiet und Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. H.-J. Bart für die freundliche Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission,

den derzeitigen und früheren Mitarbeitern der AG Werkstoff- und Oberflächentechnik Kaiserslautern, insbesondere Sylvia Bachmann, Pascal Bernd, Kambiz Damavandi, Juliane Elsässer, Julia Evdokimow, Ruben Friedland, Sascha Gramsch-Kempkes, Caro Hofmann, Mark Pascal Kötter, Vitalijus Kohl, Rudi Schmitt, Melanie Schumann und Johannes Stahl sowie allen ehemaligen und derzeitigen wissenschaftlichen Hilfskräften, Studien- und Diplomarbeitern,

Herr Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann und seinen Mitarbeitern Björn Abeln und Carl Richter vom Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau der RWTH Aachen, sowie Prof. Dr. Ö. Bucak und seinem Mitarbeiter Martin Bues für die Zusammenarbeit in den Forschungsvorhaben LAKKI und KLAX,

der Firma KÖMMERLING Chemische Fabrik GmbH und insbesondere Herrn Dr. Wolfgang Wittwer, für die außergewöhnliche Unterstützung meiner Arbeit,

meiner Frau Inga, für ihr Verständnis und die Unterstützung während meiner Zeit als Doktorand,

meinen Eltern, die immer an mich geglaubt und durch ihre Unterstützung und Förderung den Grundstein für das Gelingen dieser Arbeit legten.

Inhaltsverzeichnis

<u>I.</u>	<u>Kurzfassung.....</u>	<u>I</u>
<u>II.</u>	<u>Abstract.....</u>	<u>II</u>
<u>III.</u>	<u>Summary.....</u>	<u>III</u>
<u>1</u>	<u>Einleitung und Motivation</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>Theoretische Grundlagen</u>	<u>3</u>
2.1	Mechanisches Werkstoffverhalten von Elastomeren.....	3
2.1.1	Green-Elastizität	3
2.1.2	Mullins-Effekt	4
2.1.3	Elastische Klebverbindungen und deren molekularer Aufbau	5
2.2	Grundlagen der Kontinuumsmechanik.....	7
2.2.1	Deformationsgradient und Deformationsmaße.....	7
2.2.2	Dehnungen und Verstreckungen.....	8
2.2.3	Querdehnung.....	11
2.2.4	Invarianten.....	13
2.3	Numerische Verfahren zur Beschreibung von hyperelastischen Werkstoffen	16
2.3.1	Werkstoffmodelle für Green-Elastizität.....	17
2.3.2	Werkstoffmodelle für den Mullins-Effekt.....	19
<u>3</u>	<u>Materialien und Methoden.....</u>	<u>21</u>
3.1	Materialien.....	21
3.1.1	Substrate	21
3.1.2	Klebstoffe.....	21
3.2	Oberflächenvorbereitung und -vorbehandlung.....	23
3.2.1	Edelkorundstrahlen	23
3.2.2	Wischentfettung	23
3.3	Prüfmethoden.....	24
3.3.1	Prüfmaschine.....	24

3.3.2	Optische Messeinrichtung.....	24
3.3.3	Zugversuch.....	25
3.3.4	Zugscherversuch	29
3.3.5	Druckversuch.....	35
3.3.6	Kopfzugversuch	40
3.3.7	Energiebetrachtung bei mechanischen Prüfergebnissen	42
3.3.8	Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse.....	43
3.4	Verfahren zur Identifikation der Werkstoffkennwerte.....	44
3.4.1	Identifikationsverfahren 1	44
3.4.2	Identifikationsverfahren 2	47
4	<u>Experimentelle Bestimmung der Klebstoffeigenschaften</u>	49
4.1	Uniaxiale Zugversuche	49
4.1.1	Kömmerling Körapur 140.....	50
4.1.2	Kömmerling GD 920	52
4.2	Zugscherversuche.....	55
4.2.1	Kömmerling Körapur 140.....	55
4.2.2	Kömmerling GD 920	56
4.2.3	Validierung der Betrachtung zum Energieeintrag.....	57
4.3	Uniaxiale Druckversuche.....	58
4.3.1	Kömmerling Körapur 140.....	59
4.3.2	Kömmerling GD 920	61
4.4	Untersuchungen mittels Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse	64
4.4.1	Kömmerling Körapur 140.....	65
4.4.2	Kömmerling GD 920	66
4.5	Beurteilung der Ergebnisse	67
5	<u>Ableiten von Kennwerten für Green'sche Materialmodelle</u>	68
5.1	Kennwertermittlung für Green-Elastisches Werkstoffverhalten	68
5.1.1	Identifikation nach Verfahren 1	68
5.1.2	Verbesserung der gefundenen Werkstoffgesetze nach Verfahren 2	72

5.2	Kennwertermittlung für Mullins-Effekt	75
5.2.1	Kömmerling Körapur 140	75
5.2.2	Kömmerling GD 920	76
5.3	Beurteilung der Ergebnisse	76
6	<u>Überprüfung der Materialmodelle an Klebfugen mit multiaxialen Spannungszuständen</u>	79
6.1	Kopfzugversuche.....	79
6.1.1	Kömmerling Körapur 140	80
6.1.2	Kömmerling GD 920	82
6.2	Validierungsrechnung und Vergleich mit dem Experiment.....	85
6.2.1	Validierung des Werkstoffmodells für Kömmerling Körapur 140.....	86
6.2.2	Validierung des Werkstoffmodells für Kömmerling GD 920.....	88
6.3	Betrachtung des Verformungszustandes der Kopfzugprobe	90
6.3.1	Kömmerling Körapur 140	91
6.3.2	Kömmerling GD 920	92
6.4	Beurteilung und Vergleich mit konventioneller Berechnung	94
7	<u>Grenzen der Beanspruchbarkeit.....</u>	97
7.1	Untersuchungen zum Bruchverhalten der betrachteten Klebstoffe	97
7.1.1	Versagen bei einfacher Belastung	97
7.1.2	Versagen bei mehrfacher Belastung	105
7.2	Vergleich zwischen Simulation und Experiment im Grenzbereich der Beanspruchbarkeit.....	112
7.3	Betrachtung des Verformungszustandes im Bereich der ersten erkennbaren Schädigung	113
7.3.1	Vergleichsspannung nach von Mises	113
7.3.2	Verformungszustand.....	114
7.3.3	Verstreckgrade und Invarianten	115
7.3.4	Formänderungsenergiedichte im Bereich der ersten erkennbaren Schädigung.....	117
7.4	Beurteilung der Untersuchungen zum Grenzbereich der Beanspruchbarkeit.....	118

8	<u>Zusammenfassung und Ausblick.....</u>	<u>120</u>
9	<u>Literatur.....</u>	<u>123</u>
10	<u>Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....</u>	<u>130</u>
10.1	Abbildungsverzeichnis	130
10.2	Tabellenverzeichnis	140
A.	<u>Anhang.....</u>	<u>144</u>
A.1	Ermittelte Werkstoffkennwerte nach Identifikationsverfahren 1	144
A.1.1	Kömmerling Körapur 140	144
A.1.2	Kömmerling GD 920	148
A.2	Vergleich der experimentell ermittelten Punkverschiebungen auf der Probenoberfläche von Kopfbogenproben mit den Simulationsergebnissen.....	152
A.2.1	Kömmerling Körapur 140	152
A.2.2	Kömmerling GD 920	153
A.3	Abbildungen der Schädigungsverläufe	154
A.3.1	Kömmerling Körapur 140	154
A.3.2	Kömmerling GD 920	155
A.4	Studien- und Diplomarbeiten, die einen Beitrag zu dieser Dissertation geleistet haben	156

I. Kurzfassung

Elastische Klebverbindungen werden heute in der Praxis immer häufiger lastabtragend eingesetzt. Daher steigt auch die Nachfrage nach zuverlässigen Berechnungsmethoden und Beurteilungskriterien für diese Klebstoffe. Ziel dieser Arbeit ist es, anhand von geeigneten Prüfmethoden, Werkstoffkennwerte für Werkstoffgesetze, die für FE-Berechnungen geeignet sind, zu bestimmen und diese zu überprüfen. Außerdem soll der Grenzzustand der Beanspruchbarkeit untersucht werden um einerseits bewerten zu können, bis zu welchem Beanspruchungszustand die verwendeten Werkstoffgesetze einsetzbar sind und andererseits um die Grenzbelastungen für diese Klebstoffe beurteilen zu können. In dieser Arbeit wurden zwei elastische Klebstoffe untersucht, einer auf Silikon und einer auf Polyurethanbasis. Die Ermittlung der Werkstoffkennwerte erfolgt an Normproben, die den Vorteil einer weiten Verbreitung und Reproduzierbarkeit bieten. Das Werkstoffverhalten wurde unter Zug-, Schub- und Druckbelastung untersucht. Dabei wurde die Belastungsgeschwindigkeit in allen Belastungsarten so gewählt, dass der Energieeintrag pro Volumen und Zeiteinheit für alle Belastungsarten gleich ist. Dies bietet den Vorteil, dass für alle Belastungsarten der gleiche energetische Zustand des Klebstoffes untersucht wird. Diese Untersuchungen bilden die Grundlage für die Bestimmung der Werkstoffkonstanten für Green'sche Werkstoffgesetze. Diese haben sich für die Berechnung von elastomeren Werkstoffen bewährt. Die Kennwerte für diese Werkstoffgesetze wurden durch Methoden der Ausgleichsrechnung (Methode der kleinsten Quadrate) iterativ so bestimmt. Die Überprüfung der Kennwerte erfolgt anhand von Kopfzugproben. Diese geklebten Proben mit mehrachsigen Spannungszuständen zeigen eine Vielzahl von in der Praxis relevanten Spannungszuständen und damit besonders für die Überprüfung der Werkstoffgesetze geeignet. Der Vergleich zwischen Simulation und Experiment zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Anhand dieser Probengeometrie werden auch der Grenzzustand der Beanspruchung und die hierfür maßgeblichen mechanischen Größen untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass die Formänderungsenergiedichte als Bewertungsgröße für den Grenzzustand und das Eintreten von Schädigungen im Werkstoff geeignet ist.

II. Abstract

Elastic adhesive joints are used today in many industrial sectors. In these applications adhesive joints are used more frequently in a load carrying way. Thus there is a strong increase in demand for reliable calculation methods for these materials. The goal of this thesis is to determine and verify the variables for suitable material laws to be used in FE analyses of two different adhesives (one silicone based and one polyurethane based), based on appropriate test methods. Furthermore, the serviceability limit state of these adhesives is examined in order to evaluate critical stress and deformation magnitudes as well as the range in which the material models provide sufficient results. In this work the stress-strain behavior is investigated using standard test specimen which deliver a wide distribution and a high reproducibility. Since the mechanical behavior of elastic adhesives depends on the mode of deformation, the mechanical properties are measured from the three basic strain states: simple tension, simple shear and simple compression. These tests are performed with constant energy input per volume and time to guarantee the same energy conditions for all three strain states. Based on the results of the mechanical tests the material parameters for hyperelastic material laws are derived iteratively by minimizing the difference between calculated and measured result. In the next step these material laws are validated by comparing the calculated results with the results from a glued cylindrical test specimen with high adhesive layer thickness, which shows a variety of different multi-axial strain states. The comparison shows a good agreement of the simulation results. Based on these results the serviceability limit state and the relevant stress and deformation magnitudes are investigated using identical cylindrical test specimens. The investigations show that the strain energy density is suitable as evaluation parameter for the limiting condition and the occurrence of damage in the material.

III. Summary

Today elastic adhesive joints are used in many industrial fields, for example in the automotive industry, in aviation, in construction or in medical technology. In these applications adhesive joints are used more frequently in a load carrying way. Elastic adhesive joints are able to balance out changes in shape of the joint parts (e.g. from different thermal expansion factors) and allow the joining of nearly every material combination. In practical applications the stress-strain behavior is often calculated by using linear elastic material laws and equivalent stresses as criteria for the serviceability limit state with high safety factors (cf. chapter 1). To improve the efficiency of future designs there is a strong increase in demand for reliable calculation methods for these materials.

The goal of this thesis is to determine and verify the variables for suitable material laws to be used in FE analyses for elastic adhesives, based on appropriate test methods. Furthermore, the serviceability limit state of these adhesives is examined in order to evaluate critical stress and deformation magnitudes as well as the range in which the material models provide sufficient results. In this work two different adhesives are examined. The first is a polyurethane based adhesive (KP 140), which cures with the humidity of the air or by adding a water-based second component and the second one is a two-component structural silicone (GD 920).

The mechanical properties of the investigated adhesives are nonlinear (hyperelastic) and depend on the deformation mode, the deformation rate, the deformation history and the temperature. In order to reduce the number of dimensions the mechanical tests in this work are performed at room temperature and with constant deformation rates. Furthermore in a first step the stress-strain behavior is investigated in a range where damage has no significant impact on the mechanical properties. The influence of deformation rate and temperature is assessed by dynamic-mechanical-analysis (DMTA), but not fully investigated. These investigations (cf. chapter 4) show a much smaller influence of the deformation rate and the temperature near the room temperature than near the glass transition range. In order to investigate the influence of the deformation mode and -history the stress-strain-behavior is measured in three different strain states and in successive stress cycles using contactless optical measuring technologies. The three different strain states are simple tension, shear and simple compression. In this step the stress-strain behavior is investigated using standard test specimen which deliver a wide distribution and a high reproducibility. In this work the simple tension stress state is measured from bulk specimen according to DIN EN 527-2, the shear state is measured from thick adherent shear specimen according to EN 14862-2 and the uniaxial compression is measured from bulk specimen according to DIN EN ISO 604 and

DIN ISO 7743. In order to investigate the stress-strain behavior at the same energy conditions for all three strain states the strain rate for the tests is determined with respect to the energy input rate. The strain-rate was calculated in a way that the energy input per volume and time is constant for all performed tests (cf. chapter 3.3.4.1).

Based on the characterization of the mechanical properties, the material parameters for hyperelastic material laws are calculated (cf. chapter 5). These material laws have proven their suitability for calculating elastomeric materials. Therefore the difference between simulation and the three experimental tests is minimized by use of the method of least squares. In a first step the deviatoric and volumetric parts of the stress-strain behavior are considered separately (cf. chapter 3.4.1 und 5.1.1). This method is state of the art in commercially available finite-element (FE) software but does not provide good results when the volumetric behavior is significant. Depending on the results of this determination the material parameters are improved by minimizing the difference between FE-analyses from one volume element and the experimental test data from all three strain states including the measured lateral contraction from the uniaxial tension test (cf. chapter 3.4.2 and 5.1.2). The benefit of this method is, that the deviatoric and the volumetric material behavior is derived in one step, which provides significant improvement especially for materials with Poisson's ratio smaller than 0.5.

In addition to the uniaxial tests, the force-displacement behavior of cylindrical test specimen, with high adhesive layer thickness and different geometry rates (diameter to adhesive layer thickness), is measured under tension and compression. These results are compared with the simulation results to validate the identified material parameters (cf. chapter 6). These cylindrical test specimens provide a variety of different multi-axial strain states. In Addition to the force-displacement behavior the local displacement on the surface of the test specimen, measured contactless by videoextensometrie, is compared with the analysis results. Both, the force-displacement and the local displacements, show good agreement of the simulation results with the test data. The difference between the simulation and test is smaller than the variability of the test for all investigated geometries. The results from this validation show, that the chosen methods are capable to predict the mechanical behavior of the investigated adhesives under multi-axial stress states.

On the basis of these results the serviceability limit state is examined (cf. chapter 7). In a first step the point in the cylindrical test specimen at which the first damage occurs is identified. Furthermore the crack growth in both adhesives is characterized. In Addition the damage behavior (crack initiation and growth) in successive stress cycles is investigated. To characterize the damage behavior the energy input into the test specimen was evaluated. The results show first macroscopic visible damage in stress states that are much smaller than the stress state of the total failure of the specimen. Furthermore the comparison shows a good

agreement of the simulation with the test results until this stress state. This means, that in order to describe the stress-strain-behavior of the investigated adhesives, it is necessary to model the damage behavior of these adhesives. Nevertheless, the stress states in which damage occurs are far beyond the allowable stress states for practical applications in which the crash behavior is not relevant.

Since it has been shown, that the FE-analysis delivers good results in the stress state of the first macroscopic damage the deformations and stresses in this state are analyzed in order to find the critical magnitudes for the damage initiation. The results of this FE-analysis show that the von Mises equivalent stress is not a suitable value to describe the initiation of damage because it is independent of hydrostatic stresses. The strain energy density delivers much better results and might be suitable to define a damage initiation criterion for FE-analysis.

The methods used in this work have proved to be useful in describing the stress-strain behavior under constant energy input rate and temperature, up to the point where the first macroscopic damage occurs. With the strain energy density as a suitable variable for the damage initiation it is furthermore possible to estimate the range where the simulation shows valid results.

1 Einleitung und Motivation

Elastische Klebverbindungen werden heute bereits in den unterschiedlichsten Einsatzgebieten lastabtragend eingesetzt. Klebtechnische Anwendungen finden sich beispielsweise im Automobilbau [1, 2], in der Luftfahrttechnik [3] und Medizintechnik [4]. Zur Herstellung eines *Aston Martin Vanquish* werden beispielsweise ca. 15 Liter Klebstoff verwendet [5]. Der bekannteste und bereits sehr lange etablierte Anwendungsfall aus der Automobilindustrie ist dabei die Montage der Frontscheibe von Fahrzeugen, die mittels eines elastischen Klebstoffs in die Karosserie des Fahrzeugs erfolgt. Dabei hat diese Verbindung auf die Verwindungssteifigkeit der Karosserie einen entscheidenden Einfluss [6–8]. Auch in der Nutzfahrzeugtechnik werden Klebverbindungen immer häufiger eingesetzt [9].

Im Fassadenbau steigt aufgrund der Nachfrage nach immer anspruchsvolleren, schlanken und transparenten Konstruktionen auch die Nachfrage nach einer zuverlässigen, lastabtragenden Verbindungstechnik [10]. Gerade elastische Klebungen bieten dabei den Vorteil, dass sie in der Lage sind, Formänderungen der Fügepartner, beispielsweise durch unterschiedliche Temperaturexpansionskoeffizienten, auszugleichen und dabei Verbindungen zwischen nahezu jeder beliebigen Werkstoffkombination zu ermöglichen [11, 12]. Die Zulassung geklebter, lastabtragender Verbindungen ist allerdings in Deutschland derzeit nur für bestimmte Silikonklebungen, mit sehr starken Einschränkungen, gegeben. Alle anderen Klebverbindungen bedürfen einer Zustimmung im Einzelfall. Allgemein zulassungsfähig sind derzeit ausschließlich rechteckige Fugengeometrien, deren Festigkeit mit Hilfe von Handformeln und hohen Sicherheitsbeiwerten nachgewiesen wird (vgl. [13]). Für die Berechnung der Klebverbindungen werden dabei in der Regel linear-elastische Ansätze und Vergleichsspannungen verwendet [13–16]. Diese starken Einschränkungen sind vor allem darin begründet, dass sich die zuverlässige Berechenbarkeit von elastischen Klebverbindungen vor allem bei komplexen Fugengeometrien mit mehrachsigen Spannungszuständen oft als problematisch herausstellt. Die vorgenannten Beispiele zeigen deutlich die Nachfrage nach zuverlässigen Berechnungsmethoden für elastische Klebfugen um in Zukunft schlankere und weniger überdimensionierte Konstruktionen zu ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit ist es, auf Grundlage von geeigneten Versuchen, Prüfmethoden zur Bestimmung der Materialkennwerte für Werkstoffgesetze zu ermitteln, die das Werkstoffverhalten möglichst bis zum Grenzbereich der Beanspruchbarkeit abbilden können. Für die Kennwertermittlung sollen dabei möglichst Normproben verwendet werden, da diese den Vorteil einer weiten Verbreitung und guter Reproduzierbarkeit bieten. Für die Verformungsmessung wird berührungslose optische Messtechnik eingesetzt (Videoextensometrie), die es ermöglicht, die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Klebstoffe sehr genau zu messen.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von elastischen Klebstoffen ist nichtlinear und abhängig von der Belastungsart, der Belastungsgeschwindigkeit, der Temperatur und der Historie [11, 12, 17–19]. Diese Umstände machen es schwierig, ein allgemeingültiges Werkstoffgesetz zu finden. Um die Vielzahl der Einflussfaktoren zu begrenzen, wird das Werkstoffverhalten im Rahmen dieser Arbeit bei Raumtemperatur und bei festgelegten Belastungsgeschwindigkeiten betrachtet. Als maßgebliche Größe für die Belastungsgeschwindigkeit wird hier die Energieeintragsrate gewählt. Die Dehnrates werden für die unterschiedlichen Belastungsarten im Vorfeld der Versuche so festgelegt, dass die eingebrachte Energie in das Werkstoffvolumen je Zeiteinheit für alle Versuche möglichst gleich ist.

Auf Grundlage dieser Versuche werden dann Werkstoffkennwerte ermittelt, mit denen sich das Werkstoffverhalten unter mehrachsiger Beanspruchung abbilden lässt. Verwendet werden dazu Green'sche Werkstoffgesetze, die sich bei der Beschreibung von elastomeren Werkstoffen bewährt haben [20–22]. Zur Überprüfung dieser Werkstoffkennwerte werden die Mess- und Simulationsergebnisse von Proben mit mehrachsigen Spannungszuständen verglichen und die Qualität des ermittelten Werkstoffmodells bewertet. Außerdem wird anhand dieser Probengeometrie das Werkstoffverhalten im Grenzbereich der Beanspruchbarkeit untersucht und die Gültigkeit der ermittelten Werkstoffgesetze in diesem Bereich bewertet. Aufbauend auf diesen Untersuchungen wird abschließend untersucht, welche Größen für die Bewertung des Grenzzustandes und das Auftreten der ersten erkennbaren Werkstoffschädigung relevant sind.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Mechanisches Werkstoffverhalten von Elastomeren

Das mechanische Verhalten elastomerer Werkstoffe unterscheidet sich stark von dem anderer Werkstoffe bspw. von Metallen. Die mechanischen Werkstoffeigenschaften können dabei mit Hilfe der in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Modellvorstellung beschrieben werden. Auf die wichtigsten mechanischen Eigenschaften wird im Folgenden näher eingegangen.

2.1.1 Green-Elastizität

Elastomere zeichnen sich durch relativ große reversible Verformbarkeit, teilweise weit über 100 % Dehnung, bei relativ kleinen Kräften aus. Bereits im Jahr 1679 beschrieb Robert Hooke (1635 – 1703) den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung eines elastischen Werkstoffs (in diesem Fall eine Feder) durch einen linearen Zusammenhang mit einer Proportionalitätskonstante [23].

Das Verhalten von Elastomeren ist allerdings zu sehr großen Anteilen bis zum Versagen zwar elastisch aber nichtlinear. Diese Eigenschaft wird in der Kontinuumsmechanik als Hyperelastizität oder auch als Green-Elastizität (nach George Green, 1793 – 1841) bezeichnet. Für kleine Verformungen kann das Spannungs-Dehnungs-Verhalten mittels eines Modul beschrieben werden. Hierzu bietet sich der Schubmodul an. Dieser ist für relativ kleine Verformungen konstant. Für große Verformungen ist diese Beschreibung aufgrund des nichtlinearen Verhaltens ungültig [21]. Ein beispielhafter Schubspannungs-Gleitungs-Verlauf ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

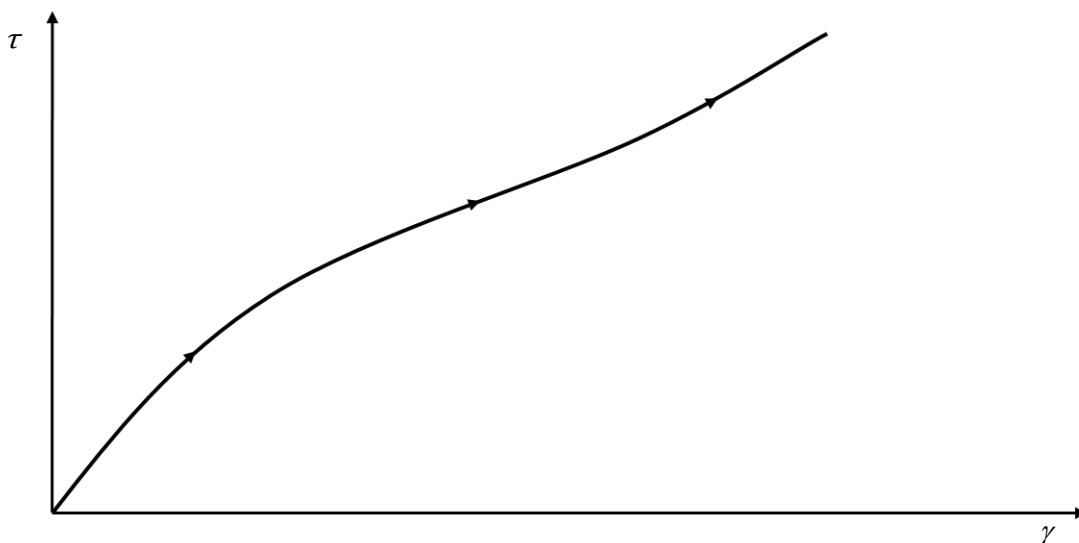


Abbildung 2.1 Hyperelastischer Schubspannungs-Gleitungs-Verlauf

Insbesondere bei gefüllten Elastomeren zeigen sich nach Entlastung kleine Anteile an bleibender Deformation. Diese sind im Verhältnis zum elastischen Verhalten deutlich kleiner. Nach mehreren Belastungen auf das gleiche Lastniveau werden diese plastischen Anteile immer kleiner und verschwinden nahezu ganz [21, 24, 25]. Im unbelasteten Zustand bilden sich diese Dehnungen teilweise nach einiger Zeit wieder zurück und der Werkstoff gelangt zu seiner Ausgangsform. Daher werden Verformungsanteile, die nach Entlastung als Achsenabschnitt auf der x-Achse sichtbar sind, im Folgenden als zunächst bleibende Dehnungen bezeichnet.

2.1.2 Mullins-Effekt

Elastomere zeigen häufig eine große Abweichung in ihrem Spannungs-Dehnungs-Verlauf zwischen der ersten und den darauf folgenden Belastungen. Dieser Effekt ist bereits in den 1960er Jahren beschrieben worden und wird heute in der Literatur häufig Mullins- oder Payne-Effekt (nach Leonard Mullins [26], bzw. A. R. Payne [27]) genannt. [21, 25, 28, 29]

Der in Abbildung 2.2 gezeigte Verlauf ist die schematische Darstellung eines typischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens für einen Werkstoff mit Mullins-Effekt.

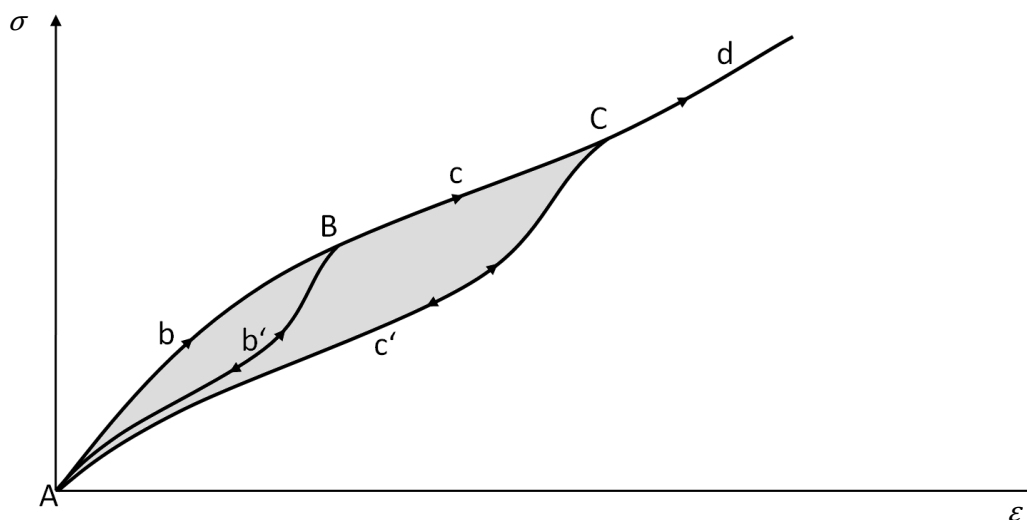


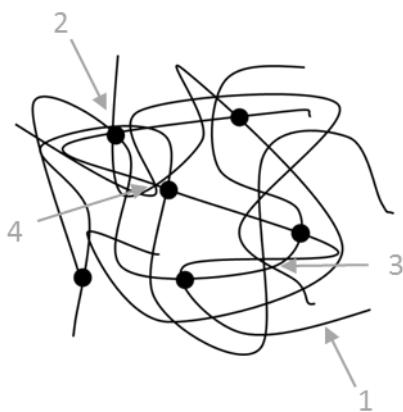
Abbildung 2.2 Schematische Darstellung des Mullins-Effekts (vgl. [26, 28, 30])

Wird ein Werkstoff, der einen Mullins-Effekt zeigt, zum ersten Mal mit einer bestimmten Spannung belastet, so verursacht diese Spannung eine Dehnung entlang der Strecke AbB (vgl. Abbildung 2.2). Bei der Entlastung des Werkstoffes vom Punkt B zeigt sich dann die Entlastung entlang der Strecke Bb'A. Wird der Werkstoff erneut belastet, folgt der Werkstoff der entfestigten Spannungs-Dehnungs-Kurve Ab'B. Für weitere Belastungen mit Dehnungen größer als B folgt der Werkstoff im weiteren Verlauf der Kurve Bc. Die Kurve Bc ist dabei der Spannungs-Dehnungs-Verlauf, der aufgetreten wäre, wenn der Werkstoff im ersten Lastzyk-

lus über B hinaus bis zum Versagen belastet worden wäre (AbBcCd). Wird die Belastung nun am Punkt C gestoppt und wieder entlastet, so bleibt der Spannungs-Dehnungs-Verlauf auf dieser Kurve (Ac'C) für alle Lasten, die kleiner als C sind. Für Belastungen größer als C folgt die Spannungs-Dehnungs-Kurve wieder dem ursprünglichen Verlauf (Cd). Der in Abbildung 2.2 grau dargestellte Bereich stellt die beim Mullins-Effekt dissipierte Energie dar. [26, 28, 30–32]

2.1.3 Elastische Klebverbindungen und deren molekularer Aufbau

Die mechanische Festigkeit von Klebverbindungen ist einerseits abhängig von der Anhaftung (Flächenhaftung) des Klebstoffes (Adhäsion) an den Füge­teilen und andererseits von der inneren Festigkeit des Klebstoffes (Kohäsion). Die Adhäsion entsteht durch die Ausbildung von chemischen Primärbindungen (z. B. kovalente Bindungen, ionische Bindungen) und zwischenmolekularen Sekundärbindungen zwischen Klebstoff und Füge­teil. Im Bereich der Adhäsion zeigt der Klebstoff im Vergleich zum Kohäsionsbereich abweichende Eigenschaften. Diese abweichenden Eigenschaften treten bis zu einem Abstand von 100 µm von der Füge­teiloberfläche auf [33]. In der Kohäsionszone zeigt der Klebstoff seine nominellen Eigenschaften [34]. Die Kohäsionsfestigkeit wird dabei von den in Abbildung 2.3 dargestellten vier Bindungsarten beeinflusst.



1. chemische Bindungen innerhalb der Klebstoff-Polymere
2. chemische Bindungen, die zur Vernetzung des Polymers führen
3. zwischenmolekulare Wechselwirkungen zwischen den Klebstoff-Molekülen
4. mechanische Verklammerungen verschiedener Klebstoff-Moleküle

Abbildung 2.3 Bindungsarten, die einen Beitrag zur Kohäsionsfestigkeit von Klebstoffen leisten [34]

Die mechanischen Eigenschaften im kohäsiven Bereich sind stark vom Grad der Vernetzung abhängig. Der Vernetzungsgrad ist dabei ein Maß für die Anzahl der vernetzten Grundbausteine pro Volumen. Nach Vernetzungsgrad unterscheidet man, bei Kunststoffen und auch bei Klebstoffen, die in Abbildung 2.4 dargestellten Grundstrukturen.

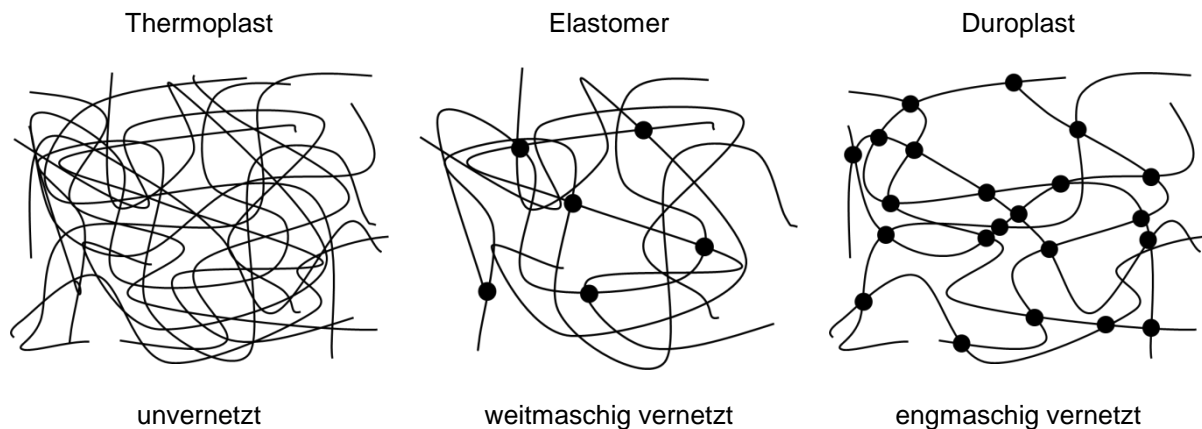


Abbildung 2.4 Schematische Darstellung des Aufbaus polymerer Werkstoffe (vgl. [11, 12, 24, 35])

Die hier betrachteten elastischen Klebstoffe sind den Elastomeren zuzuordnen. Elastomere sind formfeste aber elastisch verformbare Kunststoffe, deren Glasübergangspunkt sich unterhalb der Einsatztemperatur befindet. Sie unterscheiden sich zum einen gegenüber den Thermoplasten, die eine unvernetzte Struktur aufweisen, und zum anderen gegenüber den engmaschig vernetzten Duroplasten. Der molekulare Aufbau polymerer Werkstoffe ist in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt. Der molekulare Aufbau von Elastomeren zeichnet sich durch langkettige Makromoleküle aus, die sich miteinander verschlaufen. Dabei sind diese Molekülketten, im Gegensatz zu bspw. Thermoplasten, an wenigen Stellen durch chemische Verbindungen miteinander verknüpft. Unter Belastung richten sich die verschlaufenen Molekülketten durch Strecken, Ausrichten und Aufbrechen von Bindungen so lange aus, bis ein Gleichgewicht zwischen innerer und äußerer Kraft erreicht wird. Bei größer werdenden Kräften lösen sich einzelne Verbindungen und gespannte Ketten reißen. Bei gleichbleibender andauernder Belastung kann es außerdem zu Umlagerungseffekten (Entschlafungen, Abgleiten) und einer damit verbundenen ansteigenden Verformung kommen. [21, 36, 37]

In technischen Anwendungen werden häufig gefüllte Elastomerwerkstoffe verwendet. Als Füllstoffe werden bspw. Ruße oder Kieselsäuren eingesetzt. Diese Füllstoffe haben einen Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften der Elastomere. Dieser Einfluss wird häufig als Verstärkung bezeichnet. Die überwiegend positiven Einflüsse von Füllstoffen sind dabei sehr komplex und stark abhängig von Art und Menge des Füllstoffes [21, 24].

2.2 Grundlagen der Kontinuumsmechanik

2.2.1 Deformationsgradient und Deformationsmaße

Der Deformationsgradient ist eine zentrale Größe in der Kontinuumsmechanik. Ist x der Bewegungsvektor und X die Ortskoordinate eines Punktes in einem Kontinuum, so gilt für den zugehörigen Deformationstensor Gleichung 2.1.

$$\mathbf{F} = \frac{\partial x}{\partial X} \quad (2.1)$$

mit \mathbf{F} Deformationstensor
 x Bewegungsvektor
 X Ortskoordinate

Durch polare Zerlegung lässt sich der Deformationstensor in eine Starrkörperrotation und eine Streckung zerlegen. Nur die Streckung führt zu einer Werkstoffbeanspruchung. \mathbf{U} und \mathbf{V} sind symmetrische, positiv definite Tensoren [38].

$$\mathbf{F} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{R} \quad (2.2)$$

mit \mathbf{F} Deformationstensor
 \mathbf{U} Rechts-Strecktensor
 \mathbf{V} Links-Strecktensor

Dabei ist $\mathbf{R} \cdot \mathbf{U}$ die rechte und $\mathbf{V} \cdot \mathbf{R}$ die linke polare Zerlegung von \mathbf{F} . Der orthogonale Tensor \mathbf{R} beschreibt die Starrkörperrotation des Elements. Die Deformation wird durch die Strecktensoren \mathbf{U} oder \mathbf{V} beschrieben. Als Maß für die Deformation lassen sich daher nach weiterer polarer Zerlegung die folgenden Tensoren definieren. [20, 38]

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}^2 = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{V}^2 = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T \quad (2.4)$$

mit \mathbf{C} Rechter-Cauchy-Green-Tensor
 \mathbf{B} Linker-Cauchy-Green-Tensor
 \mathbf{U} Rechts-Strecktensor
 \mathbf{V} Links-Strecktensor
 \mathbf{F} Deformationstensor

Der Tensor \mathbf{C} heißt Rechter-Cauchy-Green-Tensor und der Tensor \mathbf{B} analog dazu Linker-Cauchy-Green-Tensor. Beide sind positiv definit und symmetrisch. Dadurch können sie in numerischen Anwendungen deutlich einfacher als Maß für die Deformation verwendet werden. Außerdem beschreiben sie im Gegensatz zum Deformationstensor \mathbf{F} die Deformation ohne Starrkörperbewegung. [20, 38, 39]

2.2.2 Dehnungen und Verstreckungen

Die Dehnung beschreibt die Verformung eines Körpers z. B. als Reaktion auf eine Krafteinwirkung oder eine Temperaturänderung. Sie ist eine dimensionslose Größe und richtungsabhängig.

In der Literatur sind unterschiedliche Bezugssysteme für die Dehnung beschrieben [38, 40–44]. Das am häufigsten verwendete Dehnungsmaß ist die technische oder Ingenieurdehnung. Sie bezieht die Längenänderung Δl auf die Ausgangslänge l_0 [44] und ist wie folgt definiert:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.5)$$

mit	ε_t	technische Dehnung
	Δl	Längenänderung
	l_0	Ausgangslänge

Abbildung 2.5 veranschaulicht die Definition der technischen Dehnung an einem Stabelement.

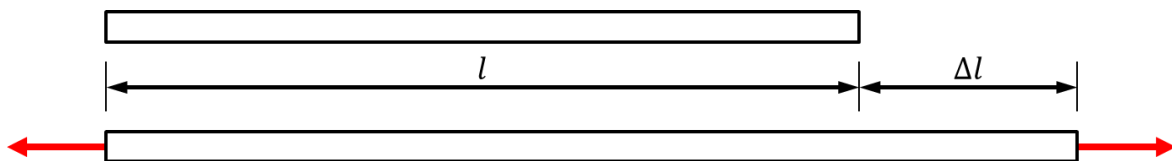


Abbildung 2.5 Definition der technischen Dehnung veranschaulicht an einem Stabelement [44]

Die technische Dehnung ist ein gängiges Maß für die Verformung und bietet den Vorteil, dass sie leicht zu berechnen ist. Gleichzeitig hat sie aber auch den Nachteil, dass sie nicht addierbar ist. Nach einer ersten Verformung hat sich die Ausgangslänge l_0 verändert, so dass man bei Addition der Dehnungen der ersten und einer darauf folgenden Verformung nicht die Gesamtdehnung erhält. Dies veranschaulichen die Gleichungen 2.6 und 2.7 [38, 39].

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{l_0} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{t,1} + \varepsilon_{t,2} = \frac{\Delta l_1}{l_0} + \frac{\Delta l_2}{l_0 + \Delta l_1} \quad (2.7)$$

mit	ε_t	technische Gesamtdehnung
	$\varepsilon_{t,i}$	technische Dehnung der i-ten Verformung
	Δl_i	Längenänderung bei i-ter Verformung
	l_0	Ausgangslänge

[38]

Der Unterschied aus den Gleichungen 2.6 und 2.7 ist nur für finite Dehnungen von Bedeutung und für infinitesimale Verformungen vernachlässigbar. Für finite Deformationen eignet sich daher vor allem die wahre (auch logarithmische [38] oder natürliche [43]) Dehnung. Dieses Dehnungsmaß wird auch als Hencky-Dehnung nach Heinrich Hencky (1898-1951) bezeichnet (vgl. auch [40]) [38]. Bei der Hencky-Dehnung wird die Dehnung auf die aktuelle Länge l des Körpers und nicht auf die Ausgangslänge bezogen. Die inkrementelle Dehnung ist gleich dem Inkrement der Länge bezogen auf die aktuelle Länge (vgl. Gleichung 2.8).

$$\delta\varepsilon_w = \frac{\delta l}{l} \quad (2.8)$$

mit $\delta\varepsilon_w$ Inkrement der wahren Dehnung
 δl Inkrement der Länge
 l aktuelle Länge

[38]

Aus Gleichung 2.8 ergibt sich durch Integration

$$\int \delta\varepsilon_w = \int_{l_0}^l \frac{\delta l}{l} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_w = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2.10)$$

mit ε_w wahre Dehnung
 δl Inkrement der Länge
 l aktuelle Länge
 l_0 Ausgangslänge

Die Gleichungen 2.11 und 2.12 zeigen, dass die wahren Dehnungen addierbar sind.

$$\varepsilon_{w,1+2} = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l_1 + \Delta l_2}{l_0}\right) \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_{w,1} + \varepsilon_{w,2} = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l_1}{l_0}\right) + \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l_1 + \Delta l_2}{l_0 + \Delta l_1}\right) = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l_1 + \Delta l_2}{l_0}\right) \quad (2.12)$$

mit $\varepsilon_{w,1+2}$ wahre Gesamtdehnung
 $\varepsilon_{w,i}$ wahre Dehnung der i-ten Verformung
 Δl_i Längenänderung bei i-ter Verformung
 l_0 Ausgangslänge

[38]

Die wahre Dehnung lässt sich, wie auch der Rechte- und der Linke-Cauchy-Green-Tensor, in einer verallgemeinerten Tensorschreibweise ausdrücken (vgl. [38, 45]).

Ein weiteres Maß für die Dehnung, das sich vor allem bei der Beschreibung von Verzerrungen von hoch elastischen Materialien bei großen Dehnungen etabliert hat [21, 38, 39, 46], ist der Verstreckgrad λ . Der Verstreckgrad wird außerdem häufig bei der Definition von hyperelastischen Materialmodellen verwendet. Der Verstreckgrad ist wie folgt definiert.

$$\lambda = \frac{l}{l_0} \quad (2.13)$$

mit λ Verstreckgrad
 l aktuelle Länge
 l_0 Ausgangslänge

Im unverformten Zustand ist der Verstreckgrad $\lambda = 1$. Für positive Längenänderungen wird $\lambda > 1$ und für Stauchungen wird $\lambda < 1$. Zwischen dem Deformationsgradient aus 2.2.1 und dem Verstreckgrad λ besteht dabei der Zusammenhang aus Gleichung 2.14 [20, 38].

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \lambda_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \lambda_{33} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

mit \mathbf{F} Deformationstensor
 λ_{ii} Verstreckgrad in Richtung i
 γ_{ij} Scherwinkel in ij -Ebene

An dieser Stelle sei angemerkt, dass, da es bei der Schreibweise von Tensoren üblich ist numerische Indizes zu verwenden, im Rahmen dieser Arbeit diese Schreibweise analog zur Indizierung mit x , y und z verwendet wird.

Dreht man das Bezugskordinatensystem für die Deformation in Richtung der Hauptverstreckungen so werden die Scherwinkel aus Gleichung 2.14 zu $\gamma_{ij} = 0$ und der Deformationstensor lässt sich wie folgt schreiben (Gleichung 2.15).

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

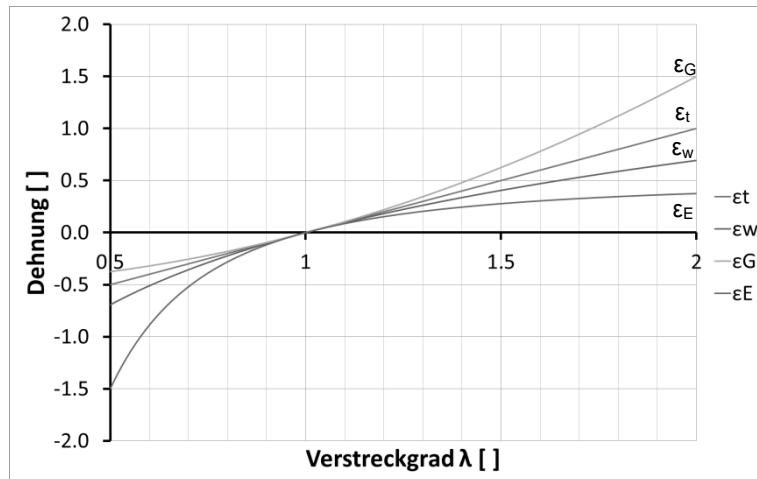
mit \mathbf{F} Deformationstensor
 λ_i Hauptverstreckgrad in i -Richtung

Die vorgenannten Dehnungsmaße sind ineinander überführbar. In Abhängigkeit vom Verstreckgrad gilt für die technische Dehnung und die wahre Dehnung der Zusammenhang aus den Gleichungen 2.16 und 2.17. Abbildung 2.6 veranschaulicht diesen Zusammenhang graphisch.

$$\varepsilon_t = \lambda - 1 \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_w = \ln(\lambda) \quad (2.17)$$

mit	ε_t	technische Dehnung
	ε_w	wahre Dehnung
	λ	Verstreckgrad



$$\varepsilon_t = \frac{l - l_0}{l_0} = \lambda - 1$$

$$\varepsilon_w = \int_{l_0}^l d\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln \lambda$$

$$\varepsilon_G = \frac{1}{2} \left(\frac{l^2 - l_0^2}{l_0^2} \right) = \frac{1}{2} (\lambda^2 - 1)$$

$$\varepsilon_E = \frac{1}{2} \left(\frac{l^2 - l_0^2}{l^2} \right) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

Abbildung 2.6 Unterschiedliche Dehnungsmaße über dem Verstreckgrad λ [22, 43, 44, 46]

In Abbildung 2.6 sind außerdem die Definitionen der Green'schen und der Euler'schen Dehnung angegeben (vgl. [38, 46]). Die hier genannten Dehnungsmaße sind lediglich eine Auswahl. Nach [38, 47] kann jede isotrope Tensorfunktion 2. Stufe des Green'schen Deformationstensors C oder des Cauchy'schen Deformationstensors B^{-1} , die eindeutig invertierbar ist, als Verzerrungsmaß definiert werden.

2.2.3 Querdehnung

Die Querdehnung (oder auch Querkontraktion) eines Körpers ist seine Reaktion auf eine Deformation in einer beliebigen Raumrichtung mit einer entgegengesetzten Deformation in der orthogonalen Ebene. Ein Zugstab, der in Längsrichtung gedehnt wird, reagiert auf diese Deformation mit einer Kontraktion in der zur Belastungsrichtung senkrechten Ebene. Umgekehrt zeigt ein Probekörper, der in Belastungsrichtung gestaucht wird, eine Dehnung in der orthogonalen Ebene zur Belastung. Die Dehnungen der Raumrichtungen sind also miteinander verknüpft. Wird für die Dehnung die wahre Dehnung als Dehnungsmaß verwendet, so erhält man einen linearen Zusammenhang zwischen Dehnung und der dazugehörigen Querdehnung [48]. Dies ist in Abbildung 2.7 veranschaulicht.

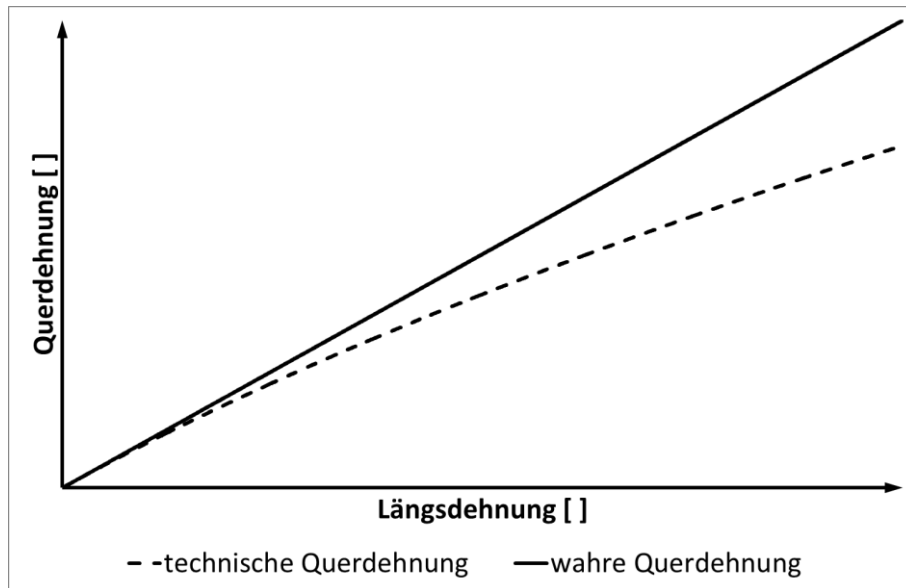


Abbildung 2.7 Vergleich des Querdehnungsverlaufs anhand von technischer und wahrer Dehnung

Das Verhältnis zwischen Längs- und Querdehnung wird als Querkontraktionszahl oder Poissonzahl (nach S. D. Poisson, 1781-1870) bezeichnet. Wird ein Probekörper in Richtung 3 verstreckt, so ergeben sich für die beiden Querdehnungen in Richtung 1 und 2 die Querkontraktionszahlen (vgl. Abbildung 2.8) [42].

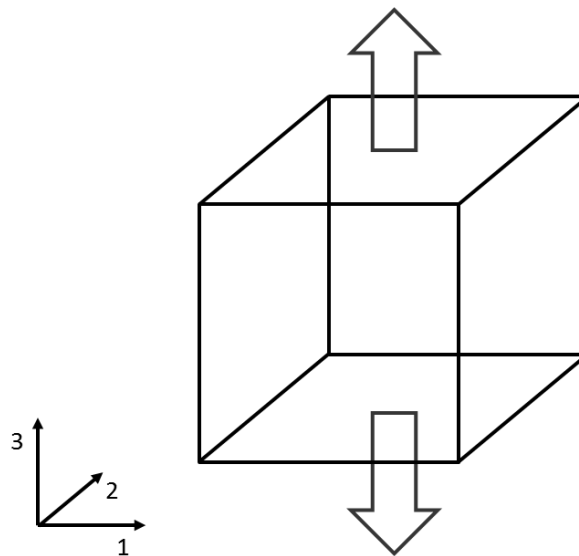


Abbildung 2.8 In Richtung 3 belasteter Körper mit Koordinatensystem zur Beschreibung der Querdehnung

$$\nu_{31} = -\frac{\varepsilon_{w,1}}{\varepsilon_{w,3}} \quad (2.18)$$

$$\nu_{32} = -\frac{\varepsilon_{w,2}}{\varepsilon_{w,3}} \quad (2.19)$$

mit ν_{ij} Poissonzahl der Richtung i bei Belastungsrichtung j
 $\varepsilon_{w,j}$ wahre Dehnung in j-Richtung

Ist das Werkstoffverhalten in der Ebene senkrecht zur Belastung richtungsunabhängig, so gilt weiter:

$$\nu_{ij} = \nu_{ji} \quad (2.20)$$

mit ν_{ij} Poissonzahl der Richtung i bei Belastungsrichtung j

Der Effekt der Querdehnung ist auf das Bestreben des Werkstoffes zurückzuführen, auf eine Deformation mit möglichst kleiner Volumenänderung zu reagieren. Die Poissonzahl ist also auch ein Maß für die Volumenänderung eines Werkstoffes, die er bei einer Verformung erfährt. Ein inkompressibler Werkstoff zeigt bei Verformung keine Volumenänderung, die Poissonzahl ist dann $\nu = 0.5$. Kompressible Werkstoffe ($\nu < 0.5$) zeigen bspw. bei einer Längsdehnung eine Volumenänderung. [42]

2.2.4 Invarianten

Um das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Elastomeren zu beschreiben, ist es zweckmäßig, eine vom Koordinatensystem unabhängige Formulierung zu verwenden. Dazu wird der Verzerrungszustand durch drei Invarianten in Abhängigkeit von den Hauptverstreckgraden definiert.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (2.21)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (2.22)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 \quad (2.23)$$

mit I_i Invariante des Verstreckgradtensors
 λ_i Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$)

vgl. [7, 20, 22, 25, 28, 39]

Die Invarianten beschreiben geometrische Eigenschaften eines Würfelements. Diese Eigenschaften sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1 Zusammenhang zwischen den Eigenschaften eines Volumenelements mit den Invarianten des Verstreckgradtensors

Invariante	Eigenschaft des Volumenelements
$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$	Quadrat der Raumdiagonalen eines Volumenelements
$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2$	Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen
$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 = J^2$	Quadrat des volumetrischen Anteils

Für den Grenzfall der Inkompressibilität bleibt das Volumen konstant und es gilt insbesondere $I_3 = 1 = \text{konst.}$ In diesem Fall lässt sich die Verzerrung eines Körpers ausschließlich in Abhängigkeit von den ersten beiden Invarianten beschreiben. Für die Beanspruchungsarten Zug, Schub und Druck ergeben sich dann die Zusammenhänge aus Tabelle 2.2 für die ersten beiden Invarianten.

Tabelle 2.2 Berechnung der Invarianten des Verstreckgradtensors für unterschiedliche Verformungszustände (inkompressibler Fall)

	Deformationsgradient	Hauptverstreckgrade	Invarianten
Uniaxial Zug	$F = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$	$\lambda_1 = \lambda_U$ $\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_U}}$	$I_1 = \lambda_U^2 + \frac{2}{\lambda_U}$ $I_2 = 2\sqrt{\lambda_U} + \frac{1}{\lambda_U}$
Schub	$F = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\lambda_1 = \lambda_{ZS}$ $\lambda_2 = \frac{1}{\lambda_{ZS}}$ $\lambda_3 = 1$ $\gamma = \lambda_{ZS} - \frac{1}{\lambda_{ZS}}$	$I_1 = \lambda_{ZS}^2 + \frac{1}{\lambda_{ZS}} + 1$ $I_2 = \lambda_{ZS} + \frac{1}{\lambda_{ZS}} + 1$
Druck	$F = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$	$\lambda_1 = \lambda_U$ $\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_U}}$	$I_1 = \lambda_U^2 + \frac{2}{\lambda_U}$ $I_2 = 2\sqrt{\lambda_U} + \frac{1}{\lambda_U}$

Mit den in Tabelle 2.2 dargestellten Zusammenhängen lässt sich für jeden der dort gezeigten Verformungszustände die zweite Invariante in Abhängigkeit von der ersten ausdrücken. Dies ist in Abbildung 2.9 veranschaulicht dargestellt.

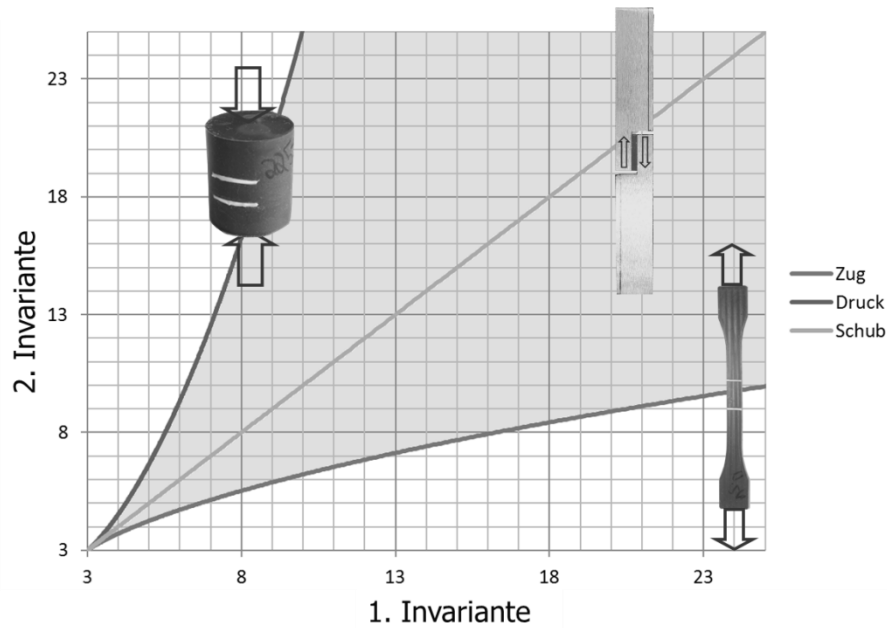


Abbildung 2.9 Invarianten Verzerrungsebene für den inkompressiblen Fall mit den Belastungszuständen Zug, Schub und Druck (vgl. [7, 25, 39, 49])

Die in Abbildung 2.9 grau dargestellte Fläche zeigt den Bereich der sinnvoll möglichen Verformungen für ein Volumenelement. Im Diagramm sind außerdem die Belastungszustände Zug, Schub und Druck dargestellt. Man stellt fest, dass der sinnvolle Verformungsbereich von diesen Belastungszuständen aufgespannt wird [7, 25, 39, 49].

Auch für den kompressiblen Fall lässt sich der Zusammenhang zwischen erster und zweiter Invariante für die einzelnen Verformungszustände darstellen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Invariantenebene der ersten und zweiten Invariante für unterschiedliche Poissonzahlen. Dabei gibt es einen deviatorischen Verformungsanteil und eine Gesamtverformung. Beide sind in der nachfolgenden Abbildung 2.10 gezeigt.

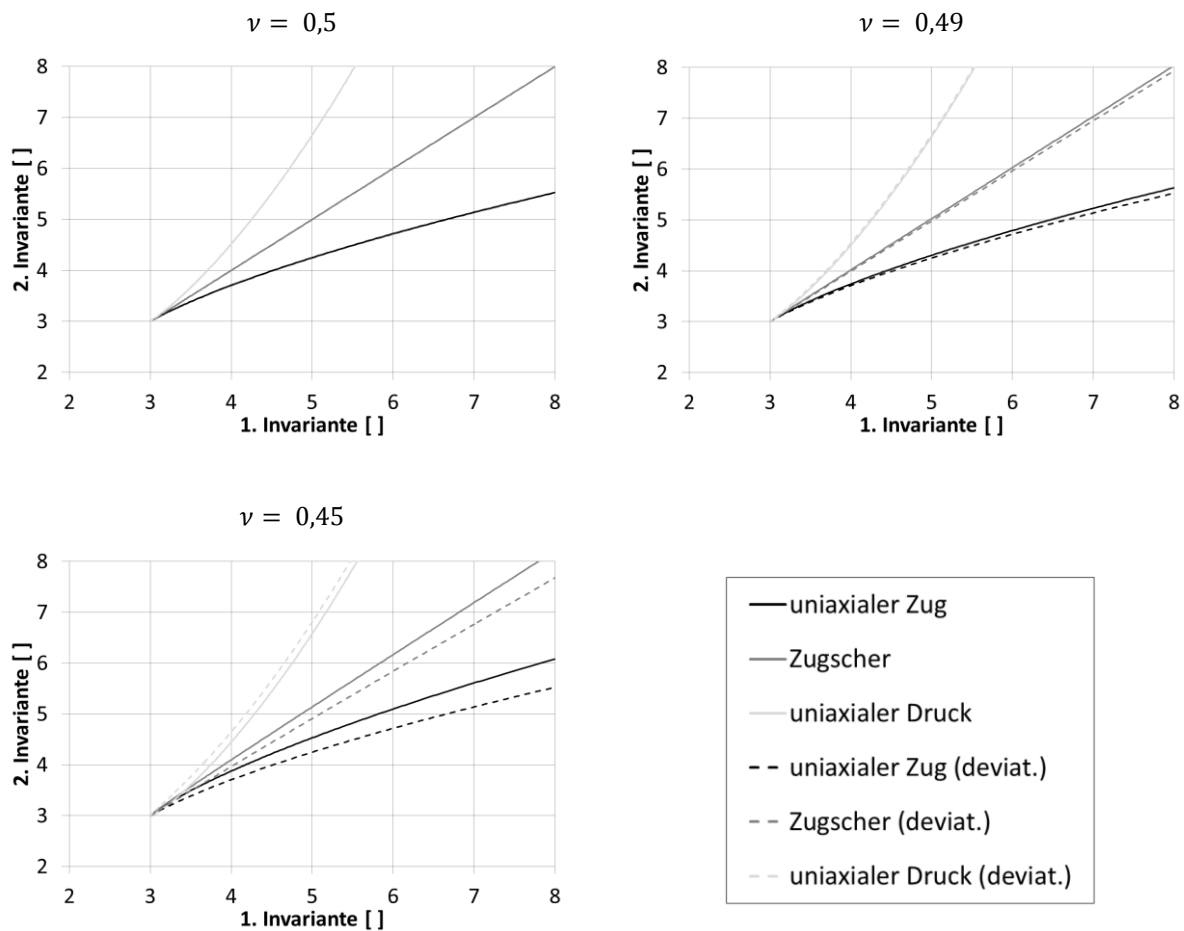


Abbildung 2.10 2. Invariante über 1. Invariante des Verstreckgradtensors für unterschiedliche Poissonzahlen und Belastungsarten

Für eine Poissonzahl von 0,5 ergibt sich keine Abweichung zwischen deviatorischem Verformungsanteil und Gesamtverformung. Je weiter die Poissonzahl von 0,5 abweicht, desto größer ist die Abweichung zwischen deviatorischem Anteil und Gesamtverformung.

2.3 Numerische Verfahren zur Beschreibung von hyperelastischen Werkstoffen

Überschlägige lineare Ansätze zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens von Elastomeren wurden bereits in den 1940er Jahren von Göbel [50, 51] veröffentlicht. Diese Ansätze finden heute noch Verwendung, bspw. bei der Auslegung von Gummifedern [52, 53]. Für die Verwendbarkeit dieser Ansätze ist allerdings ein Gültigkeitsbereich definiert. Parallel zu diesen Ansätzen wurden Materialmodelle für große Verformungen entwickelt (vgl. z.B. [25, 54, 55]). Auf die Ansätze zur Beschreibung großer Verformungen wird im Folgenden näher eingegangen. [21, 39]

2.3.1 Werkstoffmodelle für Green-Elastizität

Das nichtlinear-elastische Verhalten (Green-Elastizität oder Hyperelastizität) der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Klebstoffe wird im Folgenden mittels Green'scher Materialmodelle beschrieben. Bei diesen Materialmodellen wird die Spannung aus der Formänderungsenergiedichte berechnet [20, 22, 28, 43]. Das heißt, es existiert eine potentielle Energie (Formänderungsenergie) zu jedem Verformungszustand, aus der man durch Ableiten nach den Verstreckungen eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung erhält [56]. Zur Beschreibung des Materialverhaltens verwendet man die Dichte der Formänderungsenergie, also die potentielle Energie bezogen auf das verformte Volumen. Es gilt die Beziehung aus Gleichung 2.24.

$$\sigma_i = \frac{\partial w}{\partial \lambda_i} \quad (2.24)$$

mit σ_i Hauptspannungen ($i = 1; 2; 3$)
 w Formänderungsenergiedichte
 λ_i Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$)

Die Formänderungsenergiedichte ist dabei eine Funktion des Verformungszustandes. Es ist üblich, die Verstreckgrade (vgl. Kapitel 2.2.1) bzw. derer Invarianten als Maß für die Verformung bei der Definition des Verformungszustandes zu verwenden (vgl. Tabelle 2.1).

Aus dem Verstreckgrad erhält man außerdem das Volumenverhältnis. Es beschreibt die Volumenänderung relativ zum unverformten Zustand. Es gilt Gleichung 2.25.

$$J = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = \sqrt{I_3} \quad (2.25)$$

mit J Volumenverhältnis
 λ_i Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$)
 I_3 3. Invariante

Mit Hilfe des Volumenverhältnisses lassen sich die Verstreckgrade in einen deviatorischen und einen volumetrischen Anteil aufteilen. Für den deviatorischen Anteil der Verstreckgrade gilt allgemein Gleichung 2.26.

$$\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \cdot \lambda_i \quad (2.26)$$

mit $\bar{\lambda}_i$ Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$), deviatorischer Anteil
 J Volumenverhältnis
 λ_i Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$)

Analog zur Definition der Invarianten aus Kapitel 2.2.4 ergeben sich die deviatorischen Invarianten aus den deviatorischen Anteilen der Verstreckgrade.

$$\bar{I}_i = f(\bar{\lambda}_i) \quad (2.27)$$

mit \bar{I}_i Invarianten ($i = 1; 2; 3$), deviatorischer Anteil
 $\bar{\lambda}_i$ Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$), deviatorischer Anteil

Für die Definition der Formänderungsenergiedichte gibt es eine Vielzahl von Varianten, die je nach Anwendungsfall besser oder schlechter geeignet sind. Grundsätzlich unterscheidet man auch hier nach deviatorischem und volumetrischem Anteil.

$$w = w_{dev}(\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\lambda}_3) + w_{vol}(J) \quad (2.28)$$

mit w Formänderungsenergiedichte
 $\bar{\lambda}_i$ Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$), deviatorischer Anteil
 J Volumenverhältnis

In der Literatur sind mehrere Ansätze zur Beschreibung der Formänderungsenergiedichte bekannt. Die Formänderungsenergiedichte ist dabei immer eine Funktion von Verformung und Materialparametern, die vom jeweiligen Werkstoff abhängen [21, 56]. Im Folgenden wird auf die unterschiedlichen Definitionen der volumetrischen und deviatorischen Anteile der Formänderungsenergiedichte näher eingegangen. In gängiger FE-Software sind die folgenden Varianten der Formänderungsenergiedichte üblich. Sie sind in Tabelle 2.3 dargestellt. Dabei sind $\bar{\lambda}_1$ bis $\bar{\lambda}_3$ die deviatorischen Anteile der Hauptverstreckgrade, \bar{I}_1 bis \bar{I}_3 deren Invarianten und J das Volumenverhältnis (vgl. 2.2.2 und 2.2.4). Alle übrigen Variablen sind werkstoffabhängige Größen.

Tabelle 2.3 Definition der Formänderungsenergiedichte für die untersuchten hyperelastischen Werkstoffmodelle [28]

Modell	$W_{dev}(\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\lambda}_3) =$	$W_{vol}(J) =$	$N \in$	Quellen
Arruda-Boyce	$\mu \left\{ \frac{1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2} (\bar{I}_1^2 - 9) \right.$ $+ \frac{11}{1050\lambda_m^4} (\bar{I}_1^3 - 27)$ $+ \frac{19}{7000\lambda_m^6} (\bar{I}_1^4 - 81)$ $\left. + \frac{519}{673750\lambda_m^8} (\bar{I}_1^5 - 248) \right\}$	$\frac{1}{D} \left(\frac{J^2 - 1}{2} - \ln J \right)$	-	[28, 57]
Ogden	$\sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3)$	$\sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i}$	[1, 2, 3]	[28, 30, 55]

Modell	$W_{dev}(\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2, \bar{\lambda}_3) =$	$W_{vol}(J) =$	$N \in$	Quellen
Polynomial	$\sum_{i+j=1}^N c_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j$	$\sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i}$	[1, 2]	[28, 30, 58–60]
Reduced polynomial	$\sum_{i=1}^N c_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i$	$\sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i}$	[1, 2, 3]	[28, 60, 61]
Van der Waals	$\mu \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] - \frac{2}{3} a \left(\frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}$ <p style="text-align: center;">mit $\tilde{I} = (1 - \beta)\bar{I}_1 + \beta\bar{I}_2$</p> <p style="text-align: center;">und $\eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$</p>	$\frac{1}{D} \left(\frac{J^2 - 1}{2} - \ln J \right)$	-	[22, 28]

(vgl. auch [20, 22, 62, 63])

Nach [56] besteht die Herausforderung der Anwendung solcher Gleichungen in der Konkretisierung der Verzerrungsenergiefunktion, also der Identifikation der jeweiligen Materialkennwerte. Da dies beispielsweise bei einem Ansatz nach Ogden mit $N = 3$, also einem Polynom 3. Grades, neun voneinander unabhängige Werkstoffparameter sind, kann die Identifikation nur numerisch erfolgen. Dabei wird durch Minimierung der Abweichung im Spannungs-Dehnungs-Verhalten (z. B. auf Grundlage der Methode der kleinsten Quadrate [64, 65]) diejenige Kombination an Werkstoffparametern gesucht, die das Materialverhalten am besten beschreibt. Die Qualität der Abbildung kann dabei dadurch erheblich verbessert werden, dass die Werkstoffkurven mehrerer Beanspruchungszustände für die Kalibrierung des Materialmodells verwendet werden. Auf diese Weise wird die Abhängigkeit des Werkstoffverhaltens von der Belastungsart im Werkstoffmodell berücksichtigt und die Beschreibungsgüte verbessert [66, 67]. Die Frage, welches Modell am besten geeignet ist, kann nicht pauschal beantwortet werden und ist vom Werkstoff abhängig. [21, 28, 56, 68]

2.3.2 Werkstoffmodelle für den Mullins-Effekt

Beide im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Klebstoffe zeigen einen Mullins-Effekt, also einen deutlich geringeren Spannungs-Dehnungs-Verlauf in Folgebelastungen verglichen mit der ersten Belastung [27, 69]. Eine schematische Darstellung des Mullins-Effekts ist in Abbildung 2.2 zu finden. In gängiger FE-Software ist der Mullins-Effekt nach den im Folgenden gezeigten Gleichungen implementiert. Die Verringerung der Spannung wird dabei als isotrop,

also nicht richtungsabhängig, angenommen [20]. Dieser Ansatz geht auf R. Ogden und D. Roxburgh [70] zurück.

Um den Mullins-Effekt in einem Werkstoffgesetz abzubilden, wird die Formulierung der Formänderungsenergiedichte um eine Variable erweitert. Die Variable η ist die sogenannte „Schädigungsvariable“ [28]. Sie ist abhängig vom bisherigen Allzeitmaximum der Belastung. Die Formänderungsenergiedichte wird dann wie folgt definiert:

$U(\lambda_i, \eta) =$	$\eta U_{dev}(\bar{\lambda}_i)$	$+\phi(\eta)$	$U_{vol}(\lambda_i)$
	deviatorischer Anteil	Schädigungsfunktion	volumetrischer Anteil

[20, 21, 28, 70]

Dabei gilt für die Schädigungsvariable:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r} \operatorname{erf} \left(\frac{W_{dev}^m - W_{dev}}{m + \beta \cdot W_{dev}^m} \right) \quad (2.29)$$

mit η	Schädigungsvariable
W	Formänderungsenergiedichte
W_{dev}^m	Allzeitmaximum der Formänderungsenergiedichte
r, m, β	Werkstoffkennwerte
J	Volumenverhältnis

Und für die Schädigungsfunktion:

$$\phi(\eta) = \int_1^\eta \eta \, d\eta + (1 - \eta) \cdot W_{dev}^m \quad (2.30)$$

mit ϕ	Schädigungsfunktion
η	Schädigungsvariable
W_{dev}^m	Allzeitmaximum der Formänderungsenergiedichte
r, m, β	Werkstoffkennwerte
J	Volumenverhältnis

Ferner gilt: $\phi(1) = 0$.

Die Formänderungsenergiedichte wird also durch den hier beschriebenen Ansatz abhängig vom Allzeitmaximum verringert. Mit den Variablen r , m und β wird die Form der Entlastungskurve bestimmt. Diese Werkstoffkennwerte müssen, wie auch die Werkstoffkennwerte für die hyperelastischen Werkstoffmodelle, aus den Versuchsdaten ermittelt werden.

Das hier beschriebene Werkstoffmodell für den Mullins-Effekt ist das Werkstoffmodell, das am häufigsten in gängiger FE-Software implementiert ist und verwendet wird [28, 71, 72]. In der Literatur finden sich allerdings auch weitere Ansätze, auf die hier nicht näher eingegangen wird (vgl. [73–75]).

3 Materialien und Methoden

3.1 Materialien

3.1.1 Substrate

3.1.1.1 Stahlsubstrate aus Stahllegierung 1.0531

Als Substratmaterial für die verklebten Probengeometrien wurde konventioneller Stahl mit der Werkstoffnummer 1.0531 verwendet. Für die Kopfzugproben lag dieser als Rundmaterial nach DIN 671 [76] mit dem Durchmesser 50 mm vor. Die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.1 Chemische Zusammensetzung der Stahllegierung 1.0531 [77]

C ≤ %	Si ≤ %	Mn ≤ %	P ≤ %	S ≤ %	Cr %	Mo %	Ni %	V %
0.2	0.6	1.7	0.1	0.045				

Nb %	Ti	Al	Co ≤ %	Cu ≤ %	N ≤ %	Fe	Ce %	Y ≤ %

Tabelle 3.2 Mechanische Eigenschaften der Stahllegierung 1.0531

Eigenschaft	Wert
E-Modul	210 000 MPa
R _{p0,2}	550 MPa
R _m	560 MPa

3.1.2 Klebstoffe

3.1.2.1 Kömmerling Körapur 140

Der Klebstoff Kömmerling Körapur 140 (im folgenden KP 140 abgekürzt) ist ein elastischer, feuchtigkeitsvernetzender Einkomponenten-Klebstoff auf Polyurethan-Basis. Laut Herstellerangaben eignet er sich für grundierete und lackierte Metalle, Aluminium, Holzwerkstoffe und Duroplaste. Er besitzt eine hohe Standfestigkeit und findet Anwendung im Karosserie-, Container- und Fahrzeugbau. Außerdem zeigt der Klebstoff eine gute Witterungsbeständigkeit und ist geeignet für einen Einsatz im Temperaturbereich von -40 °C bis +90 °C (kurzfristig +120 °C). Die technischen Eigenschaften des Klebstoffes sind in Tabelle 3.3 dargestellt. [78]

Tabelle 3.3 Eigenschaften des Klebstoffes KP 140 (Herstellerangaben) [78]

Klebstoff	Art/Basis	Aushärte- temperatur	Aushärte- zeit	Dichte	Verarbeitungs- zeit	Härte Shore A
Körapur 140	1K-PUR	RT	24 h bei Verarbei- tung mit Köracur 100	1,22 g/cm ³	10 min	55

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Klebstoff mittels einer zusätzlichen zweiten Komponente ausgehärtet. Der Härter Köracur 100 ist eine wasserbasierte Komponente, die zur Aushärtung von größeren Klebschichtdicken verwendet wird. Wird diese Komponente nicht verwendet, so härtet der Klebstoff mit der Luftfeuchtigkeit aus. Die Durchhärtung beträgt dann 3 mm am ersten Tag. Die Herstellung der Probekörper erfolgt bei 23 °C (angegebene Verarbeitungstemperatur: 5 °C bis 35 °C). Um eine homogene Mischung der beiden Komponenten sicherzustellen, wird zur Herstellung eine 2-Komponenten Mischanlage der Firma Reinhardt Technik GmbH, die von der Firma Kömmerling Chemische Fabrik GmbH zur Verfügung gestellt wurde, verwendet. Nach Herstellung härten die Proben mindestens sieben Tage bei Normalklima (23 °C / 50 % rel. Feuchte), bevor sie geprüft werden.

3.1.2.2 Kömmerling GD 920

Der Zweikomponenten-Klebstoff Kömmerling GD 920 (im Folgenden GD 920 abgekürzt) ist besonders als Spezial-Dichtstoff (Sekundärversiegelung) zur Herstellung von Isolierglas, zum Beispiel in Gewächshäusern oder Wintergärten, geeignet. Der Klebstoff besteht aus Silikonkautschuk, ist für einen elastischen Klebstoff relativ hochmodulig und besitzt eine ausgeprägte UV-Beständigkeit. Das Mischverhältnis der Komponenten A (beige) und B (schwarz) beträgt 10:1 nach Volumen und Gewicht, die B-Komponente ist feuchtigkeitsempfindlich. GD 920 soll zwischen 15 °C und 35 °C verarbeitet werden. [79]

Die Eigenschaften des Klebstoffes (Herstellerangaben) sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Tabelle 3.4 Eigenschaften des Klebstoffes GD 920 (Herstellerangaben) [79]

Klebstoff	Art/Basis	Aushärte- temperatur	Aushärte- zeit	Dichte	Verarbeitungs- zeit	Härte Shore A
GD 920	2K-Silikon	RT	24 h	beide Komponenten: 1,37 g/cm ³	20 min	38

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, werden im Rahmen dieser Arbeit beide Komponenten im Massenverhältnis 10:1 mittels eines Taumischers vom Typ *SpeedMixer™ DAC 150 FV* vermischt. Auf diese Weise wird ein gleichbleibend gutes Mischergebnis sichergestellt. Die Herstellung erfolgt bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C. Anschließend werden die Proben bei Normaklima (23 °C / 50 % rel. Feuchte) mindestens 24 h ausgehärtet.

3.2 Oberflächenvorbereitung und -vorbehandlung

3.2.1 Edelkorundstrahlen

Das Strahlen ist eine Oberflächenbehandlung, bei dem ein Strahlmittel mittels Druckluft auf die Oberfläche des zu reinigenden Werkstoffes geblasen wird [80]. Das Strahlen von Oberflächen wird, neben einigen anderen Bearbeitungszielen, vor allem zum Reinigen von Oberflächen eingesetzt. Eine besondere Bedeutung für das Ergebnis der Oberflächenbehandlung hat dabei das verwendete Strahlgut. In der Praxis üblich ist bspw. die Verwendung von Korund, Glasperlen, Stahlkies und Trockeneis aber auch verschiedene Kunststoffe und auch organische Materialien wie Walnussschalen werden verwendet. [80]

Für die hier durchgeführten Vorbehandlungen wurde Edelkorund der Korngrößenklasse F90 (125-180 µm) als Strahlmittel und Druckluft als Trägermedium verwendet. Die Oberflächenbehandlung wurde möglichst kurz (max. 12 Stunden) vor der Verklebung ausgeführt, um Veränderungen der Oberfläche vor dem Kleben zu vermeiden. Nach dem Strahlen wurden die zu klebenden Oberflächen mit Aceton gereinigt und wischentfettet. Hierauf wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

3.2.2 Wischentfettung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde Aceton als Lösungsmittel für die Wischentfettung verwendet. Aceton (oder auch Propanon) ist das einfachste Keton und wird in der Praxis häufig als Lösungsmittel zum Entfernen von Verunreinigungen wie z. B. Fetten und Ölen eingesetzt.

Neben der guten Eigenschaft Fette zu lösen, bietet Aceton den Vorteil, dass es nach der Reinigung der Substrate sehr schnell verdampft, sodass eine zügige Weiterverarbeitung möglich ist.

3.3 Prüfmethoden

3.3.1 Prüfmaschine

Für die Durchführung der Versuche wurde eine Zugprüfmaschine nach DIN 51220 [81] der Firma *Messphysik* verwendet. Diese bietet unterschiedliche Einspannmöglichkeiten für die verschiedenen Probengeometrien und eine Kraftmessung in Längsrichtung. Die Kraftmessung kann dabei mittels unterschiedlicher Kraftmessdosen erfolgen. Verwendet wurden hier die Kraftmessdosen mit $F_{\max} = 1 \text{ kN}$ und $F_{\max} = 20 \text{ kN}$. Abbildung 3.1 zeigt die Zugprüfmaschine mit eingebauter 1 kN-Kraftmessdose und der Probenaufnahme.

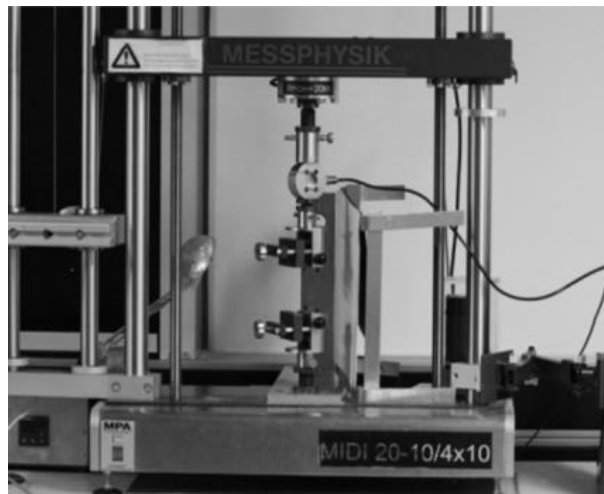


Abbildung 3.1 Zugprüfmaschine vom Typ MIDI 20-10/4x10; Hersteller Messphysik Materials Testing GmbH

Die Steuerung der Maschine bietet die Möglichkeit, den Traversenweg nach unterschiedlichen Parametern zu regeln. Es kann beispielsweise nach Weg, Geschwindigkeit, Kraft oder technischer Dehnung geregelt werden. Für die optischen Messungen steht ein Kamerasystem, bestehend aus zwei Kameras mit 640x480 Pixeln Grauwertauflösung (Wertebereich 0 bis 255 je Pixel), zur Verfügung. Die Bilder können damit sowohl gespeichert, als auch zur Echtzeitverarbeitung verwendet werden.

3.3.2 Optische Messeinrichtung

Die Videoextensometrie ist ein optisches Messverfahren, das den Abstand zwischen zwei Messmarken über den Versuchszeitraum verfolgt. Mit der Videoextensometrie kann die Längsdehnung anhand von Messmarken auf der Probe und die Querdehnung anhand des Schattenbildes der Probe (bspw. schwarzer Schatten vor hellem Hintergrund) gemessen werden. Abbildung 3.2 zeigt den Ausschnitt einer Zugprobe mit aufgebrauchten Messmarken.

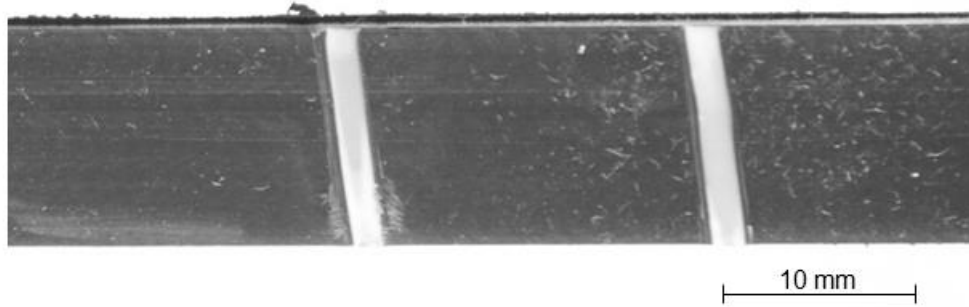


Abbildung 3.2 Bildausschnitt einer Zugprobe mit aufgetragenen Messmarken

Die Messmarke ist dabei ein beliebiger Schwarz-Weiß-Übergang auf der Probe. Die verwendete Software liefert die Ergebnisse der Längenmessung in Echtzeit an die Steuerung zurück. Die Versuchsregelung kann also direkt anhand der gemessenen Daten erfolgen.

Die Messung der Längsverformung erfolgt in der Mitte der Probe. Um das Messergebnis zu verbessern, wird der Schwarz-Weiß-Übergang über die gesamte Messmarkenbreite ausgewertet. Die Koordinate des jeweiligen Messpunktes ergibt sich dann durch lineare Interpolation auf die Mitte der Messmarke.

3.3.3 Zugversuch

Die Zugeigenschaften der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Klebstoffe werden anhand von Zugproben vom Typ 1B nach DIN EN ISO 527-2 [82] durchgeführt. Ziel dieser Versuche ist es, das Spannungs-Dehnungs-Verhalten (Dehnung in Längs- und Querrichtung) der Klebstoffe zu ermitteln. Die Versuchsführung erfolgt in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 527 [82, 83]. Die Abmessungen der Probekörper sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

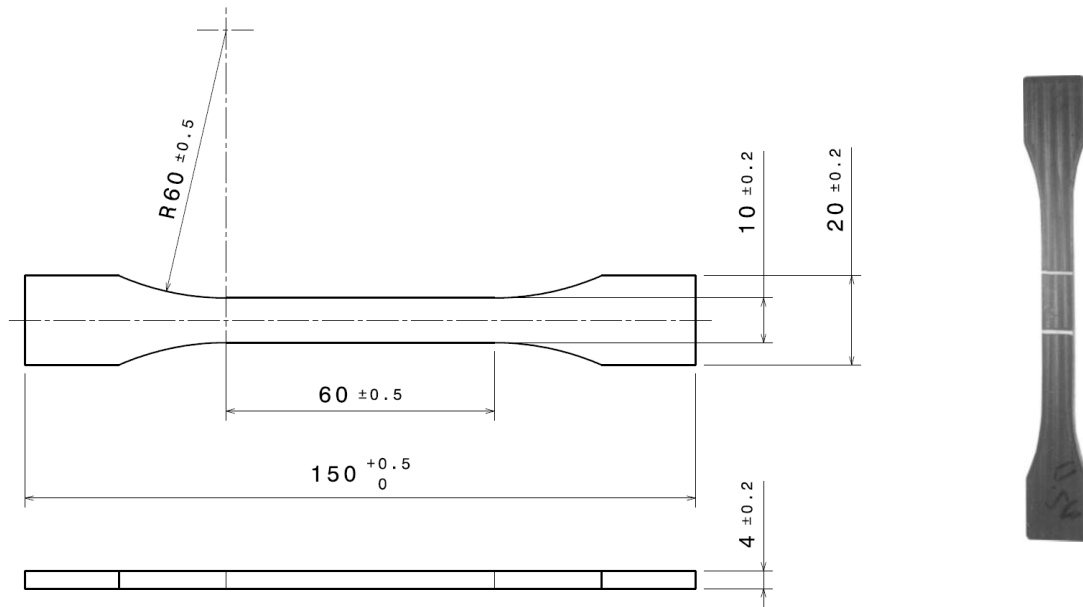


Abbildung 3.3 Abmessungen der Zugprobe vom Typ 1B nach DIN EN ISO 527-2 mit Toleranzangaben [82] (links) und Probe mit aufgetragenen Messmarken (rechts)

Die Istwerte der Probe werden vor der Messung mittels Messschieber überprüft. Auf diese Weise wird der Messeinfluss von Fertigungstoleranzen vor allem bei der Ermittlung der Spannung minimiert. Die Prüfgeschwindigkeit wird über das Messsignal des Videoextensometers so geregelt, dass eine konstante Dehnrage in Längsrichtung über die Versuchsdauer eingehalten wird. Es gilt Gleichung 3.1.

$$\dot{\varepsilon}_Z = \text{konst.} \quad (3.1)$$

mit $\dot{\varepsilon}_Z$ Dehnrage für den Zugversuch

Gemessen wird die Kraft in Belastungsrichtung mittels der 1 kN-Kraftmessdose, der Traversenweg und die Längs- und Querdehnung mit dem Videoextensometer. Die gemessenen Größen im Zugversuch sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst.

Tabelle 3.5 Gemessene Größen an Zugprobe (DIN EN ISO 527-2)

Größe	Formelzeichen	Bemerkung
Kraft in x-Richtung	F	
Verschiebung der Einspannung	u_t	Wegaufnehmer an Traverse
Techn. Dehnung in x-Richtung	ε_{11}	optisch anhand von zwei Messmarken auf der Probe
Techn. Querkontraktion in y-Richtung	ε_{22}	anhand des Schattenbildes

Aus den gemessenen Größen ergibt sich dann die wahre Dehnung nach Gleichung 3.2 (vgl. auch Kapitel 2.2.1).

$$\varepsilon_w = \ln(1 + \varepsilon_t) \quad (3.2)$$

mit ε_w wahre Dehnung
 ε_t technische Dehnung

Die technische Spannung erhält man aus den Probenabmessungen und der Kraft in Längsrichtung.

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0} = \frac{F}{b \cdot d} \quad (3.3)$$

mit F Kraft in Belastungsrichtung
 A_0 Ausgangsquerschnittsfläche im Messbereich
 b Breite im Messbereich (Ist-Maß)
 d Dicke im Messbereich (Ist-Maß)

Ebenso wie es bei großen Dehnungen wenig zweckmäßig ist, die Ausgangslänge als Referenz zu verwenden (vgl. Kapitel 2.2.1), so ist es auch wenig zweckmäßig bei großen Verformungen den Ausgangsquerschnitt als Bezugsgröße für die Spannung zu verwenden. Bei Vernachlässigung der Volumenänderung lässt sich die wahre Spannung wie in Gleichung 3.4 berechnen [43].

$$\sigma_{w \text{ vol}} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} (1 + \varepsilon) \quad (3.4)$$

mit $\sigma_{w \text{ vol}}$ wahre Spannung für Volumenkonstanz
 F Kraft
 A aktuelle Querschnittsfläche
 A_0 Ausgangsquerschnittsfläche

Ist allerdings wie in diesem Fall die Dehnung in Querrichtung bekannt, so ist diese Vereinfachung nicht zweckmäßig. Allgemein gilt für die wahre Dehnung der Zusammenhang aus Gleichung 3.5.

$$\sigma_w = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot d} = \frac{F}{(b_0 \cdot (1 + \varepsilon_{22})) \cdot (d_0 \cdot (1 + \varepsilon_{33}))} = \frac{F}{A_0 \cdot (1 + \varepsilon_{22}) (1 + \varepsilon_{33})} \quad (3.5)$$

mit	σ_w	wahre Spannung
	F	Kraft
	A	aktuelle Querschnittsfläche
	A_0	Ausgangsquerschnittsfläche
	b	aktuelle Probenbreite (2-Richtung)
	b_0	Ausgangsprobenbreite
	d	aktuelle Probendicke (3-Richtung)
	d_0	Ausgangsprobendicke
	ε_{ii}	Dehnung in i-Richtung

Für die uniaxialen Proben kann davon ausgegangen werden, dass die beiden Hauptdehnungen in der Ebene senkrecht zur Belastungsrichtung gleich groß, also die Poissonzahlen für beide Raumrichtungen gleich, sind (vgl. auch Kapitel 4.1). Man kann dann vereinfacht schreiben:

$$\sigma_w = \frac{F}{A_0 \cdot (1 + \varepsilon_{22})^2} = \frac{F}{A_0 \cdot (1 + \varepsilon_{33})^2} \quad (3.6)$$

mit	σ_w	wahre Spannung
	F	Kraft
	A_0	Ausgangsquerschnittsfläche
	ε_{ii}	Dehnung in i-Richtung

Mit der Definition der Poissonzahl (vgl. Gleichung (2.24)) lässt sich Gleichung (3.6) zu Gleichung (3.8) umformen.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{22 w}}{\varepsilon_{11 w}} \quad (3.7)$$

mit	ν	Poissonzahl
	ε_{ii}	Dehnung in i-Richtung

[43]

$$\sigma_w = \frac{F}{A_0 \cdot (1 + \nu \cdot \varepsilon_{11 w})^2} \quad (3.8)$$

mit	σ_w	wahre Spannung
	F	Kraft
	A_0	Ausgangsquerschnittsfläche
	ν	Poissonzahl
	ε_{ii}	Dehnung in i-Richtung

Für den Zugversuch werden im Folgenden die wahre Spannung über der wahren Dehnung, sowie das wahre Querdehnungs-Längsdehnungsverhalten als Ergebnisgröße betrachtet.

3.3.4 Zugscherversuch

Das Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten unter Zugscherbelastung wird im Rahmen dieser Arbeit an Zugscherproben in Anlehnung an die Norm DIN EN 14869-2 [84] untersucht. Die Klebschichtdicke und die Überlappungslänge wurden dabei so gewählt, dass sie in der Größenordnung den Abmessungen einer Klebschicht entsprechen, wie sie in der Praxis bei diesen Klebstoffen Anwendung finden. Die Abmessungen der Proben sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

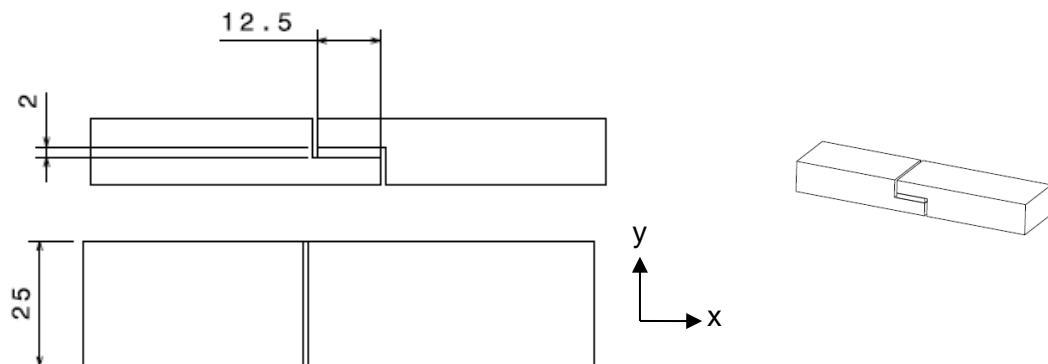


Abbildung 3.4 Dicke Zugscherprobe in Anlehnung an DIN EN 14869-2 (Klebschicht bemaßt) [84]

An den Zugscherproben werden die Kraft in Belastungsrichtung mittels der 1 KN-Kraftmessdose sowie der Traversenweg und die Verschiebung der Substrathälften mit dem Videoextensometer gemessen. Die gemessenen Größen im Zugversuch sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst.

Tabelle 3.6 Gemessene Größen an dicker Zugscherprobe (vgl. auch [84])

Größe	Formelzeichen	Bemerkung
Kraft in Belastungsrichtung	F	
Verschiebung der Einspannung	u_t	Wegaufnehmer an Traverse
Verschiebung	u	optisch anhand von zwei Messmarken auf der Probe

Für den Zugscherversuch ergibt sich die Gleitung (Schubdehnung) aus Gleichung 3.9 (vgl. auch Abbildung 3.5).

$$\tan \gamma = \frac{u}{d} \quad (3.9)$$

mit γ Gleitungswinkel
 u Verschiebung in Belastungsrichtung
 d Klebschichtdicke

[11]

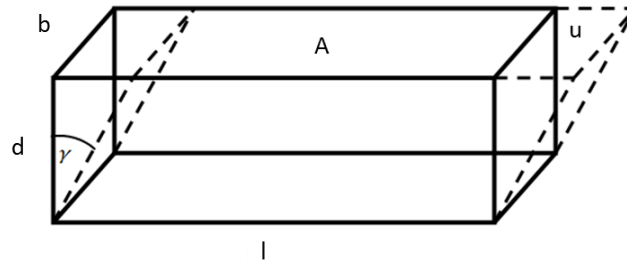


Abbildung 3.5 Klebschicht einer Zugscherprobe mit charakteristischen Größen

Auch im Zugscherversuch wird die Gleitung mit konstanter Rate gesteigert. Es gilt dann analog zum Zugversuch (vgl. Kapitel 3.3.2) die Gleichung 3.10.

$$\frac{\partial}{\partial t} \tan \gamma = \frac{\partial \frac{u}{d}}{\partial t} = \frac{1}{d} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \text{konst.} \quad (3.10)$$

mit γ Scherwinkel
 u Verschiebung
 d Klebschichtdicke

Die Schubspannung τ ergibt sich aus den gemessenen Größen nach Gleichung 3.11.

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{b l} \quad (3.11)$$

mit τ Schubspannung
 F Kraft in x-Richtung
 A Wirkfläche der Schubspannung (vgl. Abbildung 3.5)
 b Breite der Klebschicht (vgl. Abbildung 3.5)
 l Länge der Klebschicht (vgl. Abbildung 3.5)

[11]

Da die Bezugsfläche für die Spannungsberechnung beim Zugscherversuch geklebt ist und sich daher nicht ändert, wird hier nicht zwischen wahrer und technischer Spannung unterschieden. Für den Zugscherversuch wird im Folgenden die Schubspannung in Abhängigkeit von der Gleitung betrachtet.

Beim Zugscherversuch wird die Dehnrateso gewählt, dass sich der gleiche Energieeintrag pro Zeit in das Klebstoffvolumen wie beim Zugversuch ergibt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass bei beiden Prüfungen gleiche energetische Zustände herrschen und dadurch

der Einfluss des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens verkleinert wird. Im Folgenden wird die Dehnrate für die Zugscherversuche so berechnet, dass der Energieeintrag konstant ist.

3.3.4.1 Bestimmung der Prüfgeschwindigkeit für den Zugscherversuch

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Werkstoffe zeigen Werkstoffeigenschaften, die von der Belastungsgeschwindigkeit abhängen. Die verwendeten Werkstoffgesetze können dieses Verhalten jedoch nicht ohne entsprechende Erweiterung bzw. Modifikation, welche die Modelle und die zu identifizierenden Parameter noch einmal deutlich komplexer machen würde, abbilden. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Prüfgeschwindigkeiten der Proben so bestimmt, dass der Energieeintrag für alle Probengeometrien in das Volumen je Zeit gleich ist. Es soll also gelten:

$$\dot{w}_Z = \dot{w}_{ZS} \quad (3.12)$$

mit \dot{w}_Z Energieeintrag pro Volumen für den Zugversuch
 \dot{w}_{ZS} Energieeintrag pro Volumen für den Zugscherversuch

Des Weiteren werden alle im Rahmen dieser Arbeit an Laborproben durchgeführten Versuche mit konstanter Dehnrate geprüft. Es gelten also für den Zugversuch und analog für den Zugscherversuch die Gleichungen 3.13 und 3.14.

$$\dot{\varepsilon}_Z = konst. \quad (3.13)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ZS} = konst. \quad (3.14)$$

mit $\dot{\varepsilon}_Z$ Dehnrate für den Zugversuch
 $\dot{\varepsilon}_{ZS}$ Dehnrate für den Zugscherversuch

Da beide technischen Dehnraten konstant sind erhält man allgemein für die Dehnung in den beiden Versuchen die Gleichungen 3.15 und 3.16. Da die Dehnung zu Beginn der Versuche gleich null ist, gilt weiter Gleichung 3.17.

$$\varepsilon_Z = \int \dot{\varepsilon}_Z dt = \dot{\varepsilon}_Z t + C_1 \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_{ZS} = \int \dot{\varepsilon}_{ZS} dt = \dot{\varepsilon}_{ZS} t + C_2 \quad (3.16)$$

$$C_1 = C_2 = 0 \quad (3.17)$$

mit	ε_Z	Dehnung für den Zugversuch
	ε_{ZS}	Dehnung für den Zugscherversuch
	$\dot{\varepsilon}_Z$	Dehnrates für den Zugversuch
	$\dot{\varepsilon}_{ZS}$	Dehnrates für den Zugscherversuch
	t	Zeit

Die Verzerrungszustände für beide Versuche sind in Abbildung 3.6 anhand des Mohr'schen Verzerrungskreises dargestellt.

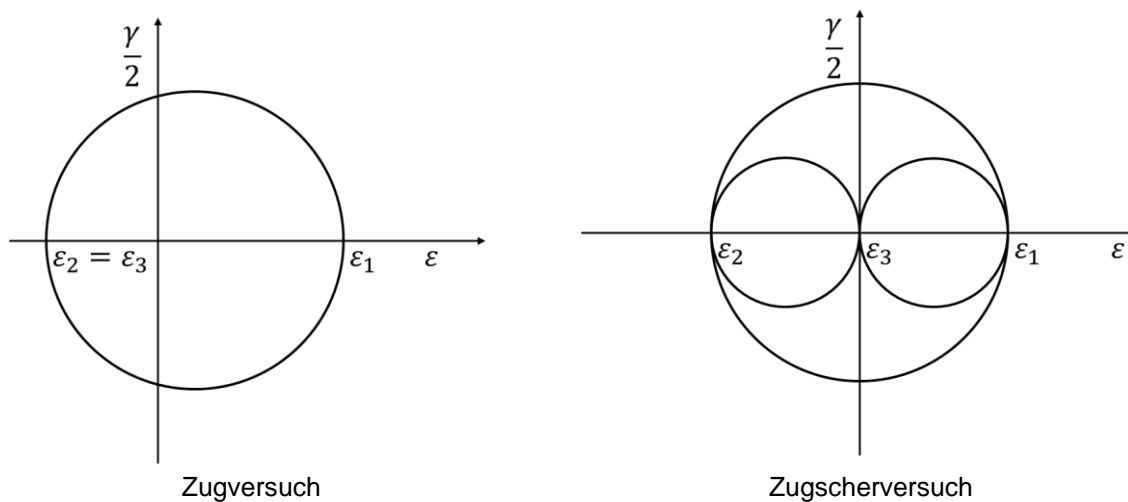


Abbildung 3.6 Mohr'scher Verzerrungskreis für den Verformungszustand der Zugprobe (links) und der Zugscheprobe (rechts) [85, 86]

Da das Spannungs-Dehnungsverhalten des zu prüfenden Werkstoffes vor dem Versuch nicht bekannt ist, wird für beide Belastungsarten der Energieeintrag in ein unverformtes Volumenelement im infinitesimalen Zeitintervall dt betrachtet. Allgemein gilt für die Energie bei der Längen- bzw. Volumenänderung von Körpern Gleichung 3.18 [87]. Für die spezifische (volumenbezogene) Energie lässt sich dann Gleichung 3.19 folgern.

$$W = \int F dl = \int \sigma A l d\varepsilon = V \int \sigma d\varepsilon \tag{3.18}$$

$$w = \int \sigma d\varepsilon \tag{3.19}$$

mit	W	Energie bei Längenänderung
	F	Kraft
	l	Weg in Belastungsrichtung
	σ	Spannung
	A	Querschnittsfläche
	ε	Dehnung
	V	Volumen
	w	spezifische Energie

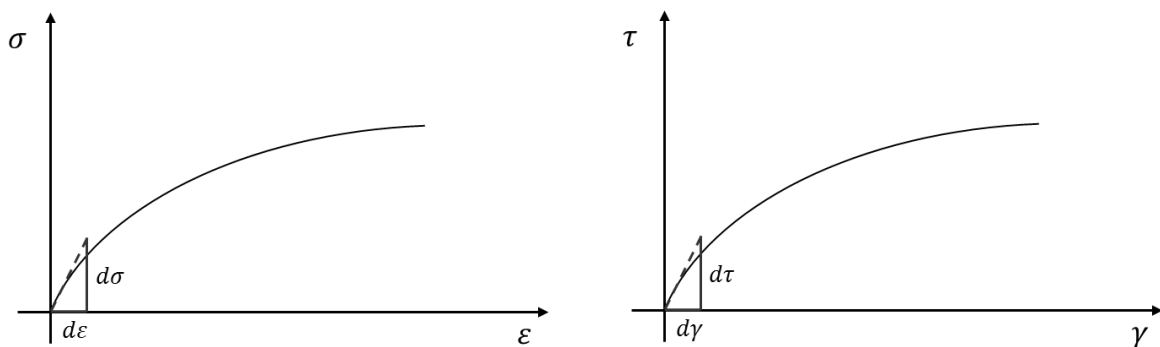


Abbildung 3.7 Schematische Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs im Zeitintervall dt (links Zugversuch, rechts Zugscherversuch)

Nimmt man für die infinitesimale Verformung Linearität an, so kann man aus Gleichung 3.19 für den einachsigen Zugversuch folgern:

$$w_{Z dt} = \frac{1}{2} d\sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} d\varepsilon^2 \tag{3.20}$$

mit	$w_{Z dt}$	spezifische Energie für den Zugversuch im Intervall dt
	$d\sigma$	Spannungsänderung
	$d\varepsilon$	Dehnungsänderung

vgl. [43]

Analog erhält man für den Zugscherversuch:

$$w_{ZS dt} = \frac{1}{2} d\tau d \tan \gamma = \frac{1}{2} \frac{\partial \tau}{\partial \tan \gamma} (d \tan \gamma)^2 \tag{3.21}$$

mit	$w_{ZS dt}$	spezifische Energie für den Zugscherversuch im Intervall dt
	τ	Schubspannung
	γ	Gleitung

vgl. [43]

Aus der Definition des E-Moduls (Gleichung 3.22) und des G-Moduls (Gleichung 3.23) erhält man unter Voraussetzung von Isotropie (vgl. [86]) die Gleichung 3.24.

$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \quad (3.22)$$

$$G = \frac{\partial \tau}{\partial \tan \gamma} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \tan \gamma} = \frac{1}{2(1 + \nu)} \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \quad (3.24)$$

mit	E	E-Modul
	σ, τ	Spannung bzw. Schubspannung
	ε, γ	Dehnung bzw. Gleitung
	ν	Poissonzahl

Gleichsetzen der beiden Energien für den Zugversuch (Gleichung 3.20) und den Zugscher-versuch (Gleichung 3.21) ergibt mit Gleichung 3.24.

$$d \tan \gamma = \sqrt{2(1 + \nu)} d\varepsilon \quad (3.25)$$

mit	ε	Dehnung
	γ	Gleitung
	ν	Poissonzahl

Division durch das Zeitintervall dt ergibt dann Gleichung 3.26.

$$\tan \gamma = \sqrt{2(1 + \nu)} \varepsilon \quad (3.26)$$

mit	ε	Dehnung
	γ	Gleitung
	ν	Poissonzahl

Aus Gleichung 3.26 folgt also, dass bei gleichem Energieeintrag die Dehnrates im Zugscherversuch von der Poissonzahl und der Dehnrates im Zugversuch abhängt. Abbildung 3.8 zeigt die berechnete Dehnrates im Zugscherversuch in Abhängigkeit von der Dehnrates im Zugversuch für unterschiedliche Poissonzahlen.

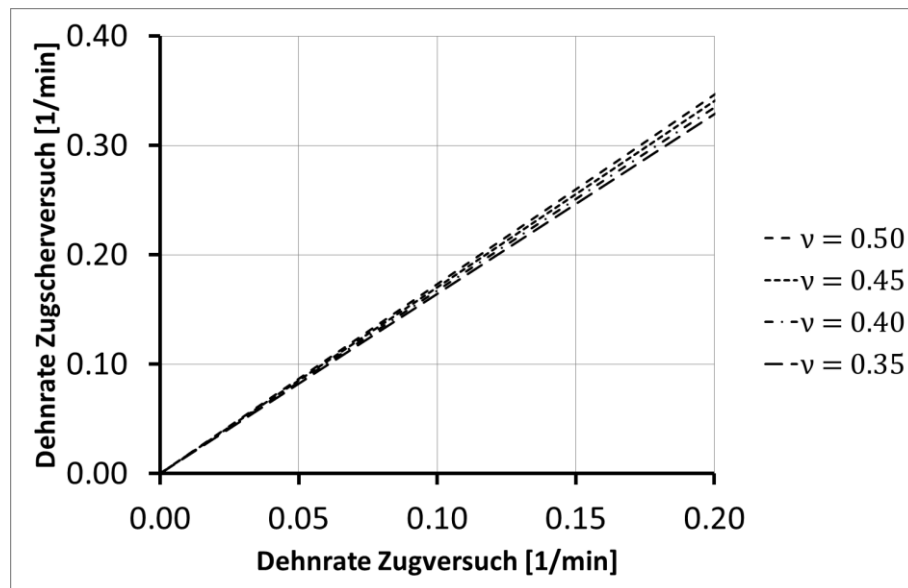


Abbildung 3.8 Berechnete Dehnrates für Zugscherversuch über Zugversuch für unterschiedliche Poissonzahlen

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Zugscherversuche mit einer zur technischen Dehnrates 10 %/min des Zugversuches korrespondierenden Dehnrates geprüft werden. Es ergeben sich also die folgenden Dehnrates für die beiden Klebstoffe.

Tabelle 3.7 Dehnrates für die Zugscherversuche der beiden Klebstoffe GD 920 und KP 140

Klebstoff	Poissonzahl aus Vorversuchen []	Dehnrates Zugversuch [%/min]	Dehnrates Zugscherversuch [%/min]
KP 140	ca. 0.45	10.0	17.0
GD 920	ca. 0.50	10.0	17.3

3.3.5 Druckversuch

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter uniaxialer Druckbelastung wird im Rahmen dieser Arbeit an Druckproben in Anlehnung an DIN EN ISO 604 und DIN ISO 7743 [88, 89] durchgeführt. Die Probekörper sind zylindrisch mit einem Durchmesser von 25 mm und einer Höhe von 30 mm. Die Geometrie der Proben ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

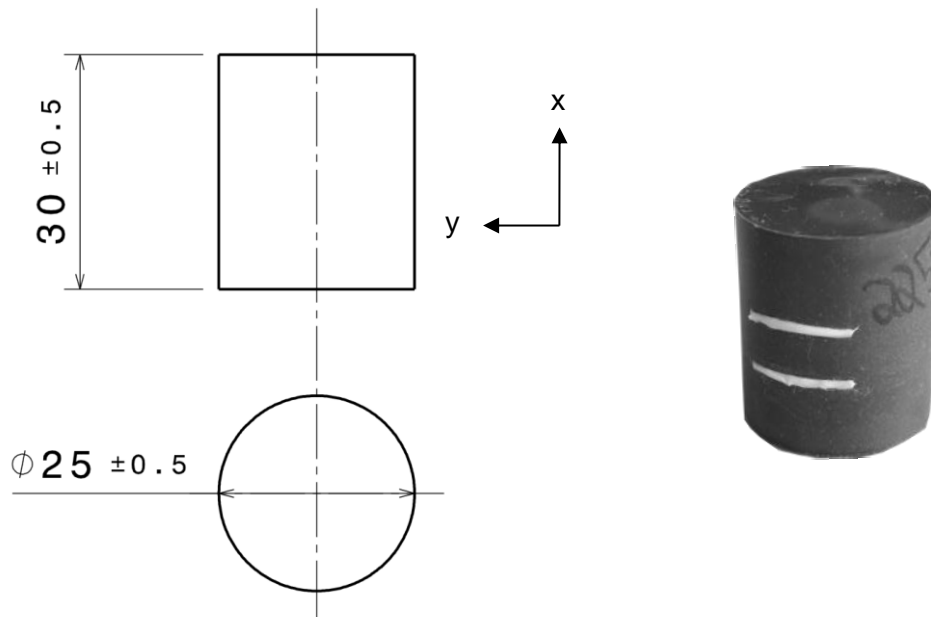


Abbildung 3.9 Druckprobe in Anlehnung an DIN EN ISO 604 und DIN ISO 7743 [88, 89] (technische Zeichnung links; Bild rechts)

Wie auch bei den beiden vorgenannten Probengeometrien werden die Ist-Maße der Probekörper vor der Messung bestimmt, um den Einfluss der Fertigungstoleranzen auf die Spannungsberechnung zu minimieren. Die Prüfgeschwindigkeit wird für die uniaxiale Druckbelastung analog zur uniaxialen Zugbelastung gewählt. Es gelten die Vorgaben aus Gleichung 3.1. Gemessen wird die Kraft in Belastungsrichtung mittels der 20 kN-Kraftmessdose sowie der Traversenweg und die Längs- und Querdehnung mit dem Videoextensometer. Die gemessenen Größen im Druckversuch sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst.

Tabelle 3.8 Gemessene Größen an Druckprobe in Anlehnung an DIN EN ISO 604 und DIN ISO 7743 [88, 89]

Größe	Formelzeichen	Bemerkung
Kraft in x-Richtung	F	
Verschiebung der Einspannung	u_t	Wegaufnehmer an Traverse
Dehnung in x-Richtung	ε_{11}	optisch anhand von zwei Messmarken auf der Probe
Querkontraktion in y-Richtung	ε_{22}	anhand des Schattenbildes

Die technischen und die wahren Dehnungen sowie die Spannungen erhält man aus der Messung analog zur Zugprobe (vgl. Kapitel 3.3.2). Es gelten die Gleichungen 2.5 und 3.2. Im Folgenden wird die Verformung der Druckprobe näher betrachtet.

3.3.5.1 Untersuchungen zum Verformungszustand der Druckprobe

Anhand der einachsigen Druckversuche soll das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Probe bei einachsiger Druckbelastung geprüft werden. Dazu wird ein zylindrischer Probekörper (vgl. Abbildung 3.9) zwischen zwei planparallelen Platten einachsigt gestaucht. Die Querdehnung in der radialen Zylinderebene ist dabei im Idealfall nicht behindert. Durch die Reibung der Zylinderstirnseiten an den Platten kann sich die Probe allerdings in diesem Bereich nicht frei ausdehnen und es kommt zu einer inhomogenen Verformung. Diese inhomogene Verformung ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

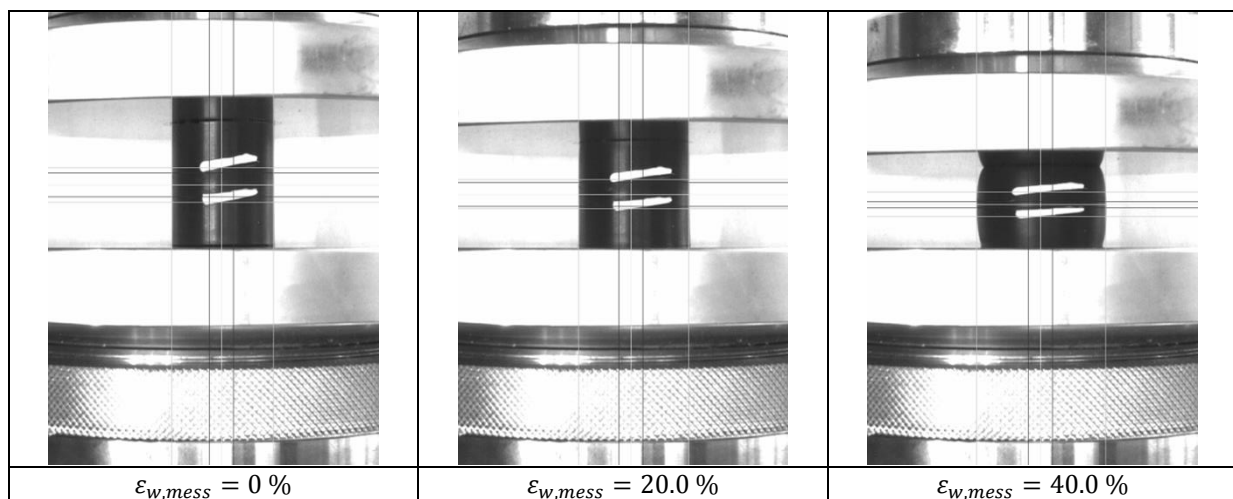


Abbildung 3.10 Verformungsverhalten der uniaxialen Druckprobe bei unterschiedlichen Belastungen in Abhängigkeit von der wahren Dehnung (links minimal, rechts maximal)

Aufgrund des Bestrebens des Klebstoffes, die Volumenänderung so klein wie möglich zu halten, zeigt der Klebstoff bei großen Verformungen am Rand eine kleinere Ausdehnung und in der Mitte der Probe eine entsprechend größere. Wie in Abbildung 3.10 zu erkennen ist, ist dieser Effekt bei relativ kleinen Dehnungen nicht so relevant wie bei großen Dehnungen. Um den Einfluss dieses Effektes zu minimieren wird die Probe für die Dehnungsmessung lediglich im mittleren Drittel optisch vermessen und die Reibung an den Kontaktflächen mittels Schmiermittel minimiert (vgl. auch [77, 78]). Um die Qualität des Versuches beurteilen zu können und einen Gültigkeitsbereich zu definieren, in dem die Verformung der Probe dem geforderten Verformungszustand entspricht, wird im Folgenden der Verformungszustand näher analysiert.

Zusätzlich zur Messung der Längsdehnung in Prüfrichtung im mittleren Drittel der Probe wird mittels Videoextensometer die Querdehnung in der Mitte der Probe gemessen. Der Verformungszustand in der Mitte der Probe kann daher anhand des Querdehnungsverhaltens beurteilt werden. Bleibt die Poissonzahl konstant verglichen mit der Poissonzahl aus dem Zugversuch, so liegt im Messbereich ein homogener einachsiger Spannungszustand vor. Bei größeren Dehnungen wird die Poissonzahl aufgrund der Reibeffekte am Rand und den damit

verbundenen größeren Ausdehnungen in der Mitte der Probe ansteigen. Dieser Effekt ist in Abbildung 3.11, anhand einer Probe, die bis -50 % technische Dehnung belastet wurde, dargestellt.

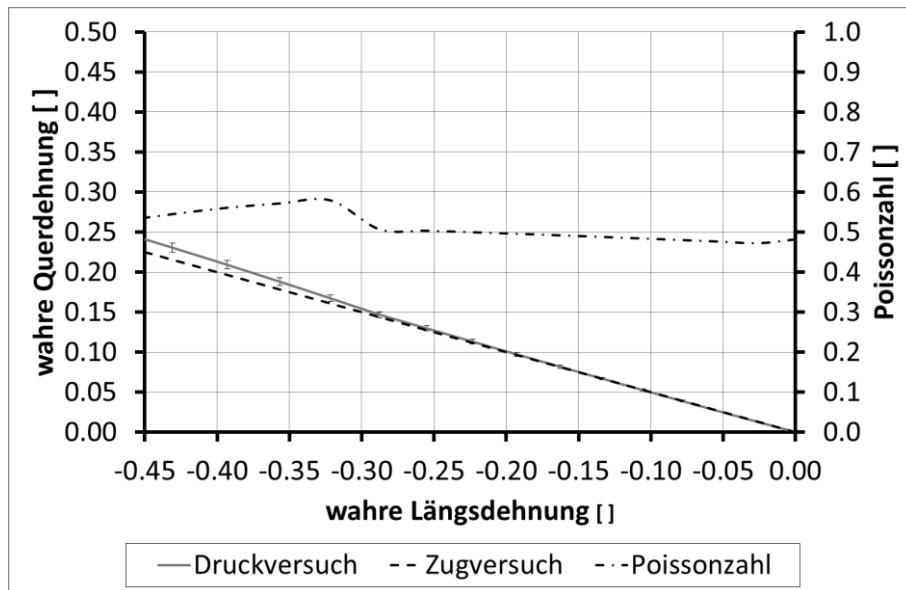


Abbildung 3.11 Vergleich des Querdehnungsverhaltens zwischen Zug- und Druckversuch (Zugversuch extrapoliert)

Abbildung 3.11 zeigt den Verlauf der wahren Querdehnung über der wahren Längsdehnung für den Druckversuch verglichen mit dem Querdehnungsverlauf aus dem Zugversuch. Außerdem ist die differentiell berechnete Poissonzahl für den Druckversuch in Abhängigkeit von der wahren Längsdehnung dargestellt. Man erkennt deutlich, dass ab ca. -30 % wahrer Längsdehnung die Poissonzahl deutlich ansteigt. Ab diesem Punkt haftet der Klebstoff an der Oberfläche und die Querdehnung im Randbereich ist ab diesem Punkt vollständig behindert. Bis zu diesem Punkt bleibt die Poissonzahl annähernd konstant.

Um den Verformungszustand noch genauer bewerten zu können wird im Folgenden eine FE-Analyse des Verformungszustandes durchgeführt. Anhand der optischen Aufnahmen mit der Messtechnik des Videoextensometers (vgl. Abbildung 3.11) wird die Kontur der Probe anhand des Grauwertübergangs zum Hintergrund vermessen. Diese Messung wird als Grundlage für die Randbedingungen der FE-Analyse verwendet. Abbildung 3.12 zeigt den Vergleich zwischen Rechnung und Versuch.

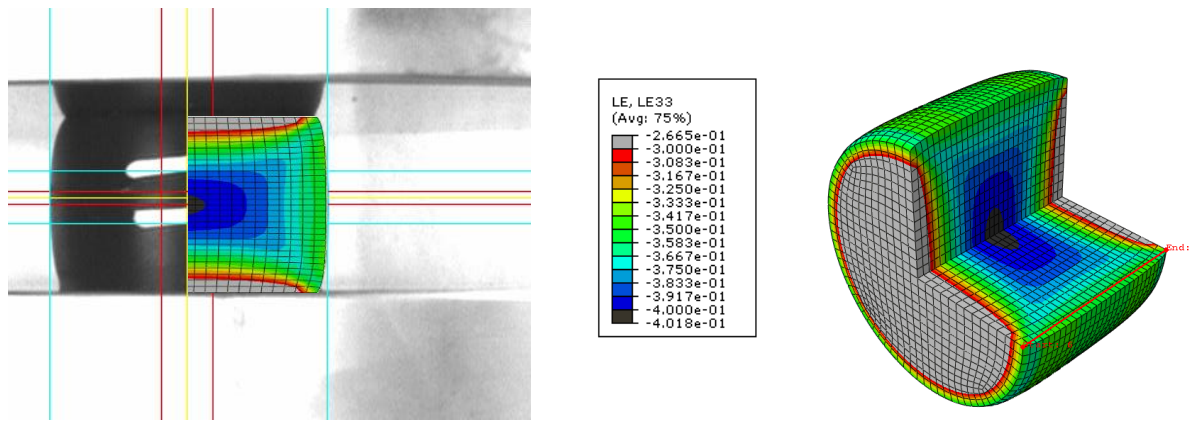


Abbildung 3.12 Druckprobe bei 30 % technischer Dehnung verglichen mit FE-Analyse zum Verformungszustand

Anhand dieser Berechnung kann der Verformungsverlauf in der Probe nachvollzogen werden. Die Verformungen bei einer gemessenen wahren Dehnung von $\epsilon_w = -40.0\%$ sind in Abbildung 3.13 dargestellt.

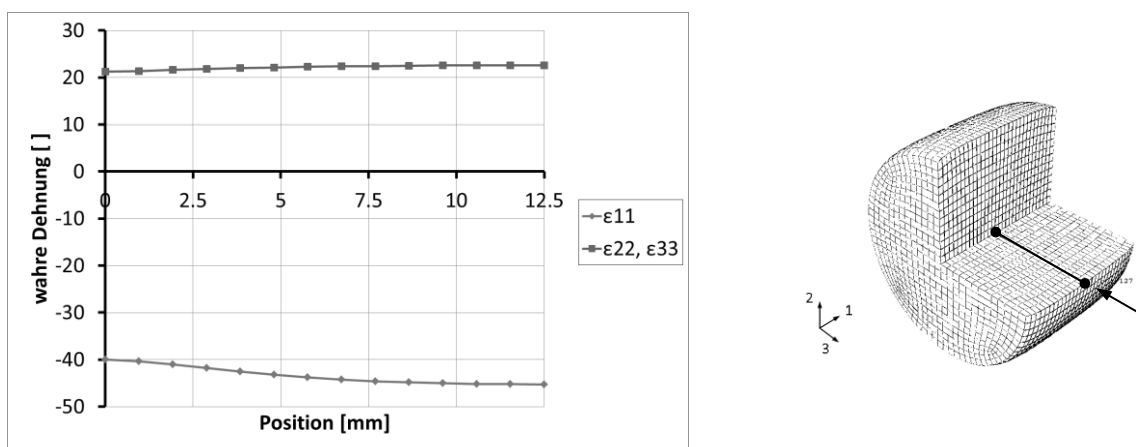


Abbildung 3.13 Verformungsverlauf der Druckprobe bei 40 % wahrer Dehnung in radialer Richtung (Pfad in Abbildung rechts; Rand der Probe bei Position 0 mm; Belastungsrichtung: 1)

Abbildung 3.13 zeigt den Dehnungsverlauf im Inneren der Druckprobe bei einer gemessenen Verformung am Rand von $\epsilon_w = -0.40$. In der Mitte der Probe ist die Dehnung mit $\epsilon_w = -0.44$ um ca. 10 % größer. Der Mittelwert der wahren Dehnung in Belastungsrichtung liegt bei $\epsilon_w = -0.42$. Es muss also im Druckversuch mit einem Fehler von ca. 5 % gerechnet werden. Bei Verformungen unterhalb des Punktes, an dem Haftreibung auftritt, sind diese Abweichungen noch deutlich kleiner (vgl. Abbildung 3.14).

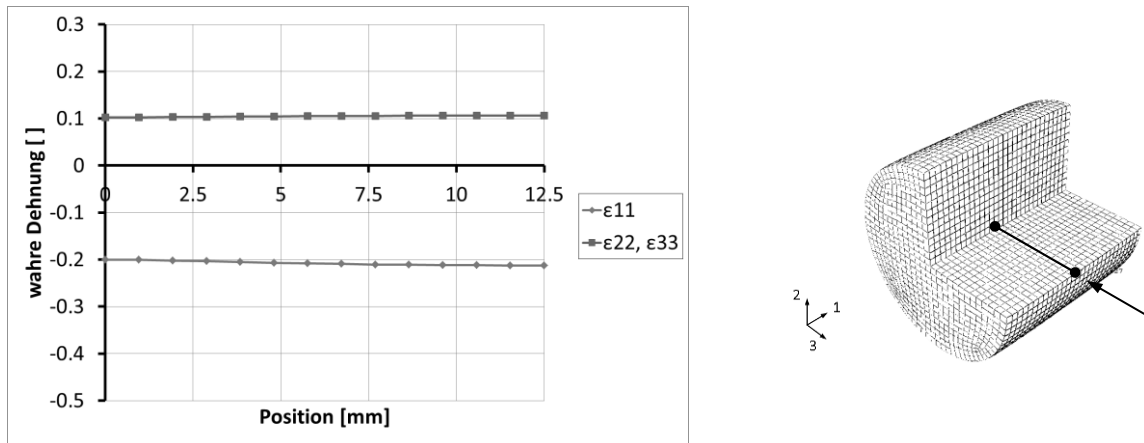


Abbildung 3.14 Verformungsverlauf der Druckprobe bei 20 % wahrer Dehnung in radialer Richtung (Pfad in Abbildung rechts; Rand der Probe bei Position 0 mm; Belastungsrichtung: 1)

Der gemessene Wert unterscheidet sich lediglich um 5 % und der Mittelwert weicht vom gemessenen Wert an der äußeren Seite der Probe lediglich um 2 % ab. Diese Untersuchungen zeigen, dass für relativ kleine Verformungen ein homogener Spannungszustand in der Mitte der Probe erzielt werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Belastungsbereich im Druckversuch für jeden untersuchten Klebstoff so gewählt, dass die Poissonzahl (bestimmt aus der wahren Dehnung) konstant bleibt. In diesem Bereich kann von einem annähernd homogenen, einachsigen Druckzustand ausgegangen werden, der eine gute Grundlage für die Ermittlung von Materialkennwerten liefert.

3.3.6 Kopfzugversuch

Um die Qualität der ermittelten Werkstoffkennwerte beurteilen zu können, werden im Rahmen dieser Arbeit auch Proben mit komplexen Spannungszuständen untersucht. Dazu werden stirnseitig geklebte zylindrische Stahlsubstrate (vgl. Kapitel 3.1.1.1) mit großer Klebschichtdicke verwendet (Kopfzugproben). Die Probengeometrie ist in Abbildung 3.15 dargestellt.

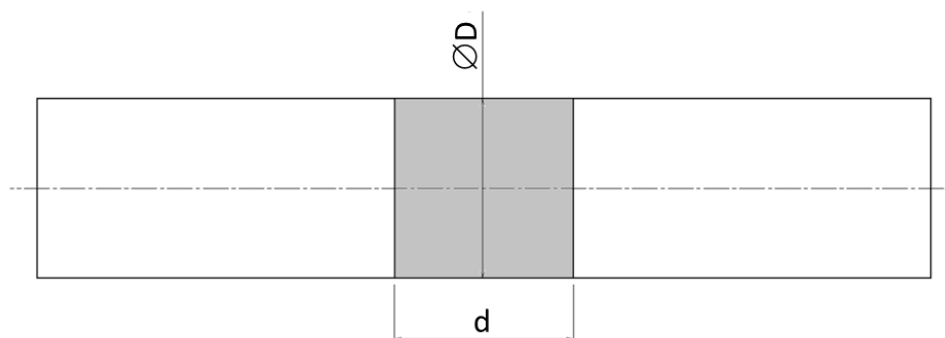


Abbildung 3.15 Kopfzugprobe mit charakteristischen Größen; Klebstoff grau dargestellt

Die Kopfbzugproben werden im Rahmen dieser Arbeit unter Druckbelastung und unter Zugbelastung untersucht. Auch wenn der Begriff nicht ganz zutreffend ist, wird im Folgenden für die Proben, die unter Druckbelastung geprüft wurden, der Begriff „Kopfbzugprobe“ verwendet, da dieser in der Literatur gängig ist.

An den geklebten Seiten der Probe ist der Verformungszustand annähernd volumetrisch, da sich der Klebstoff nicht in seiner Querrichtung kontrahieren bzw. ausdehnen kann. In der Mitte der Probe ähnelt der Verformungszustand dem des Zugversuches nach DIN EN ISO 527-2 [82], da hier fast keine Querdehnungsbehinderung mehr auftritt. Im Rahmen dieser Arbeit werden drei unterschiedliche Kopfbzuggeometrien mit unterschiedlichen Verhältnissen von Durchmesser zu Dicke betrachtet. Die Geometrievariationen sind in Tabelle 3.9 dargestellt.

Tabelle 3.9 Geometrievarianten der Stirnzugprobe

Variante	Durchmesser D [mm]	Klebschichtdicke d [mm]	Geometrieverhältnis D/d []
Variante 1	50	50	1:1
Variante 2	50	25	2:1
Variante 3	50	3	16.7:1

Neben der Kraft und der Verschiebung der Substrate wird an der Kopfbzugprobe zusätzlich die örtliche Verschiebung auf der Probenoberfläche mittels Videoextensometrie gemessen. Die örtliche Verschiebung wird anhand von Punkten, die vor dem Versuch auf der Oberfläche des Klebstoffs aufgebracht wurden, ermittelt. Diese Punkte werden über den gesamten Versuchsverlauf anhand des Kontrastes zur Oberfläche optisch verfolgt. Zur Bestimmung der Punktcoordinate ist dabei der Flächenmittelpunkt jedes einzelnen Punktes maßgeblich. Abbildung 3.16 zeigt eine Kopfbzugprobe mit aufgebrachten Messpunkten im gedehnten Zustand. Anhand des Schattenbildes kann zur jeweiligen Punktcoordinate außerdem der Probendurchmesser bestimmt werden, so dass sowohl die Position des Punktes in Längsrichtung als auch in Tiefenrichtung bekannt ist.

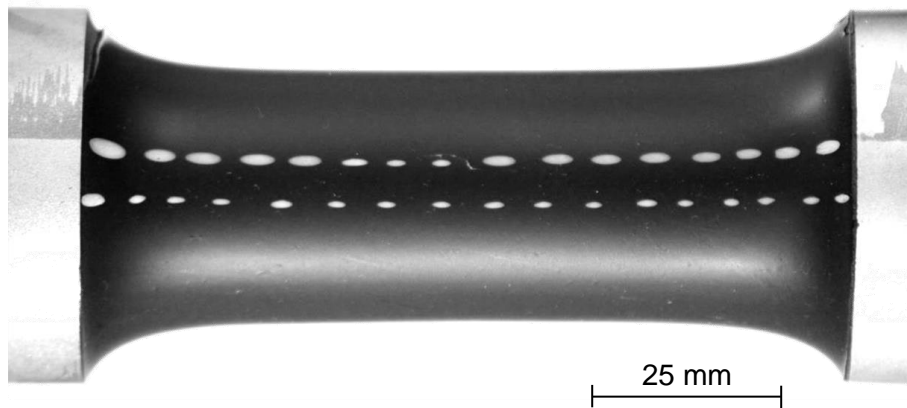


Abbildung 3.16 Verformte Kopfzugprobe mit Messpunkten zur Messung der Verschiebung auf der Oberfläche der Probe

Die gemessenen Größen im Kopfzugversuch sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst.

Tabelle 3.10 Gemessene Größen an Stirnzugprobe

Größe	Formelzeichen	Bemerkung
Kraft in x-Richtung	F	
Verschiebung der Einspannung	u_t	Wegaufnehmer an Traverse
Verschiebung	u	optisch anhand von zwei Messmarken auf den Substraten
Verschiebungsvektor auf der Oberfläche der Probe	$u_{Pi} = \begin{pmatrix} u_{Pi}^x \\ u_{Pi}^d \end{pmatrix}$	Verschiebung des Messpunktes P und Probendurchmesser an der jeweiligen Stelle

3.3.7 Energiebetrachtung bei mechanischen Prüfergebnissen

Das Verhalten der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Werkstoffe ist stark von der eingebrachten Energie abhängig. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit auch Untersuchungen zum Energieeintrag in das Klebstoffvolumen durchgeführt. Man erhält die eingebrachte Energie je Klebstoffvolumen als Integralfläche unter dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm [90]. Es gilt Gleichung 3.27 (vgl. auch Gleichungen 3.18 und 3.19)

$$w = \int \sigma d\varepsilon \quad (3.27)$$

mit w Energie pro Volumen
 σ Spannung
 ε Dehnung

Um das Verhalten der Werkstoffe bei mehrfacher Belastung z. B. zur Charakterisierung des Mullins-Effekts beschreiben zu können, wird die Integralfläche aus Gleichung 3.27 jeweils für einen Belastungszyklus ausgewertet. Dabei beginnt ein Belastungszyklus jeweils bei $F = 0$ mit der Belastung bis zum jeweiligen Dehnungsmaximum des Zyklus. Er endet mit der darauf

folgenden Entlastung der Probe auf $F = 0$ (vgl. Abbildung 3.17). Für einen Belastungszyklus ergeben sich die in Abbildung 3.17 dargestellten charakteristischen Energiegrößen.

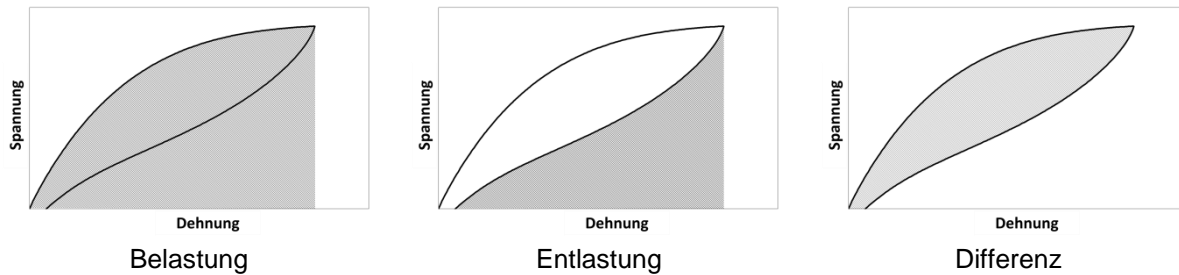


Abbildung 3.17 Charakteristische Energiegrößen eines Belastungszyklus dargestellt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Für einen Zyklus wurden jeweils die Fläche unterhalb der Belastungskurve und die Fläche unterhalb der Entlastungskurve berechnet. Diese Flächen entsprechen der bei der Belastung aufgebracht bzw. bei der Entlastung freigegebenen Energie. Die Differenz beider Flächen ist die dissipierte Energie in diesem Zyklus.

3.3.8 Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse

Die Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse (DMTA) ist ein Verfahren, mit dem Aussagen zum viskoelastischen Verhalten von Klebstoffen in Abhängigkeit von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit getroffen werden können. Zur Auslegung von Bauteilen ist es notwendig, die elastischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz zu kennen.

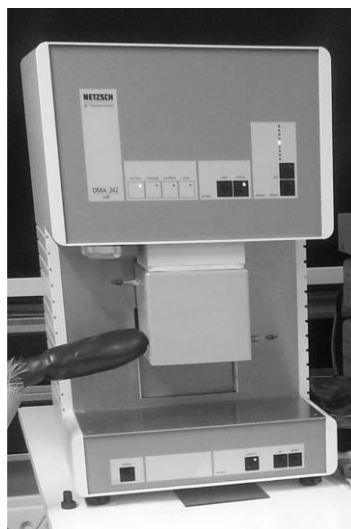


Abbildung 3.18 DMTA Prüfvorrichtung vom Typ NETZSCH DMA 242 C

Bei der Dynamisch-Mechanisch-Thermischen Analyse (DMTA) wird eine Substanzprobe mit einer annähernd sinusförmigen, dynamischen Belastung beaufschlagt. Auf diese Belastung

antwortet der Werkstoff mit einer Verformung, welche in einen In-Phase und einen Außer-Phase schwingenden Anteil aufgeteilt wird. Aus der Steifigkeit des In-Phase Anteils lässt sich der sogenannte Speichermodul E' berechnen. Der Speichermodul E' ist ein Maß für den elastischen Verformungsanteil. Aus der Steifigkeit des Außer-Phase Anteils erhält man analog den Verlustmodul E'' , welcher ein Maß für den viskosen Anteil des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens für die jeweilige Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur darstellt. Der Phasenwinkel zwischen Spannungs- und Dehnungsschwingung ist der dynamische Verlustfaktor $\tan \delta$. [11, 12, 35]

Die Versuche und die Ermittlung der charakteristischen Größen werden im Rahmen dieser Arbeit nach DIN EN ISO 6721-1 [91] durchgeführt.

3.4 Verfahren zur Identifikation der Werkstoffkennwerte

Um die in Kapitel 2.3 vorgestellten Werkstoffgesetze verwenden zu können, müssen die werkstoffspezifischen Kennwerte (vgl. Tabelle 2.3) ermittelt werden. Dies geschieht durch Minimierung des Fehlers zwischen Simulation und Experiment. Die Simulationsergebnisse können dabei sowohl analytisch, durch direkte Berechnung der Spannung aus dem Ansatz für die Formänderungsenergiegedichte (im Folgenden Verfahren 1 genannt), als auch numerisch durch Betrachtung der Simulationsergebnisse eines einzelnen Elementes (im Folgenden Verfahren 2 genannt) ermittelt werden [73, 92, 93]. Dabei ist es für ingenieurmäßige Anwendungen nicht zwingend erforderlich ein globales Minimum der Abweichung zu finden. Es genügt ein Parametersatz, der die Werkstoffeigenschaften möglichst gut abbildet. Im Folgenden wird auf die angewendeten Identifikationsverfahren näher eingegangen

3.4.1 Identifikationsverfahren 1

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete FE-Software (*Abaqus*) bietet eine Möglichkeit, auf Grundlage von einachsigen Versuchen Materialkennwerte für die o.g. Materialmodelle zu ermitteln [28]. Das gleiche Verfahren wird auch in anderen gängigen FE-Programmen angewendet [71, 72]. Bei dieser Vorgehensweise werden die Ableitungen der Formänderungsenergiegedichte für die jeweiligen einachsigen Versuche bestimmt und so eine Spannungs-Dehnungs-Beziehung ermittelt. Die Abweichung zwischen Versuch und Experiment wird dann durch Ausgleichsrechnung (Methode der kleinsten Quadrate, vgl. [65, 94]) für alle Kennwertversuche minimiert. Dabei werden die Ergebnisse aller für die Identifizierung verwendeten Versuche gleich gewichtet.

Die Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ist im Folgenden für das Materialmodell Polynomial $N = 1$ beispielhaft dargestellt (vgl. [28]).

Geht man von einem inkompressiblen ($\nu = 0.5$) Werkstoff aus, so gilt die folgende Beziehung für die Verstreckgrade und die Invarianten:

$$\bar{\lambda}_i = \lambda_i \quad (3.28)$$

$$\bar{I}_i = f(\bar{\lambda}_i) = I_i \quad (3.29)$$

mit	$\bar{\lambda}_i$	Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$), dev. Anteil
	λ_i	Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$)
	\bar{I}_i	Invarianten ($i = 1; 2; 3$), deviatorischer Anteil
	I_i	Invarianten ($i = 1; 2; 3$)

Weiter gilt dann für den Verstreckgrad bei uniaxialer Belastung:

$$\lambda_1 = \lambda_U \quad (3.30)$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_U^{-\frac{1}{2}} \quad (3.31)$$

$$\lambda_U = 1 + \varepsilon_U \quad (3.32)$$

mit	λ_i	Hauptverstreckgrade ($i = 1; 2; 3$)
	λ_U	Verstreckgrad für uniaxiale Belastung in Belastungsrichtung
	ε_U	Dehnung für uniaxiale Belastung in Belastungsrichtung

Die Gleichungen 3.33 und 3.34 sind dann analog zu Gleichung 2.24.

$$\partial W = \sigma_U \partial \lambda_U = \frac{\partial W}{\partial \lambda_U} \partial \lambda_U \quad (3.33)$$

$$\sigma_U = \frac{\partial W}{\partial \lambda_U} = \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_1} \frac{\partial \bar{I}_1}{\partial \lambda_U} + \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_2} \frac{\partial \bar{I}_2}{\partial \lambda_U} \quad (3.34)$$

mit	W	Formänderungsenergiedichte
	σ_U	Spannung für uniaxiale Belastung
	λ_U	Verstreckgrad für uniaxiale Belastung in Belastungsrichtung
	\bar{I}_i	Invarianten ($i = 1; 2; 3$), deviatorischer Anteil

Man erhält dann durch Einsetzen der Definition für das Materialmodell Polynomialic ($N = 1$) (vgl. Tabelle 2.3) für die Spannung in Belastungsrichtung den folgenden Zusammenhang:

$$\sigma_U = \frac{\partial W}{\partial \lambda_U} = 2(1 - \lambda_U^3) \left(\lambda_U \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_1} + \frac{\partial W}{\partial \bar{I}_1} \right) = 2(1 - \lambda_U^3) [C_{10} \lambda_U + C_{01}] \quad (3.35)$$

mit	σ_U	Spannung für uniaxiale Belastung
	W	Formänderungsenergiedichte
	λ_U	Verstreckgrad für uniaxiale Belastung in Belastungsrichtung
	\bar{I}_i	Invarianten ($i = 1; 2; 3$), deviatorischer Anteil
	C_{ij}	Werkstoffkennwerte

Analog kann, mit den Ansätzen aus Tabelle 2.2, die Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung ermittelt werden. Aus diesen Zusammenhängen erhält man dann durch Minimierung der Abweichung mit den Versuchswerten die Materialkennwerte (hier: C_{10} und C_{01}).

Die Konstanten für den volumetrischen Verformungsanteil erhält man aus der im Versuch bestimmten Querkontraktionszahl. Für das polynomische Werkstoffmodell gilt der Zusammenhang aus den Gleichungen 3.36 und 3.37 für den Kompressionsmodul und den Schubmodul mit den Werkstoffkennwerten.

$$G_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (3.36)$$

$$K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (3.37)$$

mit	G_0	initialer Schubmodul
	K_0	initialer Kompressionsmodul
	C_{ij}	Werkstoffkennwerte
	D_i	Werkstoffkennwerte

[20, 28, 94]

Mit der Isotropiebedingung erhält man dann die Konstante D_1 aus der Poissonzahl und den Werkstoffkonstanten (Gleichung 3.38).

$$D_1 = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(C_{10} + C_{01})(1 + \nu)} \quad (3.38)$$

mit	ν	Poissonzahl
	D_i	Werkstoffkennwerte
	C_{ij}	Werkstoffkennwerte

Das Verfahren bietet dabei den Vorteil, dass man mit einem sehr geringen rechnerischen Aufwand in kurzer Zeit zu einem Ergebnis kommt. Es liefert aber durch die Annahme der Inkompessibilität nur für Werkstoffe mit Poissonzahlen sehr nahe bei 0.5 ein gutes Ergebnis.

3.4.2 Identifikationsverfahren 2

Um die Ergebnisse, die mit dem Identifikationsverfahren 1 (vgl. 3.4.1) ermittelt wurden, zu verbessern, wurden im Identifikationsverfahren 2 die Kennwerte mit einer FE-Rechnung an einem Element ermittelt. Dies bietet den Vorteil, dass durch die Betrachtung eines dreidimensionalen Volumenelements auch die Querdehnung als Vergleichsgröße für den Versuch mit herangezogen werden kann und somit auch der volumetrische Verformungsanteil mit berücksichtigt wird.

Abbildung 3.19 zeigt den volumetrischen Verformungsanteil einer Zugprobe bei einer wahren Längsdehnung von 100 % in Abhängigkeit von der Poissonzahl (vgl. Gleichungen 2.25, 2.26).

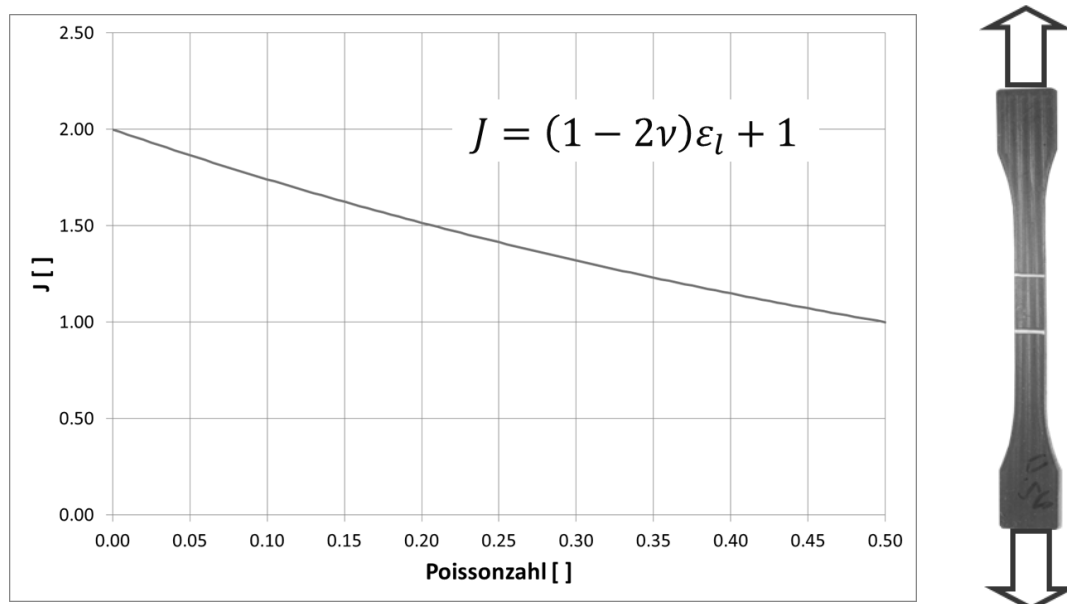


Abbildung 3.19 Volumetrischer Verformungsanteil im Zugversuch bei einer Längsdehnung von 100 % in Abhängigkeit von der Poissonzahl

In Abbildung 3.19 ist zu erkennen, dass auch in Zugproben, in Abhängigkeit von der Querkontraktionszahl, volumetrische Verformungsanteile vorhanden sind. Um diese messtechnisch erfassen zu können, muss allerdings das Querkontraktionsverhalten im Versuch mit bestimmt werden. Dieses kann dann als Zielgröße für die Ermittlung der Werkstoffkennwerte mit verwendet werden.

Die Identifikation erfolgte an einem Element mit der Kantenlänge 1x1x1 (Einheitslos) vom Typ C3D8R (vgl. [28, 94]). Dabei handelt es sich um ein hexaedrisches Element mit 8 Knoten und einem Integrationspunkt. Die Randbedingungen und Belastungsrichtungen wurden den jeweiligen Versuchen angepasst. Abbildung 3.20 zeigt ein solches Element mit den Randbedingungen für uniaxiale Belastung.

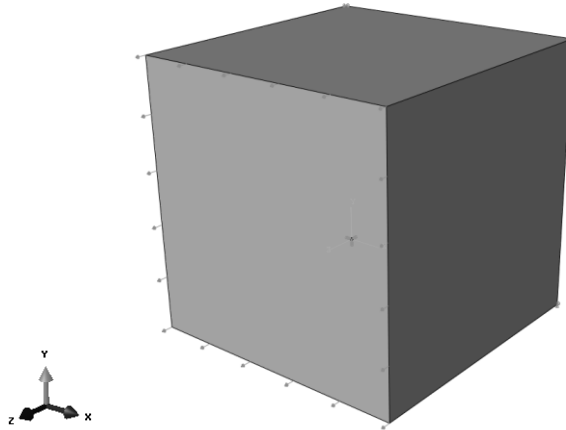


Abbildung 3.20 Element vom Typ C3D8R (*Abaqus*) für die Identifikation der Materialkennwerte aus einer FE-Rechnung

Grundlage für die Minimierung der Abweichung zwischen Versuch und Experiment war bei dieser Vorgehensweise das Spannungs-Dehnungs-Verhalten aus dem Zug-, Schub- und Druckversuch sowie zusätzlich das Längs-Quer-Dehnungsverhalten aus dem Zugversuch.

Da diese Vorgehensweise einen deutlich größeren Aufwand als die Vorgehensweise aus Kapitel 3.4.1 bedeutet, bietet es sich an, eine erste Kennwertermittlung mit Identifikationsverfahren 1 durchzuführen, um ein geeignetes Materialmodell auszuwählen. Die nach Verfahren 1 gefundenen Materialkennwerte und das Materialmodell sind dann die Grundlage und die Startwerte für die Optimierung der Kennwerte nach Verfahren 2. Für die Kennwertermittlungen im Rahmen dieser Arbeit wurde auf diese Weise vorgegangen.

4 Experimentelle Bestimmung der Klebstoffeigenschaften

Grundlage für die Ermittlung von Materialkennwerten ist die messtechnische Charakterisierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der untersuchten Klebstoffe. Das Werkstoffverhalten von elastischen Klebstoffen ist von der Temperatur, der Belastungsart, der Belastungsgeschwindigkeit und Belastungshistorie abhängig (vgl. Kapitel 2.1). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Zahl der Einflussgrößen dadurch begrenzt, dass die Klebstoffe bei Raumtemperatur und bei vorher festgelegten Belastungsgeschwindigkeiten untersucht werden. Als Maß für die Belastungsgeschwindigkeit wurde der Energieeintrag in das Klebstoffvolumen je Zeiteinheit gewählt. Anhand dieser Größe wurden die Dehnraten für die einzelnen Belastungsarten festgelegt (vgl. Kapitel 3.3).

Für die Untersuchung des Werkstoffverhaltens wurden Normproben ausgewählt. Diese bieten, verglichen mit anderen Probengeometrien, eine weite Verbreitung und Reproduzierbarkeit. Als Belastungsarten wurden Zug-, Schub- und Druckbelastung gewählt, da diese den möglichen Verformungsbereich, wie er in Abbildung 2.9 dargestellt ist, abdecken (vgl. Kapitel 2.2.4). Im Zug- und Druckversuch wurden jeweils 5 Belastungszyklen gemessen um den Einfluss der Belastungshistorie zu untersuchen. Um die Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von der Belastungsgeschwindigkeit und der Temperatur abschätzen zu können, obwohl es im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig untersucht wurde, wurden zusätzlich DMTA-Untersuchungen (vgl. Kapitel 3.3.8) durchgeführt.

4.1 Uniaxiale Zugversuche

Anhand von Zugversuchen in Anlehnung an DIN EN 527-2 (vgl. Kapitel 3.3.2) werden die Zugeigenschaften der betrachteten Klebstoffe gemessen. Um die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Belastungsgeschwindigkeit abschätzen zu können, werden die Versuche mit zwei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten (hier Dehnraten) durchgeführt. Gemessen werden jeweils fünf Probekörper je Prüfparameter. Die Prüfmatrix für die uniaxialen Zugversuche ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1 Versuchsmatrix uniaxialen Zugversuche

Klebstoffe	Anzahl Proben []	Dehnraten [%/min]	Belastungszyklen []	Dehnungsmaximum []
KP 140	5	1,0 / 10,0	5	$\varepsilon_t = 100 \%$
GD 920	5	1,0 / 10,0	5	$\varepsilon_t = 100 \%$

4.1.1 Kömmerling Körapur 140

In Abbildung 4.1 ist die wahre Spannung über der wahren Längsdehnung für eine Dehnrage von 1 %/min sowie die dazugehörige wahre Querdehnung über der wahren Längsdehnung dargestellt. In Tabelle 4.2 wurden die charakteristischen Kennwerte nach Norm (vgl. [80]) bestimmt.

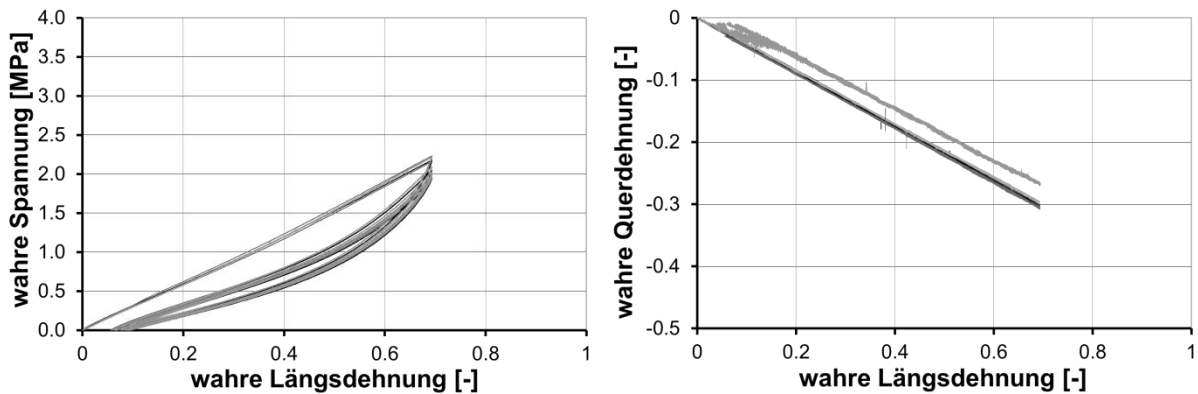


Abbildung 4.1 Wahre Spannung über wahrer Dehnung für den Klebstoff KP 140 (Dehnrage 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.2 Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im uniaxialen Zugversuch (Dehnrage 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
[0.05 <= ε <= 0.25] %	E-Modul 1 [MPa]	3.50	4.13	2.87	4.86	2.61	3.59	0.82
[0.05 <= ε <= 30.00] %	E-Modul 2 [MPa]	2.89	2.97	2.93	3.07	2.96	2.96	0.06
ε _t = 100.00 %	σ(ε _t) [MPa]	2.16	2.18	2.22	2.23	2.23	2.20	0.03
	Poissonzahl []	0.467	0.467	0.460	0.472	(0.430)	0.467	0.004

Abbildung 4.2 zeigt die Ergebnisse der uniaxialen Zugversuche mit einer Dehnrage von 10 %/min. Die ermittelten charakteristischen Kennwerte sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

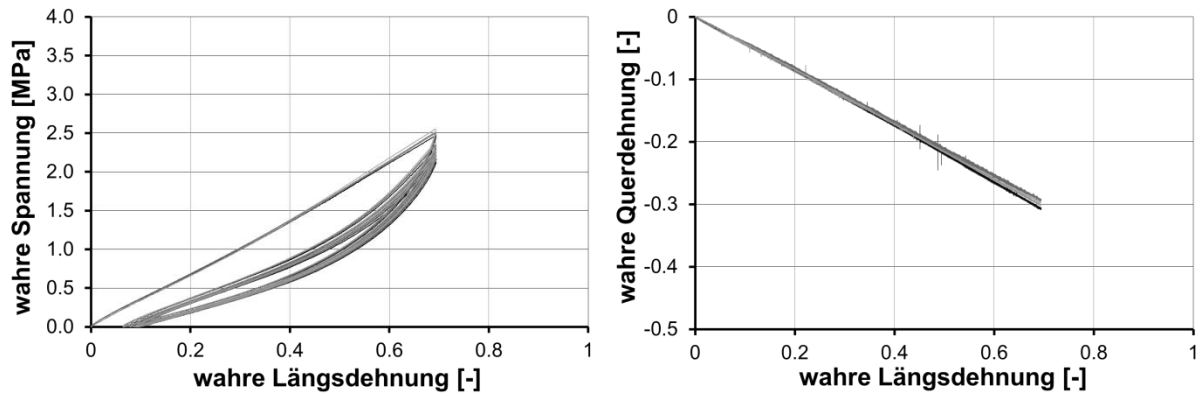


Abbildung 4.2 Wahre Spannung über wahrer Dehnung für den Klebstoff KP 140 (Dehnrage 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.3 Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im uniaxialen Zugversuch (Dehnrage 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
[0.05 ≤ ε ≤ 0.25] %	E-Modul 1 [MPa]	3.73	4.68	3.74	4.42	3.39	3.99	0.48
[0.05 ≤ ε ≤ 30.00] %	E-Modul 2 [MPa]	3.31	3.34	3.39	3.39	3.34	3.35	0.03
ε _t = 100.00 %	σ(ε _t) [MPa]	2.51	2.47	2.55	2.51	2.52	2.51	0.03
	Poissonzahl [-]	0.478	0.475	0.458	0.455	0.469	0.467	0.009

Zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Eigenschaften bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten ist in Abbildung 4.3 der Vergleich der Mittelwertkurven aus den Zugversuchen bei den Dehnraten 1,0 %/min und 10,0 %/min dargestellt. Gezeigt ist die wahre Spannung über der wahren Dehnung.

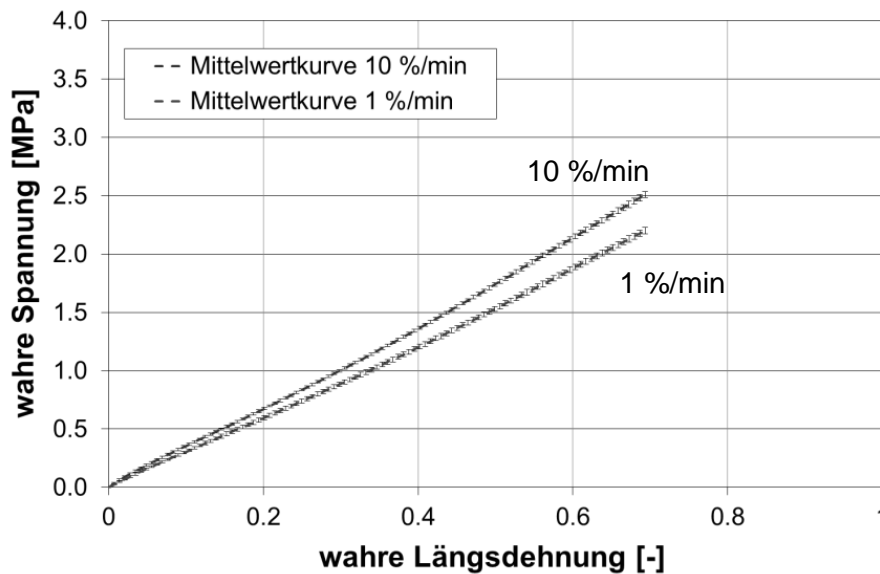


Abbildung 4.3 Wahre Spannung über wahrer Dehnung im einachsigen Druckversuch; Vergleich der Dehnraten für den Klebstoff KP140 (Temperatur $T = 23 \text{ °C}$)

Der Klebstoff KP 140 zeigt während der ersten Belastung einen nahezu linearen wahren Spannungs-Dehnungs-Verlauf. Ab der ersten Belastung stellt sich für alle folgenden Belastungen ein relativ gleichbleibender Verlauf mit einer Hysterese zwischen Be- und Entlastung ein. Nach der ersten Entlastung zeigt sich auf der x-Achse bei $\sigma = 0$ eine zunächst bleibende Dehnung ($\epsilon_{w,pl} = 14.2 \%$). Diese bleibende Dehnung wird nach dem zweiten und den folgenden Belastungszyklen tendenziell größer, der Betrag des Zuwachses ist allerdings sehr gering. Im Dehnratenvergleich zeigten die Versuche bei 10 %/min einen leicht steiferen Verlauf.

4.1.2 Kömmerling GD 920

In Abbildung 4.4 ist die wahre Spannung über der wahren Längsdehnung für eine Dehnraten von 1 %/min sowie die dazugehörige wahre Querdehnung über der wahren Längsdehnung für den Klebstoff GD 920 dargestellt. In Tabelle 4.4 wurden charakteristische Kennwerte nach Norm (vgl. [95]) bestimmt.

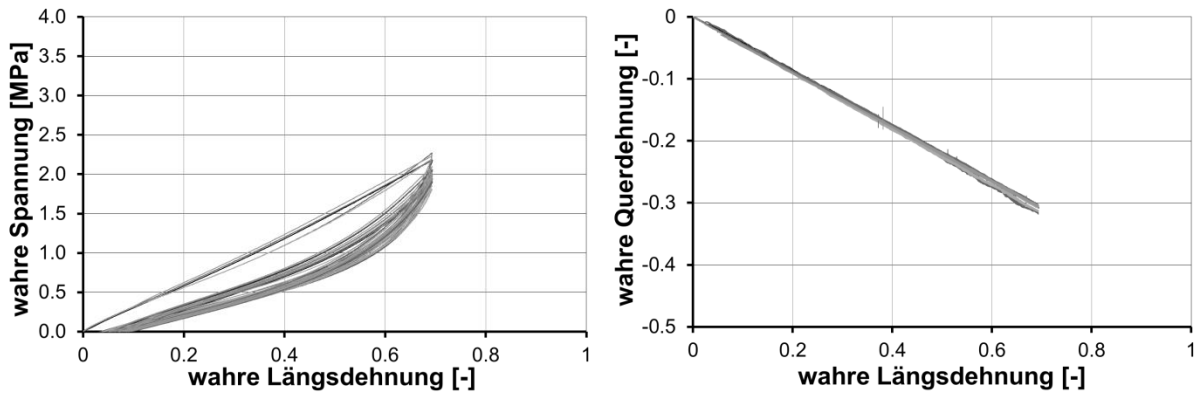


Abbildung 4.4 Wahre Spannung über wahrer Dehnung für den Klebstoff GD920 (Dehnrage 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.4 Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Zugversuch (Dehnrage 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
[0.05 ≤ ε ≤ 0.25] %	E-Modul 1 [MPa]	3.11	(0.71)	4.07	4.52	(5.70)	3.90	0.72
[0.05 ≤ ε ≤ 30.00] %	E-Modul 2 [MPa]	2.70	2.90	2.70	2.97	3.07	2.87	0.14
ε _t = 100.00 %	σ(ε _t) [MPa]	2.27	2.18	2.20	2.18	2.23	2.21	0.04
	Poissonzahl [-]	0.498	0.488	0.487	0.477	0.482	0.486	0.007

Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf der wahren Spannung über der wahren Dehnung sowie die dazugehörigen wahren Querdehnungen über der wahren Spannung der Druckversuche mit einer Dehnrage von 10 %/min. Die ermittelten charakteristischen Kennwerte sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

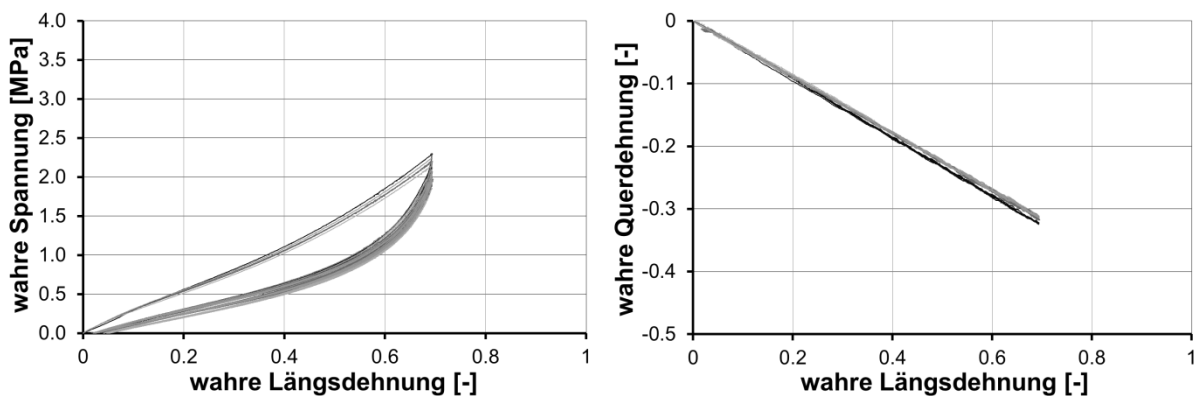


Abbildung 4.5 Wahre Spannung über wahrer Dehnung für den Klebstoff GD920 (Dehnrage 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.5 Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Zugversuch (Dehnrates 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
$[0.05 \leq \varepsilon \leq 0.25] \%$	E-Modul 1 [MPa]	3.15	2.87	3.00	3.41	3.21	3.13	0.18
$[0.05 \leq \varepsilon \leq 30.00] \%$	E-Modul 2 [MPa]	2.61	2.73	2.49	2.60	2.66	2.62	0.08
$\varepsilon_t = 100.00 \%$	$\sigma(\varepsilon_t)$ [MPa]	2.20	2.30	2.15	2.20	2.24	2.22	0.05
	Poissonzahl []	0.499	0.517	0.506	0.504	0.499	0.505	0.007

Zur Veranschaulichung der unterschiedlichen Eigenschaften bei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten zeigt Abbildung 4.6 den Vergleich der Mittelwertkurven aus den Zugversuchen bei den Dehnraten 1.0 %/min und 10.0 %/min. Gezeigt ist die wahre Spannung über der wahren Dehnung für die erste Belastung bis 100 % technischer Dehnung.

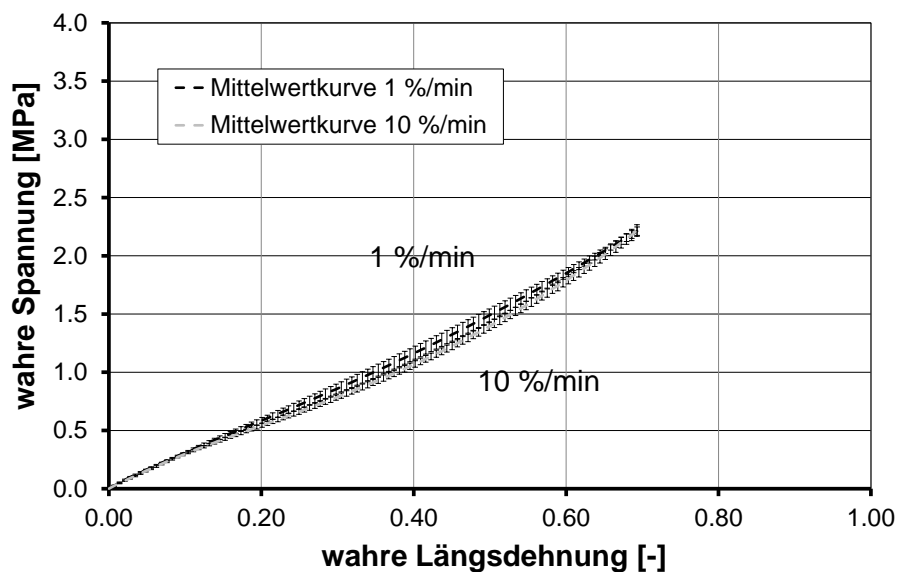


Abbildung 4.6 Wahre Spannung über wahrer Dehnung im einachsigen Zugversuch; Vergleich der Dehnraten für den Klebstoff GD 920 (Temperatur $T = 23 \text{ °C}$)

Der Klebstoff GD 920 zeigt während der ersten Belastung einen nahezu linearen wahren Spannungs-Dehnungs-Verlauf für die langsame Belastungsgeschwindigkeit. Bei einer Dehnrates von 10 %/min zeigt sich ein zunächst linearer Verlauf, der ab ca. 40 % wahrer Dehnung in einen leicht progressiven Verlauf übergeht. Ab der ersten Belastung stellt sich für alle folgenden Belastungen ein relativ gleichbleibender Verlauf ein (Mullins-Effekt).

Auch beim Klebstoff GD 920 zeigen die Belastungen nach dem ersten Zyklus eine Hysterese zwischen Be- und Entlastung. Diese ist allerdings weniger stark ausgeprägt als beim Klebstoff KP 140. Die bleibende Dehnung auf der x-Achse bei $\sigma = 0$ ist beim Klebstoff GD 920 kleiner als beim Klebstoff KP 140. Sie beträgt $\epsilon_{w,pl} = 4.5\%$ nach der ersten Entlastung und steigt mit der Zahl der Belastungszyklen. Im Dehnratenvergleich zeigt der Klebstoff GD 920 nahezu keine Abhängigkeit von der hier geprüften Belastungsgeschwindigkeit.

4.2 Zugscherversuche

Anhand von Zugscherversuchen in Anlehnung an DIN EN 14869-2 (vgl. Kapitel 3.3.4) werden die mechanischen Eigenschaften der betrachteten Klebstoffe unter Schubbelastung gemessen. Die Versuche werden bis zum Versagen der Proben durchgeführt. Gemessen werden jeweils fünf Probekörper je Prüfparameter. Die Prüfmatrix für die Zugscherversuche ist in Tabelle 4.6 dargestellt.

Tabelle 4.6 Versuchsmatrix für Zugscherversuche in Anlehnung an DIN EN 14869-2

Klebstoffe	Anzahl Proben []	Dehnraten [%/min]	Belastungszyklen []
KP 140	5	17,0	1
GD 920	5	17,3	1

4.2.1 Kömmerling Körapur 140

In Abbildung 4.7 ist der Schubspannungs-Gleitungsverlauf für eine Dehnrade von 17.3 %/min dargestellt. In Tabelle 4.7 wurden charakteristische Kennwerte nach Norm bestimmt.

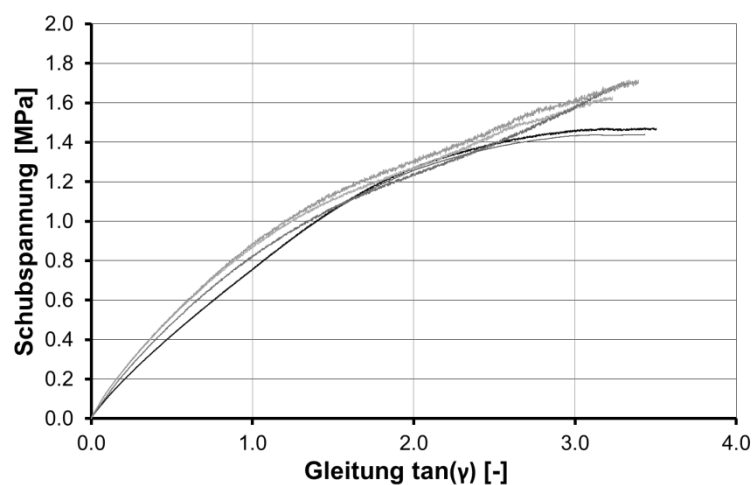


Abbildung 4.7 Schubspannung über Gleitung für den Klebstoff KP140 (Dehnrade 17.3 %/min, Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.7 Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im Zugscherversuch (Dehnrage 17.3 %/min; Temperatur 23 °C)

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
[0.05 ≤ ε ≤ 0.25] %	G-Modul 1 [MPa]	-0.05	-0.05	0.38	0.28	0.39	0.19	0.20
[0.05 ≤ ε ≤ 30.00] %	G-Modul 2 [MPa]	0.93	0.93	1.06	0.99	1.06	1.00	0.06
	T _{max} [MPa]	1.44	1.47	1.63	1.71	1.72	1.59	0.12

Der Klebstoff KP 140 zeigt im Zugscherversuch einen degressiven Schubspannungs-Gleitungs-Verlauf. Die Streuungen werden kurz vor dem Versagen der Probe größer. Die Gleitung beim Versagen beträgt im Mittel über alle Versuche $\tan(\gamma)_{\max} = 322.4\%$.

4.2.2 Kömmerling GD 920

In Abbildung 4.8 ist das Schubspannungs-Gleitungs-Verhalten für eine Gleitungsrate von 17,3 %/min für den Klebstoff GD 920 dargestellt. In Tabelle 4.8 wurden charakteristische Kennwerte nach Norm bestimmt.

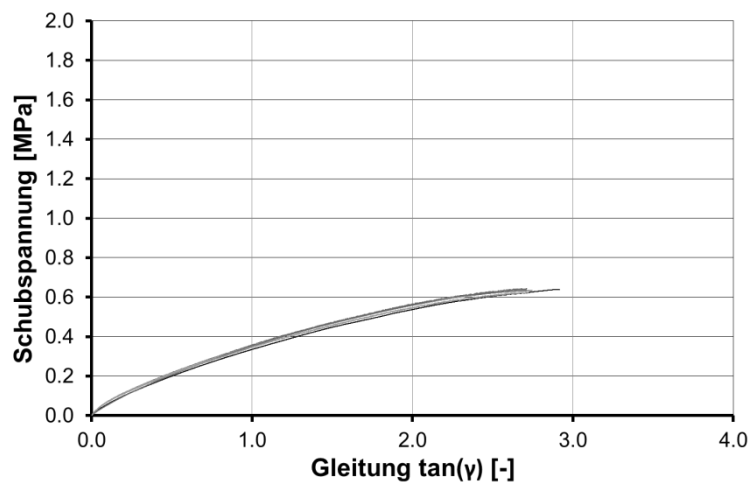


Abbildung 4.8 Schubspannung über Gleitung für den Klebstoff GD 920 (Dehnrage 17.3 %/min; Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.8 **Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Zugscherversuch (Dehnrates 17.3 %/min; Temperatur 23 °C)**

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
[0.05 <= ϵ <= 0.25] %	G-Modul 1 [MPa]	0.22	0.16	0.22	0.15	0.22	0.19	0.03
[0.05 <= ϵ <= 30.00] %	G-Modul 2 [MPa]	0.48	0.43	0.47	0.43	0.46	0.45	0.02
	T_{\max} [MPa]	0.64	0.64	0.63	0.63	0.62	0.63	0.01

Der Klebstoff GD 920 zeigt wie der Klebstoff KP 140 im Zugscherversuch einen degressiven Schubspannungs-Gleitungs-Verlauf. Die Gleitung beim Versagen beträgt im Mittel über alle Versuche $\tan(\gamma)_{\max} = 282,6\%$ und ist damit etwas geringer als die maximale Gleitung des Klebstoffes KP 140. Auch die erreichten Maximalspannungen sind beim Klebstoff KP 140 deutlich größer als beim GD 920.

4.2.3 Validierung der Betrachtung zum Energieeintrag

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurden mit konstanter Dehnrates durchgeführt. In Kapitel 3.3.4 wurde die Dehnrates so bestimmt, dass sich für die Versuche mit unterschiedlichen Belastungsarten ein möglichst gleicher Energieeintrag pro Zeiteinheit in das Klebstoffvolumen ergibt. Um die getroffenen Annahmen zu überprüfen, wurde in Abbildung 4.9 die eingebrachte Energie in den Klebstoff pro Volumen für die uniaxiale Probe sowie für die Zugscherprobe anhand des gemessenen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens ausgewertet und über der Zeit aufgetragen.

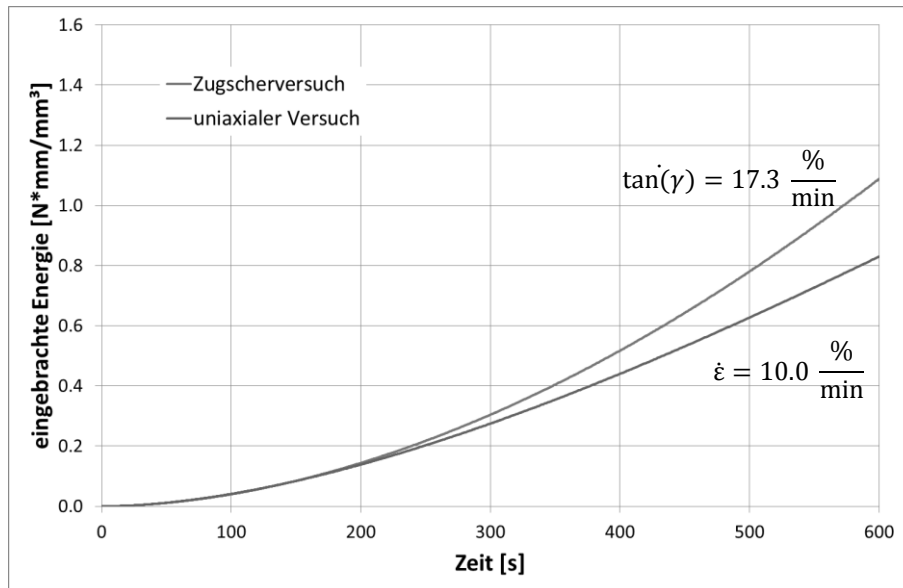


Abbildung 4.9 Eingebachte Energie über Zeit für den uniaxialen Versuch und Zugscherversuch; Klebstoff KP 140; Dehnrate Zugversuch 10.0 %/min; Dehnrate Zugscherversuch 17,3 %/min

Der Vergleich der eingebrachten Energieraten zeigt im Anfangsbereich bis 50 % technische Dehnung ($t = 300$ s) eine nahezu ideale Übereinstimmung. Bei größeren Verformungen treten leichte Abweichungen im Energieeintrag auf, die sich bei 100 % technischer Dehnung ($t = 600$ s) auf ca. 20 % der gesamten eingebrachten Energie belaufen. Die Abweichungen liegen zum einen im nichtlinearen Werkstoffverhalten begründet, und zum anderen im inhomogenen Verformungszustand der Zugscherprobe bei großen Dehnungen. Die Ergebnisse aus Abbildung 4.9 zeigen, dass der Energieeintrag in beiden Versuchen sehr gut aufeinander abgestimmt wurde.

4.3 Uniaxiale Druckversuche

Anhand von Druckversuchen in Anlehnung an DIN ISO 7743 (vgl. Kapitel 3.3.5) wurden die mechanischen Druckeigenschaften bei uniaxialer Belastung gemessen. Um die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Belastungsgeschwindigkeit abschätzen zu können, werden die Versuche mit zwei unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten (hier Dehnraten) durchgeführt. Um den Mullins-Effekt untersuchen zu können werden die Proben fünf Mal bis zum Belastungsmaximum belastet. Gemessen werden jeweils fünf Probekörper je Prüfparameter. Die Prüfmatrix für die uniaxialen Druckversuche ist in Tabelle 4.9 dargestellt.

Tabelle 4.9 Versuchsmatrix für uniaxiale Druckversuche in Anlehnung an DIN ISO 7743

Klebstoffe	Anzahl Proben []	Dehnraten [%/min]	Belastungs- zyklen []	Dehnungs- maximum []
KP 140	5	1,0 / 10,0	5	$\varepsilon_t = 100 \%$
GD 920	5	1,0 / 10,0	5	$\varepsilon_t = 100 \%$

Gezeigt ist für die jeweiligen Klebstoffe das wahre Spannungs-Dehnungs- sowie das wahre Längsdehnungs-Querdehnungs-Verhalten. Die Werte wurden dabei jeweils im mittleren Drittel der Probe gemessen. Aufgrund der inhomogenen Verformung, vor allem in den Randbereichen der Probe und bei großen Verformungen, handelt es sich hierbei lediglich um einen Mittelwert, dessen Genauigkeit von der Größe der Verformung abhängt (vgl. Fehlerbetrachtung in Kapitel 3.3.5).

4.3.1 Kömmerling Körapur 140

Abbildung 4.10 zeigt die wahre Spannung über der wahren Längsdehnung für eine Dehnrade von 1 %/min sowie die dazugehörige wahre Querdehnung über der wahren Längsdehnung, die in Druckversuchen am Klebstoff KP 140 ermittelt wurde. In Tabelle 4.10 wurden charakteristische Kennwerte in Anlehnung an die Prüfnorm bestimmt.

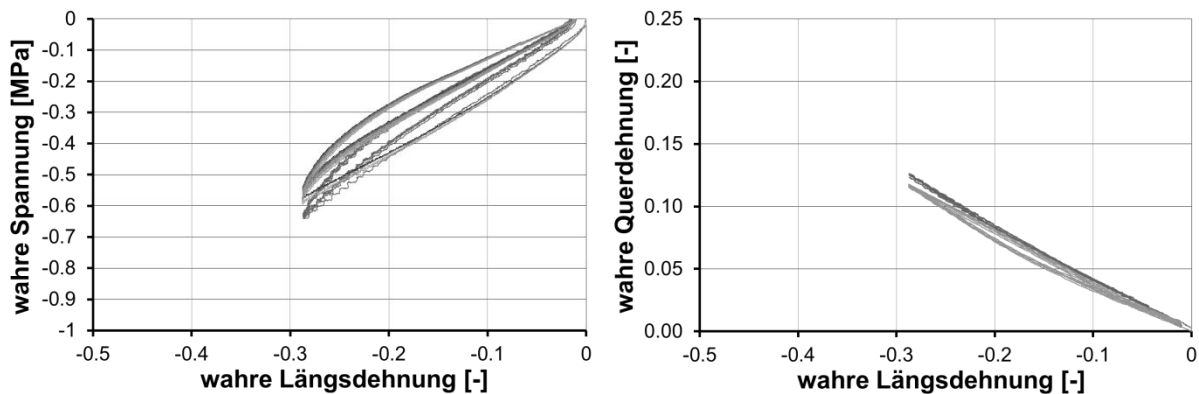


Abbildung 4.10 Wahre Spannung über wahrer Dehnung und wahre Querdehnung über wahrer Längsdehnung im einachsigen Druckversuch für den Klebstoff KP140 (Dehnrade 1.0 %/min, Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.10 Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im uniaxialen Druckversuch (Dehnrage 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
$[-0.05 \leq \epsilon \leq -0.25] \%$	E-Modul 1 [MPa]	2.10	2.78	2.84	2.80	2.86	2.68	0.29
$[-0.05 \leq \epsilon \leq -30.0] \%$	E-Modul 2 [MPa]	2.08	1.72	1.76	1.73	1.77	1.81	0.13
$\epsilon_t = -25.00 \%$	$\sigma(\epsilon_t)$ [MPa]	-0.64	-0.58	-0.59	-0.58	-0.59	-0.60	0.02

Abbildung 4.11 zeigt den Verlauf der wahren Spannung über der wahren Dehnung sowie die dazugehörigen wahren Querdehnungen über der wahren Spannung der uniaxialen Druckversuche mit einer Dehnrage von 10 %/min. Die ermittelten charakteristischen Kennwerte sind in Tabelle 4.11 dargestellt.

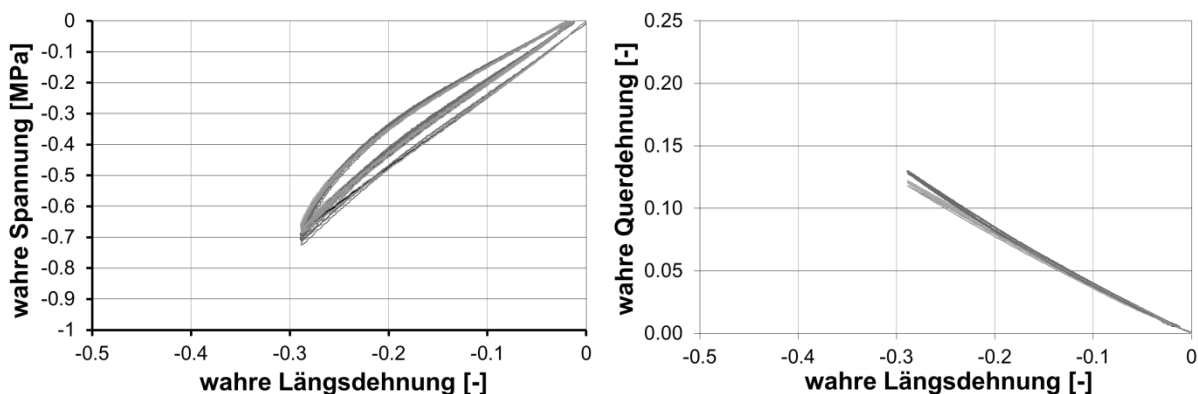


Abbildung 4.11 Wahre Spannung über wahrer Dehnung und wahre Querdehnung über wahrer Längsdehnung im einachsigen Druckversuch für den Klebstoff KP140 (Dehnrage 10.0 %/min, Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.11 Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im uniaxialen Druckversuch (Dehnrage 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
$[-0.05 \leq \epsilon \leq -0.25] \%$	E-Modul 1 [MPa]	3.56	2.70	2.68	(-22.9)	2.73	2.70	3.56
$[-0.05 \leq \epsilon \leq -30.0] \%$	E-Modul 2 [MPa]	2.32	2.14	2.11	2.28	2.14	2.20	2.32
$\epsilon_t = -25.00 \%$	$\sigma(\epsilon_t)$ [MPa]	-0.64	-0.58	-0.59	-0.58	-0.59	-0.60	-0.64

Zur Veranschaulichung der Abhängigkeit des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von der Belastungsgeschwindigkeit ist der Vergleich der Mittelwertkurven aus den Druckversuchen bei den Dehnraten 1,0 %/min und 10,0 %/min dargestellt (vgl. Abbildung 4.12).

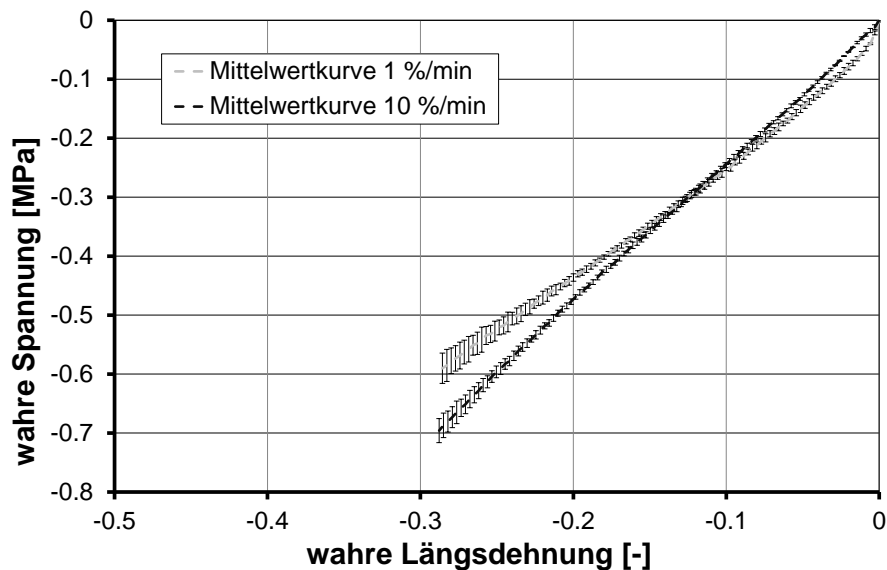


Abbildung 4.12 Wahre Spannung über wahrer Dehnung im einachsigen Druckversuch; Vergleich der Dehnraten für den Klebstoff KP 140 (Temperatur $T = 23\text{ °C}$)

Wie auch im Zugversuch zeigt der Klebstoff KP 140 während der ersten Belastung einen nahezu linearen Verlauf im wahren Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Nach der ersten Belastung zeigt sich im weiteren Be- und Entlastungsverlauf eine Hysterese und eine bleibende Verformung bei $\sigma = 0$ von im Mittel 1,24 %. Im Geschwindigkeitsvergleich zeigen die Versuche mit einer Dehnrates von 10 %/min ein geringfügig steiferes Verhalten als die Versuche mit einer Dehnrates von 1 %/min.

4.3.2 Kömmerling GD 920

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Zugversuche an uniaxialen Druckproben für den Klebstoff GD 920 dargestellt. In Abbildung 4.13 ist die wahre Spannung über der wahren Längsdehnung für eine Dehnrates von 1 %/min sowie die dazugehörige wahre Querdehnung über der wahren Längsdehnung dargestellt. In Tabelle 4.12 wurden charakteristische Kennwerte nach Norm bestimmt.

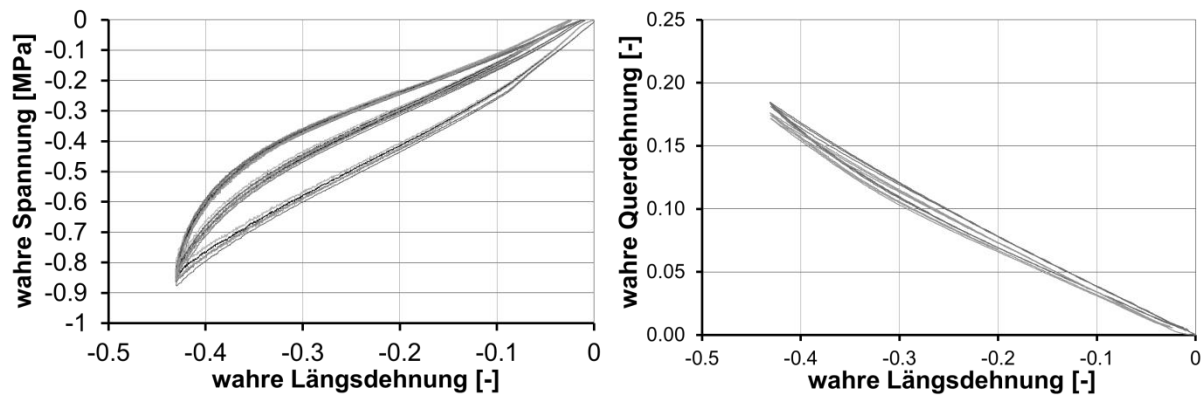


Abbildung 4.13 Wahre Spannung über wahrer Dehnung und wahre Querdehnung über wahrer Längsdehnung im einachsigen Druckversuch für den Klebstoff GD920 (Dehnrage 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.12 Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Druckversuch (Dehnrage 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
$[-0.05 \leq \epsilon \leq -0.25] \%$	E-Modul 1 [MPa]	2.44	2.10	2.04	2.40	2.13	2.22	0.16
$[-0.05 \leq \epsilon \leq -30.0] \%$	E-Modul 2 [MPa]	1.49	1.64	1.60	1.46	1.67	1.57	0.08
$\epsilon_t = -30.00 \%$	$\sigma(\epsilon_t)$ [MPa]	-0.88	-0.84	-0.83	-0.86	-0.86	-0.85	0.02

Abbildung 4.14 zeigt den Verlauf der wahren Spannung über der wahren Dehnung sowie die dazugehörigen wahren Querdehnungen über der wahren Spannung der uniaxialen Druckversuche mit einer Dehnrage von 10 %/min. Die ermittelten charakteristischen Kennwerte sind in Tabelle 4.13 dargestellt.

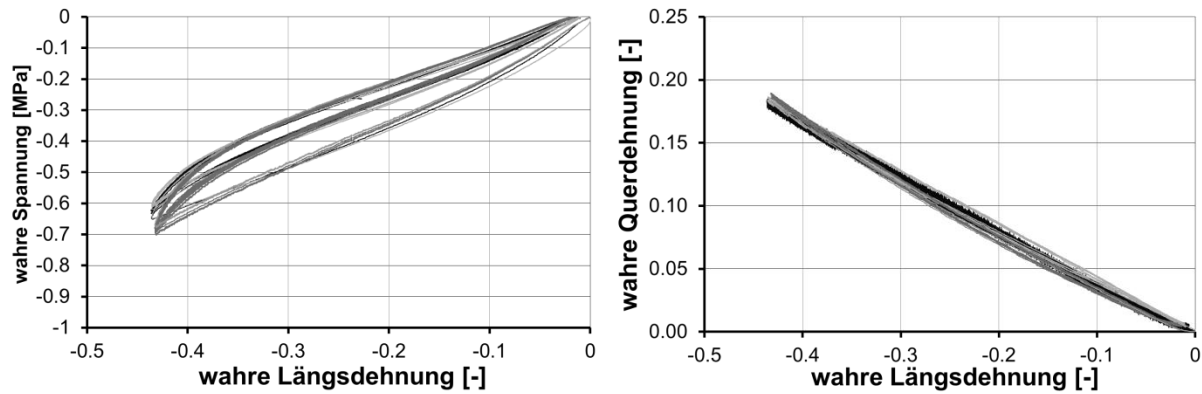


Abbildung 4.14 Wahre Spannung über wahrer Dehnung und wahre Querdehnung über wahrer Längsdehnung im einachsigen Druckversuch für den Klebstoff GD920 (Dehnrage 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Tabelle 4.13 Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Druckversuch (Dehnrage 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)

Bereich/Punkt	Größe	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Mittelwert	StaBW
$[-0.05 \leq \epsilon \leq -0.25] \%$	E-Modul 1 [MPa]	2.09	1.47	-2.80	2.13	2.05	0.99	1.91
$[-0.05 \leq \epsilon \leq -30.0] \%$	E-Modul 2 [MPa]	1.59	1.54	1.54	1.63	1.56	1.57	0.03
$\epsilon_t = -30.00 \%$	$\sigma(\epsilon_t)$ [MPa]	-0.69	-0.65	-0.65	-0.70	-0.68	-0.67	0.02

Zur Veranschaulichung der Abhängigkeit des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von der Belastungsgeschwindigkeit ist der Vergleich der Mittelwertkurven aus den Druckversuchen bei den Dehnraten 1,0 %/min und 10,0 %/min dargestellt (vgl. Abbildung 4.15). Gezeigt ist die wahre Spannung über der wahren Dehnung für die erste Belastung bis 100 % technische Dehnung.

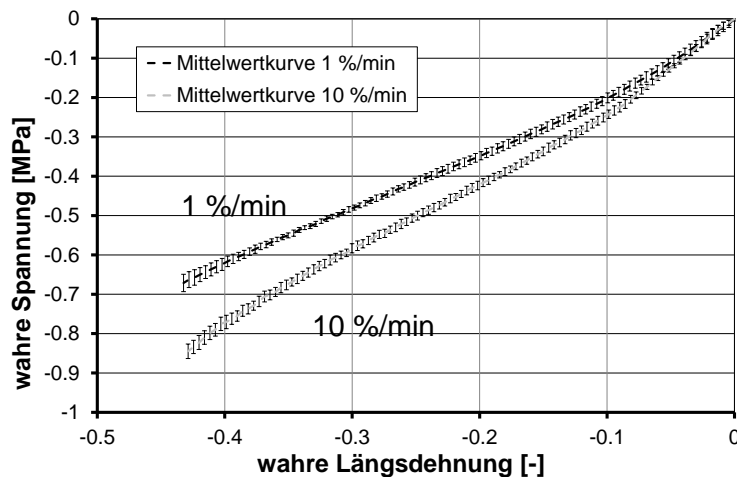


Abbildung 4.15 Wahre Spannung über wahrer Dehnung im einachsigen Druckversuch; Vergleich der Dehnraten für den Klebstoff GD920 (Temperatur $T = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Der Klebstoff GD 920 zeigt, wie auch der Klebstoff KP 140, im Druckbereich einen ähnlichen Verlauf wie im Zugversuch. Nach der ersten Belastung zeigt sich eine nahezu gleichbleibende Hysterese. Die zunächst bleibenden Dehnungen bei Entlastung auf $\sigma = 0$ sind wie im Zugversuch kleiner als die des Klebstoffes KP 140, obwohl das Dehnungsmaximum beim Druckversuch mit dem Klebstoff GD 920 größer ist. Im Gegensatz zum Zugversuch zeigt der Klebstoff GD 920 im einachsigen Druckversuch allerdings eine deutlichere Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit. Die Versuche mit langsamer Dehnrates zeigen um ca. 23 % kleinere Spannungswerte als die Versuche mit schnellerer Belastungsgeschwindigkeit.

4.4 Untersuchungen mittels Dynamisch-Mechanisch-Thermische Analyse

Zusätzlich zu den Prüfungen bei Raumtemperatur an Kleinteilproben wurden DMTA-Untersuchungen durchgeführt, die das Werkstoffverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlichen Frequenzen wiedergeben. Im Folgenden wird auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen eingegangen.

Tabelle 4.14 zeigt die Versuchsmatrix der durchgeführten DMTA-Untersuchungen für die zwei ausgewählten Klebstoffe.

Tabelle 4.14 Versuchsmatrix für DMTA-Untersuchungen

Klebstoffe	Anzahl Proben	Frequenzen [Hz]	Heizrate [K/min]
KP 140	3 Proben	1.0 / 2.5 / 5.0 / 10.0 / 20.0	2
GD 920	3 Proben	1.0 / 2.5 / 5.0 / 10.0 / 20.0	2

4.4.1 Kömmerling Körapur 140

Im Folgenden wird auf die DMTA-Untersuchungen am Klebstoff KP 140 eingegangen. Untersucht wurde eine Substanzprobe des Klebstoffes unter Zugbelastung. Es wurde im Temperaturbereich von -110 °C bis 80 °C und im Frequenzbereich von 1.0 Hz bis 20 Hz geprüft. Abbildung 4.16 zeigt den Speichermodul E' , den Verlustmodul E'' sowie den Verlustfaktor $\tan \delta$ über der Temperatur.

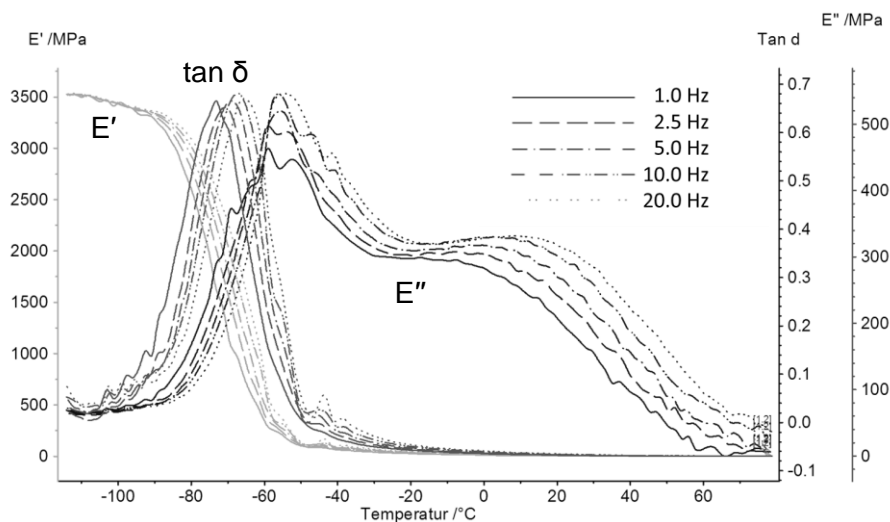


Abbildung 4.16 Ergebnisse der DMTA-Untersuchungen für den Klebstoff KP 140; Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor $\tan \delta$ über der Temperatur; Heizrate $2,0\text{ K/min}$; Frequenzen: $(1,0; 2,5; 5,0; 10,0; 20,0)\text{ Hz}$

Aus den in Abbildung 4.16 gezeigten Werten wurden anhand des Speichermoduls E' die charakteristischen Größen der Transformationsbereiche für den Klebstoff bestimmt. Die Größen Onset, Offset sowie Wendepunkt des Transformationsbereiches s , ermittelt anhand des E' -Verlaufes, sind in Tabelle 4.15 dargestellt.

Tabelle 4.15 Auswertung der charakteristischen Temperaturen im DMTA-Versuch des Klebstoffes KP 140 anhand des Speichermoduls

Bezugsgröße	Temperaturpunkt	Frequenz				
		1,0 Hz	2,5 Hz	5,0 Hz	10,0 Hz	20,0 Hz
E'	Onset [°C]	-84.3	-82.2	-80.1	-78.6	-73.5
	Wendepunkt [°C]	-75.5	-72.4	-67.5	-65.8	-64.6
	Offset [°C]	-62.9	-58.8	-57.1	-55.4	-55.8
$\tan \delta$	Maximum [°C]	-73.5	-71.2	-69.1	-67.8	-65.5

Der Klebstoff KP 140 zeigt einen Transformationsbereich bei -75 °C . Dieser liegt weit unterhalb der Raumtemperatur. Im Bereich der Raumtemperatur sind die Abhängigkeiten der gemessenen Werkstoffeigenschaften von Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur relativ gering.

4.4.2 K mmerling GD 920

Im Folgenden wird auf die DMTA-Untersuchungen am Klebstoff GD 920 eingegangen. Untersucht wurde eine Substanzprobe des Klebstoffes unter Zugbelastung. Es wurde im Temperaturbereich von -110  C bis 80  C und im Frequenzbereich von 1.0 Hz bis 20 Hz geprüft. Abbildung 4.17 zeigt den Speichermodul E', den Verlustmodul E'' sowie den Verlustfaktor tan   über der Temperatur.

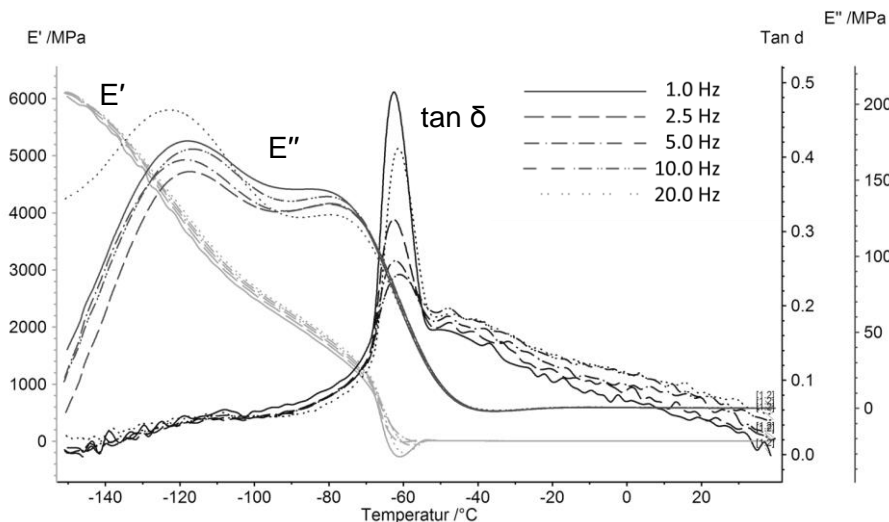


Abbildung 4.17 Ergebnisse der DMTA-Untersuchungen für den Klebstoff GD 920; Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor tan   über der Temperatur; Heizrate 2,0 K/min; Frequenzen: (1,0; 2,5; 5,0; 10,0; 20,0) Hz

Aus den in Abbildung 4.17 gezeigten Werten wurden anhand des Speichermoduls E' die charakteristischen Größen des Transformationsbereiches für den Klebstoff bestimmt. Die Größen Onset, Offset sowie Wendepunkt für die beiden Transformationsbereiche des Klebstoffs GD 920 sind in Tabelle 4.16 dargestellt.

Tabelle 4.16 Auswertung der charakteristischen Temperaturen im DMTA-Versuch des Klebstoffes GD 920 anhand des Speichermoduls

Bezugsgröße	Nr	Temperaturpunkt	Frequenz				
			1,0 Hz	2,5 Hz	5,0 Hz	10,0 Hz	20,0 Hz
E'	1	Onset [�C]	-135.6	-141.6	-143.1	-145.0	-147.3
		Wendepunkt [�C]	-128.9	-132.4	-129.2	-128.1	-128.5
		Offset [�C]	-119.6	-113.9	-107.4	-108.0	-105.1
E'	2	Onset [�C]	-68.7	-69.3	-69.4	-70.4	-68.8
		Wendepunkt [�C]	-65.9	-66.6	-66.8	-65.8	-65.3
		Offset [�C]	-55.3	-57.6	-62.3	-53.9	-54.4
tan �	1	Maximum [C]	-62.1	-61.2	-60.5	-60.2	-60.3

Wie in Tabelle 4.16 dargestellt, zeigt der Klebstoff GD 920 zwei Transformationsbereiche, die beide deutlich unterhalb der Raumtemperatur liegen. Im Bereich der Raumtemperatur zeigen die Untersuchungen mittels DMTA nur vergleichsweise geringe Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit und der Temperatur.

4.5 Beurteilung der Ergebnisse

Die durchgeführten Versuche liefern umfangreiche Informationen über das Spannungs-Dehnungsverhalten der beiden Klebstoffe. Die Versuche mit Zug-, Scher- und Druckbelastung zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Klebstoffeigenschaften von der Belastungsart. Dies wird bei Betrachtung der gemessenen Nennspannungen in den drei Versuchen deutlich. Abbildung 4.18 zeigt den Nennspannungs-Nenndehnungsverlauf aus dem Zug-, Zugscher- und Druckversuch für beide Klebstoffsysteme.

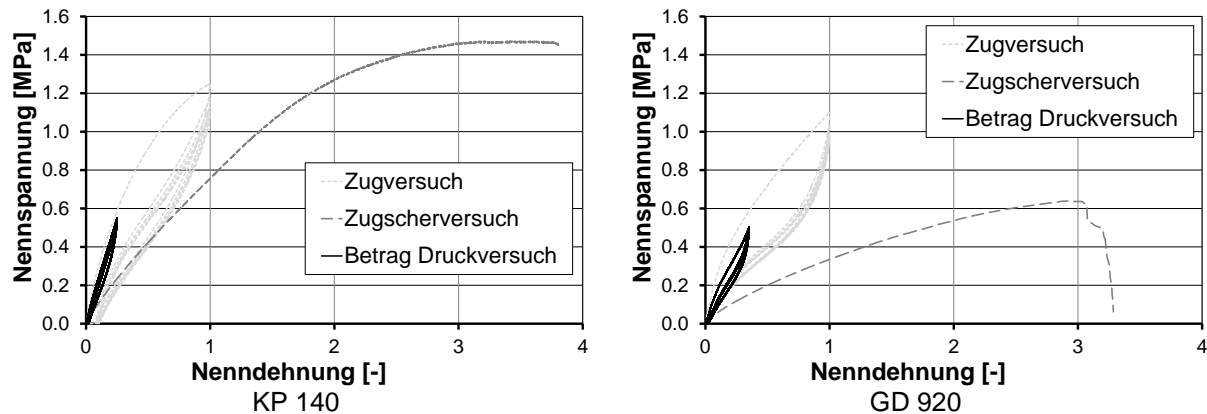


Abbildung 4.18 Vergleich der Nennspannungsverläufe aus Zug-, Zugscher- und Druckversuch für die Klebstoffe KP 140 und GD 920

Der Einfluss der Belastungshistorie wird im Versuch anhand des Mullins-Effekts deutlich, den beide Klebstoffe zeigen. Die erste Belastung weicht deutlich von den Folgebelastungen ab, während die Folgebelastungen untereinander nur sehr geringe Abweichungen zeigen. Der Geschwindigkeitsvergleich in den Zug- und Druckversuchen zeigt außerdem eine Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von der Belastungsgeschwindigkeit. Dies wird auch im DMTA-Versuch deutlich. Dieser Versuch lässt weiterhin erkennen, dass die Abhängigkeit von Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur im Bereich der Raumtemperatur zwar vorhanden, aber relativ gering ist verglichen mit den Transformationsbereichen der jeweiligen Klebstoffe. Ein Werkstoffmodell, das sich auf Versuche stützt, die in einem festgelegten Temperatur- und Belastungsgeschwindigkeitsbereich durchgeführt wurden, kann daher lediglich in diesem Bereich brauchbare Ergebnisse liefern. Für die Praxis ist es daher bei dieser Vorgehensweise wichtig, die Belastungsgeschwindigkeiten und Einsatztemperaturen der zu berechnenden Bauteile zu kennen.

5 Ableiten von Kennwerten für Green'sche Materialmodelle

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse aus Kapitel 4 werden im weiteren Vorgehen Werkstoffkennwerte für geeignete Werkstoffgesetze identifiziert. Verwendet werden dazu die in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Ansätze für die Green'sche Elastizität sowie der in Kapitel 2.3.2 beschriebene Ansatz für den Mullins-Effekt.

5.1 Kennwertermittlung für Green-Elastisches Werkstoffverhalten

5.1.1 Identifikation nach Verfahren 1

5.1.1.1 Kömmerling Körapur 140

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Kennwertermittlung für den Klebstoff KP 140 dargestellt. Abbildung 5.1 zeigt den Verlauf der wahren Spannung über der wahren Dehnung für den Versuch verglichen mit den einzelnen Materialmodellen bei uniaxialer Belastung (Zug-Versuch: 1. Quadrant, Druck-Versuch: 3. Quadrant). Abbildung 5.2 zeigt den Verlauf der Schubspannung über der Gleitung (Zug-Scher-Versuch).

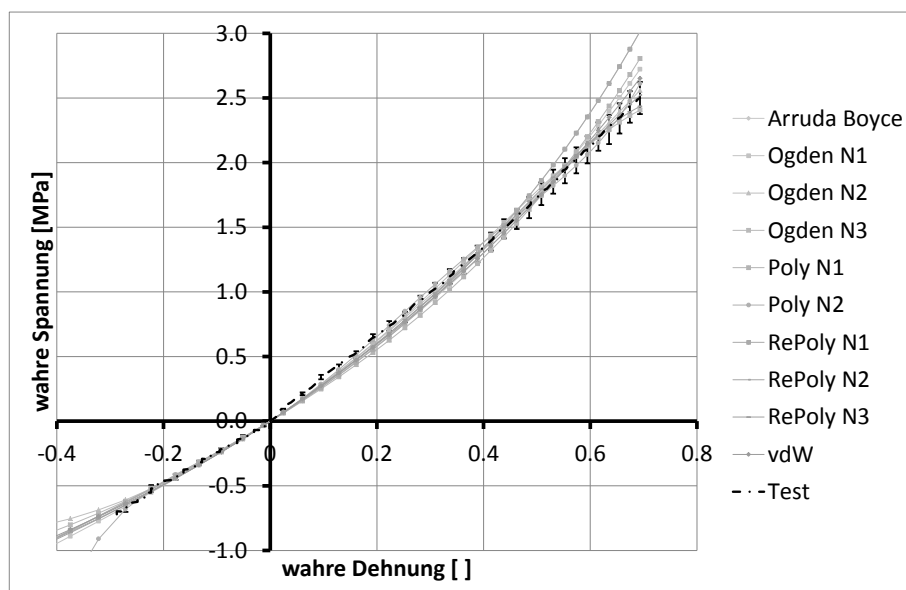


Abbildung 5.1 Wahre Spannung über wahrer Dehnung für alle betrachteten Materialmodelle im Vergleich mit dem Experiment (Test) für uniaxiale Belastung; Klebstoff KP 140

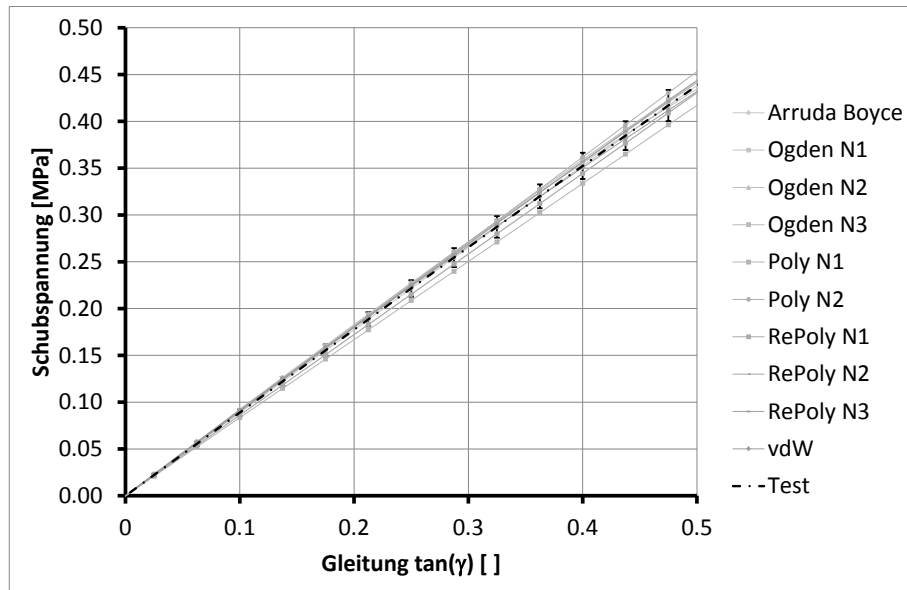


Abbildung 5.2 Schubspannung-Gleitung für alle betrachteten Materialmodelle im Vergleich mit dem Experiment (Test); Klebstoff KP 140

Um bewerten zu können, wie gut die Simulation den Versuch abbildet, wurde für jedes Werkstoffmodell der Mittelwert des Bestimmtheitsmaßes R^2 für alle drei Kalibrierungsversuche gebildet. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

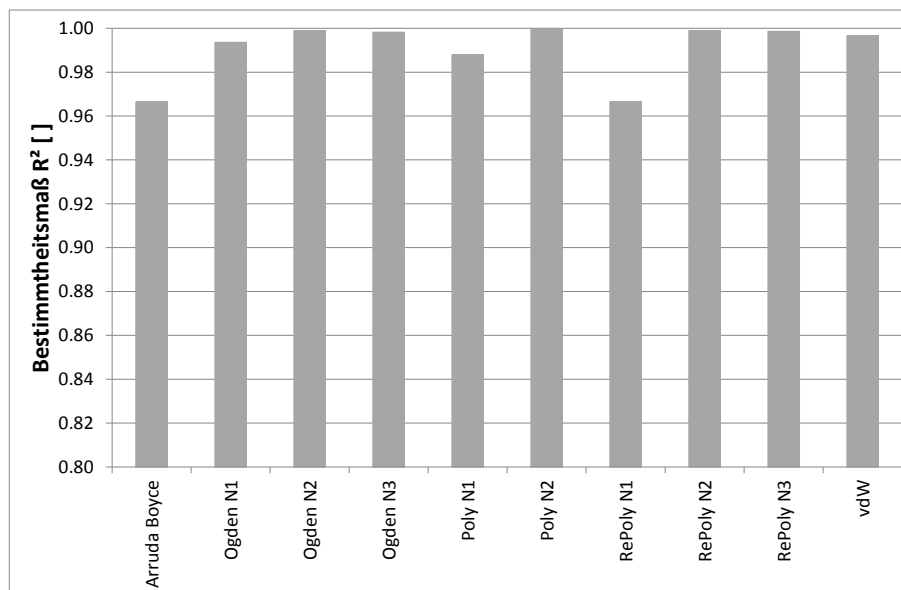


Abbildung 5.3 Mittelwert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus Simulation und Versuch; Zug-, Zug-Scher- und Druck-Versuch; Klebstoff KP 140

Für den Klebstoff KP 140 wurde die beste Abbildung der Werkstoffeigenschaften mit dem Werkstoffmodell "Polynomic N2" erreicht. Mit allen verwendeten Werkstoffmodellen konnte ein mittleres Bestimmtheitsmaß von größer 0.96 erreicht werden. Die schlechtesten Ergebnisse wurden mit den Werkstoffmodellen "Polynomic N1", "Reduced Polynomic N1" und "Arruda-Boyce" erzielt. Die ermittelten Werkstoffkennwerte sind in Anhang A.1.1 zusammengefasst.

5.1.1.2 Kömmerling GD 920

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Kennwertermittlung für den Klebstoff GD 920 dargestellt. Abbildung 5.4 zeigt den Verlauf der wahren Spannung über der wahren Dehnung für den Versuch verglichen mit den einzelnen Materialmodellen bei uniaxialer Belastung (Zug-Versuch: 1. Quadrant, Druck-Versuch: 3. Quadrant). Abbildung 5.5 zeigt den Verlauf der Schubspannung über der Gleitung (Zug-Scher-Versuch).

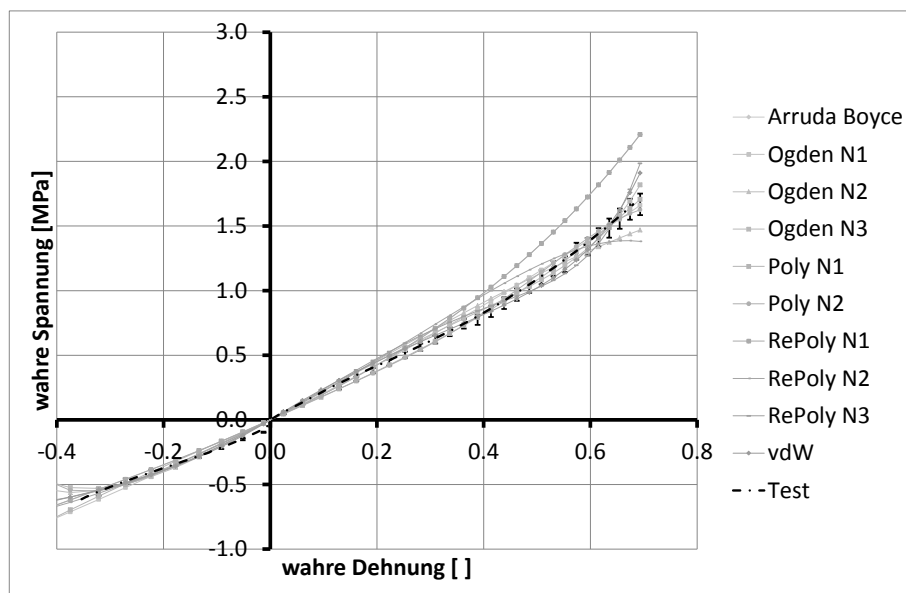


Abbildung 5.4 Wahre Spannung über wahrer Dehnung für alle betrachteten Materialmodelle im Vergleich mit dem Experiment (Test) für uniaxiale Belastung; Klebstoff GD 920

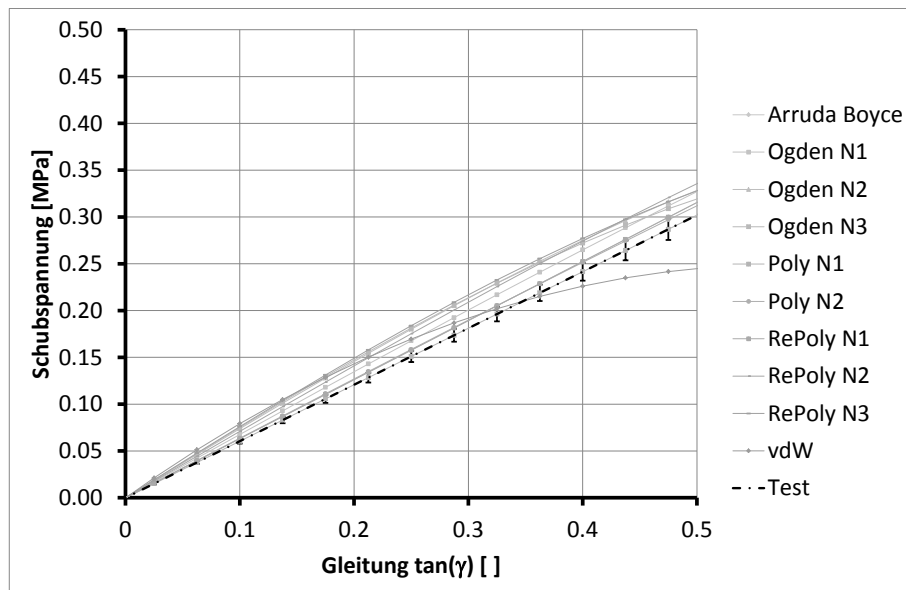


Abbildung 5.5 Schubspannung-Gleitung für alle betrachteten Materialmodelle im Vergleich mit dem Experiment (Test); Klebstoff GD 920

Um bewerten zu können, wie gut die Simulation den Versuch abbildet, wurde für jedes Werkstoffmodell der Mittelwert des Bestimmtheitsmaßes R^2 für alle drei Kalibrierungsversuche gebildet. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

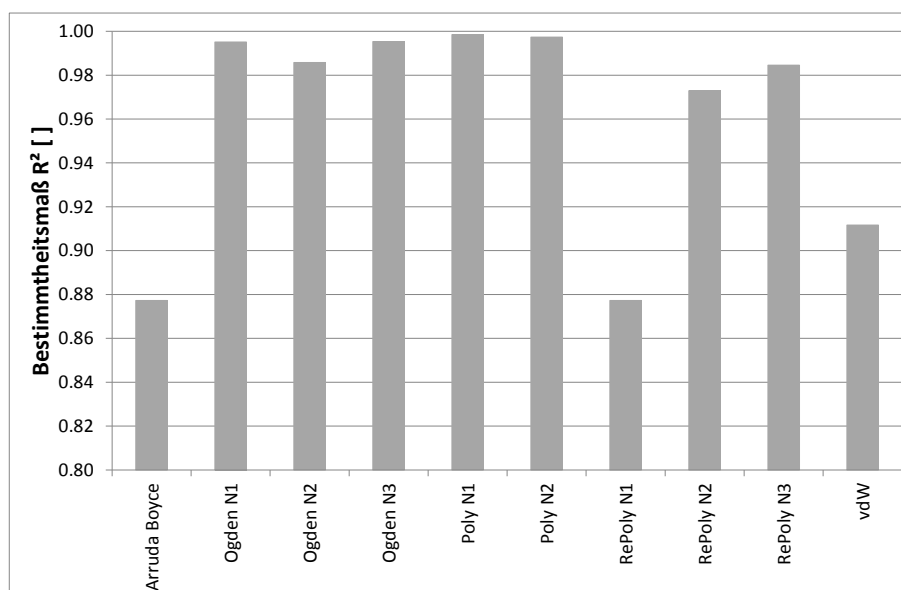


Abbildung 5.6 Mittelwert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus Simulation und Versuch; Zug-, Zug-Scher- und Druck-Versuch; Klebstoff GD 920

Wie in Abbildung 5.6 ersichtlich zeigen die meisten (7 von 10) Werkstoffmodelle ein mittleres Bestimmtheitsmaß größer als 0.96. Lediglich die Werkstoffmodelle "Arruda-Boyce", "Reduced Polynomic N1" und van-der-Waals zeigen eine deutlich schlechtere Abbildung. Das beste Fitting wurde mit dem Werkstoffmodell "Polynomic N1" erreicht. Die ermittelten Werkstoffkennwerte sind in Anhang A.1.2 zusammengefasst.

5.1.2 Verbesserung der gefundenen Werkstoffgesetze nach Verfahren 2

Die in Kapitel 5.1.1 ermittelten Werkstoffgesetze werden im Folgenden durch Berechnungen mit dem Identifikationsverfahren 2 (vgl. Kapitel 3.4.2) verbessert. Das Identifikationsverfahren 2 hat dabei den Vorteil, dass anhand von Volumenelementen das Querdehnungsverhalten und damit auch der volumetrische Verformungsanteil berücksichtigt werden kann. Vor allem für Werkstoffe mit einer Poissonzahl die deutlich kleiner ist als 0.5 wird eine deutliche Verbesserung erwartet.

5.1.2.1 Kömmerling Körapur 140

Abbildung 5.7 zeigt die Ergebnisse der Kennwertermittlung nach Verfahren 2 für den Klebstoff KP 140. Dargestellt ist jeweils der Spannungs-Dehnungs-Verlauf für alle drei verwendeten Versuchsarten sowie der Längsdehnungs-Querdehnungs-Verlauf aus dem Zugversuch.

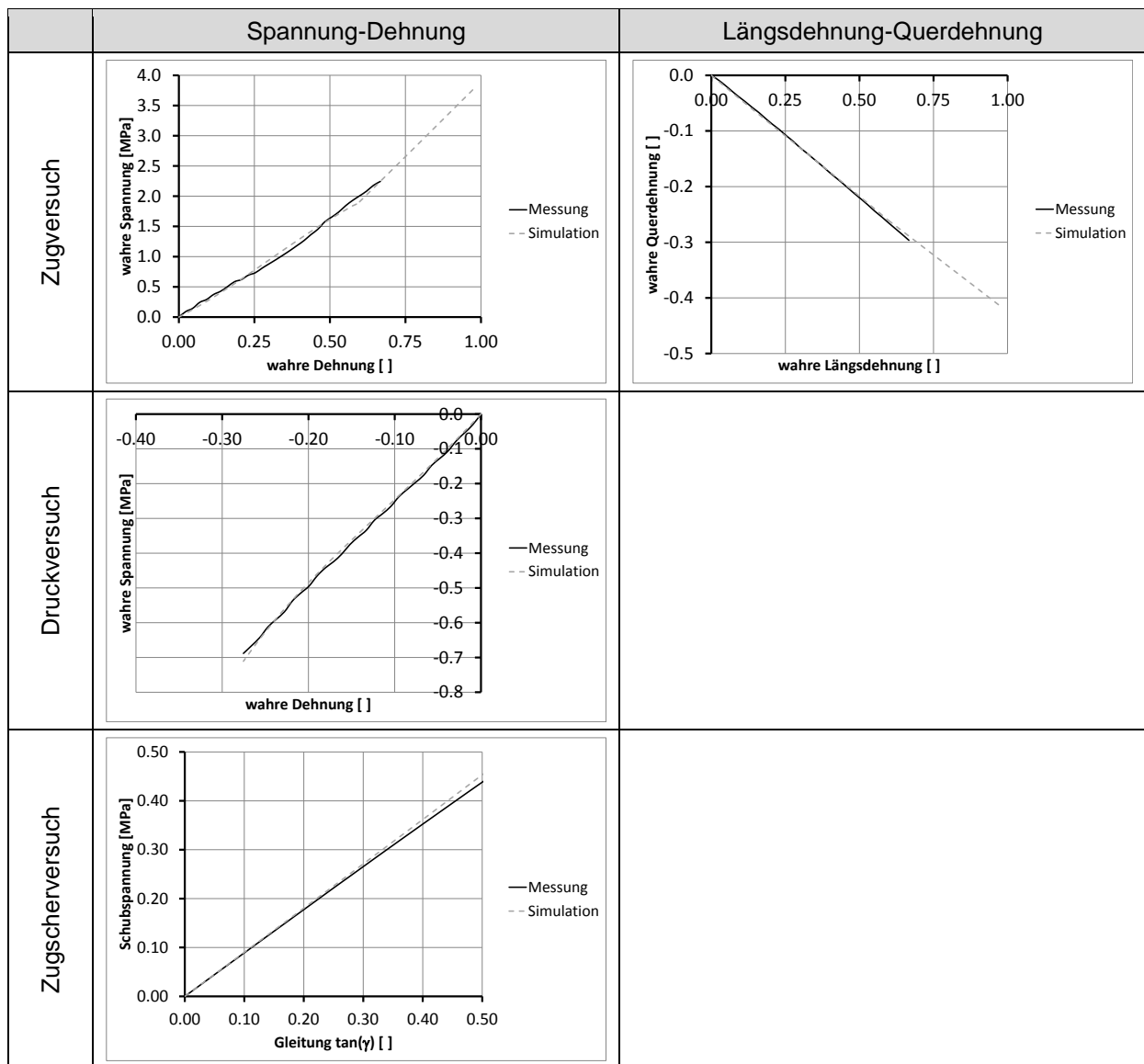


Abbildung 5.7 Vergleich zwischen Simulation und Experiment für die zur Kennwertermittlung verwendeten Versuchsarten; Klebstoff KP 140

In der Verbesserung des Werkstoffmodells für den Klebstoff KP 140 konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch erzielt werden. Auch das Querdehnungsverhalten kann mit den gefundenen Werkstoffkennwerten sehr gut abgebildet werden. Die auf diese Weise ermittelten Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1 **Ermittelte Werkstoffkennwerte nach Identifikationsverfahren 2 für den Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Polynomisch N = 2**

Parameter	Wert	Einheit
N	2	[]
C ₁₀	6.43882337E-01	[MPa]
C ₀₁	-1.78668343E-01	[MPa]
C ₂₀	3.79944503E-01	[MPa]
C ₁₁	-1.19570953E+00	[MPa]
C ₀₂	8.13551272E-01	[MPa]
D ₁	2.39355225E-01	[1/MPa]
D ₂	1.13186228E+10	[1/MPa]

5.1.2.2 Kömmerling GD 920

Abbildung 5.8 zeigt die Ergebnisse der Kennwertermittlung nach Verfahren 2 für den Klebstoff GD 920. Dargestellt ist jeweils der Spannungs-Dehnungs-Verlauf für alle drei verwendeten Versuchsarten sowie der Längsdehnungs-Querdehnungs-Verlauf aus dem Zugversuch.

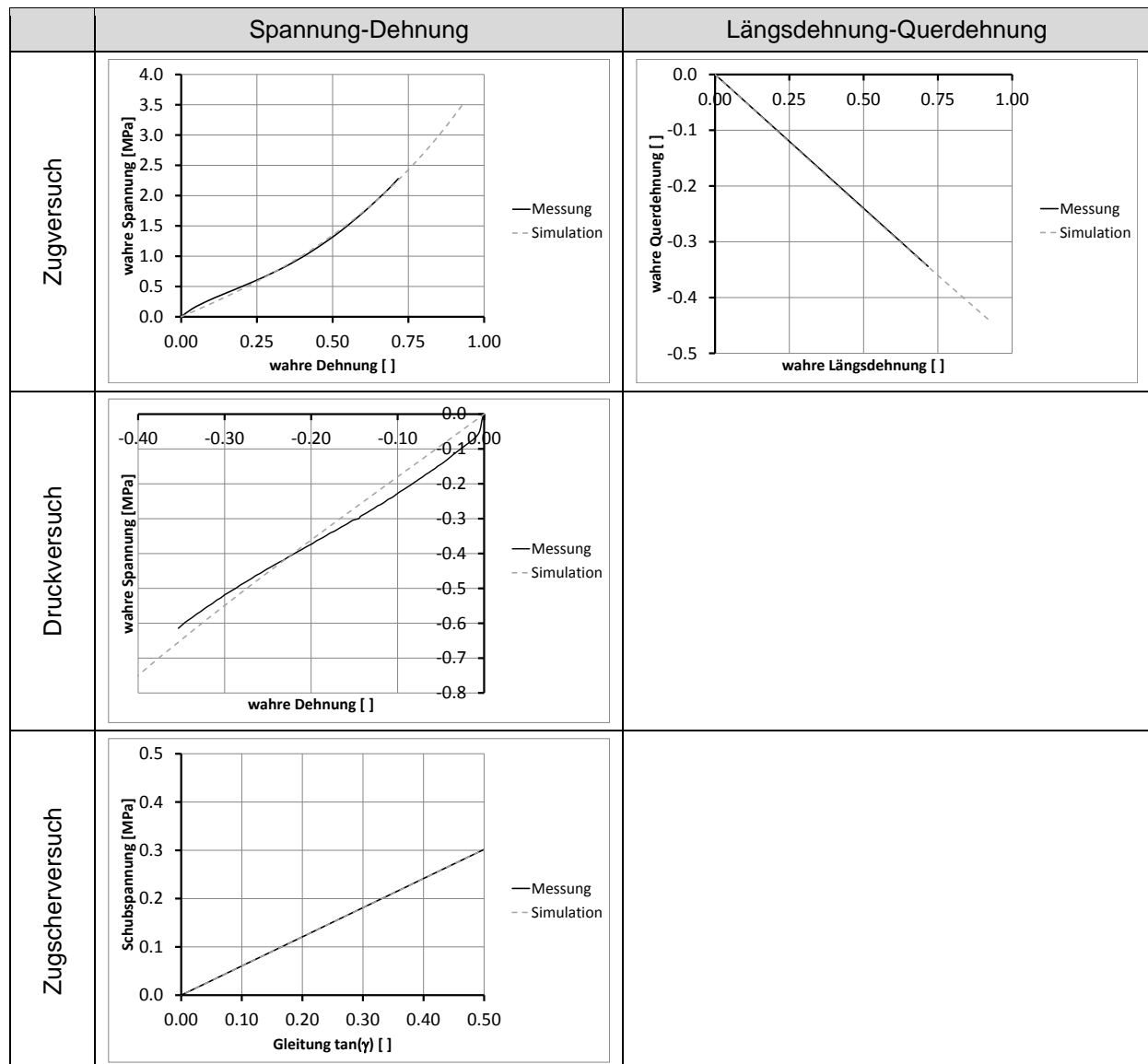


Abbildung 5.8 Vergleich zwischen Simulation und Experiment für die zur Kennwertermittlung verwendeten Versuchsarten; Klebstoff GD 920

Die weitere Optimierung der Werkstoffkennwerte für den Klebstoff GD 920 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Versuch. Lediglich im Druckversuch sind die Abweichungen geringfügig größer als bei den anderen Versuchen. Es ist zu vermuten, dass diese Abweichung mit dem nicht optimalen Verformungs- bzw. Spannungszustand (vgl. Kapitel 3.3.5.1) der Druckprobe zusammenhängt. Auch der Längsdehnungs-Querdehnungsverlauf zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den im Versuch ermittelten Werten. Die auf diese Weise ermittelten Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2 Ermittelte Werkstoffkennwerte nach Identifikationsverfahren 2 für den Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Polynomisch N = 1

Parameter	Wert	Einheit
N	1	[]
C_{10}	2.44181186E-01	[MPa]
C_{01}	8.133285794E-02	[MPa]
D_1	3.08233854E-02	[1/MPa]

5.2 Kennwertermittlung für Mullins-Effekt

Im Folgenden werden die Werkstoffkennwerte für den Mullins-Effekt ermittelt. Dabei wird jeweils der auf das Belastungsmaximum bezogene Entlastungszyklus aus Zug- und Druckversuch betrachtet. Betrachtet werden immer alle fünf Belastungszyklen ohne die erste Belastung.

5.2.1 Kömmerling Körapur 140

In Abbildung 5.9 ist der Vergleich zwischen Simulation und Messung für die Ermittlung der Kennwerte für den Mullins-Effekt der Klebstoffs Kömmerling Körapur 140 dargestellt.

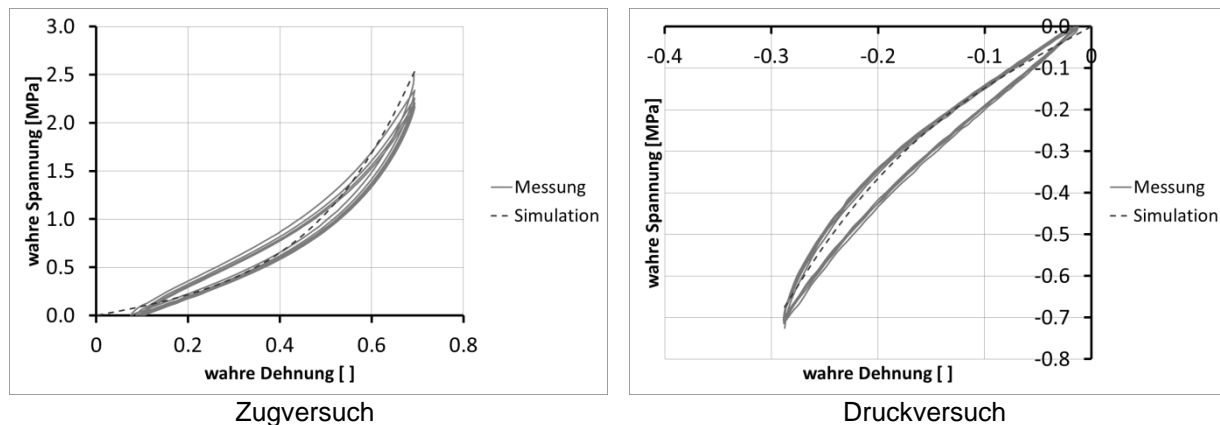


Abbildung 5.9 Vergleich zwischen Simulation und Experiment für die Kennwertermittlung des Mullins-Effekts ohne erste Belastung; Klebstoff KP 140

Sowohl im Zug- als auch im Druckbereich lassen sich mit den gefundenen Werkstoffkennwerten gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Versuch erzielen. Die auf diese Weise ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3 Ermittelte Werkstoffkennwerte für den Mullins-Effekt; Klebstoff KP 140

Parameter	Wert	Einheit
r	1.001	[]
m	0.0887487	[MPa]
β	1.33666	[MPa]

5.2.2 Kömmerling GD 920

In Abbildung 5.10 ist der Vergleich zwischen Simulation und Messung für die Ermittlung der Kennwerte für den Mullins-Effekt es Klebstoffs Kömmerling Körapur 140 dargestellt.

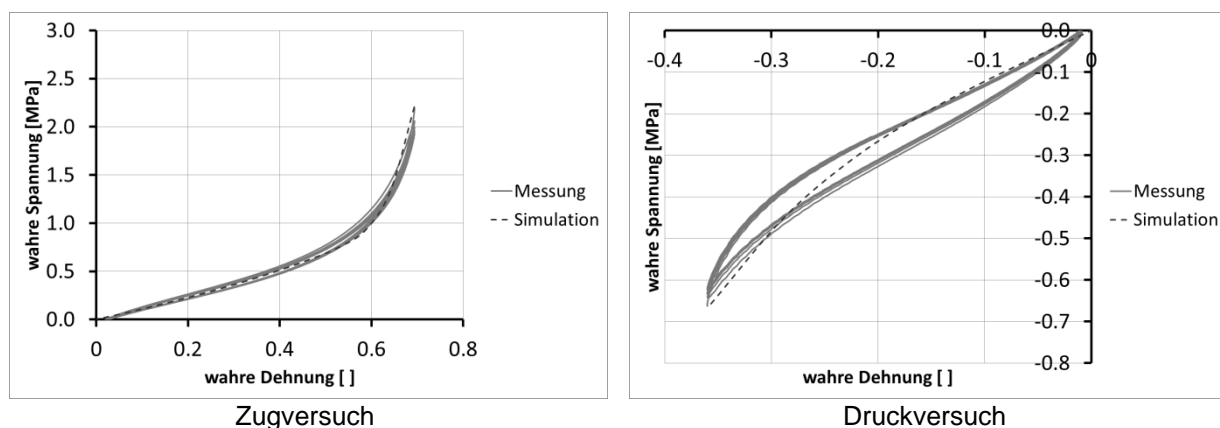


Abbildung 5.10 Vergleich zwischen Simulation und Experiment für die Kennwertermittlung des Mullins-Effekts ohne erste Belastung; Klebstoff GD 920

Wie auch beim Klebstoff KP 140 zeigen sich beim Klebstoff GD 920 gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Experiment. Die auf diese Weise ermittelten Kennwerte sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.4 Ermittelte Werkstoffkennwerte für den Mullins-Effekt; Klebstoff GD 920

Parameter	Wert	Einheit
r	2.01326	[]
m	0.152503	[MPa]
β	0.0226915	[MPa]

5.3 Beurteilung der Ergebnisse

Die Ermittlung der Kennwerte in Kapitel 5 zeigt für die meisten untersuchten Werkstoffmodelle eine gute Übereinstimmung zwischen den Messdaten und dem Experiment. Bei dieser Art der Kennwertermittlung werden allerdings die volumetrischen Verformungsanteile nicht berücksichtigt. Bei dieser Art der Identifikation ist es üblich, die Konstanten für den volumetrischen Verformungsanteil anhand der Poissonzahl separat zu bestimmen. Da im Modell beide Formänderungsenergieanteile (deviatorisch und volumetrisch) in Summe betrachtet wer-

den, wirken sie quasi wie eine Reihenschaltung, die man sich veranschaulicht mit der Reihenschaltung zweier Federn vorstellen kann. Geht man bei der Ermittlung der Kennwerte allerdings davon aus, dass eine der in Reihe geschalteten Federn nicht existiert, so erhält man in der Summe ein weniger steifes Ergebnis. Dies ist unerheblich, wenn eine der beiden Federn so steif ist, dass ihre Verformung im Vergleich mit der anderen keine Rolle spielt (dies ist für Poissonzahlen sehr nahe bei 0.5 der Fall). Für Werkstoffe wie bspw. der Klebstoff KP 140, der eine Poissonzahl von ca. 0.45 hat, ist dieser Effekt allerdings nicht vernachlässigbar. Um diesen Effekt zu umgehen wurden die Kennwerte nach Verfahren 2 unter Berücksichtigung der volumetrischen Anteile verbessert (vgl. Kapitel 5.1.2). Die verbesserten Modelle zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment, vor allem auch im Querdehnungsverhalten. Auch für die Kennwertermittlungen für das Mullins-Effekt-Modell konnten sowohl im Zug- als auch im Druckbereich sehr gute Ergebnisse erzielt werden (vgl. Kapitel 5.2).

Insgesamt konnten Kennwerte für ein vielversprechendes Werkstoffmodell ermittelt werden. Die ausgewählten Ansätze können das hyperelastische Verhalten sowie den Mullins-Effekt im betrachteten Temperatur- und Geschwindigkeitsbereich abbilden. Die zunächst bleibenden Verformungen (vgl. x-Achsenabschnitt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm) können vom Werkstoffmodell allerdings nicht abgebildet werden. Auch die Hysterese, die sich bei mehrfacher Belastung zwischen Be- und Entlastung zeigt, wird von den ausgewählten Modellen nicht erfasst. Beide Effekte sind allerdings für das Gesamtverhalten des Werkstoffes relativ klein verglichen mit den übrigen Effekten.

Ein weiterer Effekt, der nicht abgebildet werden kann, ist die Anisotropie, die sich nach der ersten Belastung des Werkstoffs einstellt. Durch diese erste Belastung richtet sich das Polymer Netzwerk aus und man erhält für diese Belastungsrichtung veränderte Eigenschaften. Dies wird in Abbildung 5.11 deutlich.

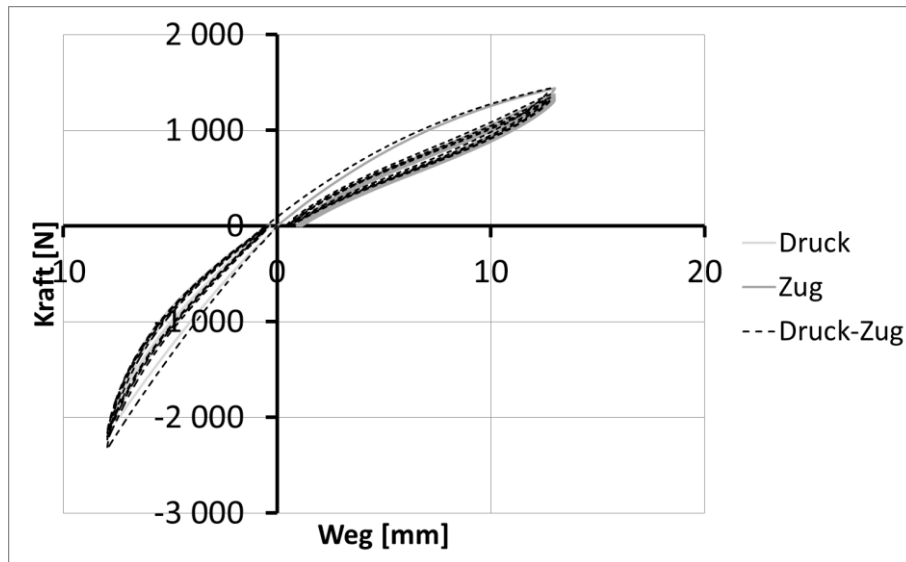


Abbildung 5.11 Richtungsabhängigkeit des Mullins-Effekts anhand des Kraft-Weg-Verlaufs einer Kopfzugprobe

Abbildung 5.11 zeigt das Spannungs-Dehnungs-Verhalten einer Kopfzugprobe, die zunächst fünf Mal im Druckbereich belastet wurde und anschließend fünf Mal im Zugbereich verglichen mit dem Verhalten je einer Probe, die nur in eine Richtung belastet wurde. Man erkennt, dass das Verhalten im Zugbereich der beiden Proben (mit und ohne vorherige Druckbelastung) identisch ist. Der Mullins-Effekt, der aufgrund einer Druckbelastung auftritt, hat also keinen Einfluss auf das Verformungsverhalten im Zugbereich. Im Werkstoffmodell für den Mullins-Effekt ist dies nicht der Fall. Das Spannungs-Dehnungsverhalten ist im Modell nur Abhängig vom Allzeitmaximum der Belastung und nicht von der Belastungsrichtung (vgl. 2.1.2). Für aufeinanderfolgende Belastungen in unterschiedlichen Richtungen ist das Modell also nicht geeignet.

6 Überprüfung der Materialmodelle an Klebfugen mit multiaxialen Spannungszuständen

6.1 Kopfzugversuche

Die im Folgenden dargestellten Messungen an Kopfzugversuchen dienen der Messung des mechanischen Verhaltens der beiden untersuchten Klebstoffe unter komplexen Spannungs- und Verformungszuständen. Außerdem werden die Werkstoffmodelle, die in Kapitel 5 ermittelt wurden, anhand dieser Versuche validiert (vgl. Kapitel 6.2). Untersucht wurden im Rahmen dieser Messreihe Kopfzugproben mit unterschiedlichen Geometrieverhältnissen (1:1, 2:1 und 16.7:1). Die Probengeometrien mit den beiden großen Klebschichtdicken bieten den Vorteil von unterschiedlichen multiaxialen Verformungszuständen, während die Proben mit 3 mm Klebschicht die in der Praxis übliche Dicke widerspiegeln. Alle Probengeometrien werden sowohl auf Druck als auch auf Zug geprüft. Die Prüfgeschwindigkeit wird so gewählt, dass sich eine globale Ingenieurdehnrate (ermittelt aus dem Abstand der beiden Substratoberflächen) von 10 %/min einstellt. Die lokalen Dehnraten weichen von dieser globalen Dehnrate aufgrund der unterschiedlichen lokalen Verformungen ab (vgl. auch Kapitel 3.3.6). Zusätzlich zum Kraft-Verformungsverhalten wird an den Kopfzugproben mit Geometrieverhältnis 1:1 und 2:1 auch die lokale Verschiebung von Punkten auf der Oberfläche erfasst (vgl. Kapitel 3.3.6), um diese später mit den Simulationsergebnissen vergleichen zu können. Die Prüfmatrix für die Kopfzugversuche ist in Tabelle 6.1 dargestellt. Die Dehnungsmaxima für diese Versuche wurden in Vorversuchen so bestimmt, dass im Klebstoff keine Schädigungen zu erkennen sind, da diese von den ermittelten Werkstoffgesetzen nicht abgebildet werden können (vgl. Kapitel 5).

Tabelle 6.1 Versuchsmatrix für Kopfzugversuche mit unterschiedlichen Geometrieverhältnissen und Belastungsarten

Klebstoff	Anzahl Proben []	Verhältnis D/d	Dehnraten [%/min]	Zyklen []	Dehnungsmaximum []
KP 140	5	1:1	10.0	5	$\varepsilon_t = 100 \%$
KP 140	5	2:1	10.0	5	$\varepsilon_t = 25 \%$
KP 140	5	1:1	10.0	5	$\varepsilon_t = -25 \%$
KP 140	3	16.7:1	10.0	1	$\varepsilon_t = 30 \%$
KP 140	3	16.7:1	10.0	1	$\varepsilon_t = -30 \%$
GD 920	5	1:1	10.0	5	$\varepsilon_t = 70 \%$

Klebstoff	Anzahl Proben []	Verhältnis D/d	Dehnraten [%/min]	Zyklen []	Dehnungsmaximum []
GD 920	5	2:1	10.0	5	$\varepsilon_t = 25 \%$
GD 920	5	1:1	10.0	5	$\varepsilon_t = -25 \%$
GD 920	3	16.7:1	10.0	1	$\varepsilon_t = 30 \%$
GD 920	3	16.7:1	10.0	1	$\varepsilon_t = -30 \%$

6.1.1 Kömmerling Körapur 140

Abbildung 6.1 zeigt das Kraft-Weg-Diagramm der Kopfzugversuche für den Klebstoff KP 140 mit einem Durchmesser/Klebschichtdicke-Verhältnis von 1:1 und 1:2.

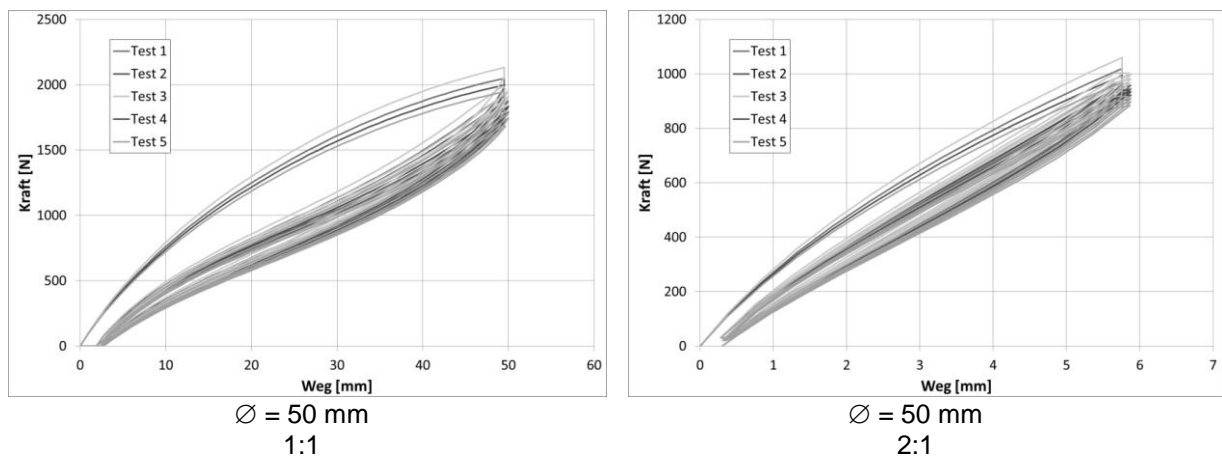


Abbildung 6.1 Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff KP 140; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 und 2:1 [mm/mm]; Zugbelastung; Temperatur T = 23 °C; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

In Abbildung 6.2 ist das Kraft-Weg-Diagramm der Kopfzugversuche mit einem Durchmesser/Klebschichtdicke-Verhältnis von 1:1 unter Druckbelastung und in Abbildung 6.3 sind die Ergebnisse der Kopfzugversuche mit kleiner Klebschichtdicke dargestellt. Da bei den Versuchen mit kleiner Klebschichtdicke ein stärkeres Messrauschen auftritt, sind diese Ergebnisse zur besseren Übersicht als Mittelwertkurven mit Fehlerbalken abgebildet.

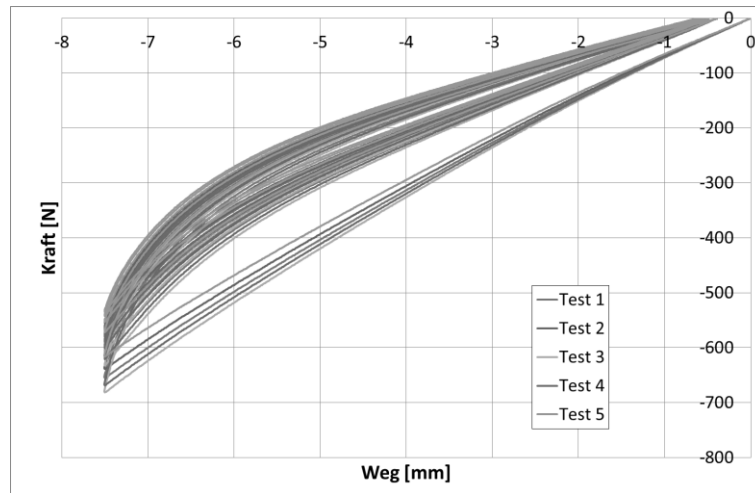


Abbildung 6.2 Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff KP 140; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Druckbelastung; Temperatur $T = 23\text{ °C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

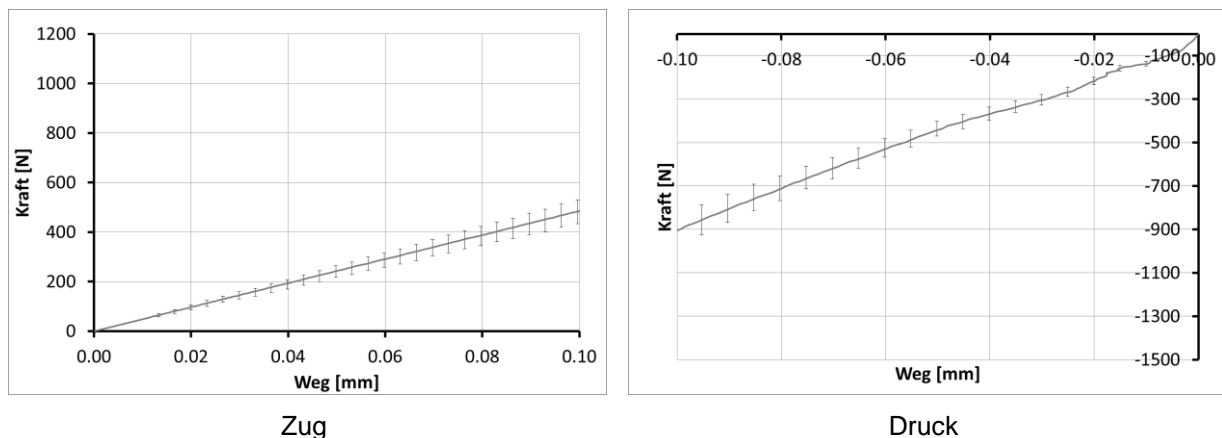


Abbildung 6.3 Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff KP 140; Klebschichtdicke 3 mm; Temperatur $T = 23\text{ °C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

Die Kopfzugversuche zeigen einen ähnlichen charakteristischen Verlauf wie die Zugversuche (vgl. Kapitel 3.3.2). Der Mullins-Effekt ist bei kleinerer Klebschichtdicke, aufgrund des höheren hydrostatischen Verformungsanteils, weniger stark ausgeprägt. Beide Versuche zeigen nach Entlastung eine geringe zunächst bleibende Verformung.

Zusätzlich zu den Kraft-Weg-Verläufen wurden für die Kopfzugproben mit großer Klebschichtdicke (1:1 und 2:1) die Verschiebungen auf der Oberfläche mittels Videoextensometrie gemessen. Dabei wurde zum einen die x-Verschiebung in axialer Probenrichtung für 17 Punkte verfolgt und zum anderen die Veränderung des Probenquerschnittes (z-Koordinate) am jeweiligen Messpunkt, sodass aufgrund der Rotationssymmetrie eine dreidimensionale Positionsinformation vorhanden ist. Die gemessenen Oberflächenverschiebungen sind für

einen repräsentativen Vergleichsversuch in Abbildung 6.4 für die x-Koordinate und Abbildung 6.5 für die z-Koordinate dargestellt.

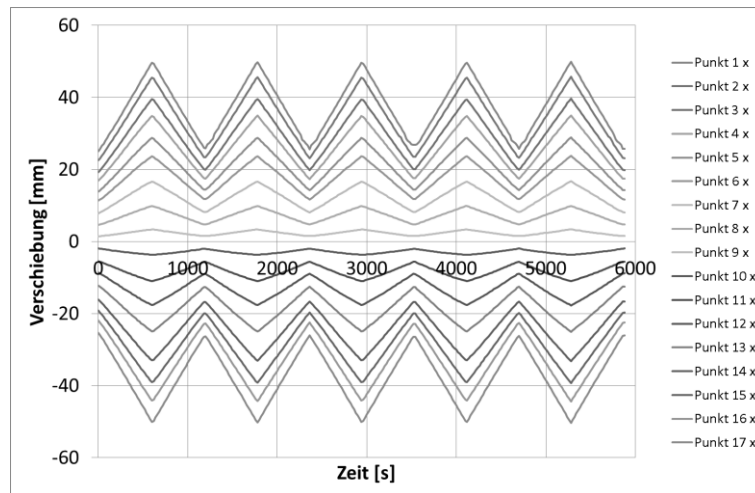


Abbildung 6.4 x-Verschiebungen auf der Oberfläche der Kopfzugprobe; Klebstoff KP 140; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Temperatur T = 23 °C; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

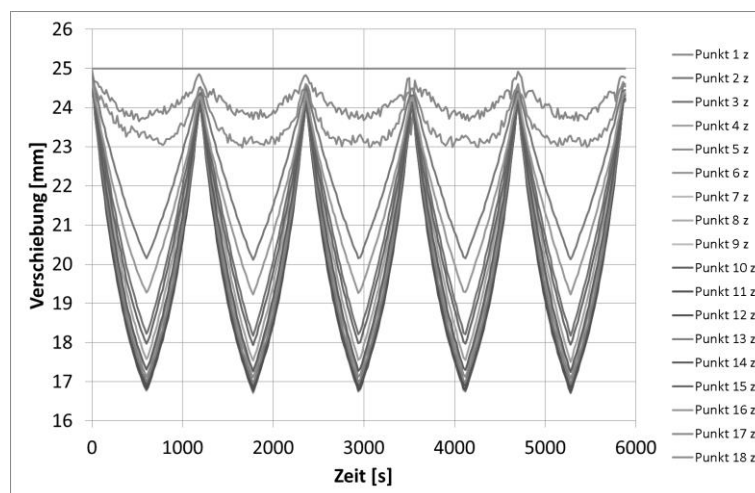


Abbildung 6.5 z-Verschiebungen auf der Oberfläche der Kopfzugprobe; Klebstoff KP 140; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Temperatur T = 23 °C; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

6.1.2 Kömmerling GD 920

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Kopfzugversuche für den Klebstoff GD 920 dargestellt. Abbildung 6.6 zeigt das Kraft-Weg-Diagramm der Kopfzugversuche für den Klebstoff GD 920 mit einem Durchmesser/Klebschichtdicke-Verhältnis von 1:1.

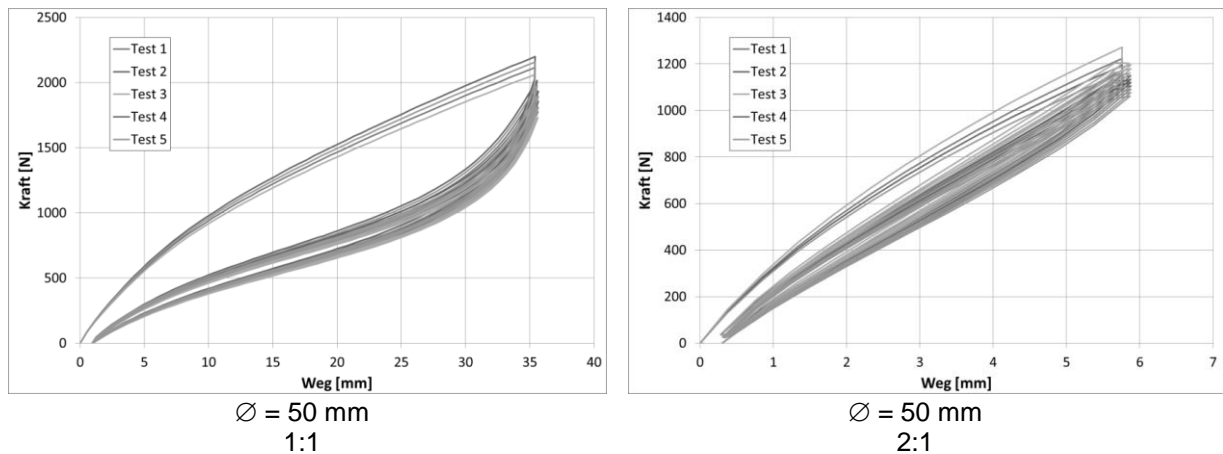


Abbildung 6.6 Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff GD 920; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 und 1:2 [mm/mm]; Zugbelastung; Temperatur $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

In Abbildung 6.7 ist das Kraft-Weg-Diagramm der Kopfzugversuche mit einem Durchmesser/Klebschichtdicke-Verhältnis von 1:1 unter Druckbelastung und in Abbildung 6.8 sind die Ergebnisse der Kopfzugversuche mit kleiner Klebschichtdicke dargestellt. Da bei den Versuchen mit kleiner Klebschichtdicke ein stärkeres Messrauschen auftritt, sind diese Ergebnisse als Mittelwertkurven mit Fehlerbalken abgebildet.

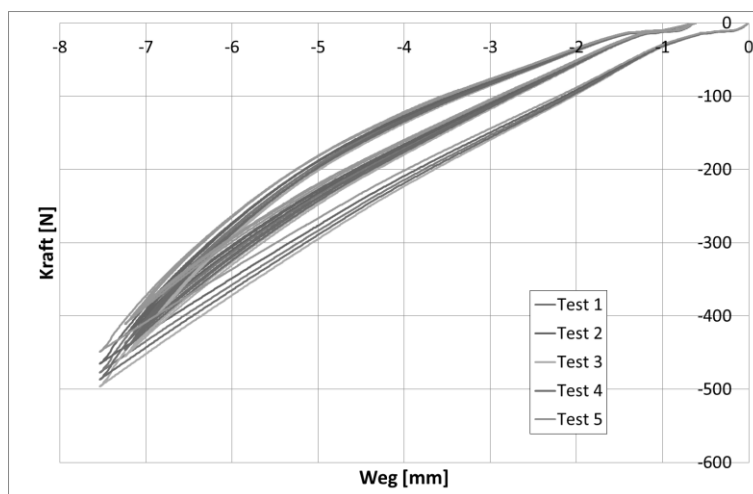


Abbildung 6.7 Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff GD 920; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Druckbelastung; Temperatur $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

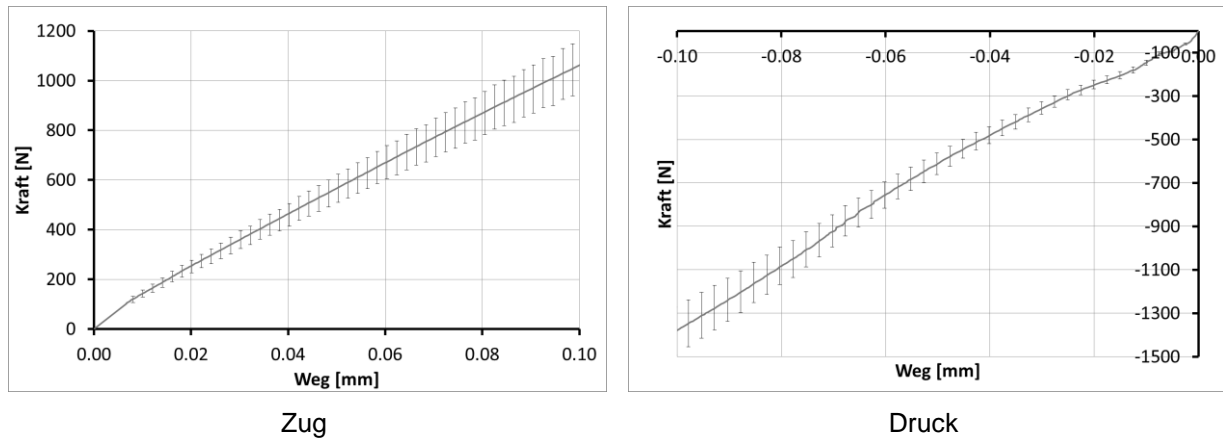


Abbildung 6.8 Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff GD 920; Klebschichtdicke 3 mm; Temperatur T = 23 °C; Dehnrage der Ingenieurdehnung 10 %/min

Wie der Klebstoff KP 140 zeigt auch der Klebstoff GD 920 einen ähnlichen charakteristischen Verlauf des Kraft-Weg-Verhaltens bzw. Spannungs-Dehnungs-Verhaltens wie die Zugprobe (vgl. Kapitel 3.3.2). Auch hier ist der Mullins-Effekt bei kleiner Klebschichtdicke und damit größerem hydrostatischen Verformungsanteil weniger stark ausgeprägt.

Die Kopfzugversuche zeigen einen ähnlichen charakteristischen Verlauf wie die Zugversuche. Der Mullins-Effekt ist bei kleinerer Klebschichtdicke, aufgrund des höheren hydrostatischen Verformungsanteils, weniger stark ausgeprägt. Beide Versuche zeigen nach Entlastung eine geringe zunächst bleibende Verformung.

Auch für den Klebstoff GD 920 wurden die lokalen Verschiebungen auf der Oberfläche bestimmt (vgl. auch Kapitel 6.1.1) Die Ergebnisse sind für einen repräsentativen Vergleichsversuch in Abbildung 6.9 für die x-Koordinate und Abbildung 6.10 für die z-Koordinate dargestellt.

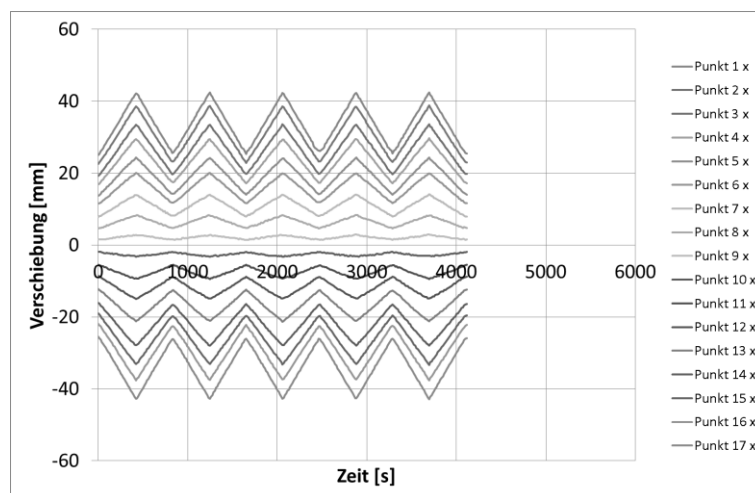


Abbildung 6.9 x-Verschiebungen auf der Oberfläche der Kopfzugprobe; Klebstoff GD 920; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Temperatur T = 23 °C

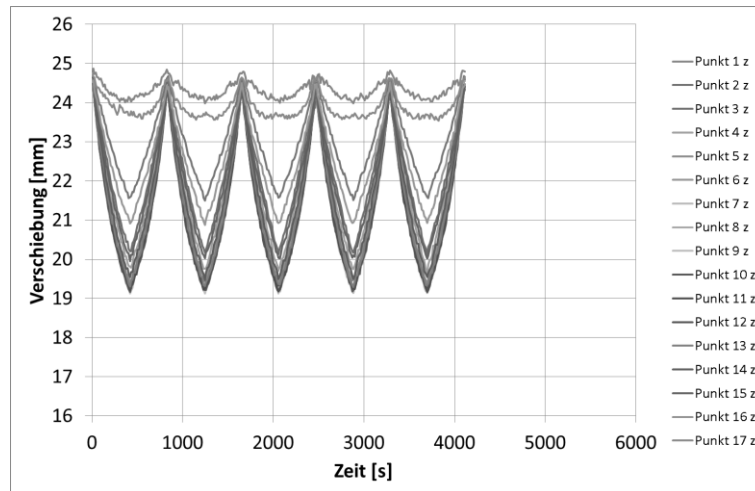


Abbildung 6.10 y-Verschiebungen auf der Oberfläche der Kopfzugprobe; Klebstoff GD 920; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Temperatur $T = 23\text{ °C}$

6.2 Validierungsrechnung und Vergleich mit dem Experiment

Anhand der in Kapitel 6.1 gezeigten Versuchsergebnisse werden die Werkstoffgesetze aus Kapitel 5.1.2 überprüft. Verglichen werden jeweils die Mittelwertkurven aus den Versuchen in Kapitel 6.1 mit den entsprechenden Simulationsergebnissen. Für die Simulation wurden jeweils die Mittelwerte der vor dem Versuch ermittelten Ist-Maße der Proben verwendet, so dass Abweichungen, die sich aus der Fertigungstoleranz der Proben ergeben, minimiert werden. Die Versuchsstreuung ist im jeweiligen Diagramm durch Fehlerbalken dargestellt.

Für die Berechnung wurde ein Volumenmodell der Kopfzugprobe in einem FE-Netz abgebildet. Die Anhaftung des Klebstoffes am Substrat und deren Verschiebung über den Versuch würde als Randbedingung an den entsprechenden Elementen vorgegeben. Eine Simulation des Stahlsubstrates ist nicht notwendig, da der Substratwerkstoff um sechs Größenordnungen steifer ist als der Klebstoff und hier keine relevanten Verformungen auftreten. Eine Adhesive Zone im Klebstoff mit anderen mechanischen Eigenschaften wurde nicht abgebildet, da diese verglichen mit den Gesamtausmaßen der Probe sehr klein ist (max. ca. $100\text{ }\mu\text{m}$, vgl. Kapitel 2.1.3) und durch die Wahl der Vorbehandlung sichergestellt wurde, dass kein adhesives Versagen auftritt. Um die Zahl der zu berechnenden Elemente zu reduzieren wurde außerdem nur ein Achtel der Probe berechnet und an den Symmetrieflächen entsprechende Randbedingungen verwendet. Das verwendete Modell ist in Abbildung 6.11 dargestellt.

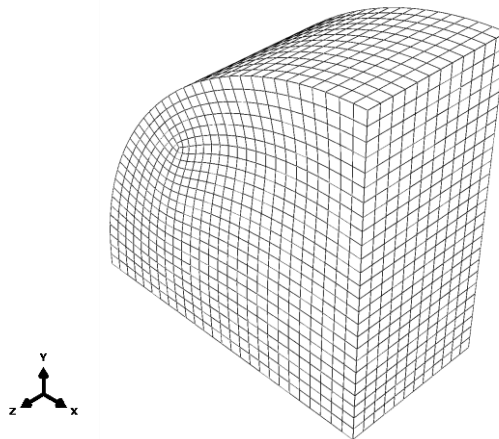


Abbildung 6.11 FE-Modell zur Berechnung der Kopfzugprobe; mittlere Elementkantenlänge 1 mm; Dargestelltes Geometrieverhältnis: 2:1

Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird die vollständige Probe (durch Spiegelung) im 3/4-Schnitt dargestellt.

6.2.1 Validierung des Werkstoffmodells für Kömmerling Körapur 140

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der Validierungsrechnung anhand der Kopfzugversuche für den Klebstoff KP 140 eingegangen. In Abbildung 6.12 sind die Ergebnisse der Kopfzugversuche mit zwei unterschiedlichen Geometrieverhältnissen (vgl. Kapitel 3.3.6) verglichen mit dem Simulationsergebnis dargestellt.

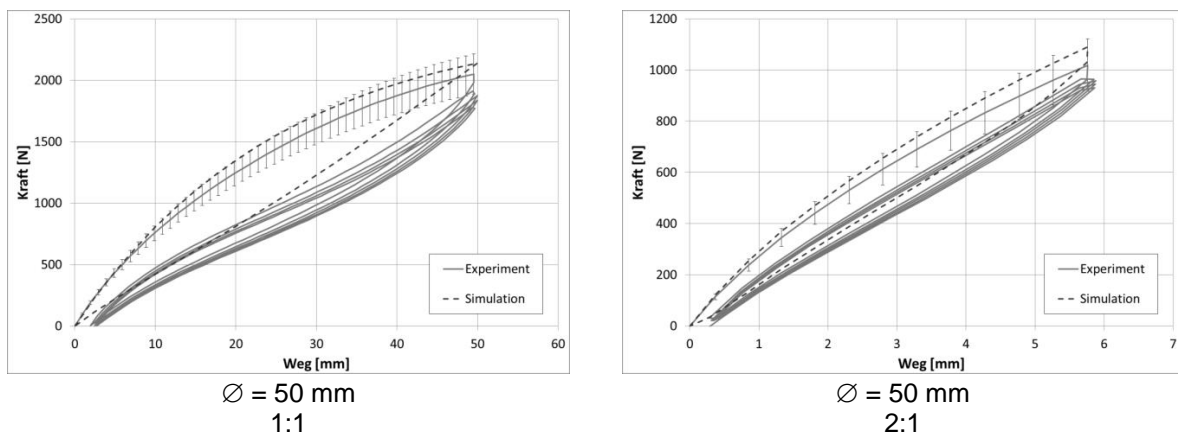


Abbildung 6.12 Kopfzugprobe KP140; Klebschichtdicke: 50 mm und 25 mm; Zugbeanspruchung; Dehnrate der Ingenieurdehnung 10 %/min

Sowohl für das Durchmesser/Klebschichtdicken-Verhältnis 1:1 als auch für das Verhältnis 2:1 liefert die Simulation eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Versuch. Die Abweichungen sind im Rahmen der Versuchsstreuung. Tendenziell liefert die Simulation ein leicht steiferes Ergebnis als der Versuch.

Zusätzlich zum Kraft-Weg-Vergleich wurde für die Kopfzugversuche mit Durchmesser/Klebschichtdicken-Verhältnis 1:1 ein Vergleich der Oberflächenverschiebung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung wurden nur die Verschiebungen auf der oberen Probenhälfte betrachtet.

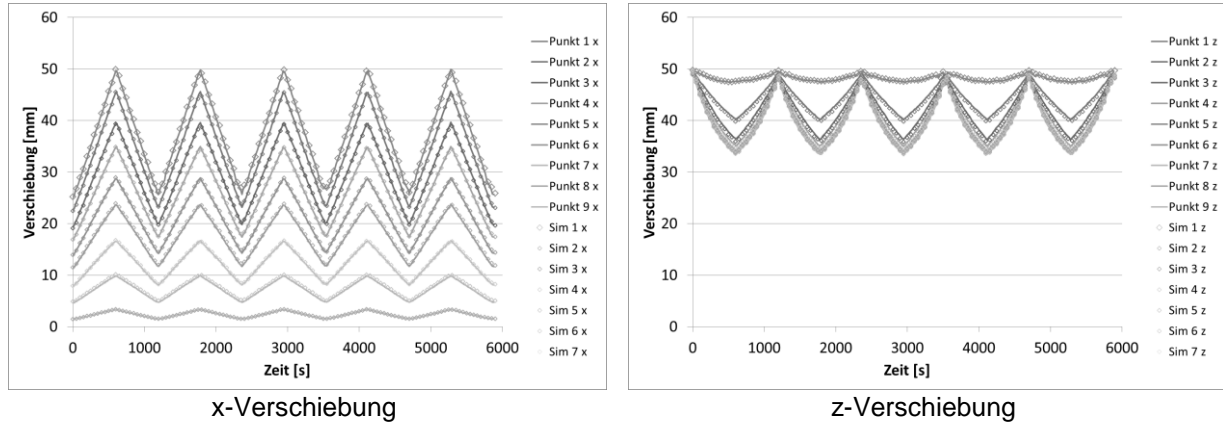


Abbildung 6.13 Kopfzugprobe KP140; Verschiebungen auf der Oberfläche; Simulation und Versuch; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

Die Oberflächenverschiebungen der Kopfzugprobe zeigen nahezu keine Abweichungen zwischen Simulation und Experiment. Die Abweichungen sind noch deutlich kleiner als die Abweichungen im Kraft-Weg-Verlauf.

Der Vergleich für die Kopfzugversuche, die auf Druck belastet wurden, sind in Abbildung 6.14 dargestellt.

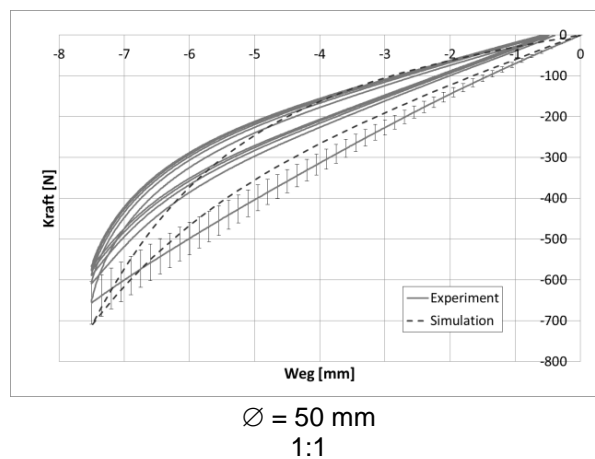


Abbildung 6.14 Kopfzugprobe KP140; Klebschichtdicke: 50 mm; Druckbeanspruchung; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

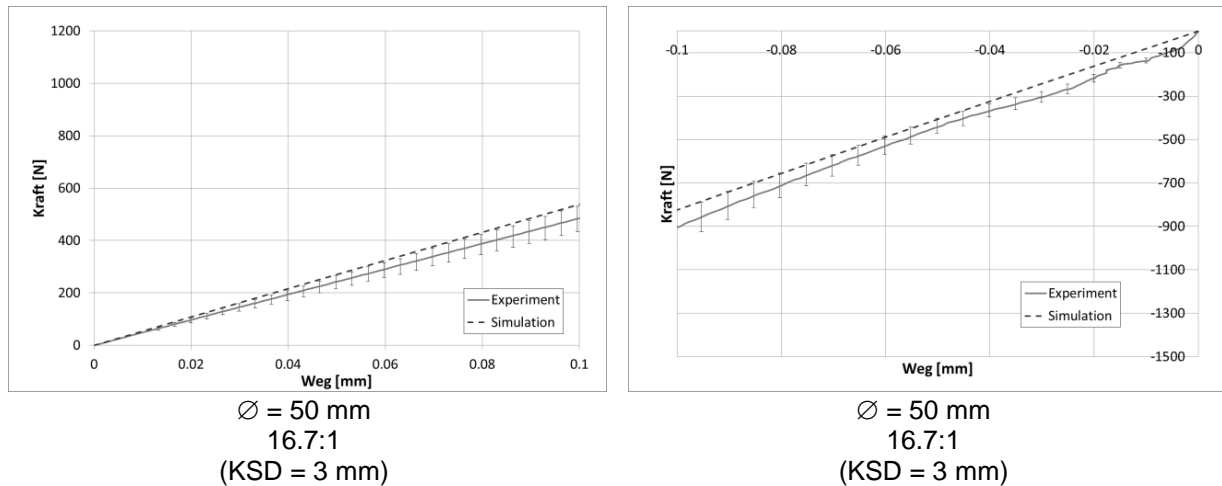


Abbildung 6.15 Kopfzugprobe KP140; Klebschichtdicke: 3 mm; Zugbeanspruchung (links) und Druckbeanspruchung (rechts); Simulation

Auch für die Druckbelastung wurden die örtlichen Verschiebungen auf der Probenoberfläche mit der Simulation verglichen. Der Vergleich zeigt hier eine ebenso gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment wie auch bei den Versuchen mit Zugbelastung (vgl. Abbildung 6.13). Die Ergebnisse sind in Anhang A.1 dargestellt.

Die Kopfzugversuche unter Druckbelastung zeigen, wie auch die Kopfzugversuche unter Zugbelastung (vgl. Abbildung 6.12), Abweichungen zwischen Simulation und Versuch in der Größenordnung der Versuchsstreuung. Der Klebstoff KP 140 zeigt bei den Kopfzugversuchen auf Druck allerdings kleine Abweichungen im Kurvenverlauf im Gegensatz zum Klebstoff GD 920 (vgl. Abbildung 6.18).

6.2.2 Validierung des Werkstoffmodells für Kömmerling GD 920

Abbildung 6.16 zeigt den Vergleich des Kraft-Weg-Verlaufs zwischen Simulation und Versuch für den Kopfzugversuch (vgl. AS 2) mit zwei unterschiedlichen Durchmesser/Klebschichtdicke-Verhältnissen. Die Streuung des Versuchs ist in Abbildung 6.16 als Fehlerbalken dargestellt.

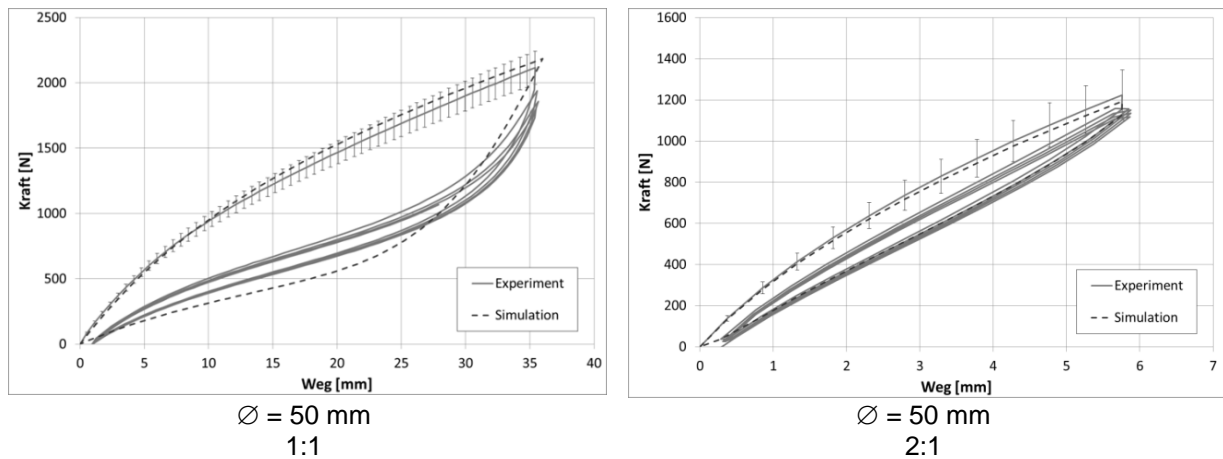


Abbildung 6.16 Kopfzugprobe GD920; Klebschichtdicke: 50 mm und 25 mm; Zugbeanspruchung; Dehnrade der Ingenieurdehnung 10 %/min

Für beide untersuchte Geometrien zeigt die Simulation eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Versuch. Tendenziell ist das Ergebnis der Simulation etwas steifer als der Versuch, die Abweichungen liegen aber bei beiden Geometrien im Rahmen der Versuchsstreuung.

Zusätzlich zum Kraft-Weg-Verlauf wurden an der Kopfzugprobe die Verschiebungen auf der Oberfläche der Probe zwischen Simulation und Versuch verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.17 dargestellt.

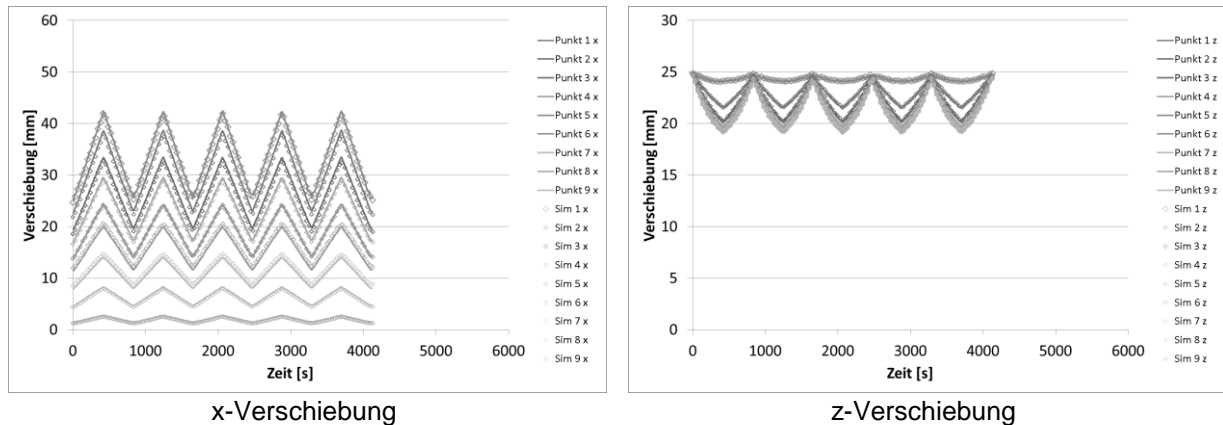
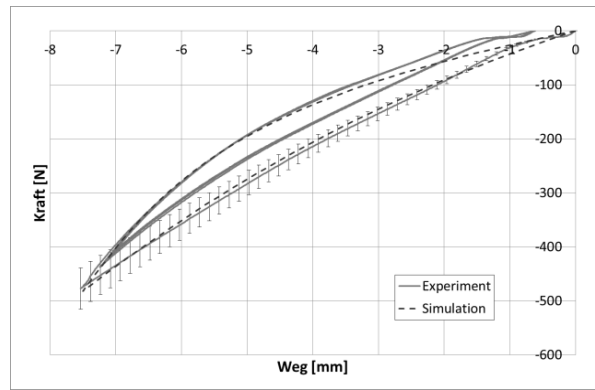


Abbildung 6.17 Kopfzugprobe GD920; Verschiebungen auf der Oberfläche; Simulation und Versuch; Dehnrade der Ingenieurdehnung 10 %/min

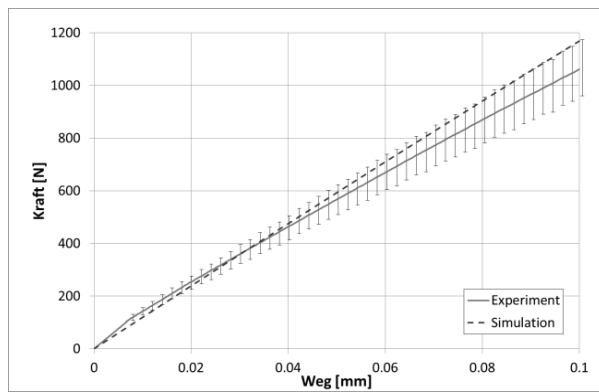
Die Oberflächenverschiebungen der Kopfzugprobe zeigen nahezu keine Abweichungen zwischen Simulation und Experiment. Die Abweichungen sind noch deutlich kleiner als die Abweichungen im Kraft-Weg-Verlauf.

Die Ergebnisse der Kopfzugversuche, die auf Druck belastet wurden, sind in Abbildung 6.18 dargestellt.

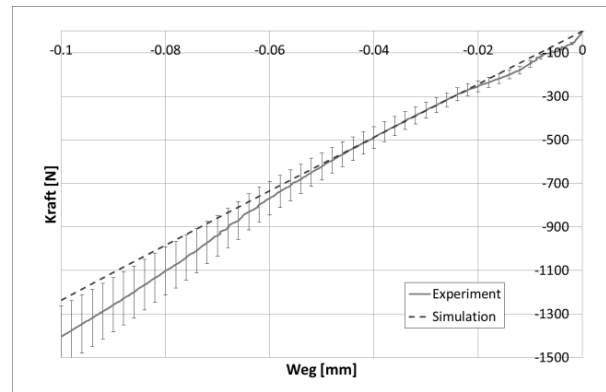


∅ = 50 mm
1:1

Abbildung 6.18 Kopfzugprobe GD920; Klebschichtdicke: 50 mm; Druckbeanspruchung; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min



∅ = 50 mm
16.7:1
(KSD = 3 mm)



∅ = 50 mm
16.7:1
(KSD = 3 mm)

Abbildung 6.19 Kopfzugprobe GD920; Klebschichtdicke: 3 mm; Zugbeanspruchung (links) und Druckbeanspruchung (rechts); Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min

Auch für die Druckbelastung wurden die örtlichen Verschiebungen auf der Probenoberfläche mit der Simulation verglichen. Der Vergleich zeigt hier eine ebenso gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment wie auch bei den Versuchen mit Zugbelastung (vgl. Abbildung 6.17). Die Ergebnisse sind in Anhang A.1 dargestellt.

Sowohl die Kopfzugversuche unter Druckbelastung als auch die Versuche mit kleiner Klebschichtdicke zeigen sehr gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Experiment. Die Abweichungen bewegen sich größtenteils im Rahmen der Versuchsstreuung.

6.3 Betrachtung des Verformungszustandes der Kopfzugprobe

Im Folgenden wird anhand der Simulationsergebnisse mit den Werkstoffmodellen aus Kapitel 5 der Verformungszustand der Kopfzugproben näher betrachtet. Als Maß für die Verformung werden die deviatorischen Anteile der ersten beiden Invarianten des Verstreckgrad-

tensors I_1 und I_2 sowie das Volumenverhältnis J verwendet (vgl. Kapitel 2.2), da diese Größen die Grundlage für die Definition der verwendeten Werkstoffgesetze sind.

6.3.1 Kömmerling Körapur 140

In Abbildung 6.20 und Abbildung 6.21 sind die ersten beiden Invarianten des Verstreckgradtensors sowie das Volumenverhältnis für eine Kopfzugprobe (Geometrieverhältnis 2:1) die bis zu einer globalen Dehnung von 25 % auf Zug bzw. -25 % auf Druck belastet wurde, dargestellt.

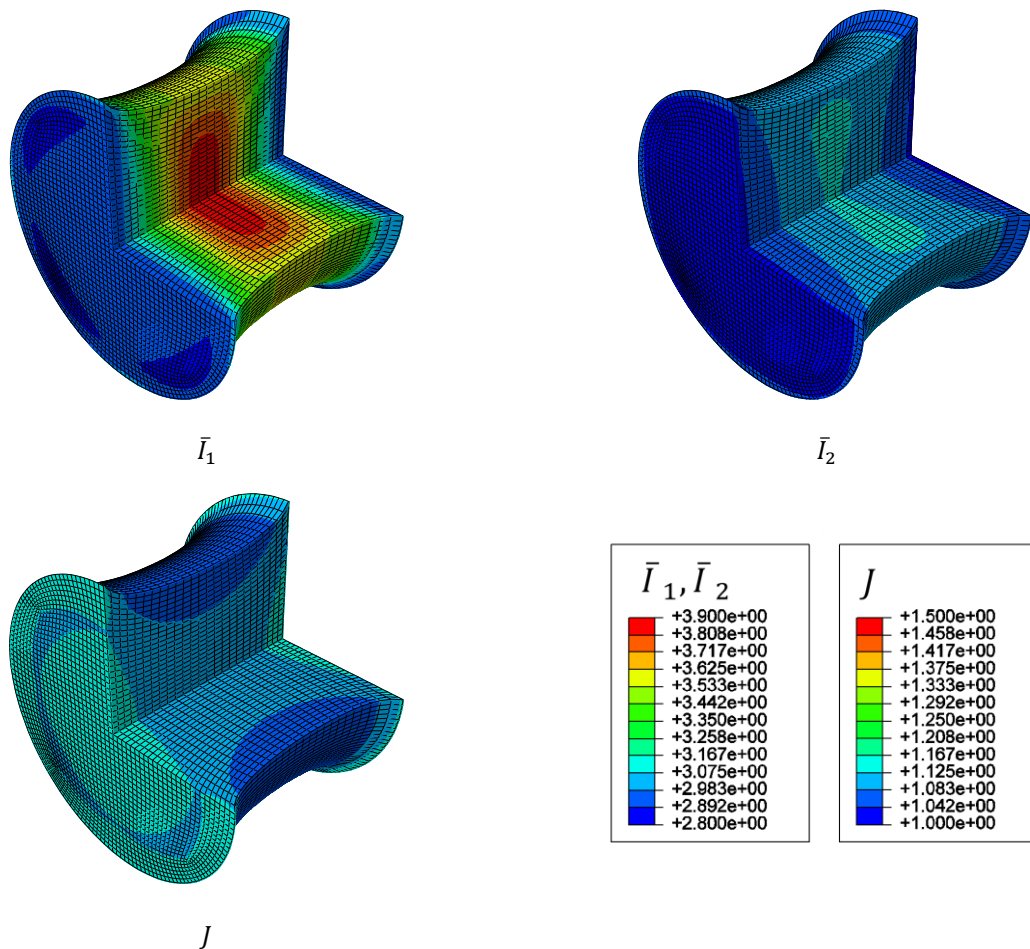


Abbildung 6.20 Invarianten des Verstreckgradtensors und Volumenverhältnis für die Kopfzugprobe mit Geometrieverhältnis 2:1; Werkstoffmodell für den Klebstoff KP 140; 50 % globale Dehnung

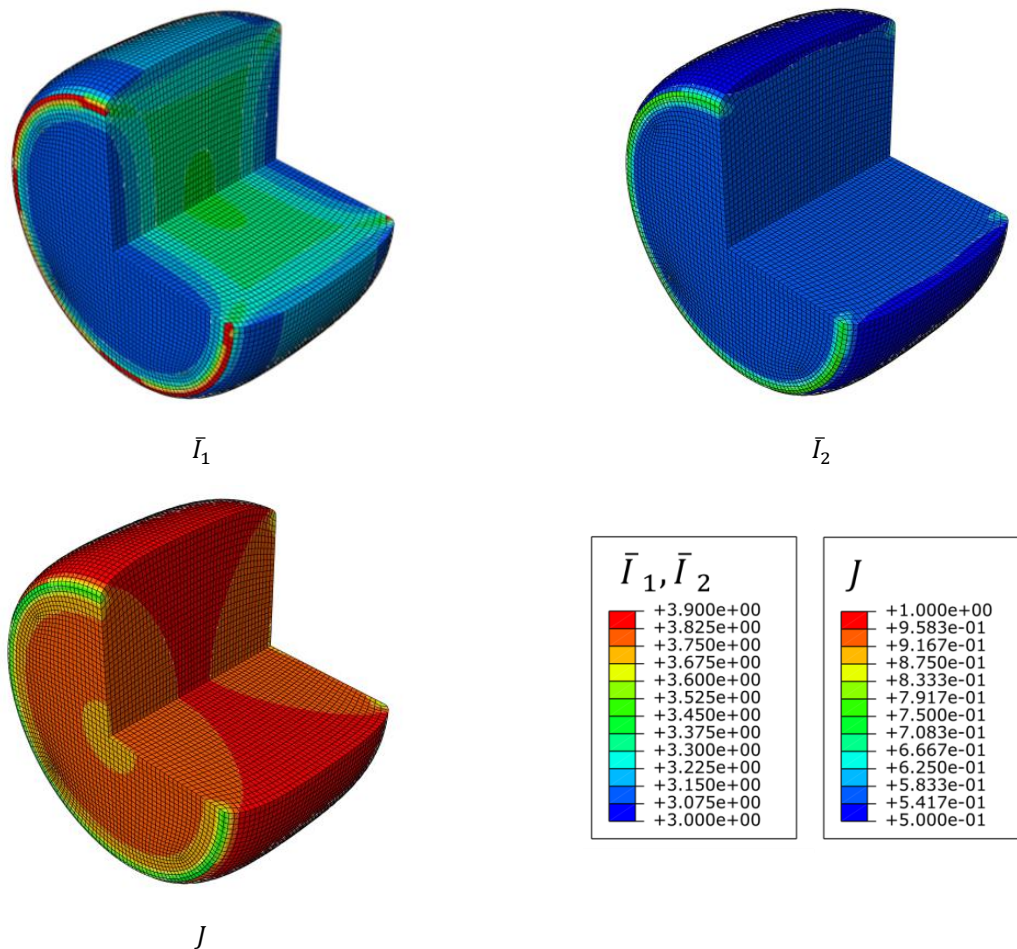


Abbildung 6.21 Invarianten des Verstreckgradtensors und Volumenverhältnis für die Kopfzugprobe mit Geometrieverhältnis 2:1; Werkstoffmodell für den Klebstoff KP 140; -25 % globale Dehnung

Das Maximum der deviatorischen Verformung liegt bei Zugbelastung in der Mitte der Probe. Beide Invarianten zeigen hier das globale Maximum. Bei Druckbelastung liegt das globale Maximum der deviatorischen Verformung im Eckbereich. Der volumetrische Verformungsanteil ist bei beiden Belastungsarten im querkontraktionsbehinderten Bereich am größten und fällt kegelförmig zu den Randbereichen der Probe hin ab.

6.3.2 Kömmerling GD 920

In den folgenden Abbildungen ist analog zu den vorangegangenen Darstellungen das Berechnungsergebnis mit dem Werkstoffmodell für den Klebstoff GD 920 dargestellt. Abbildung 6.22 zeigt die Kopfzugprobe unter Zugbelastung und Abbildung 6.23 zeigt die Kopfzugprobe unter Druckbelastung.

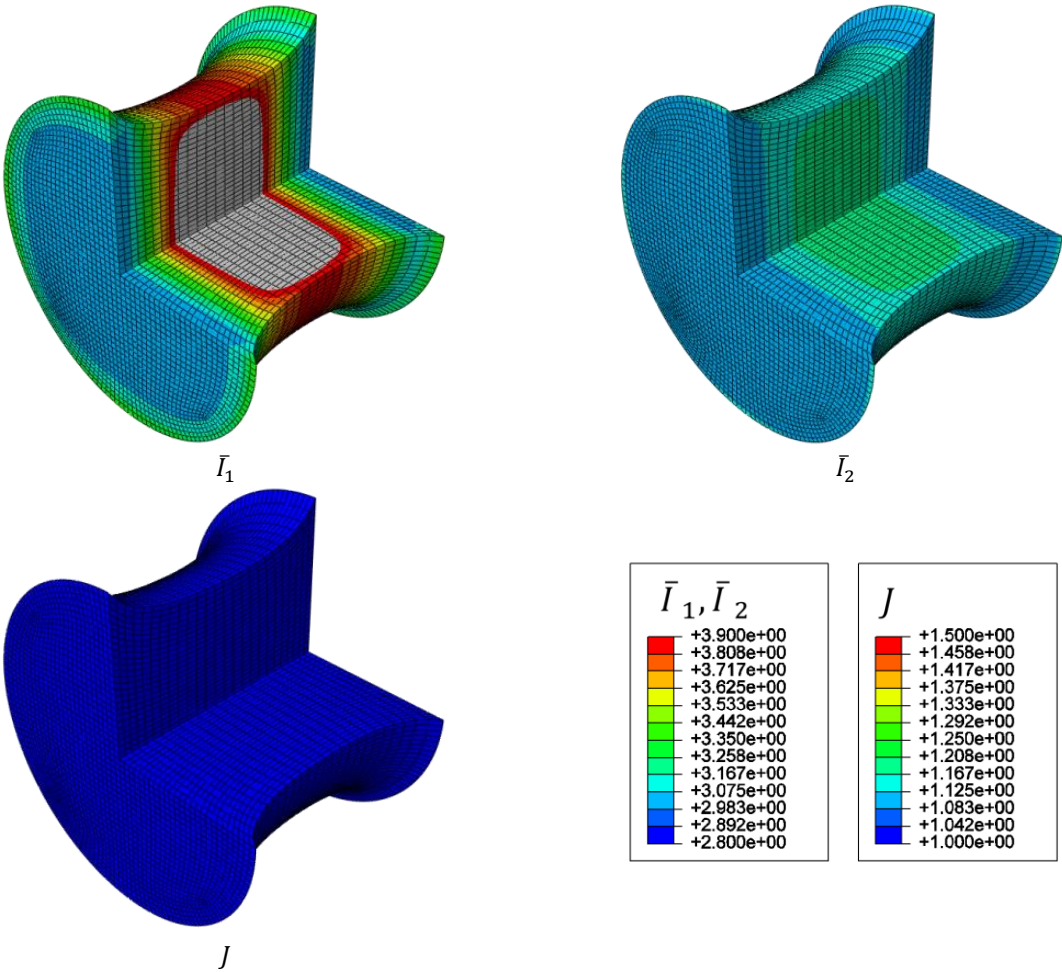


Abbildung 6.22 Invarianten des Verstreckgradtensors und Volumenverhältnis für die Kopfzugprobe mit Geometrieverhältnis 2:1; Werkstoffmodell für den Klebstoff GD 920; 50 % globale Dehnung

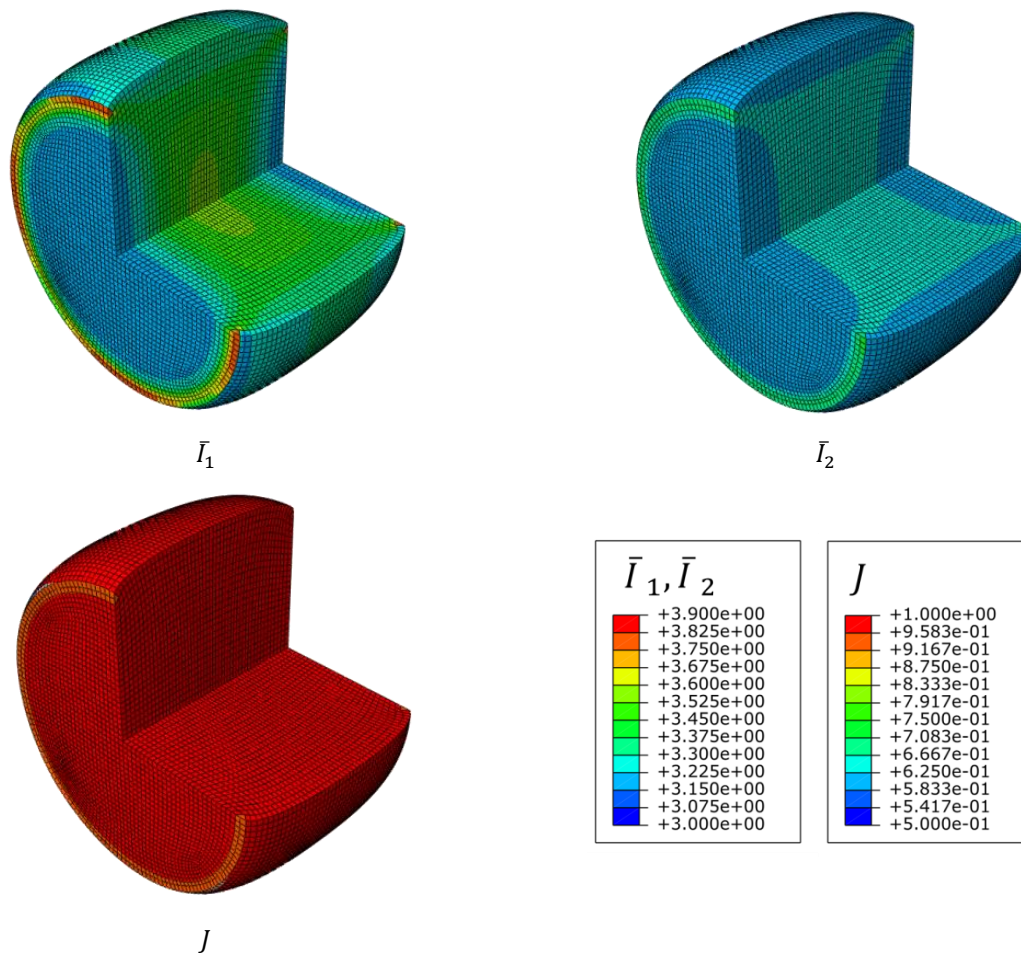


Abbildung 6.23 Invarianten des Verstreckgradensors und Volumenverhältnis für Kopfzugprobe mit Geometrieverhältnis 2:1; Werkstoffmodell für den Klebstoff GD 920; -25 % globale Dehnung

Auch die Berechnungen mit dem Werkstoffmodell für den Klebstoff GD 920 zeigen das Verformungsmaximum bei Zugbelastung in der Mitte und bei Druckbelastung im Eckbereich der Probe. Allerdings sind hier die deviatorischen Anteile vom Betrag her deutlich größer als das Ergebnis für den Klebstoff KP 140 zeigt. In beiden Belastungsrichtungen ist der volumetrische Verformungsanteil deutlich kleiner als beim Klebstoff KP 140 und über das Volumen nahezu konstant. In diesen Ergebnissen zeigen sich deutlich die unterschiedlichen Querkontraktionseigenschaften der beiden Klebstoffe.

6.4 Beurteilung und Vergleich mit konventioneller Berechnung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen mit Green'schen Werkstoffgesetzen aus Kapitel 5 mit konventionellen Berechnungsmethoden verglichen und beurteilt. Gerade bei komplexen Modellen, die große Strukturen abbilden, werden auch heute noch zur Reduzierung des Rechenaufwandes linear-elastische Werkstoffgesetze für elastische Klebverbindungen eingesetzt (vgl. z. B. [13–16]). Verwendet wurden für die Vergleichsrechnungen die

aus den Zugversuchen ermittelten Werkstoffkennwerte (vgl. Kapitle 4). Tabelle 6.2 zeigt eine Übersicht der verwendeten Kennwerte für die linear-elastischen Berechnungen. Die Vergleichsrechnungen wurden an Kopfzugprüfkörpern mit einem Geometrieverhältnis von 1:1 durchgeführt.

Tabelle 6.2 **Verwendete linear elastische Werkstoffgesetze für die Vergleichsrechnung**

Klebstoff	E-Modul [MPa]	Poissonzahl []
KP 140	3.35	0.46
GD 920	2.62	0.475

Für das linear-elastische Werkstoffmodell des Klebstoffs GD 920 musste die Poissonzahl niedriger gewählt werden als sie messtechnisch ermittelt wurde, da linear elastische Werkstoffgesetze mit hoher Poissonzahl in der FE-Berechnung eine schlechte Konvergenz zeigen [28, 94] und somit nicht zu einem Ergebnis führen. Abbildung 6.24 zeigt den Vergleich der linear-elastischen Berechnung mit den Ergebnissen der Berechnung mit Green'schen Materialgesetzen für beide Klebstoffe. Die Fehlerbalken in Abbildung 6.24 stellen zum Vergleich die Versuchsstreuung dar.

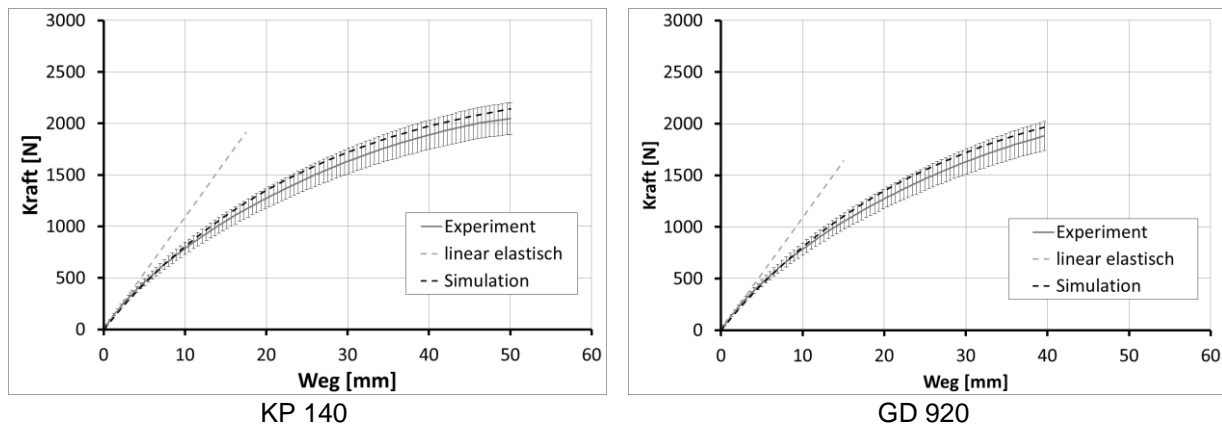


Abbildung 6.24 **Vergleich zwischen linear-elastischer Berechnung und Berechnung mit Green'schen Werkstoffgesetzen**

In Abbildung 6.24 ist deutlich zu erkennen, dass die linear-elastische Modellierung der Werkstoffeigenschaften für beide Klebstoffe nur für sehr kleine Verformungen ein zufriedenstellendes Ergebnis liefert. Im Bereich von Dehnungen > 10 % (5 mm Weg) zeigen sich deutliche Abweichungen. Des Weiteren zeigen beide linear-elastischen Werkstoffmodelle schon bei globalen Dehnungen < 40 % (20 mm Weg) Konvergenzprobleme für die betrachtete Geometrie. Die Green'schen Werkstoffgesetze zeigen im Gegensatz dazu eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Experiment im betrachteten Bereich. Die Untersuchungen zum Verformungszustand in den Kopfzugproben zeigen außerdem, dass die Unter-

schiede im volumetrischen Verhalten der Klebstoffe mit den verwendeten Werkstoffgesetzen erfasst werden, während die linear-elastische Berechnung aufgrund der niedriger gewählten Poissonzahl diese Unterschiede nicht deutlich abbilden kann. Die Untersuchungen zeigen weiterhin deutlich, dass im Anhaftungsbereich des Klebstoffes durch die starke Querkontraktionsbehinderung die volumetrischen Eigenschaften einen großen Einfluss auf die Verformung und damit auch den Spannungszustand haben. Bei Klebschichtdicken in der Größenordnung von 3 mm, wie sie in der Praxis häufig Anwendung finden, ist dieser Einfluss noch einmal deutlich größer. Dies zeigt sich auch der Vergleich der Berechnungsarten an der Kopfzugprobengeometrie mit der Klebschichtdicke $d = 3$ mm. Die linear elastischen Werkstoffgesetze zeigen hier deutliche Abweichungen vom Experiment (vgl. Abbildung 6.25 und Abbildung 6.26).

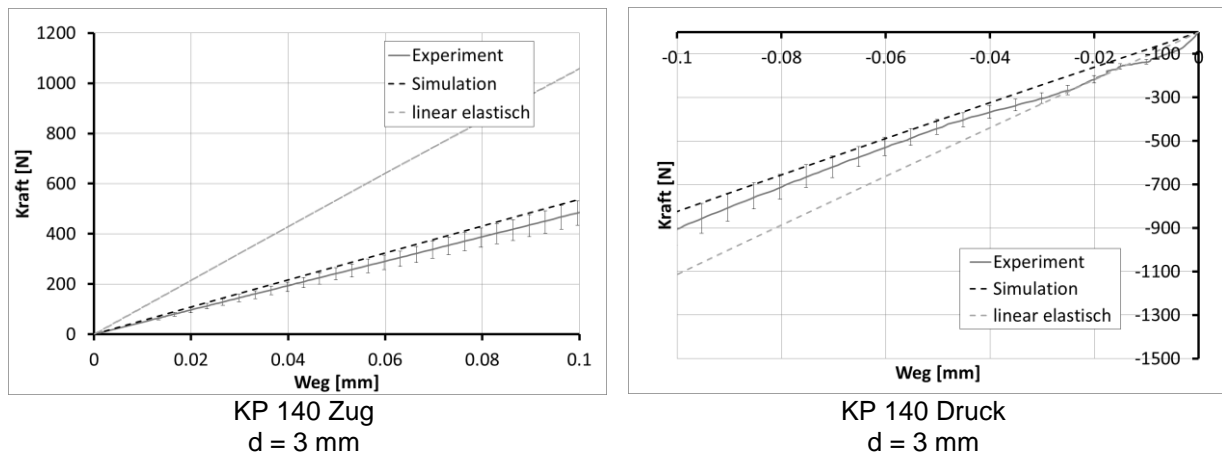


Abbildung 6.25 Vergleich zwischen linear-elastischer Berechnung und Berechnung mit Green'schen Werkstoffgesetzen; Klebstoff KP 140

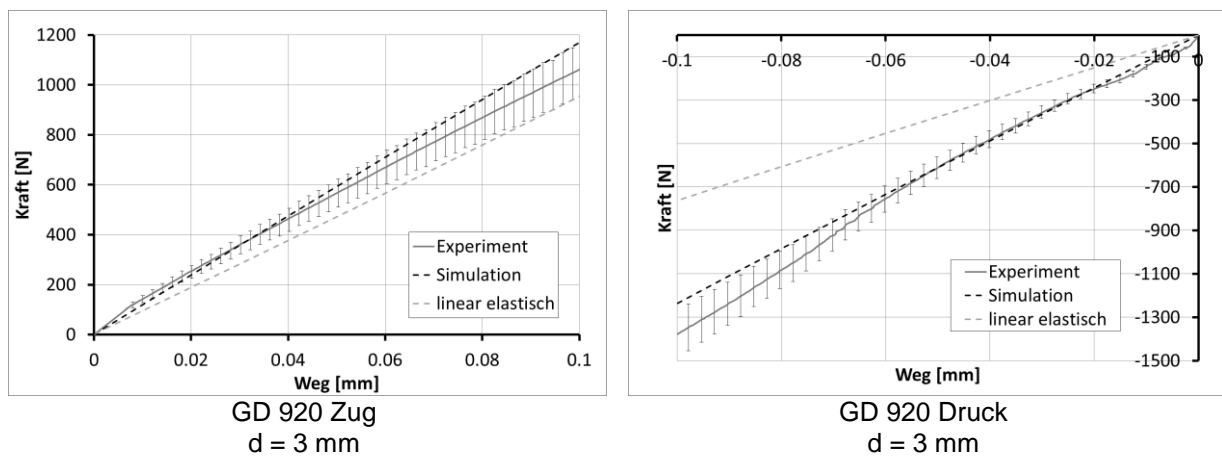


Abbildung 6.26 Vergleich zwischen linear-elastischer Berechnung und Berechnung mit Green'schen Werkstoffgesetzen; Klebstoff GD 920

7 Grenzen der Beanspruchbarkeit

Die Werkstoffgesetze aus Kapitel 5 und 6 wurden in einem vorher festgelegten Bereich, in dem keine relevante Schädigung des Werkstoffs auftritt, ermittelt und überprüft. Für die Beurteilung von Klebverbindungen in der Praxis ist es allerdings wichtig, den Bereich, in dem ein Werkstoffgesetz gültig ist, möglichst genau zu kennen. Im Folgenden wurden daher Untersuchungen im Grenzbereich bis hin zur Schädigung der betrachteten Klebstoffe durchgeführt. Außerdem wurde untersucht, in welchem Bereich der Probe die ersten Schädigungen auftreten, um daraus Rückschlüsse auf die für das Versagen der Klebschicht maßgebliche Beanspruchungsgröße ziehen zu können.

Für diese Versuche wurden Kopfzugproben mit einem Geometrieverhältnis von 2:1 verwendet. Der Anteil, der vom Randbereich beeinflussten Verformung, ist bei dieser Probengeometrie größer als beim Geometrieverhältnis 1:1 und spiegelt damit eher die Bedingungen von in der Praxis üblichen Verklebungen wieder.

7.1 Untersuchungen zum Bruchverhalten der betrachteten Klebstoffe

7.1.1 Versagen bei einfacher Belastung

Zunächst wird der Schädigungsverlauf der Probe bis zum Versagen beobachtet und mit dem Kraft-Weg-Verlauf verglichen. In diesem Versuch können Risse, die an der Oberfläche der Probe entstehen, erkannt und ihre weitere Ausbreitung beobachtet werden. Im Folgenden wird untersucht, ob im Inneren der Probe bereits erkennbare Schädigungen vorhanden sind, bevor im Randbereich, und damit von außen sichtbar, die erste Schädigung auftritt. Dazu werden je fünf Proben auf drei unterschiedliche Verformungsniveaus belastet und anschließend entlastet. Die Proben werden nach der Belastung schichtweise aufgeschnitten und auf Schädigungen untersucht. Die Höhe der Belastungsniveaus wird anhand der Versuche, die bis zum Versagen der Probe durchgeführt wurden, ausgewählt. Tabelle 7.1 zeigt die Versuchsmatrix für die Untersuchungen zur Rissentstehung.

Tabelle 7.1 Versuchsmatrix für Untersuchungen zur Rissentstehung an Kopfzugproben

Klebstoff	Anzahl Proben []	Belastung	Belastungs- zyklen []
KP 140	3	bis Versagen	-
GD 920	3	bis Versagen	-
KP 140	5	3 Ausgewählte Lastmaxima 20 mm / 30 mm / 60 mm	1
GD 920	5	3 Ausgewählte Lastmaxima 20 mm / 25 mm / 30 mm	1

7.1.1.1 Körapur 140

Abbildung 7.1 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf einer Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis $D/d = 2:1$ zusammen mit den Bildern der verformten Probe aus der Messung mittels Videoextensometrie. Abbildung 7.1 ist zur besseren Übersicht in Anhang A.3 vergrößert dargestellt.

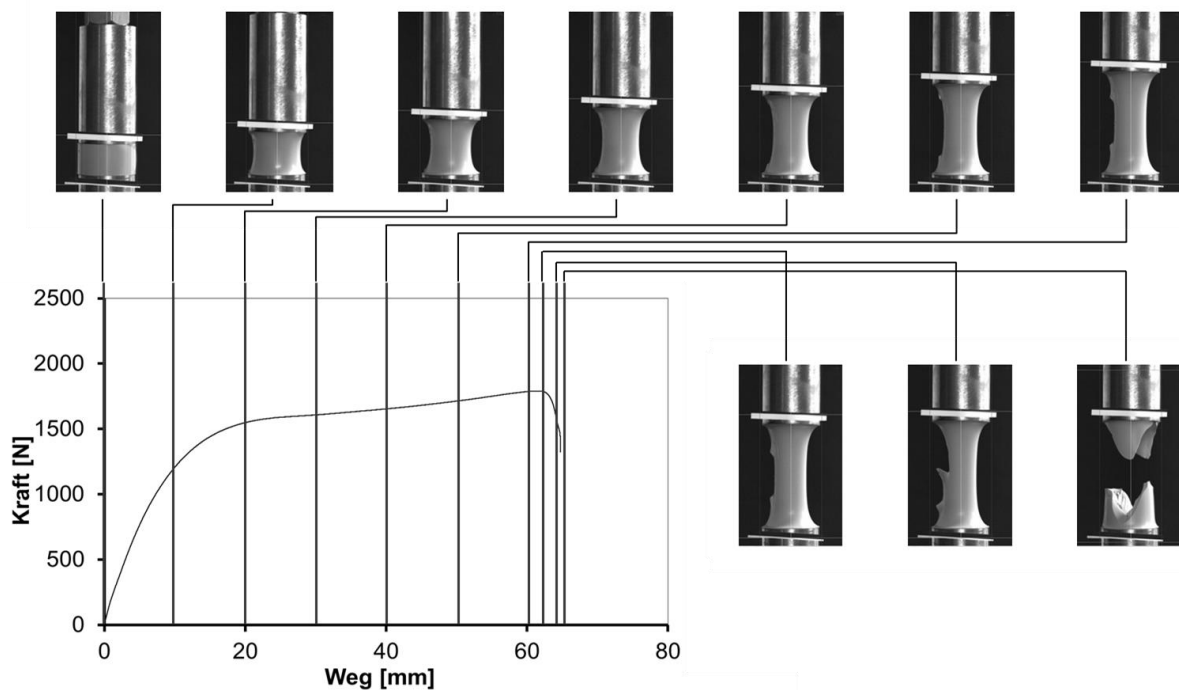


Abbildung 7.1 Schädigungsverlauf einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff KP 140 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm

Erste kleine Risse an der Außenseite der Probe können schon bei einer globalen Dehnung von 80 % (20 mm Weg) festgestellt werden (Vergrößerung vgl. Abbildung 7.2).

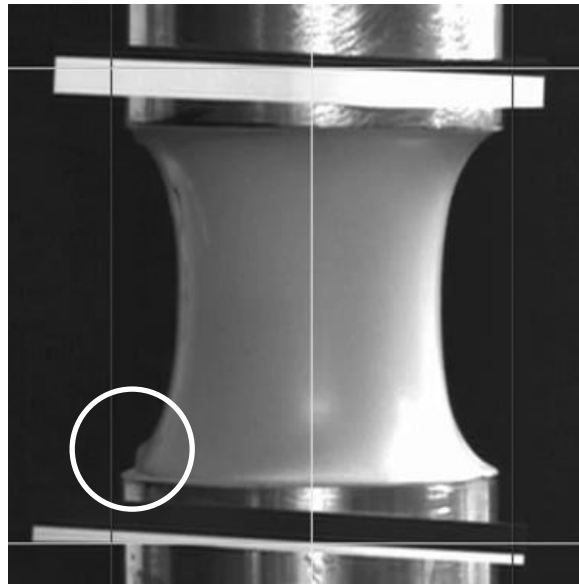


Abbildung 7.2 Erste von außen sichtbare Schädigung an der Kopfzugprobe aus Klebstoff KP 140 bei einer Verschiebung von 20 mm (80 % globale Dehnung)

Diese Risse im Randbereich der Probe vergrößern sich bei steigender Verformung sehr langsam bis zu einer globalen Dehnung von 240 % (60 mm Weg). Ab diesem Punkt wächst der Riss sehr schnell entlang der Winkelhalbierenden zwischen Substrat und Klebstoffoberfläche in Richtung der Mitte des gegenüberliegenden Substrates. Von dort aus wandert er weiter zum Randbereich des Substrates, an dem er gestartet ist. Die Schädigung der Probe läuft dabei immer in einem Winkel von ca. 45° (im unbelasteten Zustand) zur Belastungsrichtung der Probe ab. Abbildung 7.3 zeigt das Bruchbild einer solchen Stirnzugprobe.

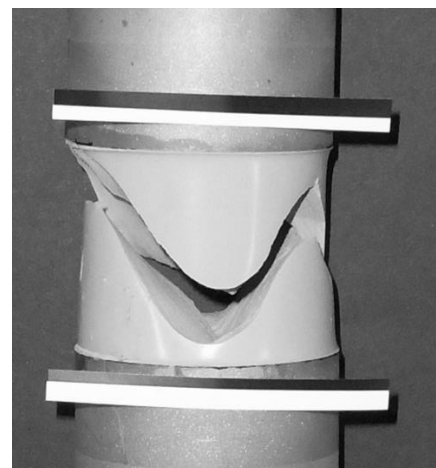
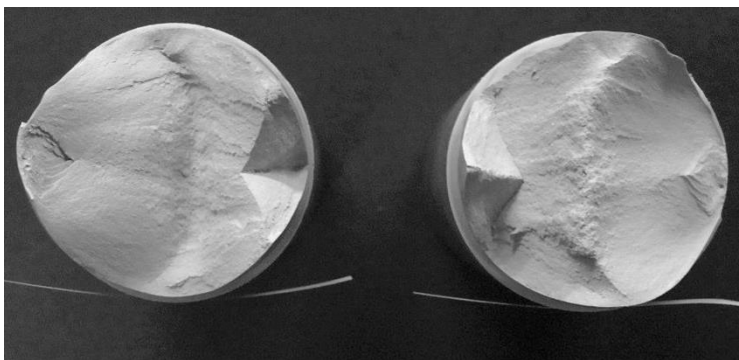


Abbildung 7.3 Exemplarisches Bruchbild einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff KP 140 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm im Zugversuch

In Abbildung 7.4 sind die Schnitte der Proben, die auf unterschiedliche Verformungsniveaus belastet wurden, dargestellt. Für den Klebstoff KP 140 wurden 20 mm, 30 mm und 60 mm (80 %, 120 % und 240 % globale Dehnung) als Verformungsniveaus gewählt.

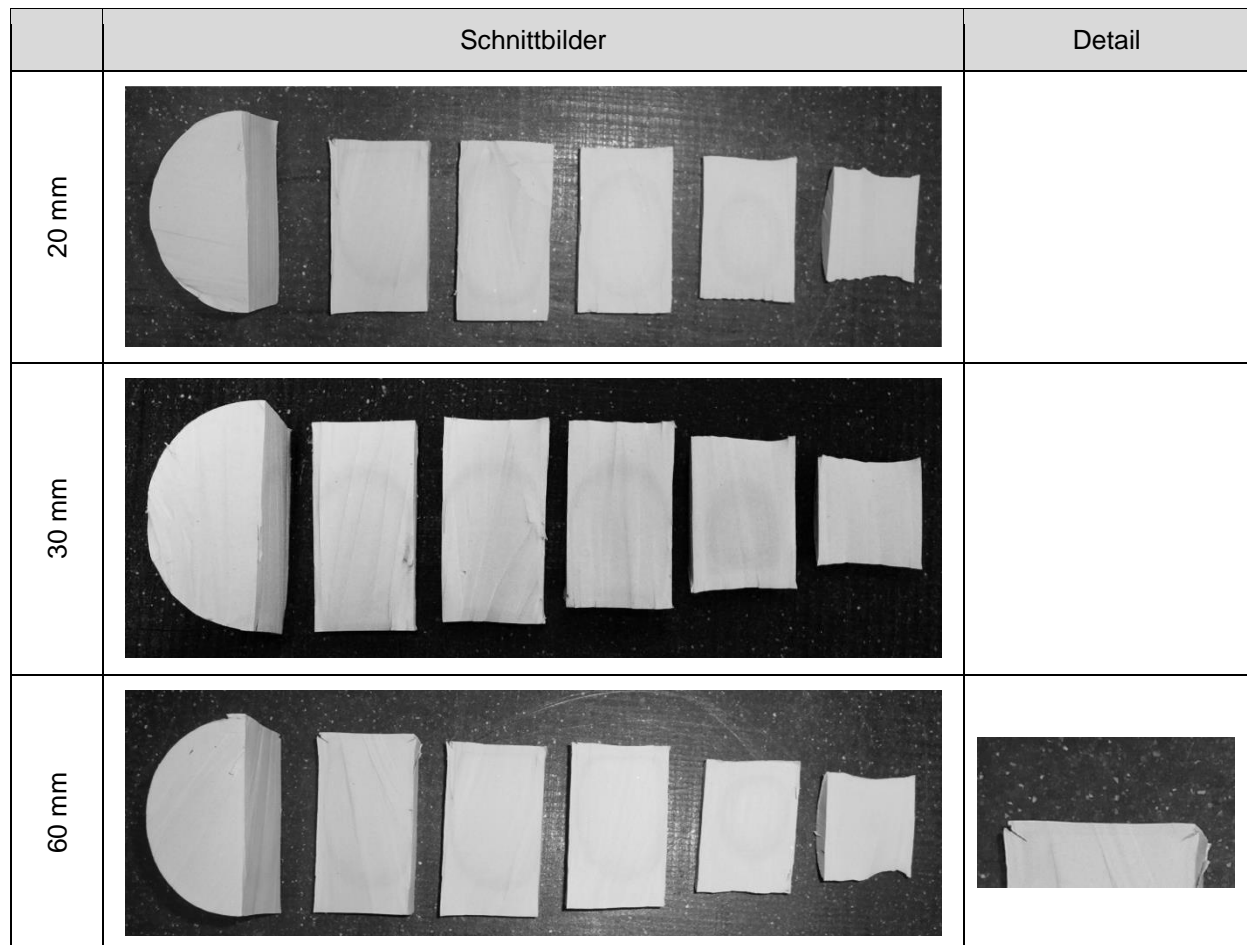


Abbildung 7.4 Schnitte der Kopfzugproben aus dem Klebstoff KP 140 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm im Zugversuch nach Belastung auf unterschiedliche Verformungsniveaus

In Abbildung 7.4 sind bei den beiden ersten Lastniveaus keine Risse zu erkennen. Lediglich im Randbereich an der Ecke zum Substrat sind kleine Ansätze von Schädigung zu erkennen. Beim Verformungsniveau 60 mm erkennt man dann deutlich den Riss, der von beiden Seiten der Probe im Eckbereich entlang der Winkelhalbierenden wächst. Vor der Entstehung des Risses im Eckbereich der Probe sind also keine makroskopisch erkennbaren Schädigungen im Klebstoff vorhanden. Abbildung 7.5 zeigt eine Mikroskopaufnahme des Risses in einer Kopfzugprobe nach Belastung auf 240 % globale Dehnung (60 mm Weg).

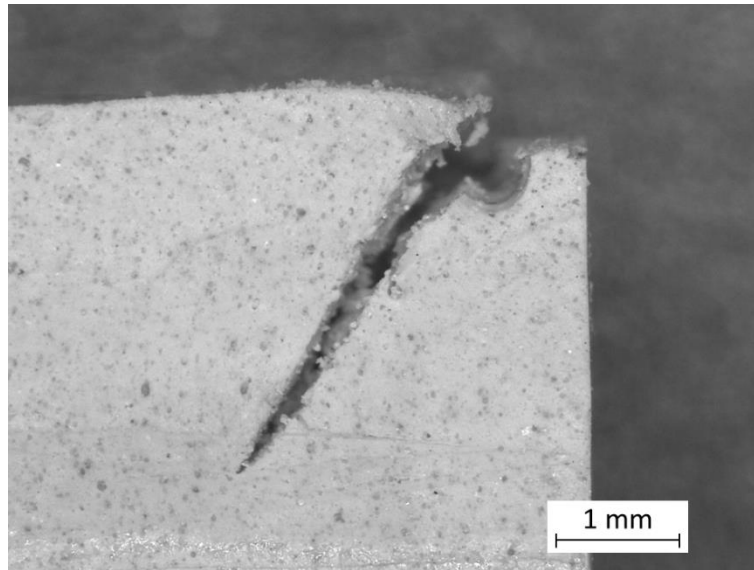


Abbildung 7.5 Mikroskopaufnahme des ersten Risses einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff KP 140 im Zugversuch nach Belastung auf 60 mm (240 % globale Dehnung)

7.1.1.2 Kömmerling GD 920

Abbildung 7.6 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf einer Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis $D/d = 2:1$ zusammen mit den Bildern der verformten Probe aus der Messung mittels Videoextensometrie für den Klebstoff Kömmerling GD 920. Abbildung 7.6 ist zur besseren Übersicht in Anhang A.3 vergrößert dargestellt.

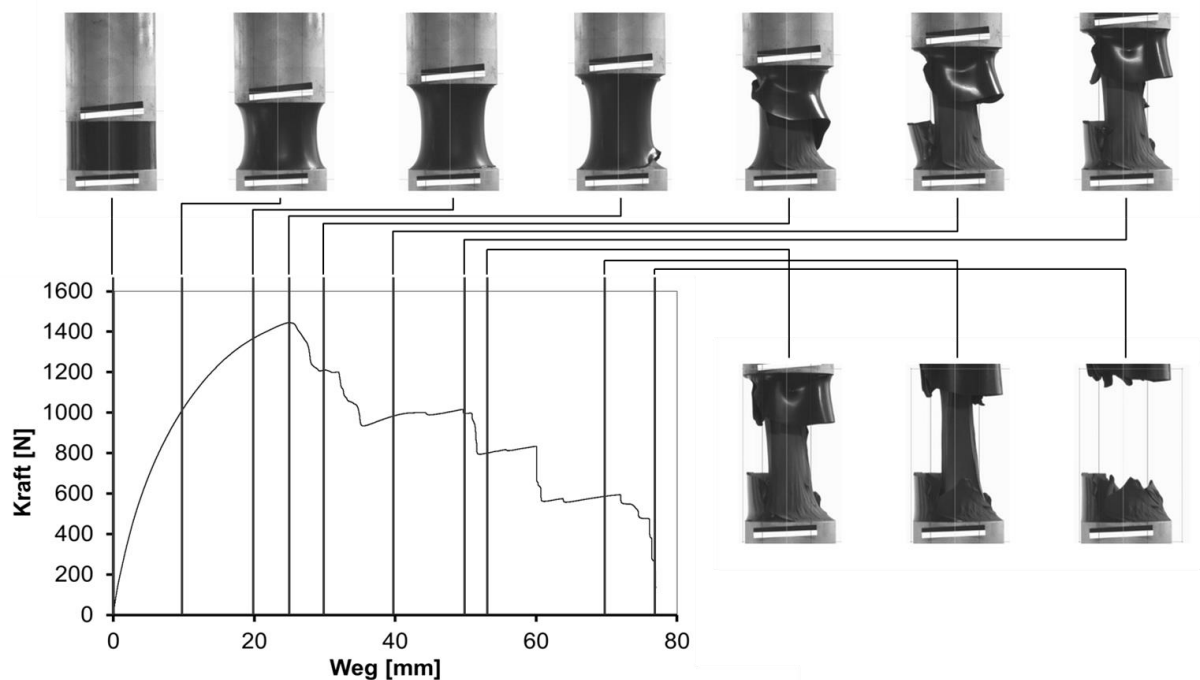


Abbildung 7.6 Schädigungsverlauf einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm

Die ersten Anzeichen von Schädigung, die von außen sichtbar sind, können beim Klebstoff GD 920 in diesem Versuch bereits bei einer globalen Dehnung von 40 % (10 mm Weg) erkannt werden. Im Kraft-Weg-Verlauf sind allerdings keine Anzeichen hierfür festzustellen. Abbildung 7.7 zeigt eine Vergrößerung dieses Risses bei 40 % globaler Dehnung.

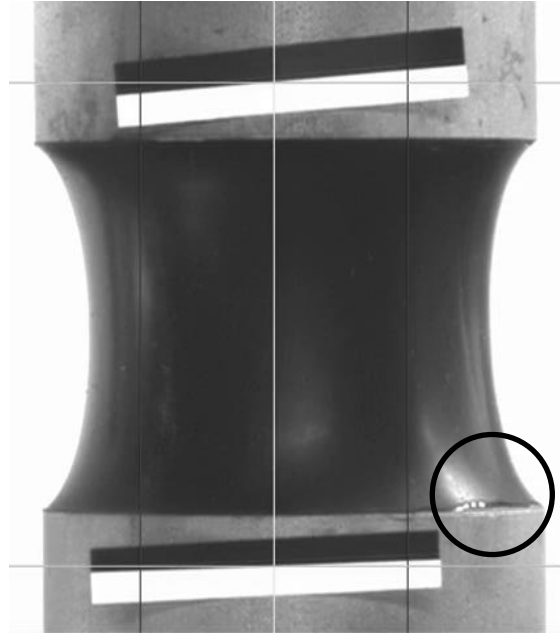


Abbildung 7.7 Erste von außen sichtbare Schädigung an der Kopfzugprobe aus Klebstoff GD 920 bei einer Verschiebung von 10 mm (40 % globale Dehnung)

Dabei handelt es sich um minimale Ablösungen im Eckbereich zwischen Klebstoffoberfläche und Substrat. Diese Ablösungen werden bis zu einer globalen Dehnung von 80 % (20 mm Weg) minimal größer. Ab diesem Punkt wachsen sie mit größer werdender Geschwindigkeit bis 100 % globaler Dehnung (25 mm Weg), um ab diesem Punkt sehr schnell bis zur gegenüberliegenden Substrathälfte zu wachsen. Der Riss wächst dabei immer sehr nah entlang der Oberfläche. Der verbleibende Klebstoffquerschnitt trägt zunächst weiter, bis auch hier im Eckbereich des Restquerschnitts ein Riss entsteht, der wiederum entlang der Oberfläche bis zur gegenüberliegenden Seite wandert. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrfach, bis die Probe bei etwas mehr als 300 % globaler Dehnung (75 mm Weg) vollständig versagt. Abbildung 7.8 zeigt das Bruchbild einer solchen Stirnzugprobe.

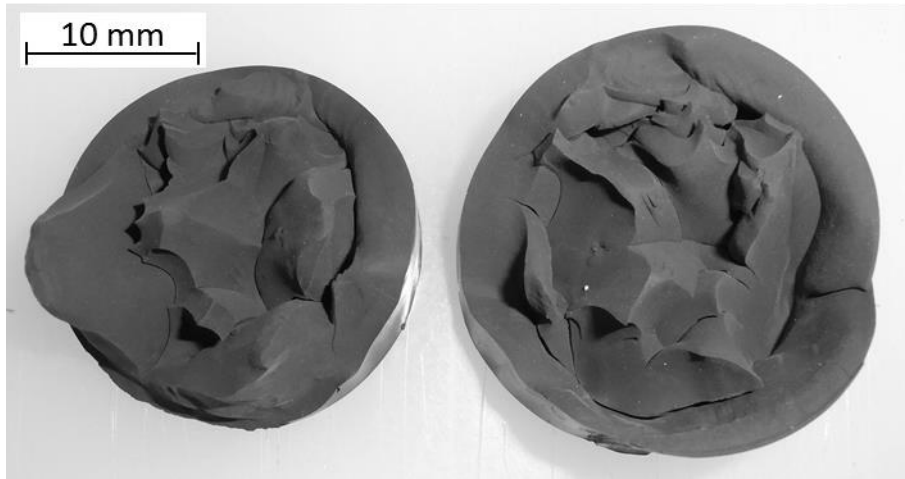


Abbildung 7.8 Exemplarisches Bruchbild einer Stirnzugprobe aus dem Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50 \text{ mm}$ und $d = 25 \text{ mm}$ im Zugversuch

In Abbildung 7.9 sind die Schnitte der Proben, die auf unterschiedliche Verformungsniveaus belastet wurden, dargestellt. Für den Klebstoff GD 920 wurden 20 mm, 25 mm und 30 mm (80 %, 100 % und 120 % globale Dehnung) als Verformungsniveaus gewählt.

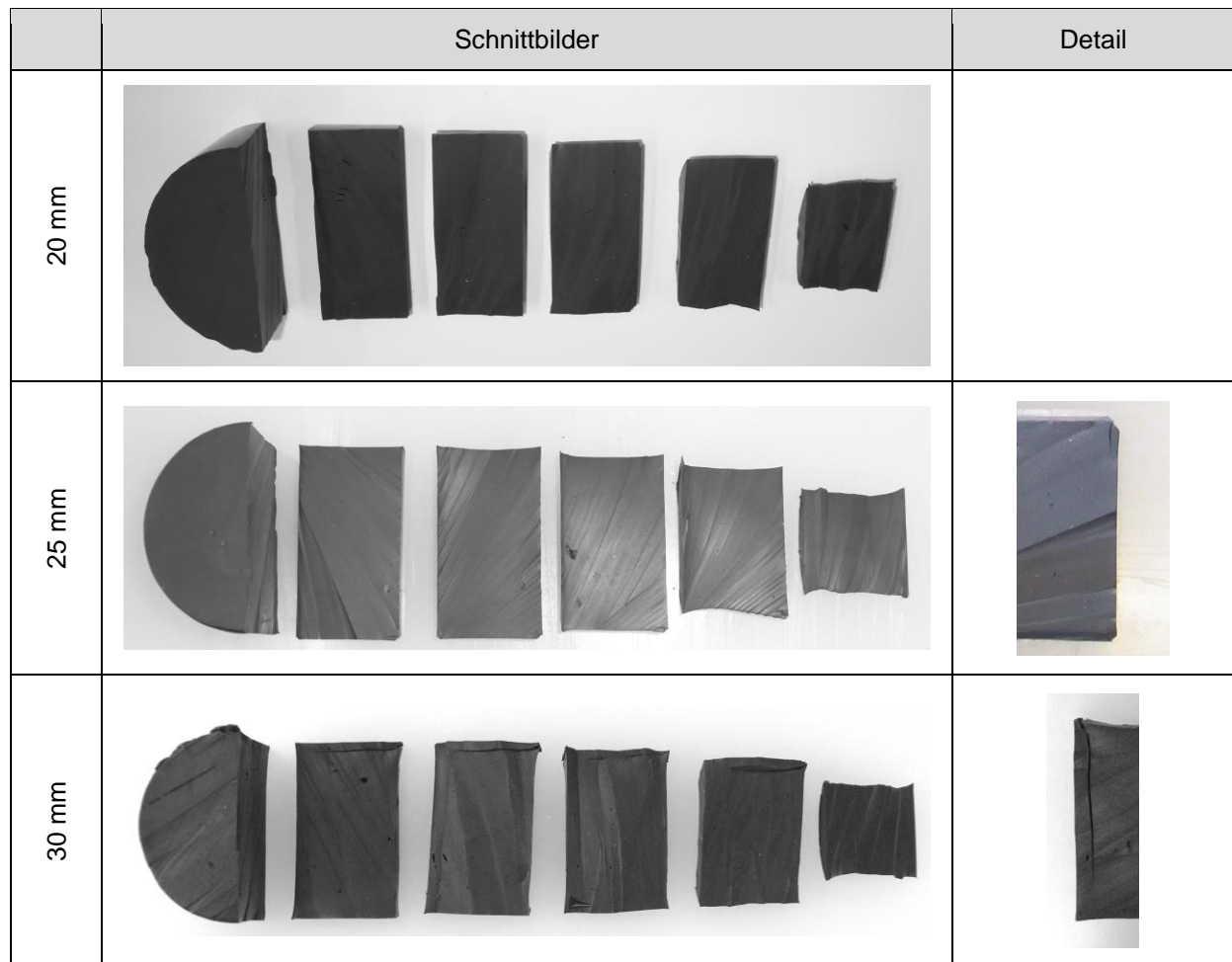


Abbildung 7.9 Schnitte der Kopfzugproben aus dem Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50 \text{ mm}$ und $d = 25 \text{ mm}$ im Zugversuch nach Belastung auf unterschiedliche Verformungsniveaus

In Abbildung 7.9 ist beim ersten Lastniveau kein Riss zu erkennen. Lediglich im Randbereich an der Ecke zum Substrat sind kleine Ansätze einer Schädigung zu beobachten. Beim Verformungsniveau von 100 % globaler Dehnung (25 mm) erkennt man dann deutlich den Riss, der vom Eckbereich der Probe zur gegenüberliegenden Seite wächst. Dieser Riss ist in Abbildung 7.10 in einer Mikroskopaufnahme dargestellt.

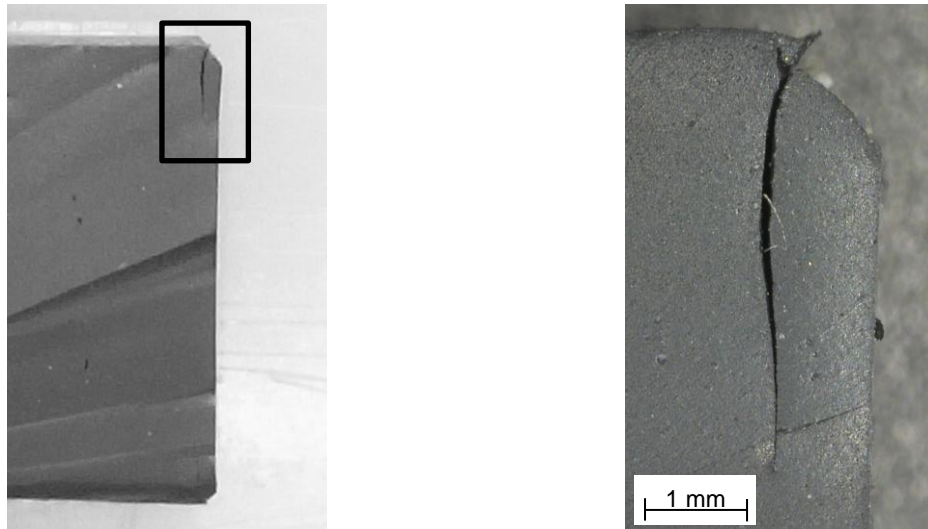


Abbildung 7.10 Mikroskopaufnahme des ersten Risses einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm im Zugversuch nach Belastung auf 25 mm (100 % globale Dehnung)

Im Gegensatz zum Klebstoff KP 140 wächst dieser Riss sehr nah entlang der Oberfläche und nicht im 45° Winkel in Richtung Mitte der Probe. Außerdem zeigt der Riss im Klebstoff KP 140 eine weitere Öffnung, während der Riss im Klebstoff GD 920 sich im entlasteten Zustand fast vollständig schließt. Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen außerdem, dass auch beim Klebstoff GD 920 vor der Entstehung des Risses im Eckbereich der Probe keine makroskopisch erkennbaren Schädigungen im Klebstoff vorhanden sind.

7.1.2 Versagen bei mehrfacher Belastung

In Kapitel 7.1.1 wurde das Versagensverhalten der Kopfzugprobe bei einfacher Belastung bis zum Bruch untersucht. Dabei konnten makroskopische Risse in der Probe bei bestimmten Belastungsniveaus gefunden werden. Da sich die erste Belastung der untersuchten Klebstoffe auf ein bestimmtes Lastniveau signifikant von den Folgebelastungen unterscheidet (vgl. Kapitel 2.1.2 sowie Versuchsergebnisse aus Kapitel 4), wird im Folgenden das Werkstoffverhalten im Grenzbereich bei mehrfacher Belastung betrachtet. Dadurch ist es möglich, die Effekte aus der ersten Belastung auf das jeweilige Dehnungsniveau von den weiteren Belastungen trennen und gesondert betrachten zu können.

7.1.2.1 Versuche mit steigender Last

Die Kopfzugproben werden bei diesem Versuch jeweils zweimal auf ein Lastniveau belastet. Nach diesen zwei Belastungen wird das Lastniveau um 20 % globale Dehnung gesteigert. Für jeden Zyklus wurden die charakteristischen Energiegrößen (vgl. 3.3.7) ermittelt. Außer-

dem wurde für jeden Klebstoff der dissipierte Energieanteil bezogen auf die globale Dehnungsdifferenz nach Gleichung 7.1 bestimmt.

$$x_Z = \frac{w_{dz}}{\Delta\varepsilon_Z} = \frac{w_{dz}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}} \quad (7.1)$$

mit x Energie bezogen auf die Dehnungsdifferenz des Zyklus
 w_{dz} dissipierte Energie des Belastungszyklus
 $\Delta\varepsilon_Z$ Dehnungsdifferenz des Zyklus

Diese Größe ist ein Maß für das Energieaufnahmevermögen des Werkstoffes je Dehnungseinheit. Diese Größe ermöglicht den Vergleich der Energiedissipation der einzelnen Belastungszyklen untereinander, obwohl die Zyklen unterschiedlich große Dehnungsdifferenzen $\Delta\varepsilon$ haben. Die Versuchsmatrix der Versuche mit steigender Belastung ist in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2 Versuchsmatrix für Untersuchungen mit steigender Belastung an Kopfbzugproben

Klebstoff	Anzahl Proben []	Belastungszyklen []	Steigerungsschritte
KP 140	3	je 2	20 % globale Dehnung
GD 920	3	je 2	20 % globale Dehnung

Abbildung 7.11 zeigt die Ergebnisse des Laststeigerungsversuchs mit Steigerung der maximalen Dehnung um jeweils 20 % globale Dehnung. Abbildung 7.12 zeigt die analoge Darstellung für den Klebstoff GD 920.

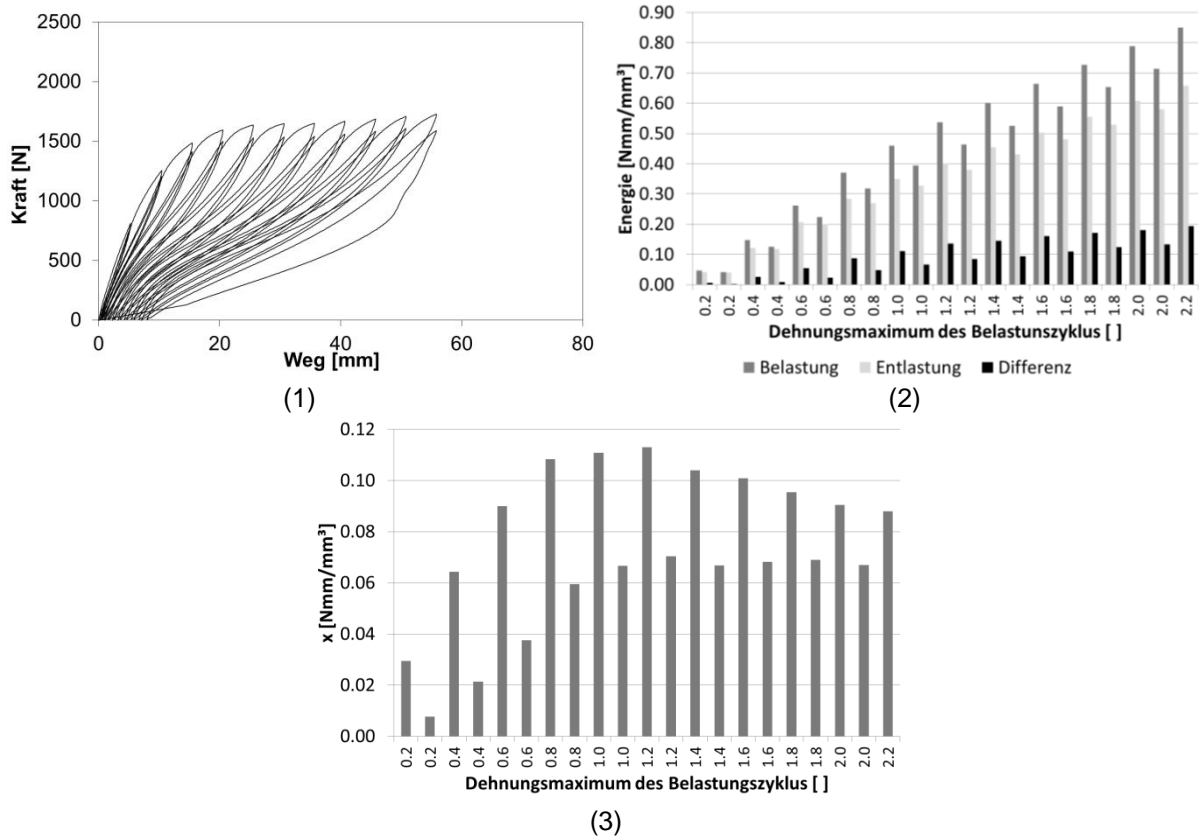


Abbildung 7.11 Versuchsergebnisse aus Mehrfachbelastungsversuch mit steigendem Lastmaximum an Kopfgugproben mit Geometrieverhältnis 2:1; Klebstoff KP 140

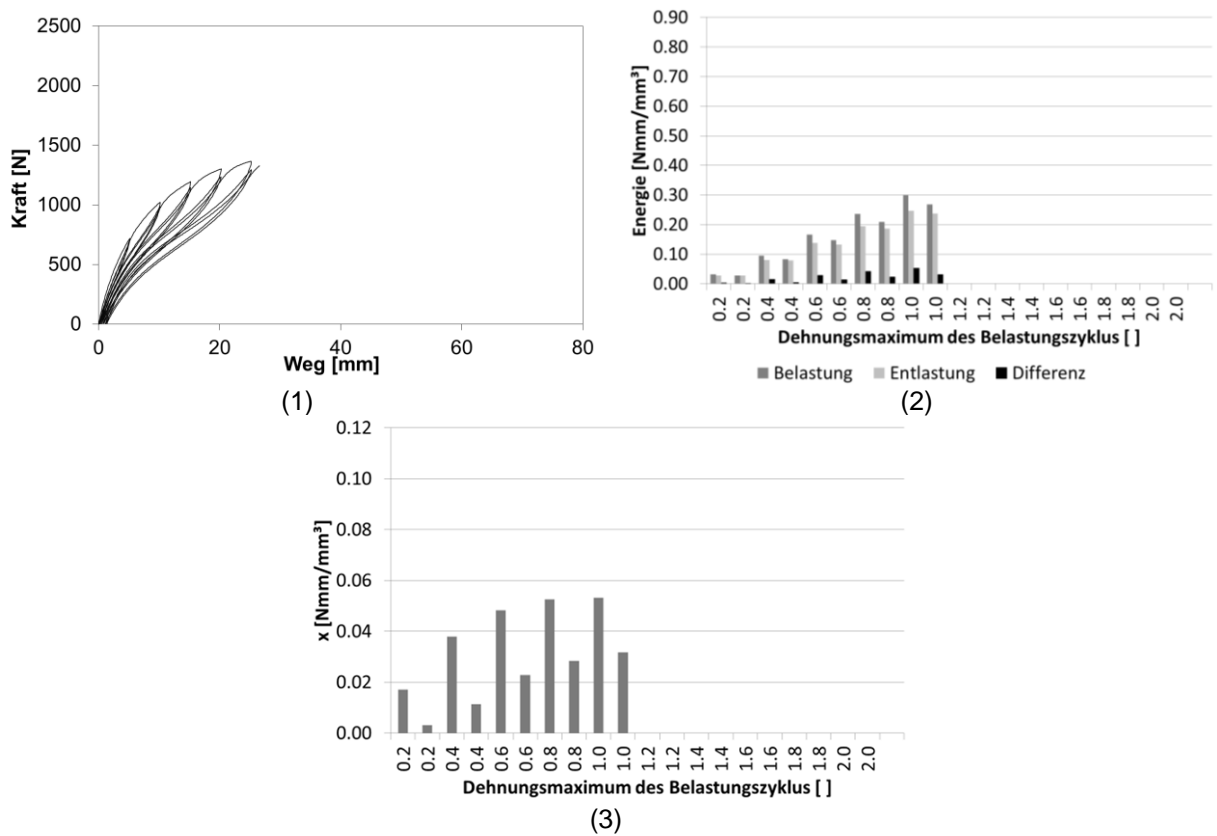


Abbildung 7.12 Versuchsergebnisse aus Mehrfachbelastungsversuch mit steigendem Lastmaximum an Kopfgugproben mit Geometrieverhältnis 2:1; Klebstoff GD 920

Beide Klebstoffe zeigen im ersten Belastungszyklus, aufgrund des Mullins-Effektes, deutlich höhere Energien als im zweiten Zyklus. Bei der ersten Belastung auf ein Lastniveau richtet sich das Polymernetzwerk aus. Im zweiten Zyklus muss die Energie zur Ausrichtung des Netzwerkes nicht mehr aufgebracht werden, die einzubringende Energie ist entsprechend kleiner. Im zweiten Zyklus muss lediglich die innere Reibung im Polymernetzwerk eingebracht werden, die in der Polymerstruktur keine Schädigung zur Folge hat.

Der Klebstoff GD 920 zeigt deutlich kleinere charakteristische Energiegrößen im Vergleich mit den Energieanteilen der Belastungszyklen des Klebstoffs KP 140 (vgl. Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12 (2)). Ab einem Dehnungsmaximum von 120 % globaler Dehnung zeigt der Klebstoff KP 140 im jeweils ersten Belastungszyklus deutlich kleiner werdende dissipierte Energieanteile bezogen auf die Dehnungsdifferenz (vgl. Abbildung 7.11 (3)). Die jeweils zweiten Zyklen bleiben ab diesem Punkt annähernd konstant. Der Klebstoff GD 920 zeigt keine kleiner werdenden Energieanteile. Sowohl der erste, als auch der zweite Belastungszyklus zeigen ständig größer werdende Werte verglichen mit den jeweiligen Zyklen des kleineren Belastungsniveaus (vgl. Abbildung 7.12 (3)).

7.1.2.2 Wiederholte Belastungen auf Lastniveaus im Grenzbereich der Beanspruchbarkeit

Um zu überprüfen, ob es bereits bei kleineren Lastniveaus eine Neigung des Klebstoffes zur Rissbildung gibt, werden im Folgenden Untersuchungen mit mehrfacher Belastung auf ausgewählte Lastniveaus durchgeführt, die nahe an dem Punkt liegen, an dem erste Risse aufgetreten sind. Die Versuchsmatrix für diese Versuche ist in Tabelle 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.3 Versuchsmatrix für Untersuchungen mit Mehrfachbelastung im Grenzbereich der Belastbarkeit

Klebstoff	Anzahl Proben []	Lastniveaus [%]	Belastungszyklen []
KP 140	3	100, 140	je 10
GD 920	3	80, 120	je 10

In Kapitel 7.1.2.1 wurde gezeigt, dass der Klebstoff KP 140 bei Belastungszyklen im Bereich von 100 % globaler Dehnung die größten Energieanteile aufnehmen kann. Um näher zu untersuchen, ob in diesem Bereich bereits Schädigungen im Klebstoff auftreten, wurden im Folgenden Versuche mit wiederholten Belastungen auf dieses Dehnungsniveau durchgeführt. Im Anschluss wurde die Probe zusätzlich wiederholt über dieses Belastungsniveau belastet (140 % globale Dehnung). Die Auswertung der Mehrfachbelastungsversuche erfolg-

te analog zu den Versuchen in Kapitel 7.1.2.1. Abbildung 7.13 zeigt die Ergebnisse aus dem Mehrfachbelastungsversuch für den Klebstoff KP 140.

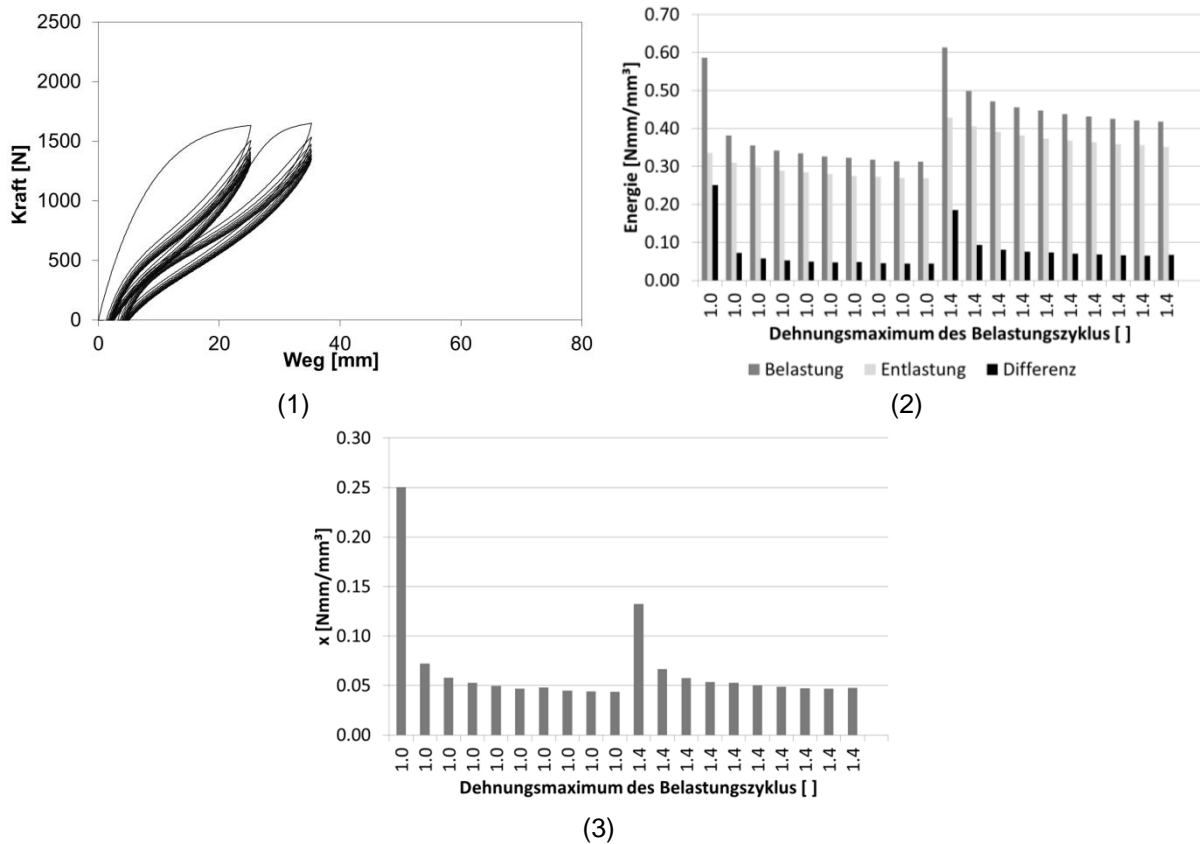


Abbildung 7.13 Versuchsergebnisse aus Mehrfachbelastungsversuchen im Grenzbereich der Belastbarkeit an Kopfzugproben mit Geometrieverhältnis 2:1; Klebstoff KP 140

Der Klebstoff KP 140 zeigt bei mehrfacher Belastung auf 100 % globale Dehnung, wie auch im Versuch ohne Entlastungen (vgl. Kapitel 7.1.1), erste kleine Schädigungen im Eckbereich der Probe bereits im ersten Belastungszyklus. Diese Schädigung vergrößert sich jedoch bei allen Folgebelastrungen nicht. Bei den folgenden Belastungszyklen auf 140 % globale Dehnung ist bei der ersten Belastung auf dieses Lastniveau eine leichte Vergrößerung der bereits vorhandenen Schädigungen zu erkennen. Bei wiederholter Belastung ist allerdings keine Vergrößerung der Schädigung zu beobachten. Abbildung 7.16 zeigt jeweils das Belastungsmaximum des ersten und des letzten Zyklus der beiden Lastniveaus.

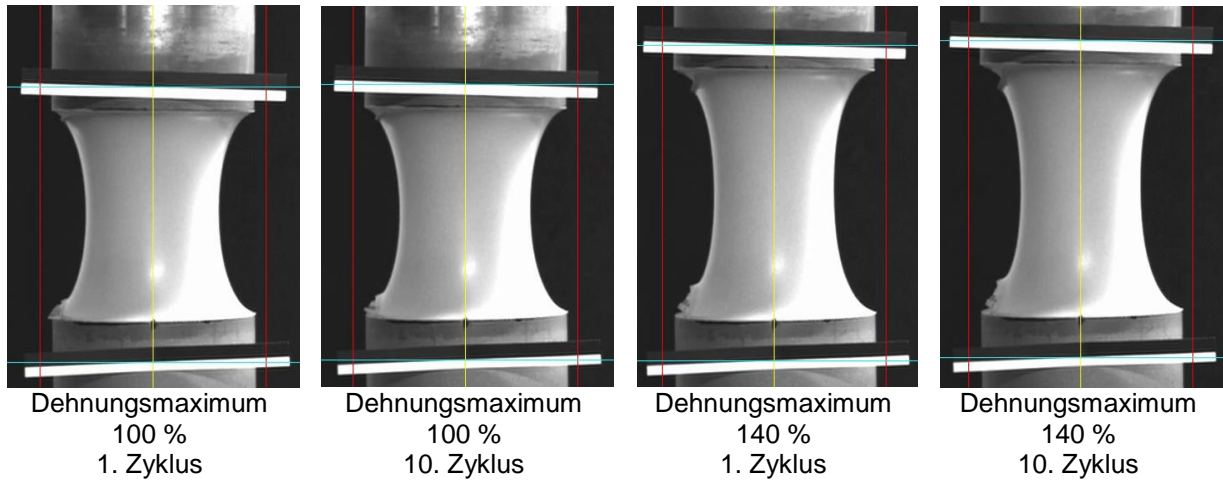


Abbildung 7.14 Belastungsmaxima des 1. und des 10. Zyklus für beide Lastniveaus der Mehrfachbelastungsversuche im Grenzbereich der Belastbarkeit; Klebstoff KP 140

Für den Klebstoff GD 920 wurden ebenfalls Mehrfachbelastungsversuche in dem Bereich durchgeführt, in dem der Klebstoff die größten Energieanteile aufnehmen kann. Die Lastmaxima für diese Versuche wurden hier mit 80 % und 120 % globaler Dehnung analog zu den Versuchen mit dem Klebstoff KP 140 gewählt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 7.15 dargestellt.

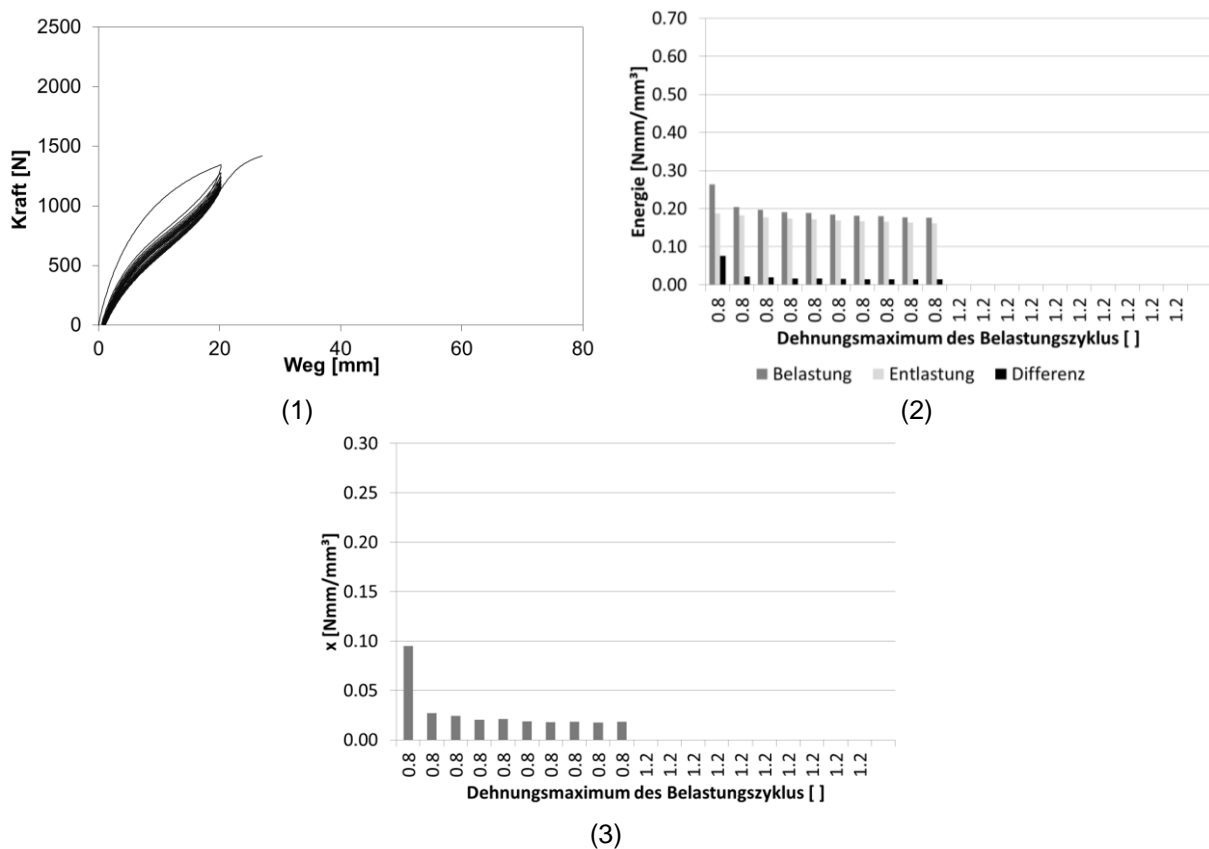


Abbildung 7.15 Versuchsergebnisse aus Mehrfachbelastungsversuchen im Grenzbereich der Belastbarkeit an Kopfzugproben mit Geometrieverhältnis 2:1; Klebstoff GD 920

Auch der Klebstoff GD 920 zeigt im Mehrfachbelastungsversuch bei Belastung auf das erste Lastniveau (hier 80 % globale Dehnung) wie erwartet bereits erste Anzeichen von Schädigung im Eckbereich der Probe (vgl. auch Kapitel 7.1.1). Im Laufe der zehn Belastungszyklen vergrößert sich diese Schädigung leicht. Bei der darauf folgenden Belastung auf das zweite Lastniveau (120 % globale Dehnung) versagt die Probe. Abbildung 7.16 zeigt das Belastungsmaximum des ersten und des letzten Zyklus für das erste Lastniveau.

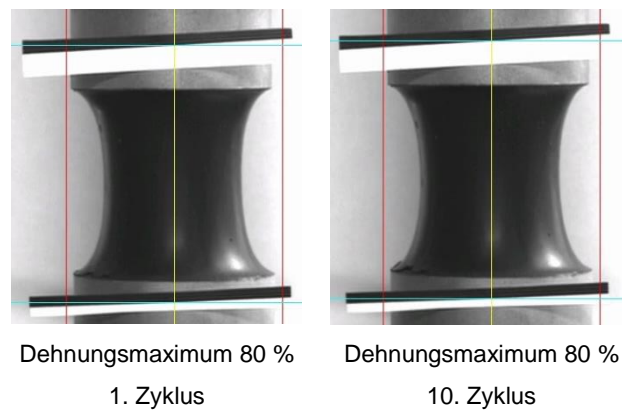


Abbildung 7.16 Belastungsmaxima des 1. und des 10. Zyklus für das 1. Lastniveau der Mehrfachbelastungsversuche im Grenzbereich der Belastbarkeit; Klebstoff GD 920

Bei beiden Klebstoffen fällt auf, dass die im Werkstoff durch innere Reibung dissipierte Energie mit zunehmender Zyklenzahl kleiner wird. Die Differenz zwischen zwei aufeinander folgenden Zyklen wird mit steigender Anzahl der Zyklen ebenfalls kleiner. Trägt man diesen Abfall über der Zyklenzahl auf so folgt die Abnahme einer Weibull-Verteilung (benannt nach Waloddi Weibull 1887-1979) [81, 82]. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 7.17 anhand der Klebstoffs KP 140 (vgl. Ergebnisse aus Abbildung 7.13) beispielhaft dargestellt.

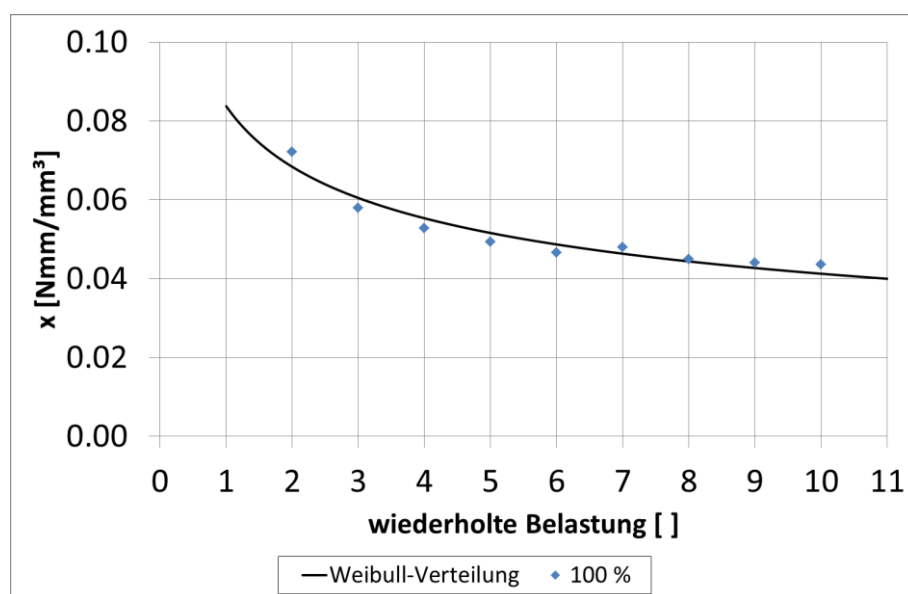


Abbildung 7.17 Energieabfall mit steigender Zyklenzahl für das Lastniveau 100 % globale Dehnung (Weibull-Verteilung)

Allgemein ist es schwierig, die schädigungsrelevanten Energieanteile messtechnisch zu erfassen. Nach dem ersten Belastungszyklus, in dem zusätzlich Orientierungsarbeit (Ausrichtung des Netzwerkes) geleistet wird, verteilt sich die eingebrachte Energie auf drei Anteile. Dies sind der elastische Energieanteil (E_{el}), der bei Belastung im Klebstoffvolumen gespeichert wird und bei Entlastung wieder vollständig freigesetzt wird, der Energieanteil, der in Reibung im Polymernetz umgesetzt wird (E_R) und der Energieanteil, der die Schädigung im System verursacht (E_S). Die Energieanteile E_{el} und E_R sind deutlich größer als E_S , weshalb es schwierig ist Veränderungen in diesem Energieanteil sichtbar zu machen [96].

7.2 Vergleich zwischen Simulation und Experiment im Grenzbereich der Beanspruchbarkeit

Anhand der Untersuchungen in Kapitel 7.1 konnte das Auftreten der ersten Schädigung in den beiden Klebstoffen ermittelt werden. Um den Beanspruchungszustand in diesem Bereich näher untersuchen zu können, wird im Folgenden überprüft, in wie weit die Werkstoffmodelle bis zum Eintreten der ersten Schädigung gültig sind. Dazu wird das Kraft-Weg-Verhalten, das im Experiment ermittelt wurde, mit den Simulationsergebnissen verglichen. Abbildung 7.18 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf beider Klebstoffe aus Simulation und Experiment.

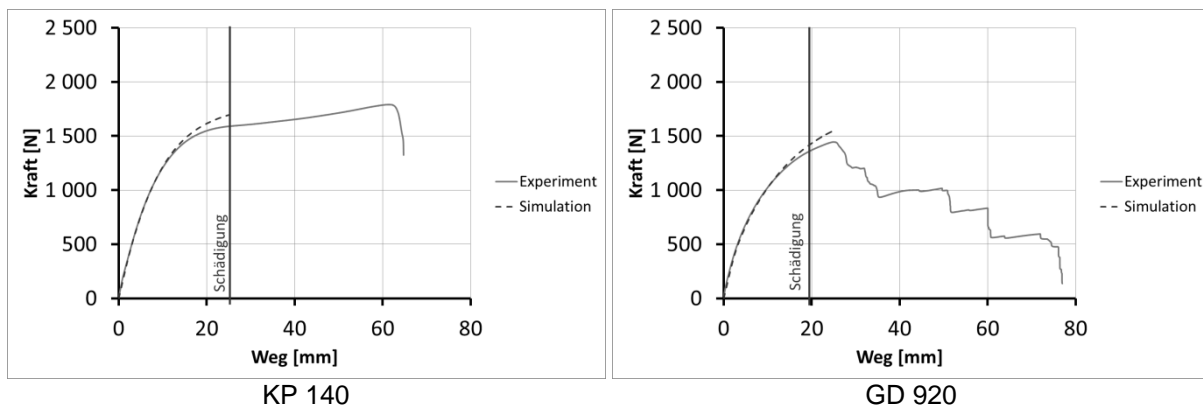


Abbildung 7.18 Vergleich zwischen Simulation und Experiment und Auftreten der ersten makroskopisch erkennbaren Schädigung; Kopfzugversuch Geometrieverhältnis 2:1

Wie in Abbildung 7.18 zu erkennen ist, zeigt die Simulation eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment werden im Bereich der Schädigung größer als bei kleineren Verformungen. Beim Auftreten der ersten Schädigung beträgt die Abweichung beim Klebstoff KP 140 6.2 % und beim Klebstoff GD 920 4.3 %. Beide Klebstoffe zeigen in diesem Bereich in der Simulation einen steiferen Verlauf.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Werkstoffmodelle aus Kapitel 5 bis zum Auftreten der ersten erkennbaren Schädigung, die in Kapitel 7.1 ermittelt wurde, gute Ergebnisse liefert.

Es ist daher möglich den Grenzbereich der Beanspruchung anhand dieser Werkstoffmodelle weiter zu untersuchen.

7.3 Betrachtung des Verformungszustandes im Bereich der ersten erkennbaren Schädigung

Auf Grundlage der Ergebnisse von Kapitel 7.1 und 7.2 wird untersucht, welche Größen für das Auftreten der ersten Schädigung relevant sind. Grundlage für diese Untersuchungen ist das Werkstoffmodell aus Kapitel 5, dessen Gültigkeit im relevanten Bereich in Kapitel 7.2 nachgewiesen wurde. Untersucht wird das mechanische Verhalten anhand von zwei Schnitten durch eine Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1. Diese Pfade sind in Abbildung 7.19 dargestellt.

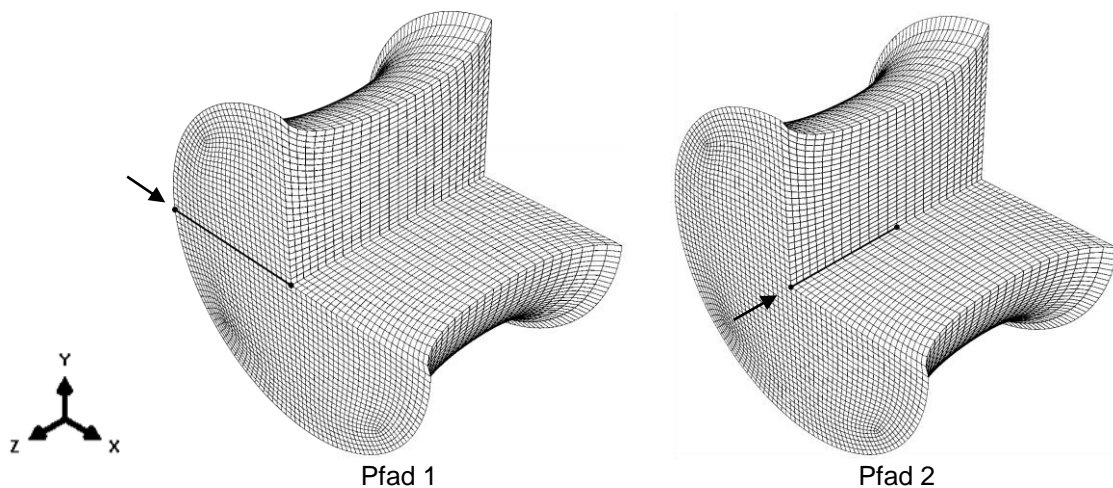


Abbildung 7.19 Ausgewerteter Pfad am FE-Modell der Kopfzugprobe mit einem Geometrieverhältnis von 2:1, hier bei 50 % globaler Dehnung

Es wird das FE-Modell aus Kapitel 6.2 für die Berechnungen verwendet. Für Pfad 1 werden dabei die Ergebnisse der Volumenelemente (Größe 1 mm) im Randbereich der Probe zum Substrat ausgewertet.

7.3.1 Vergleichsspannung nach von Mises

Eine in der Praxis immer noch häufig verwendete Variante, die kritischen Zonen in einer Klebefuge zu identifizieren, ist die Betrachtung der Vergleichsspannung nach von Mises [97], da sie sich vor allem bei der Betrachtung von metallischen Werkstoffen bewährt hat [44, 53, 98–100]. Ein großer Nachteil dieser Betrachtungsweise ist, dass hydrostatische Spannungen bei der Vergleichsspannung nicht berücksichtigt werden.

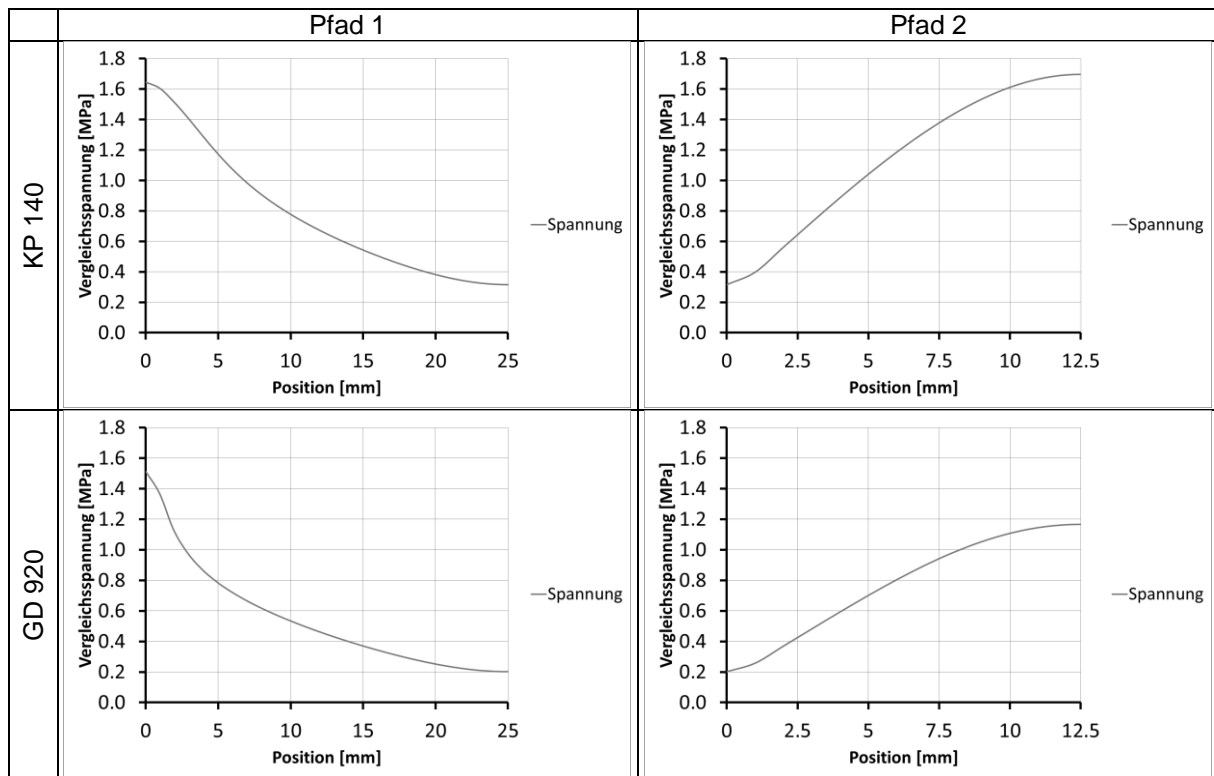


Abbildung 7.20 Verlauf der Vergleichsspannung nach von Mises in einer Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1 bei einer globalen Dehnung von 50 %

Die betrachteten Klebstoffe zeigen unterschiedliche Vergleichsspannungsverläufe. Während die Auswertung der Spannung im Eckbereich der Probe (Pfad 1, Pos. 0) annähernd gleiche Werte zeigt, sind die Spannungen im Klebstoff GD 920 in der Mitte der Kontaktzone (Pfad 1, Pos. 25 bzw. Pfad 2, Pos. 0) deutlich kleiner als beim Klebstoff KP 140. Der Klebstoff KP 140 zeigt das globale Maximum der Vergleichsspannung im Mittelpunkt der Probe (Pfad 2, Pos. 12.5). Die Spannungen im Mittelpunkt des Klebstoffes GD 920 sind allerdings deutlich kleiner und auch kleiner als die Spannungen im Eckbereich, sodass das globale Maximum für diesen Klebstoff in der Ecke der Probe liegt. Diese Untersuchungen zeigen, dass die Vergleichsspannung nach von Mises für die Beschreibung eines Schädigungsbeginns nicht geeignet ist. Beide Klebstoffe zeigen ihren Schädigungsbeginn im Eckbereich der Probe, allerdings erreicht die Vergleichsspannung nur für den Klebstoff GD 920 dort ihr Maximum. Die Betrachtung der Vergleichsspannung liefert kein eindeutiges bzw. falsche Ergebnisse, was die Vorhersage eines Schädigungsbeginns betrifft.

7.3.2 Verformungszustand

In allen Versuchen, die bis zum Versagen der Probe an Kopfzugprüfkörpern durchgeführt wurden, ist die erste Schädigung im Eckbereich der Probe aufgetreten. Im Folgenden soll daher anhand der FE-Berechnungen mit den validierten Werkstoffmodellen (vgl. auch Kapitel 6.3) der Verformungszustand sowie der Energiezustand im geklebten und vor allem im Eck-

bereich der Probe näher betrachtet werden. Abbildung 7.19 zeigt den betrachteten Bereich der Probe.

Abbildung 7.21 zeigt den Verlauf der wahren Dehnungen entlang des in Abbildung 7.19 dargestellten Pfades. Dargestellt sind die Normal- und Schubdehnungen bei einer globalen Verformung von 50 %.

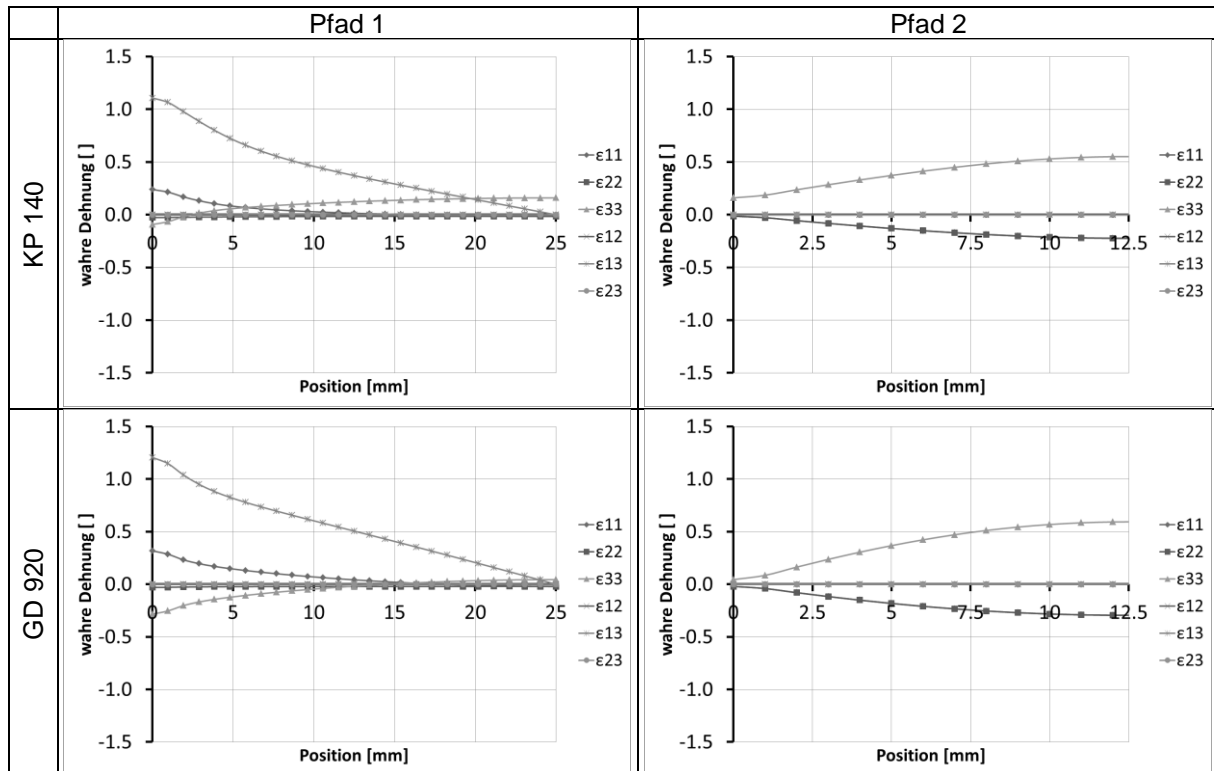


Abbildung 7.21 Verlauf der wahren Dehnungen in einer Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1 bei einer globalen Dehnung von 50 %

Beide Klebstoffe zeigen einen qualitativ gleichen Verlauf der wahren Dehnungskomponenten. Es sind lediglich minimale Unterschiede zu erkennen. Aufgrund der Rotationssymmetrie der Kopfzugprobe sind entlang des betrachteten Pfades lediglich die Dehnungskomponenten ϵ_{11} und ϵ_{33} in Normalrichtung sowie die Schubdehnung ϵ_{13} in deren Ebene relevant. Im Randbereich zeigen die Dehnungskomponenten ϵ_{11} und ϵ_{13} beim Klebstoff GD 920 geringfügig größere Werte. Die Dehnungskomponente ϵ_{33} verläuft beim Klebstoff GD 920 niedriger und zu größeren Anteilen im Druckverformungsbereich.

7.3.3 Verstreckgrade und Invarianten

Bei Rotation des Koordinatensystems in die jeweiligen Hauptachsen erkennt man Unterschiede im Verformungszustand der beiden Klebstoffe. Abbildung 7.22 zeigt die Hauptverstreckgrade für das Verformungsverhalten beider Klebstoffe entlang des o.g. Pfades. Dabei

steht im Folgenden der Index 1 für die größte, der Index 2 für die mittlere und Index 3 für die kleinste Hauptverstreckung.

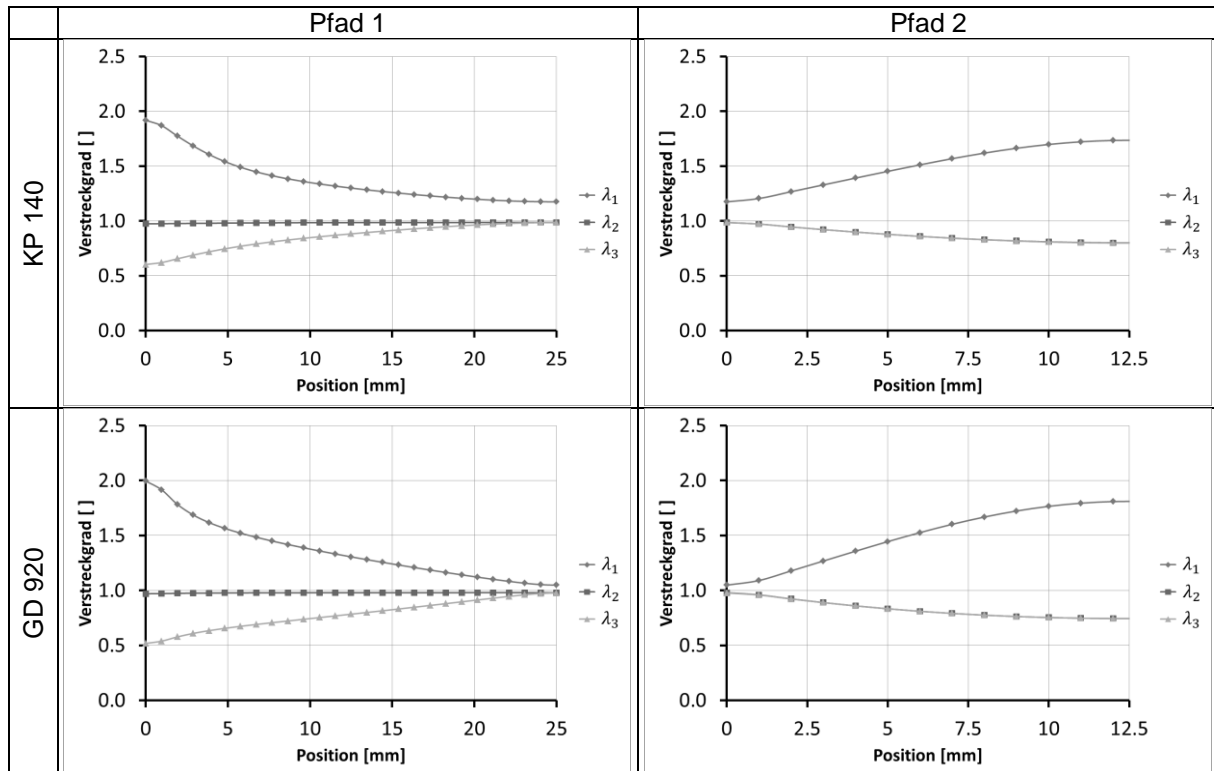


Abbildung 7.22 Verlauf der Hauptverstreckgrade in einer Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1 bei einer globalen Dehnung von 50 %

Während der Verformungszustand im Eckbereich der Probe (Pfad 1, Pos 0) bei beiden Klebstoffen nahezu identisch ist zeigt sich in der Mitte des geklebten Bereiches deutliche Unterschiede (Pfad 1, Pos. 25 bzw. Pfad 2, Pos. 0). Der Klebstoff GD 920 zeigt hier nahezu keine Verformung, während beim Klebstoff KP 140 hier eine einachsige Verformung mit Querdehnungsbehinderung zeigt. Hier zeigen sich deutlich die Unterschiede in den volumetrischen Werkstoffeigenschaften der beiden Klebstoffe. In der Mitte der Probe (Pfad 2, Pos 12.5) sind die Verformungen beim Klebstoff GD 920, aufgrund der kleineren Dehnungen im Randbereich, größer als bei KP 140.

Die Unterschiede im Querdehnungsverhalten werden auch bei Betrachtung der deviatorischen Invarianten des Verstreckgradtensors und des Volumenverhältnisses deutlich. Diese sind in Abbildung 7.23 dargestellt.

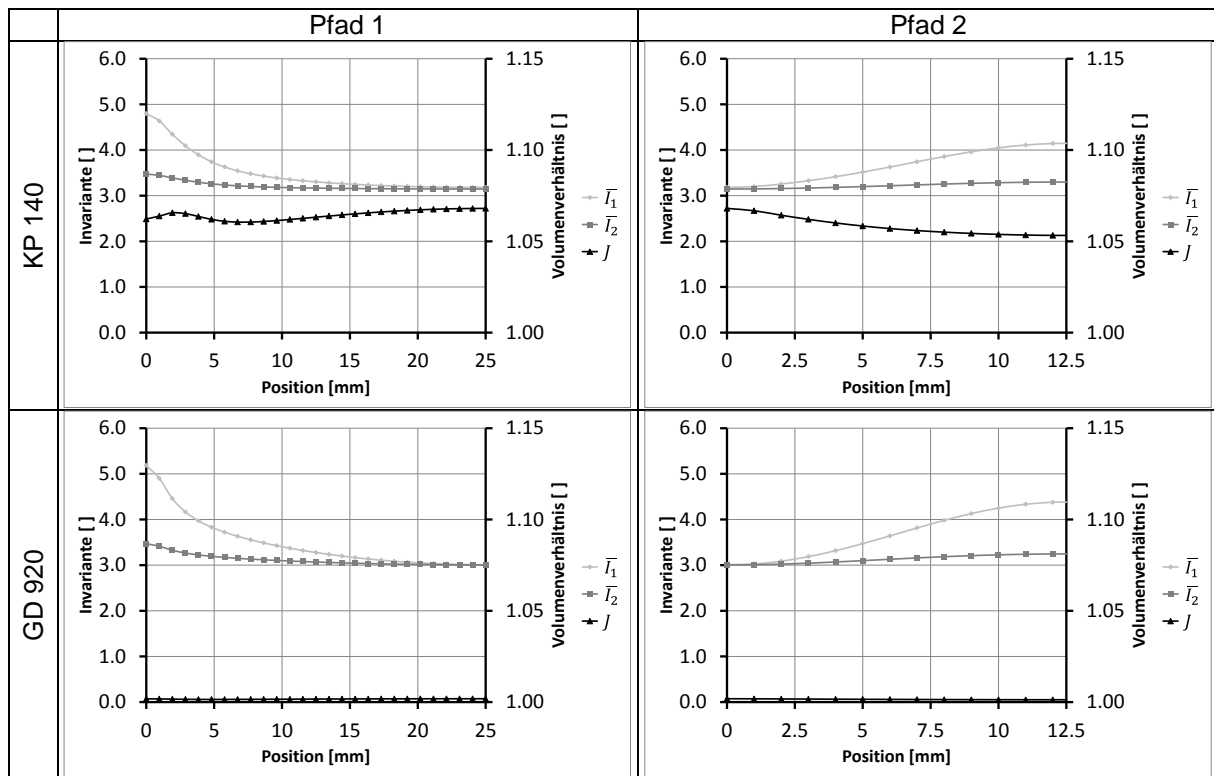


Abbildung 7.23 Deviatorischer Anteil der ersten beiden Invarianten und Volumenverhältnis in einer Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1 bei einer globalen Dehnung von 50 %

Vor allem bei der Betrachtung des volumetrischen Verformungsanteils fällt ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Klebstoffen auf. Der volumetrische Verformungsanteil ist beim Klebstoff KP 140 aufgrund seiner kleineren Poissonzahl signifikant größer. Das Volumen des Klebstoffes hat sich, im hier betrachteten Bereich, um 6.4 % vergrößert, während die mittlere Volumenvergrößerung beim Klebstoff GD 920 bei gleicher globaler Dehnung lediglich ca. 0.1 % beträgt. Der qualitative Verlauf der Invarianten entlang des betrachteten Pfades ist bei beiden Klebstoffen gleich.

7.3.4 Formänderungsenergiedichte im Bereich der ersten erkennbaren Schädigung

Um das Eintreten einer Schädigung zu beschreiben, ist eine skalare Größe notwendig. Im Folgenden soll daher die Formänderungsenergiedichte in dem Bereich näher untersucht werden, in dem die ersten Schädigungen des Klebstoffes auftreten (vgl. Kapitel 7.1).

Aus den Werkstoffgesetzen aus Kapitel 5 lässt sich die Formänderungsenergiedichte für jeden Punkt entlang des betrachteten Pfades berechnen. Sie ist die maßgebliche Größe zur Berechnung der Spannung (vgl. Kapitel 2.3) und eine skalare Größe. In Abbildung 7.24 ist der Verlauf der Formänderungsenergiedichte für beide Klebstoffe dargestellt. Die globale Verformung entspricht dabei dem Zustand, zu dem die ersten Schädigungen im Werkstoff erkannt werden konnten (vgl. Kapitel 7.1).

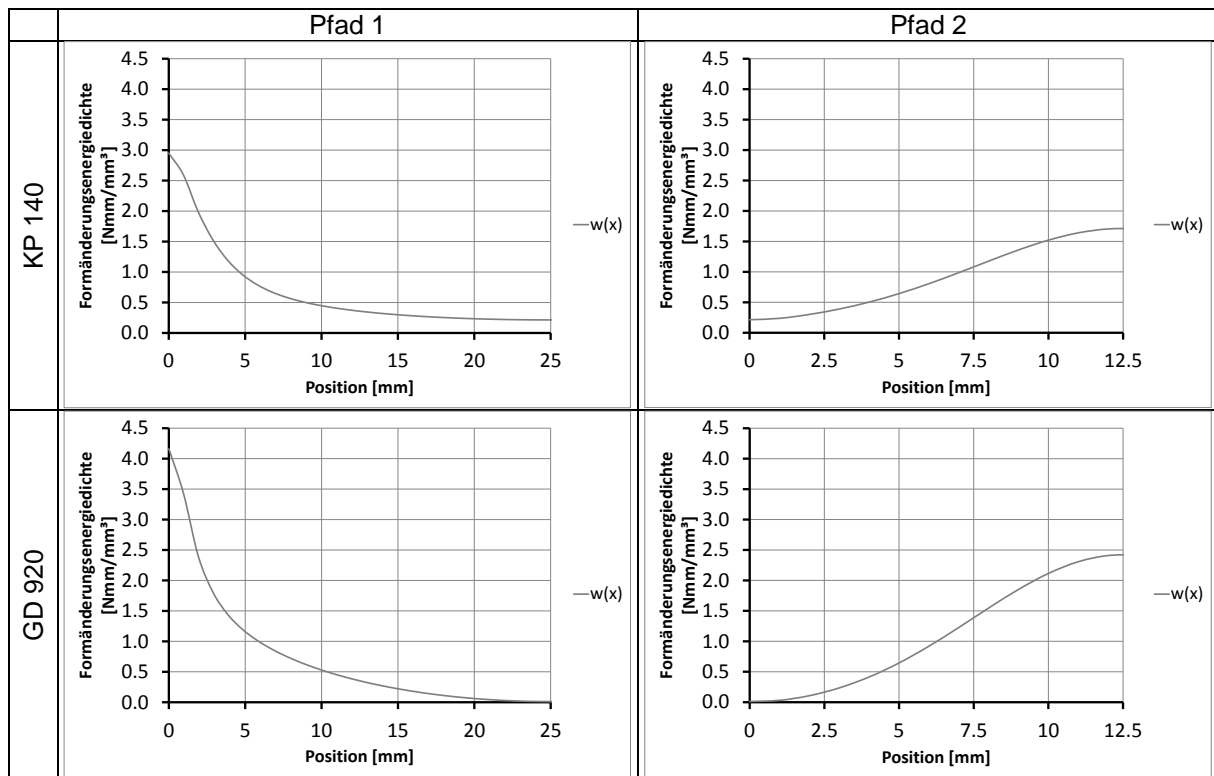


Abbildung 7.24 Verlauf der berechneten Formänderungsenergiegedichte in der Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1; globale Dehnungen $\epsilon_{KP\ 140} = 100\ %$ und $\epsilon_{GD\ 920} = 80\ %$

Abbildung 7.24 zeigt, dass beide Klebstoffe zum Zeitpunkt des ersten Versagens einen qualitativ gleichen Verlauf aber deutlich unterschiedlich große Energiedichten aufweisen. Die Formänderungsenergiegedichte erreicht außerdem für beide Klebstoffe ein Maximum an dem Punkt, an dem die erste Schädigung beobachtet wurde (vgl. Kapitel 7.1). Sie kommt daher sowohl als Beurteilungsgröße für das Auftreten von Schädigung im Werkstoff als auch als Grenze für den Gültigkeitsbereich des Werkstoffmodells in Betracht.

7.4 Beurteilung der Untersuchungen zum Grenzbereich der Beanspruchbarkeit

Die Untersuchungen zum Schädigungsverhalten der Klebstoffe zeigen, dass bei beiden Klebstoffen im Kopfzugversuch (Geometrieverhältnis 2:1) bereits unterhalb von 100 % globaler Dehnung die ersten Mikrodefekte auftreten. Der Klebstoff GD 920 zeigt bereits unter 80 % globaler Dehnung die ersten Anzeichen von Schädigung. Im Kraft-Weg-Verlauf sind Schädigungen erst deutlich später zu erkennen. Dennoch ist davon auszugehen, dass das mechanische Verhalten der Klebstoffe im Bereich jenseits des Auftretens erster Schädigung von dieser beeinflusst wird (vgl. Kapitel 7.1). In Kapitel 7.2 wurde gezeigt, dass die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Werkstoffmodelle (vgl. Kapitel 5) bis zu diesem Bereich sinnvolle Ergebnisse liefern.

Anhand dieser Werkstoffmodelle konnten im Belastungsbereich, in dem die erste Schädigung makroskopisch zu erkennen ist, Untersuchungen zu den Beanspruchungszuständen durchgeführt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Vergleichsspannung nach von Mises keine geeignete Größe ist, um das Auftreten der ersten Schädigung zu beschreiben, was vor allem darin begründet liegt, dass bei diesem Ansatz hydrostatische Spannungszustände nicht berücksichtigt werden. Gerade in geklebten Fugen, die durch ihre Adhäsion zu den in der Regel deutlich steiferen Fügepartnern stark in ihrer Querdehnung behindert sind, fallen die volumetrischen Verformungs- und Spannungszustände stark ins Gewicht.

Als sinnvolles Beurteilungskriterium hat sich, in den hier durchgeführten Untersuchungen, die Formänderungsenergiedichte erwiesen (vgl. Kapitel 7.3.3 und 7.3.4). Die Formänderungsenergiedichte hat dabei den Vorteil, dass sie als skalare Größe, im Gegensatz zu den Invarianten des Verstreckgradtensors, eine eindeutige Entscheidungsbasis bietet. Diese Größe ist also geeignet, um zu beurteilen, bis zu welchem Verformungsbereich die Simulation einer beliebigen Klebfugengeometrie sinnvolle Ergebnisse liefert und ab wann mit Schädigungen im Werkstoff gerechnet werden muss.

Um das mechanische Verhalten einer geklebten Fuge jenseits des Eintretens der ersten makroskopisch erkennbaren Schädigung zu beschreiben, ist es notwendig, ein Modell für die Schädigung des Klebstoffes zu entwickeln. Grundsätzlich ist es denkbar, ein Versagenskriterium anhand der Formänderungsenergiedichte für die betrachteten Klebstoffe zu definieren. Entsprechende Werkstoffmodelle sind in der Literatur bereits von [101], in der jüngeren Vergangenheit aber auch beispielsweise von [102–104] beschrieben worden (vgl. auch [105]). Hierzu wären allerdings weitere Untersuchungen notwendig.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Nachfrage nach zuverlässigen Berechnungsmethoden für elastische Klebverbindungen ist in den letzten Jahren immer mehr gestiegen (vgl. Kapitel 1). Ziel dieser Arbeit ist es, anhand von geeigneten Versuchen das mechanische Werkstoffverhalten von elastischen Klebverbindungen zu charakterisieren und mit Hilfe von geeigneten Werkstoffmodellen abzubilden. Darauf aufbauend sollen dann die Grenzen der Beanspruchbarkeit dieser Klebverbindungen beurteilt werden.

Die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Klebstoffe sind nichtlinear und abhängig von der Belastungsart, der Belastungsgeschwindigkeit, der Belastungshistorie und der Temperatur. Um die Zahl der Einflussgrößen zu verkleinern, wurden die Klebstoffe bei Raumtemperatur und bei konstanter Belastungsgeschwindigkeit betrachtet. Außerdem wurden die Klebstoffe zunächst in einem Bereich untersucht, in dem Schädigung, z. B. das Auftreten von Rissen, keine Rolle spielt. Die Abhängigkeit des Werkstoffverhaltens von Zeit und Temperatur wurde im Rahmen von DMTA-Untersuchungen bewertet, allerdings nicht umfänglich untersucht. Im Rahmen dieser Untersuchungen (vgl. Kapitel 4) wurde festgestellt, dass die Abhängigkeit von Zeit und Temperatur im betrachteten Bereich relativ klein ist, verglichen mit den Temperaturbereichen des Glasübergangs. Um die Abhängigkeit der Klebstoffeigenschaften von der Belastungsart und -historie bewerten zu können, wurde das Spannungs-Dehnungs-Verhalten in drei unterschiedlichen Versuchen in aufeinanderfolgenden Belastungszyklen mittels berührungsloser Messtechnik gemessen. Das Werkstoffverhalten wurde in den drei Belastungsarten Zug-, Druck- und Zugscher untersucht. Als Maß für die Belastungsgeschwindigkeit wurde der Energieeintrag in das Klebstoffvolumen gewählt. Die Dehnraten für die Versuche mit unterschiedlichen Belastungsarten wurden also so bestimmt, dass sich für jede Belastungsart ein gleicher Energieeintrag je Volumen und Zeiteinheit ergibt. Zusätzlich wurden Kopfzugversuche mit großer Klebschichtdicke durchgeführt um anhand der dort auftretenden mehrachsigen Spannungszustände die Werkstoffgesetze validieren zu können.

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche wurden Kennwerte für mehrere Green'sche Werkstoffgesetze bestimmt (vgl. Kapitel 5). Zur Identifikation dieser Kennwerte wurde die Abweichung zwischen Versuch und Experiment iterativ minimiert. Für die Kalibrierung der Werkstoffgesetze wurden dabei zunächst der deviatorische und der volumetrische Verformungsanteil getrennt betrachtet (vgl. Kapitel 3.4.1 und 5.1.1). Diese Methode wird häufig in gängiger FE-Software angewandt. Auf Grundlage dieser Abweichung wurde dann für jeden Klebstoff ein Werkstoffgesetz ausgewählt, das die mechanischen Eigenschaften am besten beschreibt. Die ausgewählten Werkstoffgesetze wurden im Folgenden anhand von Berech-

nungen mit Volumenelementen weiter verbessert (vgl. Kapitel 3.4.2 und 5.1.2). Entscheidend ist dabei, dass durch die Berücksichtigung des Querdehnungsverhaltens auch der volumetrische Verformungsanteil besser abgebildet werden konnte. Dies hat vor allem für den Klebstoff KP 140, der eine Poissonzahl von ca. 0.45 und damit deutlich < 0.5 hat, einen signifikanten Einfluss.

Die ermittelten Werkstoffkennwerte wurden anhand von Kopfzugversuchen mit unterschiedlichen Geometrieverhältnissen, die ein Vielzahl von unterschiedlichen Verformungszuständen in Abhängigkeit von der Position in der Probe zeigen, überprüft (vgl. Kapitel 6). Dazu wurde der mittels numerischer Simulation ermittelte Kraft-Weg-Verlauf mit den Ergebnissen aus dem Experiment verglichen und bewertet. Außerdem wurde das berechnete Verformungsverhalten an der Oberfläche der Probe anhand von ortsaufgelösten Messungen überprüft. Die berechneten Kraft-Weg-Verläufe aller untersuchten Geometrieverhältnisse liegen innerhalb der Versuchsstreuung. Auch das Verformungsverhalten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Experiment. Die ausgewählten Werkstoffgesetze und die dazu ermittelten Kennwerte sind also im betrachteten Bereich für die Berechnung von mehrachsigen Spannungszuständen geeignet.

Aufbauend auf den vorgenannten Ergebnissen wurden die Grenzen der Beanspruchbarkeit der betrachteten Klebstoffe untersucht (vgl. Kapitel 7). Dazu wurde an Kopfzugproben zunächst der Punkt im Klebstoffvolumen bestimmt, an dem die erste Schädigung des Klebstoffes auftritt und die Rissausbreitung sowie das mechanische Verhalten nach Entstehung der ersten Schädigung charakterisiert. Darauf aufbauend wurde anhand von Versuchen, bei denen die Proben mehrfach bis in den Grenzbereich belastet wurden, die Rissausbreitung und die Änderung des mechanischen Verhaltens bei mehrfacher Belastung in diesem Bereich untersucht. Zur Charakterisierung des Schädigungsverhaltens wurde bei diesen Untersuchungen die eingebrachte Energie verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass in der untersuchten Probengeometrie (Kopfzugprobe) relativ früh, und damit deutlich vor dem Totalversagen, erste Schädigungen auftreten. Bis zu diesem Punkt zeigen die Simulationsergebnisse eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Dies bedeutet, um den Spannungs-Dehnungsverlauf der untersuchten Klebstoffe bis zum totalen Versagen der Probe bzw. der Klebfuge beschreiben zu können, ist daher ein Werkstoffmodell, das das Schädigungsverhalten elastomerer Werkstoffe abbilden kann, notwendig. Die Untersuchungen zur eingebrachten Energie zeigen, dass die Formänderungsenergiedichte eine geeignete Größe ist um das Eintreten von Schädigung bei diesen Werkstoffen zu beschreiben. Zu diesem Thema wären weitere Forschungen denkbar. Denkbar wäre außerdem für jeden Klebstoff anhand der Normproben eine maximale Formänderungsenergiedichte zu definieren um den Grenzzustand der Beanspruchbarkeit für mehrachsige Spannungszustände zu definieren.

Die in dieser Arbeit angewendeten Methoden haben sich als geeignet erwiesen, das Werkstoffverhalten der untersuchten Klebstoffe bei konstantem Energieeintrag und konstanter Temperatur zu beschreiben. Da der hydrostatische Verformungsanteil gerade für Klebfugen, die stark in ihrer Querkontraktion behindert sind, einen großen Einfluss hat, wäre zur weiteren Verbesserung der Werkstoffgesetze ein Versuch unter hydrostatischen Belastungsbedingungen, wie er beispielsweise in [94, 106] beschrieben ist, als weiterer Versuch für die Identifizierung von Werkstoffkennwerten sinnvoll. Die Versuchsführung ist bei diesen Versuchen allerdings schwierig [106].

Ein Werkstoffmodell, das die Effekte Temperatur und Zeit berücksichtigt, bedarf weiterer Versuche im gewünschten Bereich. Grundsätzlich bietet moderne FE-Software auch die Möglichkeit mehrere Werkstoffgesetze in Abhängigkeit von der Temperatur zu definieren. Zwischen den gewählten Temperaturpunkten werden dann die Werkstoffeigenschaften durch lineare Interpolation ermittelt [28, 94]. Denkbar wäre auch ein Werkstoffgesetz basierend auf dem Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip [11, 17] unter Verwendung der WLF- [107] oder Arrhenius-Gleichung [108], zu definieren (vgl. auch [109]). Die notwendigen numerischen Ansätze sind teilweise bereits in moderner FE-Software vorhanden [28, 72] und die benötigten Werkstoffkonstanten könnten beispielsweise mit Hilfe von DMTA-Untersuchungen ermittelt werden. Ob sich dieses Prinzip auf die hier vorliegenden mehrphasigen Systeme anwenden lässt ist allerdings fraglich [110]. Außerdem kämen möglicherweise Werkstoffgesetze in Frage, die in der Lage sind, zumindest Teile des zeitabhängigen Verhaltens abzubilden [111, 112].

Mit den im Rahmen dieser Arbeit ausgewählten Versuchen konnten Werkstoffmodelle kalibriert werden, die das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der betrachteten Klebstoffe sehr gut abbilden. Um das Werkstoffverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten abbilden zu können, sind diese Modelle, ohne entsprechende Erweiterung, allerdings nicht geeignet. Dennoch können anhand dieser Vorgehensweise Kennwerte für Werkstoffmodelle, die zur Berechnung von Lastfällen bis zum Eintreten der ersten makroskopisch erkennbaren Schädigung geeignet sind und bei denen Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit bekannt sind gefunden und der Grenzzustand der Beanspruchbarkeit bewertet werden.

9 Literatur

- [1] D. Klempler, Sendijarevic V., *Handbook of polymeric foams and foam technology*, 2nd ed., Hanser, Munich **2004**.
- [2] R. Leppkes, *Polyurethane: Ein vielseitiger Spezialkunststoff*, 6th ed., Die Bibliothek der Technik, Bd. 91, Süddt. Verl. onpact, München **2012**.
- [3] H. Mensen, *Handbuch der Luftfahrt*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2013**.
- [4] K. Witte, *Sportgerätetechnik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2013**.
- [5] H. Lohse, in *Internationale AVK-Tagung: Tagungsband* **2010**.
- [6] *Adhäsion Kleben & Dichten* **2001**, 45, 32.
- [7] H. Baaser, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* **2010** (Ausgabe 05/2010), 364.
- [8] H. E. Friedrich, *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden **2013**.
- [9] E. Hoepke, W. Appel, *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen Systeme Komponenten ; mit 35 Tabellen*, 7th ed., ATZ-MTZ Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden **2013**.
- [10] M. Pröbster, *Baudichtstoffe*, Vieweg+Teubner, Wiesbaden **2011**.
- [11] W. Brockmann, P. L. Geiß, J. Klingen, B. K. Schröder, *Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren*, Wiley-VCH, Weinheim **2005**.
- [12] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 6th ed., Springer **2008**.
- [13] EOTA European Organisation for Technical Approvals, *ETAG No.2 Guideline for European Technical Approval for Structural Sealant Glazing Systems*, Brüssel **1998**.
- [14] A. Hagl, *Experimental and Numerical Analysis of Edge Seal Spacers of Insulated Glass Units for Structural Sealant Glazing Applications*, Challenging Glass 3 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft **2012**.
- [15] Ö. Bucak, A. Hagl, B. Held, M. Bues, *Geklebte Verbindungen im konstruktiven Ingenieurbau: abgeschlossenes AiF Projekt Nr. 17040255*, Köln **2007**.
- [16] Ö. Bucak, A. Hagl, *Stahlbau* **2006**, 75 (6), 499.
- [17] P. L. Geiß, in *Handbook of Adhesion Technology*, Vol. 2 (Eds: L. F. M. d. Silva, A. Öchsner, R. D. Adams), Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg **2011**.

-
- [18] G. Habenicht, *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie*, 6th ed., Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden **2012**.
- [19] P. Eyerer, P. Elsner, T. Hirth, *Polymer Engineering: Technologien und Praxis*, VDI-Buch, Springer, Berlin, Heidelberg **2008**.
- [20] G. A. Holzapfel, *Nonlinear solid mechanics. a continuum approach for engineering*, Wiley, Chichester, Weinheim u.a **2010**.
- [21] M. Stommel, M. Stojek, W. Korte, *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*, 1st ed., Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l **2011**.
- [22] P. Wriggers, *Nonlinear Finite Element Methods*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2008**.
- [23] R. Hooke, J. Martyn, *Lectiones Cutlerianae, Or a Collection of Lectures: Physical, mechanical, Geographical & Astronomical, Made Before the Royal Society on Several Occasions ... to which are Added Divers Miscellaneous Discourses*, John Martyn printer **1679**.
- [24] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer, T. Hirth, *DOMININGHAUS - Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen (VDI-Buch) (German Edition)*, 7th ed., VDI-Buch, Springer, Dordrecht **2008**.
- [25] L. R. G. Treloar, *The physics of rubber elasticity*, 3rd ed., Monographs on the physics and chemistry of materials, Clarendon Press, Oxford **1975**.
- [26] L. Mullins, *Softening of rubber by deformation*, Rubber chemistry and technology, vol. 42, no. 1 (Feb.1969), Rubber Division, American Chemical Society, Akron, Ohio **1969**.
- [27] J. A. Harwood, L. Mullins, A. R. Payne, *Journal of Applied Polymer Science* **1965**, 9; Jg. 1965 (9), 3011-&.
- [28] *Abaqus Analysis User's Manual: Version 6.13*, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA **2012**.
- [29] W. V. Mars, *Tire Science and Technology* **2004**, 32 (3), 120.
- [30] R. W. Ogden, *Non-linear elastic deformations*, Dover books on physics, Dover, Mineola, NY **1997**.
- [31] M. F. Beatty, *Journal of elasticity and the physical science of solids* **2000**, 59 (1-3), 369.
- [32] F. Beatty, S. Krishnaswamy, *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP* **2000**, 51 (6), 984.

-
- [33] M. Presser, Entwicklung einer Methodik zur mechanischen Analyse der grenzschichtbeeinflussten Polymereigenschaften in Klebverbunden mit Epoxidharzklebstoffen, *Dissertation*, TU Kaiserslautern **2011**.
- [34] P. L. Geiß, *Klebtechnik: Skript zur Vorlesung*, Kaiserslautern **2010**.
- [35] G. Ehrenstein, *Polymer-Werkstoffe: Struktur; Eigenschaften; Anwendung*, 3rd ed., Hanser Verlag, München **2011**.
- [36] G. Abts, *Einführung in die Kautschuktechnologie*, Hanser, München **2007**.
- [37] V. L. Popov, *Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebedynamik*, 2nd ed., Springer-Verlag, s.l **2010**.
- [38] H. Altenbach, *Kontinuumsmechanik: Einführung in die materialunabhängigen und materialabhängigen Gleichungen*, 2nd ed., Springer Vieweg, Berlin **2012**.
- [39] M.-C. Vöhringer, *Prüfung und Beschreibung des mehrachsigen mechanischen Verhaltens von Elastomeren für die Finite-Elemente-Methode*, 1st ed., IKV-Berichte aus der Kunststoffverarbeitung, Vol. 199, Verl.-Gruppe Mainz, Aachen **2009**.
- [40] H. Hencky, *Zeitschrift für technische Physik* **1928**, 9, 215.
- [41] A. Acharya, *Journal of Elasticity* **1999**, 56 (2), 95.
- [42] M. Stojek, W. Korte, M. Stommel, *FEM zur mechanischen Auslegung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*, Ingenieur-Werkstoffe, Springer-VDI, Berlin **1998**.
- [43] D. Gross, W. Hauger, P. Wriggers, *Technische Mechanik 4: Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden*, 8th ed., Springer-Lehrbuch, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2011**.
- [44] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder, W. A. Wall, *Technische Mechanik 2: Elastostatik*, 11th ed., Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin **2012**.
- [45] J. Arghavani, F. Auricchio, R. Naghdabadi, *International Journal of Plasticity* **2011**, 27 (6), 940.
- [46] O. Klapp, *Mechanisches Verhalten elastomerer Klebeverbindungen*, Kassel Univ. Press, Kassel **2003**.
- [47] R. S. Rivlin, J. L. Ericksen, *Archives of Mechanics* **1955** (4), 323.
- [48] Bayer MaterialScience AG, *Thermoplastic Polyurethanes: Innovative Materialeigenschaften* **2013**.
- [49] R. Weiß, E. Osen, H. Baaser, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* **2010** (Volume 103, Issue 3,), 242.

-
- [50] K. Kollmann, E. F. Göbel, *Gummifedern*, Vol. 7, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **1969**.
- [51] E. F. Göbel, *Gummifedern*, Vol. 7, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **1945**.
- [52] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannisch, J. Voßiek, *Normung, Berechnung, Gestaltung: Mit 76 vollständig durchgerechneten Beispielen.*, 21st ed. **2013**.
- [53] H. Dubbel, K.-H. Grote, *Taschenbuch für den Maschinenbau: Mit Tabellen*, 23rd ed., Springer, Berlin **2011**.
- [54] P. Haupt, Viskoelastizität inkompressibler isotroper Stoffe: Approximation der allgemeinen Materialgleichung und Anwendungen, *Dissertation*, Technische Universität Berlin **1971**.
- [55] R. W. Ogden, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **1972**, 326 (1567), 565.
- [56] G. Silber, F. Steinwender, *Bauteilberechnung und Optimierung mit der FEM: Materialtheorie, Anwendungen, Beispiele ; mit 5 Tabellen und zahlreichen Beispielen*, 1st ed., Lehrbuch Maschinenbau, Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden **2005**.
- [57] E. M. Arruda, M. C. Boyce, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **1993**, 41 (2), 389.
- [58] R. S. Rivlin, D. W. Saunders, *Large elastic deformations of isotropic materials VII: Experiments of the deformation of rubber*, Royal Society Philosophical Transactions, Vol. 243, s.n., [S.I **1951**.
- [59] M. Mooney, *J. Appl. Phys.* **1940**, 11 (9), 582.
- [60] R. S. Rivlin, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **1948**, 241 (835), 379.
- [61] O. H. Yeoh, *Rubber Chemistry and Technology* **1993**, 66 (5), 754.
- [62] A. N. Gent, *Engineering with rubber: How to design rubber components*, 3rd ed., Hanser-Verl; Hanser Publications, München, Cincinnati, Ohio **2012**.
- [63] C. W. Macosko, *Rheology: Principles, measurements, and applications*, Advances in interfacial engineering series, VCH, New York, NY **1994**.
- [64] C. F. Gauß, *Theoria Motus Corporum Coelestium in sectionibus conicis solem ambientium: Theorie der Bewegung der Himmelskörper, welche in Kegelschnitten die Sonne umlaufen*, Hannover **1865**.
- [65] A. M. Legendre, *Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes*, F. Didot, Paris **1805**.

-
- [66] M. Stommel, Beschreibung der viskoelastischen mechanischen Eigenschaften, der Betriebsfestigkeit und des Bruchverhaltens von Elastomerbauteilen mit der Finite-Elemente-Methode, *Dissertation*, RWTH Aachen **1999**.
- [67] A. Grambow, Bestimmung der Materialparameter gefüllter Elastomere in Abhängigkeit von Zeit, Temperatur und Beanspruchungszustand, *Dissertation*, RWTH Aachen **2002**.
- [68] M. C. Boyce, E. M. Arruda, *Rubber Chemistry and Technology* **2000**, 73 (3), 504.
- [69] J. A. Harwood, A. R. Payne, *Journal of Applied Polymer Science* **1966**, 10; Jg. 1966 (2), 315.
- [70] R. Ogden, D. Roxburgh, *Proceedings of the Royal Society of London* **1999**, 1999 (1988), 2861.
- [71] ANSYS, Inc., *ANSYS Workbench User's Guide*, Canonsburg **2009**.
- [72] MSC.Software Corporation, *Marc 2008 r1: User's Guide*, Santa Ana **2008**.
- [73] T. Heimes, Finite Thermoelastizität, Univ **2005**.
- [74] H. Qi, M. C. Boyce, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* **2004**, 52 (10), 2187.
- [75] T. Heimes, *Proc. Appl. Math. Mech.* **2005**, 5 (1), 297.
- [76] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Blanker Rundstahl; Maße, zulässige Abweichungen nach ISO-Toleranzfeld h9*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **1981** (DIN 671).
- [77] *Stahlschlüssel-Taschenbuch: Wissenswertes über Stähle*, 20th ed., Verl. Stahlschlüssel Wegst, Marbach/N **2004**.
- [78] Kömmerling Chemische Fabrik GmbH, *Körapur 140 - Elastischer, feuchtigkeitsvernetzender Einkomponenten-Klebstoff für grundierete und lackierte Metalle, Aluminium, Holzwerkstoffe und Duroplaste (Produktinformation)*, Pirmasens **2002**.
- [79] Kömmerling Chemische Fabrik GmbH, *Isolierglas-Dichtstoff GD 920: Spezial-Dichtstoff (Sekundärversiegelung) zur Herstellung von Isolierglas - Produktinformation*, Pirmasens **2011**.
- [80] H. Hofmann, J. Spindler, *Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik: Grundlagen - Vorbehandlung - Oberflächenreaktionen - Schichtabscheidung - Strukturierung - Prüfung ; mit 94 Tabellen und zahlreichen Beispielen*, 2nd ed., Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl, München **2010**.
- [81] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Werkstoffprüfmaschinen - Allgemeines zu Anforderungen an Werkstoffprüfmaschinen und zu deren Prüfung und Kalibrierung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2003**, 19.060 (DIN 51220).

-
- [82] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen - Entwurf*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2010**, 83.080.01 (DIN EN ISO 527-2).
- [83] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2010**, 83.080.01 (DIN EN ISO 527-1).
- [84] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Füge-teile*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2011**, 83.180 (DIN EN 14869-2).
- [85] O. Mohr, *Abhandlungen aus dem Gebiete der technischen Mechanik: Mit 491 Textabb*, 2nd ed., Ernst, Berlin **1914**.
- [86] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder, W. A. Wall, *Technische Mechanik 1: Statik*, Springer **2011**.
- [87] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer, H. Käß, *Physik für Ingenieure: Mit 116 Tabellen und 2 Falltafeln*, 11th ed., Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin **2012**.
- [88] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Bestimmung der Druckeigenschaften*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2003**, 83.080.01 (DIN EN ISO 604).
- [89] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung des Druckverformungs-Verhaltens*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2006**, 83.060 (DIN ISO 7743).
- [90] H.-J. Bargel, G. Schulze, *Werkstoffkunde: Mit 85 Tabellen*, 9th ed., VDI-Buch, Springer, Berlin, Heidelberg **2005**.
- [91] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe – Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundlagen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2011**, 83.080.01 (DIN EN ISO 6721-1).
- [92] S. Hartmann, *Acta Mechanica* **2001**, 148 (1-4), 129.
- [93] S. Hartmann, *International Journal of Solids and Structures* **2001**, 38 (44-45), 7999.
- [94] *Abaqus Theory Manual: Version 6.13*, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA **2012**.
- [95] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin **2012**, 83.080.01 (DIN EN ISO 527-2).

-
- [96] W. Wittwer, *Kömmerling Chemische Fabrik GmbH (Zweibrücker Straße 200, 66954 Pirmasens), persönliches Gespräch, Pirmasens 2013.*
- [97] R. v. Mises, *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse 1913*, 1913, 582.
- [98] J. Betten, *Finite Elemente für Ingenieure*, Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, Heidelberg u.a.
- [99] K.-J. Bathe, *Finite-Elemente-Methoden*, 2nd ed., Springer, Berlin **2002**.
- [100] J. Wissmann, K.-D. Sarnes, *Finite Elemente in der Strukturmechanik: Mit 11 Tabellen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2006**.
- [101] E. Beltrami, *Nuovo Cim* **1885**, 18 (1), 145.
- [102] G. Sih, B. Macdonald, *Engineering Fracture Mechanics* **1974**, 6 (2), 361.
- [103] M. Kipp, G. Sih, *International Journal of Solids and Structures* **1975**, 11 (2), 153.
- [104] G. Sih, *Engineering Fracture Mechanics* **1973**, 5 (2), 365.
- [105] D. Gross, T. Seelig, *Bruchmechanik: Mit einer Einführung in die Mikromechanik*, 5th ed., Springer, Heidelberg **2011**.
- [106] L. Crocker, B. Duncan, *Measurement Methods for Obtaining Volumetric Coefficients for Hyperelastic Modelling of Flexible Adhesives*, NPL report, National Physical Laboratory, Great Britain, Centre for Materials Measurement and Technology **2001**.
- [107] M. L. Williams, R. F. Landel, J. D. Ferry, *J. Am. Chem. Soc.* **1955**, 77 (14), 3701.
- [108] S. Arrhenius, *Zeitschrift für Physikalische Chemie* **1889**, 4, 226.
- [109] W. Wittwer, T. Schwarz, in *COST Action TU0905 Mid-term Conference on Structural Glass: Proceedings of COST Action TU0905 Mid-term Conference on Structural Glass, Poreč, Croatia, 18-19 April 2013* (Eds: C. Louter, D. Mocibob, J. Belis), CRC Press, Boca Raton **2013**.
- [110] W. Wittwer, *Kömmerling Chemische Fabrik GmbH (Zweibrücker Straße 200, 66954 Pirmasens), persönliches Gespräch, Kaiserslautern 2013.*
- [111] J. S. Bergström, *Tire Science and Technology* **2005**, 33; Jg. 2005 (2), 120.
- [112] H. Dal, M. Kaliske, *Computational Mechanics* **2009**, 44 (6), 809.

10 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Hyperelastischer Schubspannungs-Gleitungs-Verlauf.....	3
Abbildung 2.2	Schematische Darstellung des Mullins-Effekts (vgl. [26, 28, 30]).....	4
Abbildung 2.3	Bindungsarten, die einen Beitrag zur Kohäsionsfestigkeit von Klebstoffen leisten [34].....	5
Abbildung 2.4	Schematische Darstellung des Aufbaus polymerer Werkstoffe (vgl. [11, 12, 24, 35]).....	6
Abbildung 2.5	Definition der technischen Dehnung veranschaulicht an einem Stabelement [44].....	8
Abbildung 2.6	Unterschiedliche Dehnungsmaße über dem Verstreckgrad λ [22, 43, 44, 46].....	11
Abbildung 2.7	Vergleich des Querdehnungsverlaufs anhand von technischer und wahrer Dehnung	12
Abbildung 2.8	In Richtung 3 belasteter Körper mit Koordinatensystem zur Beschreibung der Querdehnung	12
Abbildung 2.9	Invarianten Verzerrungsebene für den inkompressiblen Fall mit den Belastungszuständen Zug, Schub und Druck (vgl. [7, 25, 39, 49])	15
Abbildung 2.10	2. Invariante über 1. Invariante des Verstreckgradensors für unterschiedliche Poissonzahlen und Belastungsarten.....	16
Abbildung 3.1	Zugprüfmaschine vom Typ MIDI 20-10/4x10; Hersteller Messphysik Materials Testing GmbH.....	24
Abbildung 3.2	Bildausschnitt einer Zugprobe mit aufgebrachtten Messmarken.....	25
Abbildung 3.3	Abmessungen der Zugprobe vom Typ 1B nach DIN EN ISO 527-2 mit Toleranzangaben [82] (links) und Probe mit aufgebrachtten Messmarken (rechts)	26

Abbildung 3.4	Dicke Zugscherprobe in Anlehnung an DIN EN 14869-2 (Klebschicht bemaßt) [84].....	29
Abbildung 3.5	Klebschicht einer Zugscherprobe mit charakteristischen Größen	30
Abbildung 3.6	Mohr'scher Verzerrungskreis für den Verformungszustand der Zugprobe (links) und der Zugscherprobe (rechts) [85, 86].....	32
Abbildung 3.7	Schematische Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs im Zeitintervall dt (links Zugversuch, rechts Zugscherversuch)	33
Abbildung 3.8	Berechnete Dehnrate für Zugscherversuch über Zugversuch für unterschiedliche Poissonzahlen	35
Abbildung 3.9	Druckprobe in Anlehnung an DIN EN ISO 604 und DIN ISO 7743 [88, 89] (technische Zeichnung links; Bild rechts).....	36
Abbildung 3.10	Verformungsverhalten der uniaxialen Druckprobe bei unterschiedlichen Belastungen in Abhängigkeit von der technischen Dehnung (links minimal, rechts maximal)	37
Abbildung 3.11	Vergleich des Querdehnungsverhaltens zwischen Zug- und Druckversuch (Zugversuch extrapoliert).....	38
Abbildung 3.12	Druckprobe bei 30 % technischer Dehnung verglichen mit FE-Analyse zum Verformungszustand.....	39
Abbildung 3.13	Verformungsverlauf der Druckprobe bei 40 % wahrer Dehnung in radialer Richtung (Pfad in Abbildung rechts; Rand der Probe bei Position 0 mm; Belastungsrichtung: 1)	39
Abbildung 3.14	Verformungsverlauf der Druckprobe bei 20 % wahrer Dehnung in radialer Richtung (Pfad in Abbildung rechts; Rand der Probe bei Position 0 mm; Belastungsrichtung: 1)	40
Abbildung 3.15	Kopfzugprobe mit charakteristischen Größen; Klebstoff grau dargestellt	40
Abbildung 3.16	Verformte Kopfzugprobe mit Messpunkten zur Messung der Verschiebung auf der Oberfläche der Probe	42

Abbildung 3.17	Charakteristische Energiegrößen eines Belastungszyklus dargestellt im Spannungs-Dehnungs-Diagramm	43
Abbildung 3.18	DMTA Prüfvorrichtung vom Typ NETZSCH DMA 242 C	43
Abbildung 3.19	Volumetrischer Verformungsanteil im Zugversuch bei einer Längsdehnung von 100 % in Abhängigkeit von der Poissonzahl.....	47
Abbildung 3.20	Element vom Typ C3D8R (<i>Abaqus</i>) für die Identifikation der Materialkennwerte aus einer FE-Rechnung.....	48
Abbildung 4.1	Wahre Spannung über wahrer Dehnung für den Klebstoff KP 140 (Dehnrates 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)	50
Abbildung 4.2	Wahre Spannung über wahrer Dehnung für den Klebstoff KP 140 (Dehnrates 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)	51
Abbildung 4.3	Wahre Spannung über wahrer Dehnung im einachsigen Druckversuch; Vergleich der Dehnrates für den Klebstoff KP140 (Temperatur T = 23 °C)	52
Abbildung 4.4	Wahre Spannung über wahrer Dehnung für den Klebstoff GD920 (Dehnrates 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)	53
Abbildung 4.5	Wahre Spannung über wahrer Dehnung für den Klebstoff GD920 (Dehnrates 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)	53
Abbildung 4.6	Wahre Spannung über wahrer Dehnung im einachsigen Zugversuch; Vergleich der Dehnrates für den Klebstoff GD 920 (Temperatur T = 23 °C).....	54
Abbildung 4.7	Schubspannung über Gleitung für den Klebstoff KP140 (Dehnrates 17.3 %/min, Temperatur 23 °C)	55
Abbildung 4.8	Schubspannung über Gleitung für den Klebstoff GD 920 (Dehnrates 17.3 %/min; Temperatur 23 °C).....	56
Abbildung 4.9	Eingebrachte Energie über Zeit für den uniaxialen Versuch und Zugscherversuch; Klebstoff KP 140; Dehnrates Zugversuch 10.0 %/min; Dehnrates Zugscherversuch 17,3 %/min.....	58

Abbildung 4.10	Wahre Spannung über wahrer Dehnung und wahre Querdehnung über wahrer Längsdehnung im einachsigen Druckversuch für den Klebstoff KP140 (Dehnrates 1.0 %/min, Temperatur 23 °C).....	59
Abbildung 4.11	Wahre Spannung über wahrer Dehnung und wahre Querdehnung über wahrer Längsdehnung im einachsigen Druckversuch für den Klebstoff KP140 (Dehnrates 10.0 %/min, Temperatur 23 °C).....	60
Abbildung 4.12	Wahre Spannung über wahrer Dehnung im einachsigen Druckversuch; Vergleich der Dehnrates für den Klebstoff KP 140 (Temperatur T = 23 °C)	61
Abbildung 4.13	Wahre Spannung über wahrer Dehnung und wahre Querdehnung über wahrer Längsdehnung im einachsigen Druckversuch für den Klebstoff GD920 (Dehnrates 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)	62
Abbildung 4.14	Wahre Spannung über wahrer Dehnung und wahre Querdehnung über wahrer Längsdehnung im einachsigen Druckversuch für den Klebstoff GD920 (Dehnrates 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)	63
Abbildung 4.15	Wahre Spannung über wahrer Dehnung im einachsigen Druckversuch; Vergleich der Dehnrates für den Klebstoff GD920 (Temperatur T = 23 °C)	64
Abbildung 4.16	Ergebnisse der DMTA-Untersuchungen für den Klebstoff KP 140; Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor $\tan \delta$ über der Temperatur; Heizrate 2,0 K/min; Frequenzen: (1,0; 2,5; 5,0; 10,0; 20,0) Hz	65
Abbildung 4.17	Ergebnisse der DMTA-Untersuchungen für den Klebstoff GD 920; Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor $\tan \delta$ über der Temperatur; Heizrate 2,0 K/min; Frequenzen: (1,0; 2,5; 5,0; 10,0; 20,0) Hz	66
Abbildung 4.18	Vergleich der Nennspannungsverläufe aus Zug-, Zugscher- und Druckversuch für die Klebstoffe KP 140 und GD 920	67
Abbildung 5.1	Wahre Spannung über wahrer Dehnung für alle betrachteten Materialmodelle im Vergleich mit dem Experiment (Test) für uniaxiale Belastung; Klebstoff KP 140.....	68

Abbildung 5.2	Schubspannung-Gleitung für alle betrachteten Materialmodelle im Vergleich mit dem Experiment (Test); Klebstoff KP 140	69
Abbildung 5.3	Mittelwert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus Simulation und Versuch; Zug-, Zug-Scher- und Druck-Versuch; Klebstoff KP 140	69
Abbildung 5.4	Wahre Spannung über wahrer Dehnung für alle betrachteten Materialmodelle im Vergleich mit dem Experiment (Test) für uniaxiale Belastung; Klebstoff GD 920	70
Abbildung 5.5	Schubspannung-Gleitung für alle betrachteten Materialmodelle im Vergleich mit dem Experiment (Test); Klebstoff GD 920.....	71
Abbildung 5.6	Mittelwert des Bestimmtheitsmaßes R^2 aus Simulation und Versuch; Zug-, Zug-Scher- und Druck-Versuch; Klebstoff GD 920.....	71
Abbildung 5.7	Vergleich zwischen Simulation und Experiment für die zur Kennwertermittlung verwendeten Versuchsarten; Klebstoff KP 140	72
Abbildung 5.8	Vergleich zwischen Simulation und Experiment für die zur Kennwertermittlung verwendeten Versuchsarten; Klebstoff GD 920	74
Abbildung 5.9	Vergleich zwischen Simulation und Experiment für die Kennwertermittlung des Mullins-Effekts ohne erste Belastung; Klebstoff KP 140	75
Abbildung 5.10	Vergleich zwischen Simulation und Experiment für die Kennwertermittlung des Mullins-Effekts ohne erste Belastung; Klebstoff GD 920.....	76
Abbildung 5.11	Richtungsabhängigkeit des Mullins-Effekts anhand des Kraft-Weg-Verlaufs einer Kopfzugprobe	78
Abbildung 6.1	Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff KP 140; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 und 2:1 [mm/mm]; Zugbelastung; Temperatur $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min.....	80
Abbildung 6.2	Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff KP 140; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Druckbelastung; Temperatur $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min.....	81

Abbildung 6.3	Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff KP 140; Klebschichtdicke 3 mm; Temperatur $T = 23\text{ °C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min	81
Abbildung 6.4	x-Verschiebungen auf der Oberfläche der Kopfzugprobe; Klebstoff KP 140; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Temperatur $T = 23\text{ °C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min	82
Abbildung 6.5	z-Verschiebungen auf der Oberfläche der Kopfzugprobe; Klebstoff KP 140; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Temperatur $T = 23\text{ °C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min	82
Abbildung 6.6	Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff GD 920; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 und 1:2 [mm/mm]; Zugbelastung; Temperatur $T = 23\text{ °C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min.....	83
Abbildung 6.7	Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff GD 920; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Druckbelastung; Temperatur $T = 23\text{ °C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min.....	83
Abbildung 6.8	Kraft-Weg-Diagramm für Kopfzugversuch; Klebstoff GD 920; Klebschichtdicke 3 mm; Temperatur $T = 23\text{ °C}$; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min	84
Abbildung 6.9	x-Verschiebungen auf der Oberfläche der Kopfzugprobe; Klebstoff GD 920; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Temperatur $T = 23\text{ °C}$	84
Abbildung 6.10	y-Verschiebungen auf der Oberfläche der Kopfzugprobe; Klebstoff GD 920; Durchmesser/Klebschichtdicke: 1:1 [mm/mm]; Temperatur $T = 23\text{ °C}$	85
Abbildung 6.11	FE-Modell zur Berechnung der Kopfzugprobe; mittlere Elementkantenlänge 1 mm; Dargestelltes Geometrieverhältnis: 2:1	86
Abbildung 6.12	Kopfzugprobe KP140; Klebschichtdicke: 50 mm und 25 mm; Zugbeanspruchung; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min.....	86
Abbildung 6.13	Kopfzugprobe KP140; Verschiebungen auf der Oberfläche; Simulation und Versuch; Dehnrates der Ingenieurdehnung 10 %/min.....	87

Abbildung 6.14	Kopfzugprobe KP140; Klebschichtdicke: 50 mm; Druckbeanspruchung; Dehnrate der Ingenieurdehnung 10 %/min	87
Abbildung 6.15	Kopfzugprobe KP140; Klebschichtdicke: 3 mm; Zugbeanspruchung (links) und Druckbeanspruchung (rechts); Simulation	88
Abbildung 6.16	Kopfzugprobe GD920; Klebschichtdicke: 50 mm und 25 mm; Zugbeanspruchung; Dehnrate der Ingenieurdehnung 10 %/min.....	89
Abbildung 6.17	Kopfzugprobe GD920; Verschiebungen auf der Oberfläche; Simulation und Versuch; Dehnrate der Ingenieurdehnung 10 %/min.....	89
Abbildung 6.18	Kopfzugprobe GD920; Klebschichtdicke: 50 mm; Druckbeanspruchung; Dehnrate der Ingenieurdehnung 10 %/min	90
Abbildung 6.19	Kopfzugprobe GD920; Klebschichtdicke: 3 mm; Zugbeanspruchung (links) und Druckbeanspruchung (rechts); Dehnrate der Ingenieurdehnung 10 %/min	90
Abbildung 6.20	Invarianten des Verstreckgradensors und Volumenverhältnis für die Kopfzugprobe mit Geometrieverhältnis 2:1; Werkstoffmodell für den Klebstoff KP 140; 50 % globale Dehnung.....	91
Abbildung 6.21	Invarianten des Verstreckgradensors und Volumenverhältnis für die Kopfzugprobe mit Geometrieverhältnis 2:1; Werkstoffmodell für den Klebstoff KP 140; -25 % globale Dehnung	92
Abbildung 6.22	Invarianten des Verstreckgradensors und Volumenverhältnis für die Kopfzugprobe mit Geometrieverhältnis 2:1; Werkstoffmodell für den Klebstoff GD 920; 50 % globale Dehnung	93
Abbildung 6.23	Invarianten des Verstreckgradensors und Volumenverhältnis für Kopfzugprobe mit Geometrieverhältnis 2:1; Werkstoffmodell für den Klebstoff GD 920; -25 % globale Dehnung.....	94
Abbildung 6.24	Vergleich zwischen linear-elastischer Berechnung und Berechnung mit Green'schen Werkstoffgesetzen.....	95
Abbildung 6.25	Vergleich zwischen linear-elastischer Berechnung und Berechnung mit Green'schen Werkstoffgesetzen; Klebstoff KP 140	96

Abbildung 6.26	Vergleich zwischen linear-elastischer Berechnung und Berechnung mit Green'schen Werkstoffgesetzen; Klebstoff GD 920	96
Abbildung 7.1	Schädigungsverlauf einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff KP 140 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm.....	98
Abbildung 7.2	Erste von außen sichtbare Schädigung an der Kopfzugprobe aus Klebstoff KP 140 bei einer Verschiebung von 20 mm (80 % globale Dehnung)	99
Abbildung 7.3	Exemplarisches Bruchbild einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff KP 140 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm im Zugversuch	99
Abbildung 7.4	Schnitte der Kopfzugproben aus dem Klebstoff KP 140 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm im Zugversuch nach Belastung auf unterschiedliche Verformungsniveaus	100
Abbildung 7.5	Mikroskopaufnahme des ersten Risses einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff KP 140 im Zugversuch nach Belastung auf 60 mm (240 % globale Dehnung).....	101
Abbildung 7.6	Schädigungsverlauf einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm.....	101
Abbildung 7.7	Erste von außen sichtbare Schädigung an der Kopfzugprobe aus Klebstoff GD 920 bei einer Verschiebung von 10 mm (40 % globale Dehnung)	102
Abbildung 7.8	Exemplarisches Bruchbild einer Stirnzugprobe aus dem Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm im Zugversuch	103
Abbildung 7.9	Schnitte der Kopfzugproben aus dem Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm im Zugversuch nach Belastung auf unterschiedliche Verformungsniveaus	104
Abbildung 7.10	Mikroskopaufnahme des ersten Risses einer Kopfzugprobe aus dem Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50$ mm und $d = 25$ mm im Zugversuch nach Belastung auf 25 mm (100 % globale Dehnung).....	105

Abbildung 7.11	Versuchsergebnisse aus Mehrfachbelastungsversuch mit steigendem Lastmaximum an Kopfbzugproben mit Geometrieverhältnis 2:1; Klebstoff KP 140	107
Abbildung 7.12	Versuchsergebnisse aus Mehrfachbelastungsversuch mit steigendem Lastmaximum an Kopfbzugproben mit Geometrieverhältnis 2:1; Klebstoff GD 920.....	107
Abbildung 7.13	Versuchsergebnisse aus Mehrfachbelastungsversuchen im Grenzbereich der Belastbarkeit an Kopfbzugproben mit Geometrieverhältnis 2:1; Klebstoff KP 140.....	109
Abbildung 7.14	Belastungsmaxima des 1. und des 10. Zyklus für beide Lastniveaus der Mehrfachbelastungsversuche im Grenzbereich der Belastbarkeit; Klebstoff KP 140	110
Abbildung 7.15	Versuchsergebnisse aus Mehrfachbelastungsversuchen im Grenzbereich der Belastbarkeit an Kopfbzugproben mit Geometrieverhältnis 2:1; Klebstoff GD 920	110
Abbildung 7.16	Belastungsmaxima des 1. und des 10. Zyklus für das 1. Lastniveau der Mehrfachbelastungsversuche im Grenzbereich der Belastbarkeit; Klebstoff GD 920.....	111
Abbildung 7.17	Energieabfall mit steigender Zyklenzahl für das Lastniveau 100 % globale Dehnung (Weibull-Verteilung).....	111
Abbildung 7.18	Vergleich zwischen Simulation und Experiment und Auftreten der ersten makroskopisch erkennbaren Schädigung; Kopfbzugversuch Geometrieverhältnis 2:1	112
Abbildung 7.19	Ausgewerteter Pfad am FE-Modell der Kopfbzugprobe mit einem Geometrieverhältnis von 2:1, hier bei 50 % globaler Dehnung	113
Abbildung 7.20	Verlauf der Vergleichsspannung nach von Mises in einer Kopfbzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1 bei einer globalen Dehnung von 50 %.....	114
Abbildung 7.21	Verlauf der wahren Dehnungen in einer Kopfbzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1 bei einer globalen Dehnung von 50 %	115

Abbildung 7.22	Verlauf der Hauptverstreckgrade in einer Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1 bei einer globalen Dehnung von 50 %	116
Abbildung 7.23	Deviatorischer Anteil der ersten beiden Invarianten und Volumenverhältnis in einer Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1 bei einer globalen Dehnung von 50 %	117
Abbildung 7.24	Verlauf der berechneten Formänderungsenergiedichte in der Kopfzugprobe mit dem Geometrieverhältnis 2:1; globale Dehnungen $\epsilon_{KP\ 140} = 100\ %$ und $\epsilon_{GD\ 920} = 80\ %$	118
Abbildung A.1	Position der auf die Kopfzugprobe aufgebrauchten Markierungen in Längsrichtung verglichen mit den Simulationsergebnissen über der Versuchszeit; Klebstoff KP 140 Geometrieverhältnis 1:1	152
Abbildung A.2	Position der auf die Kopfzugprobe aufgebrauchten Markierungen in Querrichtung verglichen mit den Simulationsergebnissen über der Versuchszeit; Klebstoff KP 140; Geometrieverhältnis 1:1	152
Abbildung A.3	Position der auf die Kopfzugprobe aufgebrauchten Markierungen in Längsrichtung verglichen mit den Simulationsergebnissen über der Versuchszeit; Klebstoff GD 920 Geometrieverhältnis 1:1	153
Abbildung A.4	Position der auf die Kopfzugprobe aufgebrauchten Markierungen in Querrichtung verglichen mit den Simulationsergebnissen über der Versuchszeit; Klebstoff GD 920 Geometrieverhältnis 1:1	153
Abbildung A.5	Schädigungsverlauf einer Kopfzugprobe für den Klebstoff KP 140 mit den Abmessungen $D = 50\ mm$ und $d = 25\ mm$; vergrößerte Darstellung.....	154
Abbildung A.6	Schädigungsverlauf einer Kopfzugprobe für den Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50\ mm$ und $d = 25\ mm$; vergrößerte Darstellung.....	155

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Zusammenhang zwischen den Eigenschaften eines Volumenelements mit den Invarianten des Verstreckgradensors	14
Tabelle 2.2	Berechnung der Invarianten des Verstreckgradensors für unterschiedliche Verformungszustände (inkompressibler Fall)	14
Tabelle 2.3	Definition der Formänderungsenergiegedichte für die untersuchten hyperelastischen Werkstoffmodelle [28]	18
Tabelle 3.1	Chemische Zusammensetzung der Stahllegierung 1.0531 [77]	21
Tabelle 3.2	Mechanische Eigenschaften der Stahllegierung 1.0531	21
Tabelle 3.3	Eigenschaften des Klebstoffes KP 140 (Herstellerangaben) [78]	22
Tabelle 3.4	Eigenschaften des Klebstoffes GD 920 (Herstellerangaben) [79]	22
Tabelle 3.5	Gemessene Größen an Zugprobe (DIN EN ISO 527-2)	26
Tabelle 3.6	Gemessene Größen an dicker Zugscherprobe (vgl. auch [84])	29
Tabelle 3.7	Dehnraten für die Zugscherversuche der beiden Klebstoffe GD 920 und KP 140	35
Tabelle 3.8	Gemessene Größen an Druckprobe in Anlehnung an DIN EN ISO 604 und DIN ISO 7743 [88, 89]	36
Tabelle 3.9	Geometrievarianten der Stirnzugprobe	41
Tabelle 3.10	Gemessene Größen an Stirnzugprobe	42
Tabelle 4.1	Versuchsmatrix uniaxialen Zugversuche	49
Tabelle 4.2	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im uniaxialen Zugversuch (Dehnrates 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)	50
Tabelle 4.3	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im uniaxialen Zugversuch (Dehnrates 10.0 %/min; Temperatur 23 °C)	51
Tabelle 4.4	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Zugversuch (Dehnrates 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)	53

Tabelle 4.5	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Zugversuch (Dehnrates 10.0 %/min; Temperatur 23 °C).....	54
Tabelle 4.6	Versuchsmatrix für Zugscherversuche in Anlehnung an DIN EN 14869-2.....	55
Tabelle 4.7	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im Zugscherversuch (Dehnrates 17.3 %/min; Temperatur 23 °C)	56
Tabelle 4.8	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Zugscherversuch (Dehnrates 17.3 %/min; Temperatur 23 °C)	57
Tabelle 4.9	Versuchsmatrix für uniaxiale Druckversuche in Anlehnung an DIN ISO 7743.....	59
Tabelle 4.10	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im uniaxialen Druckversuch (Dehnrates 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)	60
Tabelle 4.11	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff KP 140 im uniaxialen Druckversuch (Dehnrates 10.0 %/min; Temperatur 23 °C).....	60
Tabelle 4.12	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Druckversuch (Dehnrates 1.0 %/min; Temperatur 23 °C)	62
Tabelle 4.13	Ermittelte Kennwerte für den Klebstoff GD 920 im uniaxialen Druckversuch (Dehnrates 10.0 %/min; Temperatur 23 °C).....	63
Tabelle 4.14	Versuchsmatrix für DMTA-Untersuchungen	64
Tabelle 4.15	Auswertung der charakteristischen Temperaturen im DMTA-Versuch des Klebstoffes KP 140 anhand des Speichermoduls	65
Tabelle 4.16	Auswertung der charakteristischen Temperaturen im DMTA-Versuch des Klebstoffes GD 920 anhand des Speichermoduls.....	66
Tabelle 5.1	Ermittelte Werkstoffkennwerte nach Identifikationsverfahren 2 für den Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Polynomisch N = 2.....	73
Tabelle 5.2	Ermittelte Werkstoffkennwerte nach Identifikationsverfahren 2 für den Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Polynomisch N = 1	75
Tabelle 5.3	Ermittelte Werkstoffkennwerte für den Mullins-Effekt; Klebstoff KP 140	76

Tabelle 5.4	Ermittelte Werkstoffkennwerte für den Mullins-Effekt; Klebstoff GD 920	76
Tabelle 6.1	Versuchsmatrix für Kopfzugversuche mit unterschiedlichen Geometrieverhältnissen und Belastungsarten	79
Tabelle 6.2	Verwendete linear elastische Werkstoffgesetze für die Vergleichsrechnung	95
Tabelle 7.1	Versuchsmatrix für Untersuchungen zur Rissentstehung an Kopfzugproben.....	98
Tabelle 7.2	Versuchsmatrix für Untersuchungen mit steigender Belastung an Kopfzugproben.....	106
Tabelle 7.3	Versuchsmatrix für Untersuchungen mit Mehrfachbelastung im Grenzbereich der Belastbarkeit	108
Tabelle A.1	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Arruda-Boyce	144
Tabelle A.2	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Ogden N1	144
Tabelle A.3	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Ogden N2.....	144
Tabelle A.4	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Ogden N3.....	145
Tabelle A.5	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Poly N1	145
Tabelle A.6	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Poly N2	145
Tabelle A.7	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell RePoly N1	146
Tabelle A.8	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell RePoly N2	146

Tabelle A.9	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell RePoly N3	146
Tabelle A.10	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell vdW	147
Tabelle A.11	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Arruda-Boyce.....	148
Tabelle A.12	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Ogden N1	148
Tabelle A.13	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Ogden N2	148
Tabelle A.14	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Ogden N3	149
Tabelle A.15	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Poly N1	149
Tabelle A.16	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Poly N2.....	149
Tabelle A.17	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell RePoly N1	150
Tabelle A.18	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell RePoly N2	150
Tabelle A.19	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell RePoly N3	150
Tabelle A.20	Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell vdW	151

A. Anhang

A.1 Ermittelte Werkstoffkennwerte nach Identifikationsverfahren 1

A.1.1 Kömmerling Körapur 140

Tabelle A.1 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Arruda-Boyce

Parameter	Wert	Einheit
μ	0.860928191	[MPa]
μ_0	0.860928284	[MPa]
λ_m	2357.80757	[-]

Tabelle A.2 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Ogden N1

Parameter	Wert	Einheit
N	1	[-]
μ_1	0.889595583	[MPa]
α_1	1.58717529	[MPa]

Tabelle A.3 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Ogden N2

Parameter	Wert	Einheit
N	2	[-]
μ_1	6.12944559	[MPa]
α_1	-0.130455725	[MPa]
μ_2	-5.20584440	[MPa]
α_2	-0.603258937	[MPa]

Tabelle A.4 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Ogden N3

Parameter	Wert	Einheit
N	3	[-]
μ_1	9.92071898	[MPa]
α_1	1.89604545	[MPa]
μ_2	-4.14568645	[MPa]
α_2	2.60821069	[MPa]
μ_3	-4.86093458	[MPa]
α_3	1.13210516	[MPa]

Tabelle A.5 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Poly N1

Parameter	Wert	Einheit
N	1	[-]
C_{10}	0.384390704	[MPa]
C_{01}	3.26930394E-02	[MPa]

Tabelle A.6 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell Poly N2

Parameter	Wert	Einheit
N	2	[-]
C_{10}	0.752251624	[MPa]
C_{01}	-0.301527605	[MPa]
C_{20}	0.623146750	[MPa]
C_{11}	-1.94845288	[MPa]
C_{11}	1.33035912	[MPa]

Tabelle A.7 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell RePoly N1

Parameter	Wert	Einheit
N	1	[-]
C_{10}	0.430464129	[MPa]
C_{01}	0.0	[MPa]

Tabelle A.8 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell RePoly N2

Parameter	Wert	Einheit
N	2	[-]
C_{10}	0.453205198	[MPa]
C_{01}	0.0	[MPa]
C_{20}	-2.321138297E-02	[MPa]
C_{11}	0.0	[MPa]
C_{11}	0.0	[MPa]

Tabelle A.9 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell RePoly N3

Parameter	Wert	Einheit
N	3	[-]
C_{10}	0.450181620	[MPa]
C_{01}	0.0	[MPa]
C_{20}	-1.145700796E-02	[MPa]
C_{11}	0.0	[MPa]
C_{11}	0.0	[MPa]
C_{30}	-4.710889854E-03	[MPa]
C_{21}	0.0	[MPa]
C_{12}	0.0	[MPa]
C_{03}	0.0	[MPa]

Tabelle A.10 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff KP 140; Werkstoffmodell vdW

Parameter	Wert	Einheit
μ	0.927995916	[MPa]
λ_m	117.638399	[-]
A	0.195662574	[-]
β	0.0	[-]

A.1.2 Kömmerling GD 920

Tabelle A.11 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Arruda-Boyce

Parameter	Wert	Einheit
μ	0.714980834	[MPa]
μ_0	0.714980870	[MPa]
λ_m	3450.04899	[-]

Tabelle A.12 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Ogden N1

Parameter	Wert	Einheit
N	1	[-]
μ_1	0.776464186	[MPa]
α_1	1.41605294	[MPa]

Tabelle A.13 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Ogden N2

Parameter	Wert	Einheit
N	2	[-]
μ_1	0.899974692	[MPa]
α_1	1.21736054	[MPa]
μ_2	-6.760578794E-02	[MPa]
α_2	-7.02184245	[MPa]

Tabelle A.14 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Ogden N3

Parameter	Wert	Einheit
N	3	[-]
μ_1	4.78250719	[MPa]
α_1	-2.63478964	[MPa]
μ_2	8.076269991E-02	[MPa]
α_2	4.88716646	[MPa]
μ_3	-3.97036832	[MPa]
α_3	3.34192222	[MPa]

Tabelle A.15 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Poly N1

Parameter	Wert	Einheit
N	1	[-]
C_{10}	0.283360853	[MPa]
C_{01}	6.557035882E-02	[MPa]

Tabelle A.16 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell Poly N2

Parameter	Wert	Einheit
N		[-]
C_{10}	0.230772110	[MPa]
C_{01}	0.154755174	[MPa]
C_{20}	-6.431682060E-02	[MPa]
C_{11}	0.257113035	[MPa]
C_{11}	-0.250236373	[MPa]

Tabelle A.17 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell RePoly N1

Parameter	Wert	Einheit
N	1	[-]
C_{10}	0.357490433	[MPa]
C_{01}	0.0	[MPa]

Tabelle A.18 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell RePoly N2

Parameter	Wert	Einheit
N	2	[-]
C_{10}	0.388778716	[MPa]
C_{01}	0.0	[MPa]
C_{20}	-1.376007527E-02	[MPa]
C_{11}	0.0	[MPa]
C_{02}	0.0	[MPa]

Tabelle A.19 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell RePoly N3

Parameter	Wert	Einheit
N	3	[-]
C_{10}	0.412505424	[MPa]
C_{01}	0.0	[MPa]
C_{20}	-4.999661644E-02	[MPa]
C_{11}	0.0	[MPa]
C_{11}	0.0	[MPa]
C_{30}	6.750610432E-03	[MPa]
C_{21}	0.0	[MPa]
C_{12}	0.0	[MPa]
C_{03}	0.0	[MPa]

Tabelle A.20 Materialparameter für hyperelastisches Werkstoffverhalten; Klebstoff GD 920; Werkstoffmodell vdW

Parameter	Wert	Einheit
μ	0.953369056	[MPa]
λ_m	4.16622231	[-]
A	0.992705869	[-]
β	0.0	[-]

A.2 Vergleich der experimentell ermittelten Punkverschiebungen auf der Probenoberfläche von Kopfzugproben mit den Simulationsergebnissen

A.2.1 Kömmerling Körapur 140

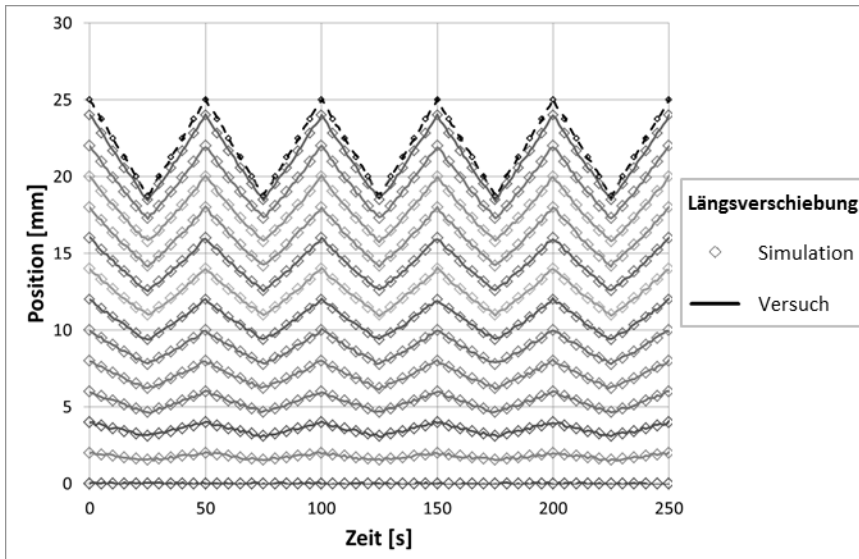


Abbildung A.1 Position der auf die Kopfzugprobe aufgebrachtten Markierungen in Längsrichtung verglichen mit den Simulationsergebnissen über der Versuchszeit; Klebstoff KP 140 Geometrieverhältnis 1:1

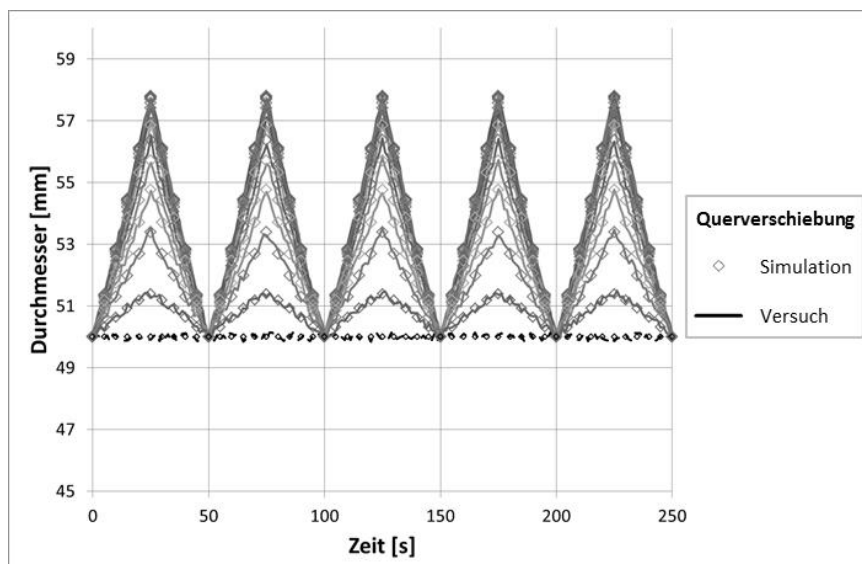


Abbildung A.2 Position der auf die Kopfzugprobe aufgebrachtten Markierungen in Querrichtung verglichen mit den Simulationsergebnissen über der Versuchszeit; Klebstoff KP 140; Geometrieverhältnis 1:1

A.2.2 Kömmerling GD 920

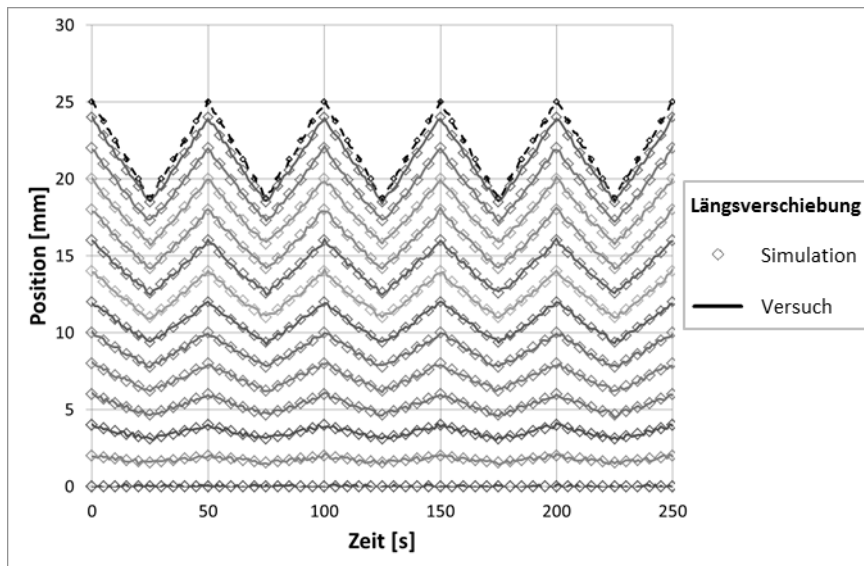


Abbildung A.3 Position der auf die Kopfzugprobe aufbrachten Markierungen in Längsrichtung verglichen mit den Simulationsergebnissen über der Versuchszeit; Klebstoff GD 920 Geometrieverhältnis 1:1

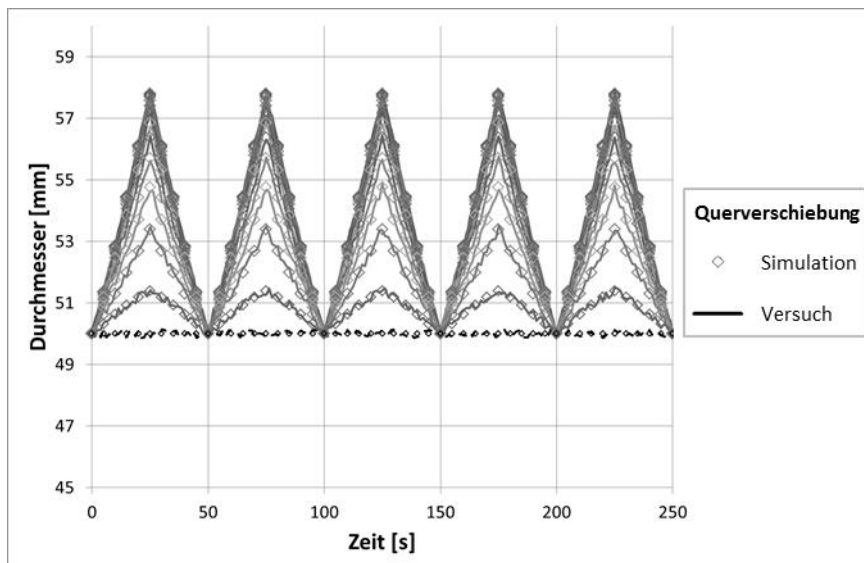


Abbildung A.4 Position der auf die Kopfzugprobe aufbrachten Markierungen in Querrichtung verglichen mit den Simulationsergebnissen über der Versuchszeit; Klebstoff GD 920 Geometrieverhältnis 1:1

A.3 Abbildungen der Schädigungsverläufe

A.3.1 Kömmerling Körapur 140

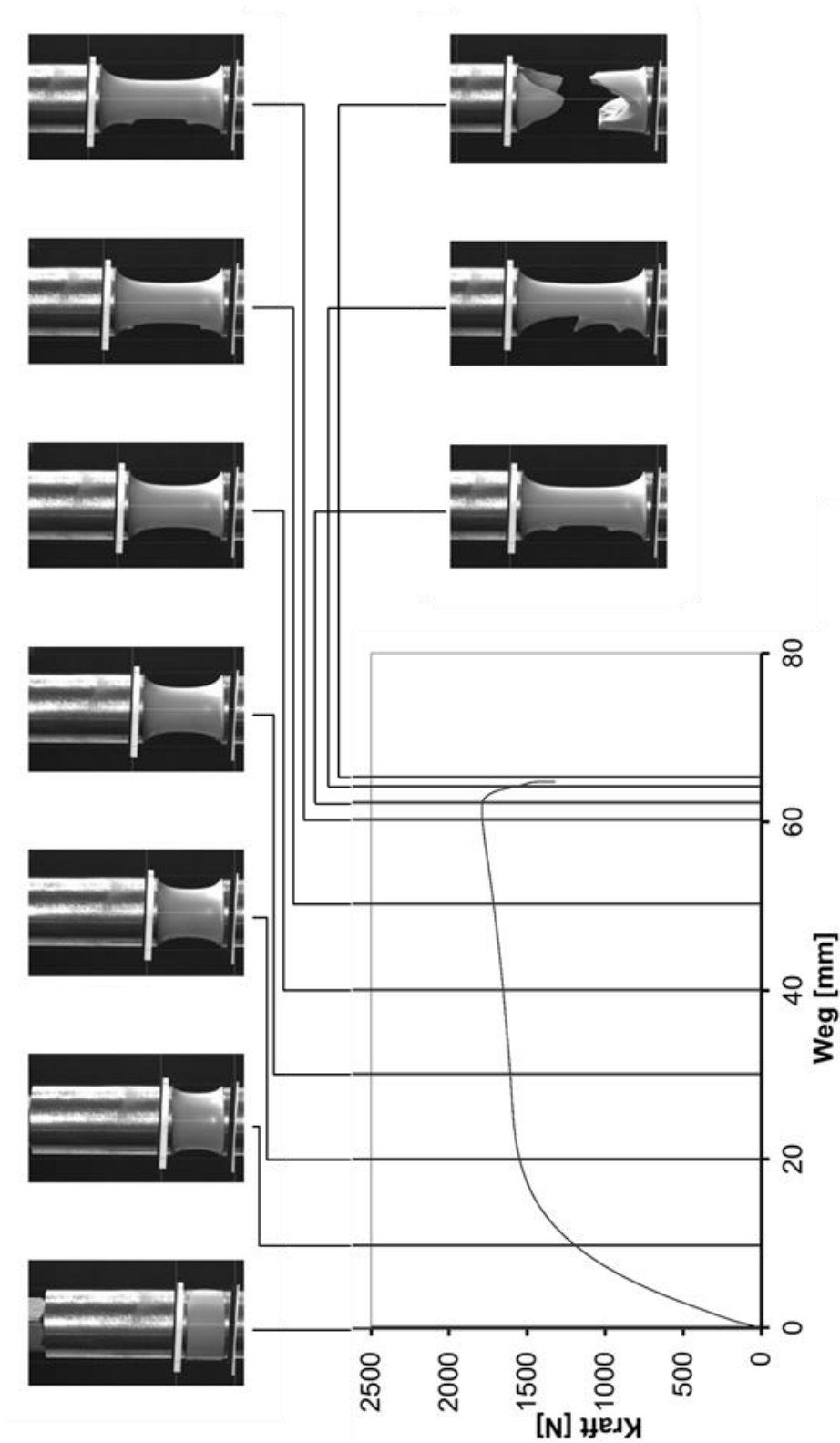


Abbildung A.5 Schädigungsverlauf einer Kopfzugprobe für den Klebstoff KP 140 mit den Abmessungen $D = 50 \text{ mm}$ und $d = 25 \text{ mm}$; vergrößerte Darstellung

A.3.2 Kömmerling GD 920

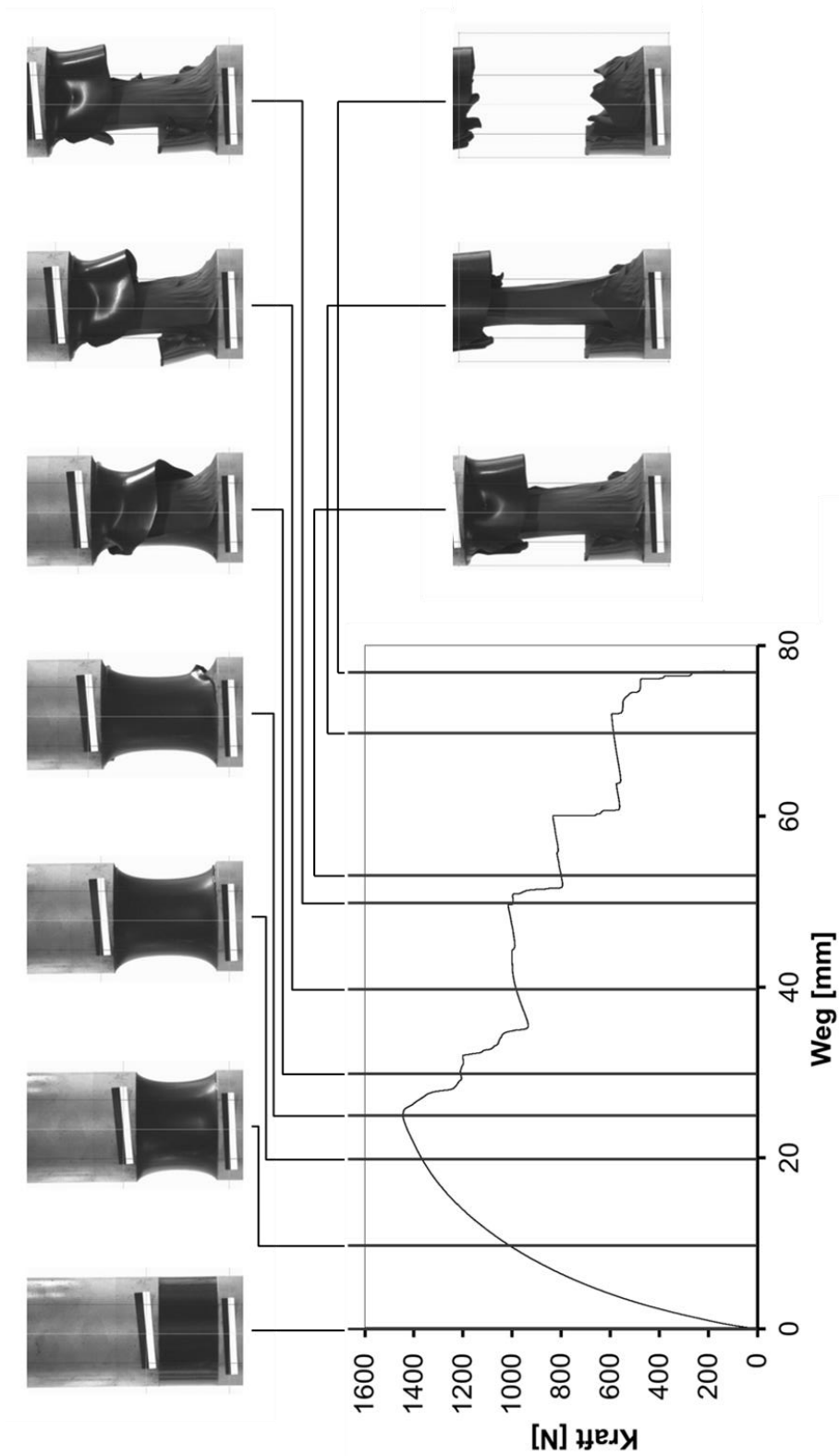


Abbildung A.6 Schädigungsverlauf einer Kopfzugprobe für den Klebstoff GD 920 mit den Abmessungen $D = 50 \text{ mm}$ und $d = 25 \text{ mm}$; vergrößerte Darstellung

A.4 Studien- und Diplomarbeiten, die einen Beitrag zu dieser Dissertation geleistet haben

Arbeit	Name	Titel
Studienarbeit	Stefan Beutler	Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter Schubbeanspruchung lastabtragender Glasklebungen
Studienarbeit	Mario Webs	Untersuchung des Alterungseinflusses auf das Schubspannungs-Gleitungsverhalten unterschiedlicher Klebstoffe
Studienarbeit	Jan Schäfer	Untersuchung des rheologischen Verhaltens fünf verschiedener Klebstoffsysteme anhand von Spannungsrelaxations- und Be-/Entlastungsversuchen
Studienarbeit	Markus Utz	Konstruktion einer Biaxialen Zugprüfvorrichtung
Diplomarbeit	Sami Rausch	Experimentelle Gegenüberstellung des Zug-Scher und des Pure-Shear-Versuchs sowie die Optimierung der bestehenden Prüfvorrichtung
Diplomarbeit	Dominik Ochmann	Charakterisierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens und Ermittlung von Materialkennwerten eines elastischen Silikonklebstoffs
Diplomarbeit	Sabine Lonitz	Kennwertermittlung und Validierung eines Werkstoffmodells für einen hyperelastischen Silikonklebstoff
Studienarbeit	Sebastian Schuff	Ermittlung von Materialkennwerten für einen elastischen Silikonklebstoff unter Berücksichtigung von zeitabhängigem Verhalten
Studienarbeit	Sebastian Backe	Charakterisierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens und Ermittlung von Materialkennwerten eines elastischen Silikonklebstoffs
Studienarbeit	Gordon Foltinek	Untersuchung des elastisch-plastischen Verhalten zweier Klebstoffsysteme bei Normalspannungsbelastung

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Thomas Scherer
Geburtsort: Birkenfeld
Staatsangehörigkeit: deutsch

Tätigkeiten

seit 01/2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Werkstoff- und
Oberflächentechnik Kaiserslautern
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Paul L. Geiß

05/2008 – 05/2009 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Kaiserslautern
Prof. Dr.-Ing. Martin Maier

Studium

10/2004 – 12/2010 Studium an der Technischen Universität Kaiserslautern im
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Abschluss: Diplom-Ingenieur Maschinenbau

Schulbildung und Zivildienst

05/2003 – 02/2004 Zivildienst, Rettungsdienst des DRK-Kreisverband Birkenfeld e. V.

08/1994 – 03/2003 Gymnasium Birkenfeld

08/1990 – 06/1994 Grundschule Brücken