

Festigkeits- und Verformungsverhalten von Fugendichtstoffen (FDS) und Fugenbändern in Kreuz- und T-Stößen zur Entwicklung eines Prüfverfahrens

TI.1 Festigkeits- und Verformungsverhalten von Fugendichtstoffen

T 3067

T 3067

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6739-7

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de

Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet Baustoffe und Baustoffprüfung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

**Festigkeits– und Verformungsverhalten von
Fugendichtstoffen (FDS) und Fugenbändern (FB)
in Kreuz– und T– Stößen
zur Entwicklung eines Prüfverfahrens**

Teil 1:

**Festigkeits– und Verformungsverhalten
von Fugendichtstoffen (FDS)**

Geschäftszeichen P 3–5–19.39–991/00

gefördert durch
das Deutsche Institut für Bautechnik Berlin
und das Berliner Programm zur Förderung der Chancengleichheit
für Frauen in Forschung und Lehre

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier,
Dipl.-Ing. Brigitte Westphal–Kay

Berlin, 30.09.2004

8.3.1.1	Die Parallelfuge	31
8.3.1.2	Die Kreuzfuge	32
8.3.2	Die Stauchzyklen	33
8.3.2.1	Die Parallelfuge	33
8.3.2.2	Die Kreuzfuge	34
8.3.3	Die Scherzyklen	35
8.3.3.1	Die Parallelfuge	35
8.3.3.2	Die Kreuzfuge	36
8.4	Material C	37
8.4.1	Die Dehnzyklen	37
8.4.1.1	Die Parallelfuge	37
8.4.1.2	Die Kreuzfuge	38
8.4.2	Die Stauchzyklen	39
8.4.2.1	Die Parallelfuge	39
8.4.2.2	Die Kreuzfuge	40
8.4.3	Die Scherzyklen	42
8.4.3.1	Die Parallelfuge	42
8.4.3.2	Die Kreuzfuge	42
8.5	Material D	44
8.5.1	Besonderheit bei der Prüfung von Material D	44
8.5.2	Die Dehnzyklen	44
8.5.2.1	Die Parallelfuge	44
8.5.2.2	Die Kreuzfuge	45
8.5.3	Die Stauchzyklen	47
8.5.3.1	Die Parallelfuge	47
8.5.3.2	Die Kreuzfuge	48
8.5.4	Die Scherzyklen	49
8.5.4.1	Die Parallelfuge	49
8.5.4.2	Die Kreuzfuge	49
9	GEGENÜBERSTELLUNG DER MESSERGEBNISSE	51
9.1	Die Dehnzyklen	51
9.2	Die visuelle Begutachtung nach den Dehnzyklen	55
9.3	Die Stauchzyklen	57
9.4	Die visuelle Begutachtung nach den Stauchzyklen	61
9.5	Die Scherzyklen	62
9.6	Die visuelle Begutachtung nach den Scherzyklen	63
9.7	Auswirkungen der Fugengeometrie auf die Prüfergebnisse	63
10	ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	64

11	MATERIALVERHALTEN	65
11.1	Besonderheiten im Materialverhalten	65
11.2	MULLINS Effekt	66
11.3	Materialgesetze zur Beschreibung des inkompressiblen Materialverhaltens	68
11.3.1	Phänomenologische und Statistische Materialgesetze – Allgemeine Ansätze	68
11.3.2	Statistische Materialgesetze	69
11.3.2.1	Gauss–Statistik	69
11.3.2.2	Nichtgauss–Statistik	70
11.3.3	Phänomenologische Materialgesetze	72
11.3.3.1	Ansatz nach MOONEY–RIVLIN	72
11.3.3.2	Ansatz nach RIVLIN	74
11.3.3.3	Ansatz nach YEOH	75
11.3.3.4	Ansatz nach VALANIS und LANDEL	76
11.3.3.5	Ansatz nach OGDEN	77
11.4	Materialgesetze für die Beschreibung von nahezu inkompressiblem Material	78
11.5	Auswahl der Materialgesetze für die Simulationsrechnungen	79
12	FINITE–ELEMENTE–METHODE	80
12.1	Nichtlineare Strukturanalysen	80
12.2	Lösung nichtlinearer Probleme	80
12.3	Newton–Raphson–Iteration	81
12.3.1	Reguläre Newton–Raphson–Iteration	81
12.3.2	Modifizierte Newton–Raphson–Iteration	82
12.4	Konvergenzkriterien	83
12.5	Einbindung des Materialgesetzes in das FEM–Modell	83
12.6	Verwendete Strukturelemente	85
13	SIMULATIONSRECHNUNGEN	87
13.1	Durchgeführte Simulationsrechnungen	87
13.2	Strukturmechanisches Modell	87
13.3	Verwendete Materialkennwerte	88
13.3.1	Voraussetzungen für die Bestimmung der Materialkennwerte	88
13.3.2	Analytisch bestimmte Materialkennwerte	89
13.3.3	Numerisch bestimmte Materialkennwerte	91
13.4	Analytische und numerische Ermittlung der Spannungs– Dehnungs–Kurve für den einaxialen Zugversuch	93
13.5	Simulation des Zugversuchs an der Parallelfuge	95

13.6	Simulation des Zugversuchs an der Kreuzfuge	98
14	DIE 3D–PHOTOGRAMMETRISCHEN UNTERSUCHUNGEN	100
14.1	Ziel der Untersuchungen	100
14.2	Der Versuchsaufbau	100
14.3	Die Auswertung der 3D–photogrammetrischen Aufnahmen	101
14.3.1	Der Bearbeitungsstand	101
14.3.2	Die Vorgehensweise bei der Auswertung	101
14.4	Die Verschiebungen der Mörtelplatten	102
14.5	Der Vergleich der photogrammetrischen Daten mit den Ergebnissen aus den Simulationsrechnungen	103
14.5.1	Die Vorbereitung der Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen	103
14.5.2	Der Vergleich der Ergebnisse für die Verformungen in der x–y–Ebene	105
14.5.3	Der Vergleich der Ergebnisse für die Verformungen in z–Richtung	107
15	AUSWERTUNG DER SIMULATIONSERGEBNISSE	110
15.1	Festigkeitshypothesen	110
15.2	Ermittlung der lokalen Beanspruchungen	111
15.3	Vergleich der im Material B entstehenden Beanspruchungen	112
15.3.1	Material B: Beanspruchung im 1. Zyklus	112
15.3.2	Material B: Beanspruchung im 4. Zyklus	114
15.3.3	Vergleich der lokalen Beanspruchungen im ersten und vierten Belastungszyklus	114
15.4	Vergleich der im Material C entstehenden Beanspruchungen	115
15.4.1	Material C: Beanspruchung bei 6 mm/min	115
15.4.2	Material C: Beanspruchung bei 200 mm/min	116
15.4.3	Vergleich der lokalen Beanspruchungen für die Beanspruchungsgeschwindigkeiten 6 mm/min und 200 mm/min	117
16	ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG UND EMPFEHLUNGEN FÜR WEITERE FORSCHUNGSARBEITEN	119
17	LITERATURVERZEICHNIS	122

ANHANG

Kurzfassung:

Für die Zulassung von Fugenabdichtungssystemen in Anlagen zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen (LAU–Anlagen) wassergefährdender Stoffe wurden vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) neue Zulassungsgrundsätze [LAU01] erarbeitet. Die Zulassungsgrundsätze sehen nacheinander eine zyklische Dehnbeanspruchung bei -20°C und eine zyklische Stauchbeanspruchung bei $+50^{\circ}\text{C}$ sowie eine zyklische Scherbeanspruchung bei -20°C von Parallelfugen vor. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte nachgeprüft werden, inwieweit von Versuchen, die an Parallelfugen gefahren werden, auf das Materialverhalten von Kreuzfugen geschlossen werden kann.

Dafür wurden vier für den Einbau in LAU–Anlagen zugelassene Fugendichtstoffe als Parallel– und Kreuzfuge appliziert und untersucht. Alle Probekörper wurden in Absprache mit dem DIBt, unabhängig von den in ihren Zulassungsbescheiden angegebenen zulässigen Verformungen, mit den gleichen Verformungen beansprucht. Die Versuche wurden an einer für diese Aufgabe entwickelten neuartigen Prüfvorrichtung gefahren, die mit Mitteln des DIBt finanziert wurde.

Die Zulassungsgrundsätze sehen die Bewertung durch visuelle Begutachtung vor. Nach den zyklischen Untersuchungen ließ sich bei einem der untersuchten Materialien durch visuelle Begutachtung bei einigen Parallel– und Kreuzfugen Kohäsionsversagen feststellen. Dieses Material wurde über die in dem Zulassungsbescheid vorgegebenen zulässigen Verformungen hinaus beansprucht. Kohäsionsversagen wurde im Bereich der Ecken und in unmittelbarer Nähe der Fugenflanken beobachtet, wobei es nicht zum Versagen an der Haftfläche (Adhäsionsversagen) kam.

Für zwei Materialien wurden die Zugversuche mit dem kommerziell erhältlichen FEM–Programm ANSYS nachgerechnet. Dabei wurde das hyperelastische Materialverhalten mit den phänomenologisch motivierten Ansätzen nach Mooney–Rivlin, Yeoh und Ogden erfasst. Unter Berücksichtigung der Kompressibilität des Materials können die im Versuch erzielten Spannungs–Dehnungs–Kurven durch FEM mit guter Übereinstimmung vorausgesagt werden. Die Simulationsrechnungen zeigen, dass sich im Bereich der Ecken und in unmittelbarer Nähe der Fugenflanken lokale Spannungsspitzen ausbilden. Ein Vergleich der lokal maximal auftretenden größten Hauptspannung S_1 ergibt, dass zum Erreichen des gleichen Hauptspannungswerts S_1 die Parallelfuge eine um den Faktor 2 größere Fugendehnung aufnehmen kann als die Kreuzfuge. Den Zulassungsgrundsätzen liegt ein Faktor von 1,5 zu Grunde. Wird der gesamte Probekörper betrachtet, so kann der Faktor 1,5 durch die Simulationsrechnungen bestätigt werden.

Abstract:

The German Institute for Construction Technology, (DIBt), has worked out a new Technical Approval Guideline for joint sealing compounds used in plants that deal with water contaminating substances (i.e. pure chemical liquids or mixtures thereof), so-called „LAU Facilities“. These Technical Approval Guidelines imply the use of successive loading in form of a cyclic expansion at -20°C , a cyclic compression at $+50^{\circ}\text{C}$ as well as a cyclic shearing at -20°C at joints with parallel faces. The goal of this research project was to verify whether examination of specimens with parallel faces allows conclusions on the material behavior of specimens with crossed joints.

This study was conducted using four joint sealing compounds which have a technical approval for construction applications dealing with water contaminating substances. In verbal agreement with the DIBt, all specimens were loaded to identical deformations, independent of the expansion capability defined by their technical approval. The examinations were carried out with a novel testing device which was developed during this research project. The testing device was supported financially by the DIBt.

The Technical Approval Guideline includes visual evaluation of the joint sealing material after testing. Specimens made from three of the four examined materials did not show any failure after the cyclic tests. Some specimens of the fourth material showed cohesion failure. The deformation examined on this material was greater than the allowed deformation capability.

Cohesion failure was observed near the corners and the faces. There was no adhesion failure at the faces. In situations where failure of the crossed joints was noted parallel faces had also failed.

For two materials the traction tests with the FEA-program ANSYS were checked. The phenomenological based models after Mooney–Rivlin, Yeoh, and Ogden were used for getting the hyper-elastic material behavior. With consideration of the compressibility the stress–stretch–curves obtained in the tests can be forecasted by FEA with good correlation. The simulations show that local stress peaks arise in the range of the corners and in direct proximity of the joint flanks. Stretching the parallel joint around the factor 2 more strongly than the cross joint produces locally the same principle stress S_1 in both joints.

The Technical Approval Guideline calls for a factor of 1.5. The simulations confirm this with regard to the entire specimen.

Résumé:

Pour l'admission des systèmes de l'étanchement des joints dans les constructions pour le stockage, le soutirage et le renversage (SSR) (LAU) des matières qui pourraient encrasser l'eau l'institut pour la technique de construction (DIBt) a élaboré des nouveaux principes de l'admission. Les principes prescrivent un allongement cyclique pendant une température de -20°C suivi par un raccourcissement cyclique pendant une température de $+50^{\circ}\text{C}$ et une farce tranchante cyclique à -20°C à des joints parallèles. Le projet de recherche devrait démontrer que l'on pourrait tirer des conclusions des essais avec les joints parallèles pour les transformer sur les conditions des joints à forme géométrique de croix.

Dans les essais quatre matériaux admis pour l'étanchement des joints dans les constructions SSR (LAU) ont été appliqués correspondant à des joints parallèles et de forme de croix. Tous les échantillons avec l'entente du DIBt furent examinés avec les mêmes déformations sans regard les déformations qui étaient admises officiellement. Les essais étaient exécutés avec une machine test qui avait été construite et financièrement supportée par le DIBt spécialement pour cette tâche.

Les principes de l'admission prescrivent une inspection visuelle. Quelques joints parallèles et de forme de croix de l'un des matériaux furent détruits par une perte de cohésion. Ce matériau était demandé au dessus de la déformation permise concernant l'admission officielle. La perte de cohésion fut constatée dans les régions des coins et proche des flancs des joints. Il n'y avait pas de perte de l'adhérence. Dans tous les cas quand les joints en forme de croix montraient des destructions aussi les joints parallèles montraient les destructions semblables.

Par rapport aux deux matériaux les essais de tirage furent vérifiés sur la base de la programmation „ANSYS„. Dans ce contexte la rétention hyper-élastique du matériel fut conçue avec les explications phénoménologiques de Mooney-Rivlin, Yeoh et Ogden. En tenant compte de la compressibilité du matériel les graphiques „tension-allongement„ résultantes des essais peuvent être prédit par la méthode des éléments finis (FEM) avec une concordance satisfaisante. Les calculs simulantes montrèrent, que des pointes locales se forment dans les régions des coins et proche des flancs des joints. En comparaison de la tension principale locale au maximum (S 1) les calculs simulantes montrèrent, que la joint parallèle pour rejoindre la même tension principale (S 1) peut absorber une allongement de la joint deux fois plus grande que la joint de forme de croix. Les principes de l'admission prévoient un facteur de 1,5. En regardant tous les échantillons, le facteur 1,5 pouvait être vérifié par les calculs simulantes.

1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird das Verformungsverhalten von Fugendichtstoffen (FDS) im Kreuzfugenbereich untersucht. Es sollen Korrelationsfaktoren ermittelt werden, die aus der Prüfung am parallelfankigen Probekörper einen Rückschluss auf das Beanspruchungsverhalten in der Kreuzfuge zulassen.

Die Bearbeitung der Aufgabenstellung erfolgte in zwei Teilen.

Im ersten Teil, der in den Kapiteln 2 bis 10 beschrieben wird, liegt der Schwerpunkt auf den durchgeführten Versuchen und deren Auswertung. Zur Ermittlung des Spannungs–Dehnungs–Verhaltens der Fugendichtstoffe wurden zyklische Versuche an parallelfankigen Probekörpern und an Kreuzfugen durchgeführt. Das Verformungsverhalten an der Kreuzfuge wurde mit einer neuartigen Prüfvorrichtung untersucht, die hierfür entwickelt wurde. Es wurden vier Fugendichtstoffe untersucht, die drei Herstellerfirmen zur Verfügung stellten. Alle Aussagen beziehen sich auf diese Materialien. Bei den untersuchten Materialien handelt es sich um technische Produkte, die aus verschiedenen Gründen, z.B. durch die sich ändernde Qualität der Ausgangsstoffe oder die sich ändernden Bedingungen während der Verarbeitung vor Ort, in der untersuchten Eigenschaft Spannungs–Dehnungs–Verlauf nicht konstant sind. Eine statistische Aussage über die betrachteten Eigenschaftswerte ist nicht möglich, da während des Untersuchungszeitraums nur stichprobenartig Material untersucht werden konnte. Statistische Angaben bezüglich des Spannungs–Dehnungs–Verlaufs, z.B. anhand des Zugspannungswerts bei 100% Dehnung, wurden aus firmenpolitischen Gründen von den Produktherstellern nicht offen gelegt.

Die Kapitel 11 bis 16 beinhalten den zweiten Teil der Arbeit. Die Zugversuche von zwei Fugendichtstoffen wurden mit dem Finite Element Programm ANSYS nachgerechnet. Das hyperelastische Materialverhalten der Fugendichtstoffe wurde mit den phänomenologischen Ansätzen nach Mooney–Rivlin, Ogden und Yeoh abgebildet. Die lokalen Beanspruchungsmaxima konnten so für die Parallelfuge und für die Kreuzfuge ermittelt werden. Aus diesen ergeben sich die gesuchten Korrelationsfaktoren.

2 Der Stand der Technik

2.1 Motivation der Forschung

Die zu untersuchenden Fugendichtstoffe werden in Fugenkonstruktionen von Anlagen zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen wassergefährdender Stoffe (LAU–Anlagen) eingebaut. Wassergefährdend sind Stoffe im Sinne von §§ 19 g - I WHG dann, wenn sie nachhaltig die physikalische, chemische und/oder biologische Beschaffenheit des Wassers (Oberflächen– und Grundwasser) nachteilig verändern. Das trifft z.B. auf Kraftstoffe zu, die in Lagertanks aufbewahrt werden.

Die Abdichtungsflächen, z.B. Ortbetonplatten, Fertigteilplatten oder Asphaltflächen, sowie Einbauten in die Abdichtungsflächen, z.B. Entwässerungsrinnen und Domschächte, und die Fugenkonstruktion müssen gegenüber den betreffenden Stoffen flüssigkeitsundurchlässig sein. Sie müssen einen Eintritt der wassergefährdenden Stoffe in das Erdreich verhindern.

Die Dichtheit ist nach den Technischen Regeln wassergefährdender Stoffe (TRwS) bei kurzfristigem, begrenztem bzw. langfristigem Angriff für 8 Stunden, 72 Stunden bzw. 42 Tage zu gewährleisten. [TRwS132]

Bei den betrachteten Bauteilfugen handelt es sich um Bewegungsfugen. Diese müssen unterschiedliche Bewegungen zwischen Bauteilen bzw. Baukörpern, die z.B. durch Durchbiegen, Setzen, Verkanten, Kippen, Schwinden und / oder Temperaturänderung verursacht werden können, ermöglichen. Die Fugen sind Wartungsfugen im Sinne der DIN 52 460 [LAU01], [DIN3]. Damit müssen die Fugendichtstoffe dauerhaft elastisch sein. [LAWA96]

2.2 Die derzeitigen Prüfmethoden

Zurzeit werden die mechanischen Eigenschaften der Fugendichtstoffe lediglich an Probekörpern mit parallelen Fugenflanken geprüft. Diese sind in Abbildung 2-1 dargestellt. Als Kontaktmaterial werden gemäß [DIN1] zwei Mörtelprismen $12 \times 25 \times 70 \text{ mm}^3$ verwendet. In den FDS werden Dehn– / Stauchbelastungen in y–Richtung bzw. Scherbelastungen in z–Richtung eingetragen (y– und z–Richtung gemäß Abbildung 2-1).

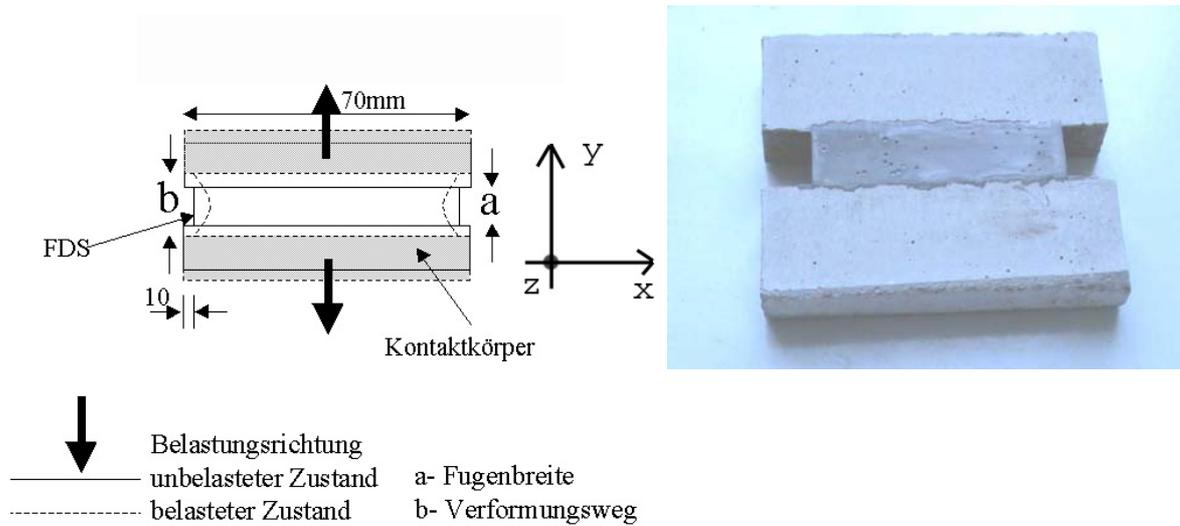


Abbildung 2-1: Probekörper, wie er für Dehn- / Stauchbelastung bzw. Scherbeanspruchung nach [DIN1] verwendet wird (links: schematisch, rechts: fotografiert)

Infolge der Dehn- Stauch- Zyklen wird der Fugendichtstoff im mittleren Bereich in y- und z-Richtung beansprucht, im Randbereich zusätzlich in x-Richtung.

Das Materialverhalten im Kreuzfugenbereich kann nicht abgebildet werden. Im Kreuzbereich kommt es durch die Fugengeometrie zu einem mehraxialen Spannungszustand. Es entstehen an den Ecken Spannungsspitzen. Die örtlichen Beanspruchungen des Fugendichtstoffs im Kreuzfugenbereich sind mehraxial und damit größer als an der parallelfankigen Fuge.

3 Die untersuchten Fugendichtstoffe

3.1 Aufbau und Aufgaben eines Fugenabdichtungssystems

Die Fugendichtstoffe werden im gießfähigen oder standfesten Zustand in die Fugen, die Bauteile miteinander verbinden, eingebracht und erhärten dann durch chemische Reaktion. Die Systeme können ein- oder zweikomponentig aufgebaut sein. Die Härterkomponente der Einkomponentensysteme ist der Luftsauerstoff. Bei Zweikomponentensystemen werden beide Komponenten im vorgegebenen Verhältnis innigst gemischt. Der erforderliche Haftverbund zum Untergrund der Fugenflanken wird durch einen auf das Abdichtungssystem abgestimmten Voranstrich (Primer) erreicht. Die standfesten Systeme werden zum Verschließen von vertikalen bzw. stark geneigten Fugen verwendet. Die gießfähigen Systeme werden in horizontale Fugen eingebaut.

Die Änderungen der Fugenbreite sind für die Fugendichtstoffe wiederkehrende Beanspruchungen. In den Zulassungsbescheiden der jeweiligen Fugendichtstoffe sind durch den Hersteller die zulässigen Verformungen für die Dehn-, Stauch- und Scherbeanspruchung sowie für die Kombination der vorgenannten Beanspruchungen festgelegt. Die angegebenen zulässigen Verformungen tragen der Erfahrung Rechnung, dass ein Dichtstoff sich wiederholende Dehn–Stauchbeanspruchungen nur in einer bestimmten Größenordnung über längere Zeit erträgt. Diese Größenordnung ist deutlich geringer als die Dehnung, bei der Kohäsions- oder Adhäsionsversagen festgestellt werden. [Baus95] Aufgrund ihrer gummielastischen Eigenschaften können die Fugendichtstoffe die wiederkehrenden Bewegungen ohne Schaden aufnehmen.

Die Fugendichtstoffe sind Elastomere. **Elastomere** besitzen eine räumlich gering vernetzte Struktur. Durch die Krafteinwirkung werden die Molekülketten gestreckt bzw. gestaucht. Lässt die auf die Molekülketten einwirkende Kraft nach, sind diese bestrebt, wieder in ihre Ausgangslage zurückzukehren. Der elastomere Werkstoff geht dann auch makroskopisch wieder in seine Ausgangsform zurück. Elastomere verhalten sich in einem weiten Temperaturbereich elastisch. [Bene99]

Bestandteil des Forschungsvorhabens sind Versuche mit den Elastomeren Polyurethan und Polysulfid.

3.2 Polyurethan (PUR)

Polyurethan (PUR) ist ein Polymer–Werkstoff, der je nach Zusammensetzung verschiedene Festigkeits- und Verformungseigenschaften aufweisen kann. Die Viel-

fältigkeit ist auf die charakteristischen Isocyanatgruppen zurückzuführen, die eine Reihe von Additionsreaktionen eingehen können. Da die Isocyanate stufenweise reagieren, ergeben sich lagerstabile Zwischenprodukte. Damit werden günstige Bedingungen für die weitere Reaktion zum hochpolymeren Endprodukt geschaffen. Die Isocyanate reagieren bei der Bildung von PUR hauptsächlich mit Polyolen, zusätzlich können Hilfsstoffe und Additive, wie UV–Absorber oder Farbpasten, zugegeben werden. Die Qualität der Verzweigungen (linear, gering oder stark verzweigt) hängt von der funktionellen Gruppe ab. [Saec92] Falls nach dem Einbau noch freie Isocyanatgruppen vorliegen, können diese mit Wasser unter Abspaltung von Kohlendioxid reagieren und damit zu Porenbildung führen. Im Qualitätsmanagementsystem ist diesem Umstand Rechnung zu tragen.

3.3 Polysulfid

Polysulfid ist ein reaktionshärtendes Elastomer, bei dem die vorhandenen linearen Makromolekülketten über Schwefelatome (S) miteinander verbunden sind. Die Molekülketten enthalten endständig reaktive SH–Gruppen (Mercaptogruppe), die mit Sauerstoff unter Wasseraustritt Disulfidbrücken (–S–S–) bilden. Der Sauerstoff wird durch ein Härter– oder Verknüpfungssystem zugegeben. Durch die oxidative Verknüpfung wird das meist flüssig vorliegende Polysulfid in ein hochmolekulares, gummielastisches Produkt umgewandelt, das dann als ein Zweikomponenten–Dichtstoff vorliegt. [Bene99]

3.4 Die Codierung der untersuchten Fugendichtstoffe

Die Versuche innerhalb des Forschungsvorhabens wurden mit vier Produkten vorgenommen. Ihre Codierung ist der Tabelle 3-1 zu entnehmen.

Tabelle 3-1: Untersuchte Fugendichtstoffsysteme (Einbaukonsistenz, chemische Basis, Anzahl der Komponenten, Verschlüsselung)

	Einbaukonsistenz	
Chemische Basis	gießfähig	standfest
Polysulfid	C	D
Polyurethan	A	B

1–komponentiger Fugendichtstoff

4 Die Prüfvorrichtung

Zur Prüfung der Kreuzfugen wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine neuartige Prüfvorrichtung konstruiert und gebaut. Die Prüfvorrichtung ermöglicht neben der Prüfung von Parallelfugen auch die Prüfung von Kreuzfugen. Mit der Prüfvorrichtung können zyklische Dehn-, Stauch- und Scherversuche durchgeführt werden. Die Fuge wird dabei gleichmäßig verformt. Variabel sind die Verfahrenswege, die Geschwindigkeiten, die Haltezeiten und die Zyklenzahl.

Zur Dimensionierung der Prüfvorrichtung fanden Vorversuche statt. [Hill01]

In Abbildung 4-1 ist die Prüfvorrichtung dargestellt.

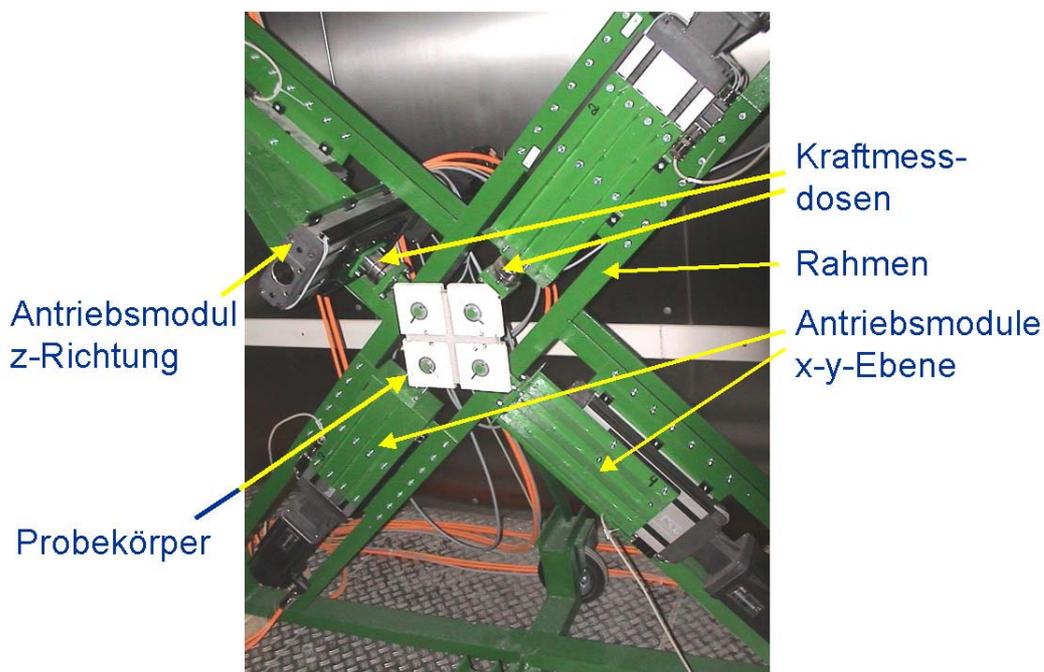


Abbildung 4-1: Prüfvorrichtung mit eingespannter Kreuzfuge

Auf einem festen, aber verfahrbaren Gestell sind die Antriebsmodule und die Vorrichtung zur Aufnahme des Probekörpers montiert. In der x–y–Ebene befinden sich vier voneinander unabhängige Antriebsmodule, deren maximaler Verfahrweg 100 mm beträgt. In der z–Ebene befindet sich ein Antriebsmodul, das bis zu 50 mm je Richtung aus seiner Nulllage heraus verfahren werden kann. Der Antrieb erfolgt über Gleichstrom–Servomotore. Die Geschwindigkeit der Antriebsmodule kann zwischen 1 mm/min bis 2000 mm/min variiert werden. Die Motore können maximal eine Kraft von 3000 N aufnehmen.

Die Prüfvorrichtung kann weg- oder kraftgesteuert arbeiten. An der Prüfvorrichtung sind zwei Kraftmessdosen installiert, wovon eine Kraftmessdose die Prüfvor-

richtung steuert. Die zweite Kraftmessdose dient ausschließlich der Datenaufnahme. Während des Versuchs werden die Positionen der Antriebsmodule sowie die Kraftdaten aufgezeichnet. Die Datenaufzeichnung erfolgt über einen PC mit Pentium MMX und einer Prozessorleistung von 200 MHz. Die Daten werden mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet.

5 Die Herstellung der Probekörper

Die Fugendichtstoffe wurden gemäß Herstellerangaben verarbeitet. Nach Aufbringen des vorgeschriebenen Primers wurde nach Ablauf der Ablüftezeit der Fugendichtstoff an den Kontaktplatten appliziert. Als Kontaktplatten wurden Mörtelplatten verwendet, die an der TU Berlin nach der in [LAU01] vorgegebenen Rezeptur hergestellt wurden. Die Mörtelplatten hatten zum Zeitpunkt der Applikation ein Alter von mindestens 56 Tagen. Mindestens sieben Tage nach der Herstellung sind die Mörtelplatten mit einer wassergekühlten Diamantsäge in der Art zersägt worden, dass sie die für die Prüfung erforderlichen Abmessungen hatten. Somit entstanden die für die Applikation notwendigen Schnittflächen.

Die zweikomponentigen Fugendichtstoffe (A, C und D) wurden mit einer Standbohrmaschine, die eine Regulierung der Umdrehungszahl ermöglichte, und einem entsprechenden Rührwerkzeug gleichmäßig homogenisiert. Die Abbildung 5-1 zeigt eine Kreuzfuge kurz vor der Applikation. Die applizierten Probekörper lagerten nach der Applikation des Fugendichtstoffs bis zur Prüfung in der Klimakammer im Normklima bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65%.

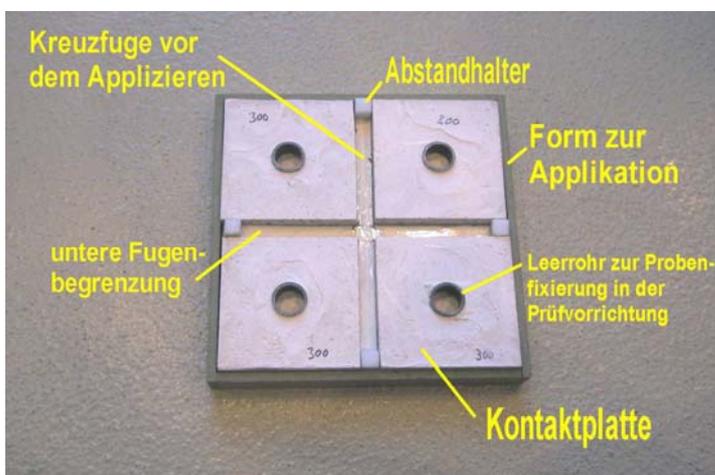


Abbildung 5-1: Kreuzfuge vor der Applikation: In der Form liegen vier geprimierte Kontaktplatten. Der Fugenabschluss ist mit jeweils einem Abstandhalter versehen.

Für jeden der zu prüfenden Fugendichtstoffe A, B und C wurden für jede Prüfmart (zyklische Dehn- und Stauchversuche / zyklische Scherversuche) jeweils fünf Probekörper als Kreuzfuge und als Parallelfuge appliziert. Vom Material D wurde zunächst eine Serie, bestehend aus je fünf Parallel- und Kreuzfugen, im zyklischen Dehn- und Stauchversuch untersucht. Anschließend wurden aus einer neuen Charge je fünf weitere Parallel- und Kreuzfugen für die Versuche zyklisches Dehnen und Stauchen sowie zyklisches Scheren hergestellt.

6 Das Prüfprogramm

6.1 Prüfbeanspruchungen

Die Tabelle 6-1 enthält für die untersuchten Fugendichtstoffe die laut Hersteller zugelassenen Verformungen. In den Spalten 1 und 2 sind die gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung zugelassenen Verformungswege für Parallelfugen bzw. Kreuzfugen in mm angegeben. Die Verformungswege beziehen sich auf eine Fuge mit einer Fugenbreite von 15 mm. Daraus ergeben sich die zulässigen Gesamtverformungen (zGv) für die Fugendichtstoffe als Quotient aus dem zugelassenen Verformungsweg in Spalte 1 bzw. 2 und der Fugenbreite von 15 mm. Die Spalten 3 und 4 enthalten die zGv, angegeben in Prozent, für die Parallelfuge bzw. Kreuzfuge.

Tabelle 6-1: Zugelassene Verformungen der untersuchten Fugendichtstoffe nach Allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Zulassungsbescheid)

	Zugelassene Verformungswege ¹⁾ in mm (lt. Zulassungsbescheid)		Dehnung bezogen auf die Fugenbreite von 15 mm in % (zGv)	
	1	2	3	4
	Parallelfuge	Kreuzfuge	Parallelfuge	Kreuzfuge
A	4	3,5	27	23
B	4	2,5	27	17
C	4	3,5	27	23
D	3	3	20	20

¹⁾: bezogen auf die parallele Fugenbreite von 15 mm für Stauchen, Dehnen und Scheren
 Aus der zulässigen Gesamtverformung ergeben sich gemäß [LAU01] die in Tabelle 6-2 enthaltenen Prüfdehnungen.

In Absprache mit dem DIBt wurden die als Parallelfuge und die als Kreuzfuge applizierten Fugendichtstoffe der vier untersuchten Materialien während der Prüfung um 75% gedehnt, um –50% gestaucht und um ±75% geschert. Das entspricht den vorgegebenen Prüfdehnungen für eine zyklische Beanspruchung im T- und Kreuzstoß bei einer zulässigen Gesamtverformung von 25 % (siehe Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Zulässige Dehn- / Stauchverformung bzw. Scherverformung und Prüfdehnung aus [LAU01]

Zulässige Dehn- und Stauchverformung (Summe) bzw. Scherverformung nach Angabe des Herstellers ¹⁾	Dehn- / Stauchverformung im Versuch bezogen auf die Ausgangsfugenbreite bei zyklischer Beanspruchung bei		Scherverformung im Versuch bezogen auf die Ausgangsfugenbreite bei zyklischer Beanspruchung bei –20°C bei	
	einachsiger Beanspruchung	Beanspruchung von T- und Kreuzstößen	einachsiger Beanspruchung	Beanspruchung von T- und Kreuzstößen
%	%	%	%	%
1	2	3	4	5
12,5	± 25,0	+ 37,5 / – 25,0	± 25,0	± 37,5
15	± 30,0	+ 45,0 / – 30,0	± 30,0	± 45,0
20	± 40,0	+ 60,0 / – 40,0	± 40,0	± 60,0
25	± 50,0	+ 75,0 / – 50,0	± 50,0	± 75,0

¹⁾: Zwischenwerte dürfen interpoliert werden

Die während der Versuche eingebrachten Prüfdehnungen für eine zyklische Beanspruchung bei einachsiger Beanspruchung übersteigen für Dehnen und Scheren die in den Zulassungsgrundsätzen geforderten Prüfdehnungen. Tabelle 6-3 enthält für die Materialien A bis D eine Zusammenstellung der in den Zulassungsgrundsätzen [LAU01] geforderten Prüfdehnung („Soll“; für Material A in Spalte 1), der tatsächlichen Prüfdehnung („Ist“; für Material A in Spalte 2) und der prozentualen Abweichung zwischen Ist und Soll („Abweichung“; für Material A in Spalte 3) für eine zyklische Beanspruchung bei einachsiger Beanspruchung und bei Beanspruchung im T- und Kreuzstoß.

Bei der Festlegung der Verformungswege wurde eine ideale Fuge mit einer Fugenbreite und Fugenhöhe von je 12 mm zu Grunde gelegt.

Tabelle 6-3: Prüfdehnungen in % nach Tab. 3.2 und 3.3 in [LAU01] (Soll), während der Prüfung eingebrachte Verformung in % (Ist) und Abweichung der Ist-Verformung von der Soll-Verformung bei zyklischer Beanspruchung in % (Abweichung)

A				B			C			D		
Soll	Ist	Ab- wei- chung		Soll	Ist	Ab- wei- chung	Soll	Ist	Ab- wei- chung	Soll	Ist	Ab- wei- chung
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bei einachsiger Beanspruchung												
Stauchern	- 54	- 50	- 8	- 54	- 50	- 8	- 54	- 50	- 8	- 40	- 50	+ 25
Dehnen	+ 54	+ 75	+ 39	+ 54	+ 75	+ 39	+ 54	+ 75	+ 39	+ 40	+ 75	+ 88
Scheren	± 54	± 75	+ 39	± 54	± 75	+ 39	± 54	± 75	+ 39	± 40	± 75	+ 88
bei Beanspruchung von T- und Kreuzstößen												
Stauchern	- 46	- 50	+ 8,7	- 34	- 50	+ 47	- 46	- 50	+ 8,7	- 40	- 50	+ 25
Dehnen	+ 69	+ 75	+ 8,7	+ 51	+ 75	+ 47	+ 69	+ 75	+ 8,7	+ 60	+ 75	+ 25
Scheren	± 69	± 75	+ 8,7	± 51	± 75	+ 47	± 69	± 75	+ 8,7	± 60	± 75	+ 25

Die Dehnungen beziehen sich auf die Ausgangsfugenbreite bzw. -höhe

Aus der Tabelle 6-3 folgt, dass für eine zyklische Beanspruchung bei einachsiger Beanspruchung die Materialien A, B und C mit einer um 8% geringeren Verformung gestaucht wurden, aber mit einer um 39% höheren Verformung gedehnt bzw. geschert wurden. Für das Material D wurde bei einachsiger Beanspruchung das Material um 25% stärker gestaucht und um 88% stärker gedehnt bzw. geschert. Die zyklische Beanspruchung bei Beanspruchung im T- und Kreuzstoß war für die Materialien A und C um ca. 9% höher als gefordert, für das Material B um 47% höher als gefordert und für das Material D um 25% höher als gefordert.

6.2 Abmessungen der Probekörper

Unmittelbar vor dem Einbau in die Prüfvorrichtung wurden die Probekörper dem Normklima 20/65 entnommen. Die Abmessungen der Fuge (Fugenbreite / Fugenhöhe / Fugenlänge) wurden dokumentiert. Die Sollbreite und Sollhöhe der Fuge ist mit je 12 mm vorgeben, wobei die Fugenhöhe d das 0,8fache bis 1fache der Fugenbreite b betragen kann [LAU01]. Die Mittelwerte der Ist-Abmessungen sind in Tabelle 6-4 angegeben. Die mittlere Fugenbreite, -höhe und -länge wurden für jeden Probekörper ermittelt: für die Parallelfugen aus je zwei Einzelwerten, für die Kreuzfugen aus je vier Einzelwerten für die Fugenbreite und -höhe. Unterschiede in der Geometrie wurden bei der Auswertung dadurch berücksichtigt, dass die aufgezeichneten Kraftdaten in Spannungswerte und die Wegdaten in Dehnungswerte umgerechnet wurden. Da die Ist-Fugenbreiten meistens größer waren als 12 mm wurde das Material nicht, wie vorgesehen, um 75% bezogen auf die Ausgangsfugenbreite gedehnt bzw. um 50% bezogen auf die Ausgangsbreite gestaucht. Die realen Dehnungen und Stauchungen lagen unter dem Vorgabewert.

In Abbildung 6-1 sind die Einzelwerte und Mittelwerte der Abmessungen dargestellt. Die Fugenhöhen schwanken stärker als die Fugenbreite. Die Ursache liegt in der Applikationstechnik. Das vorgegebene Verhältnis $0,8 < d/b < 1$ wurde bei den als Parallelfuge aus dem Material A hergestellten Probekörpern viermal überschritten und bei den aus Material D hergestellten Probekörpern je einmal über- und unterschritten. Bei den als Kreuzfuge hergestellten Probekörpern wurde dieses Verhältnis beim Material B einmal überschritten und bei den Materialien C und D je zweimal unterschritten.

In Kapitel 9.7 „Auswirkungen der Fugengeometrie auf die Prüfergebnisse“ ist dargelegt, welchen Einfluss die Abweichung der Fugengeometrie auf die Messergebnisse hat.

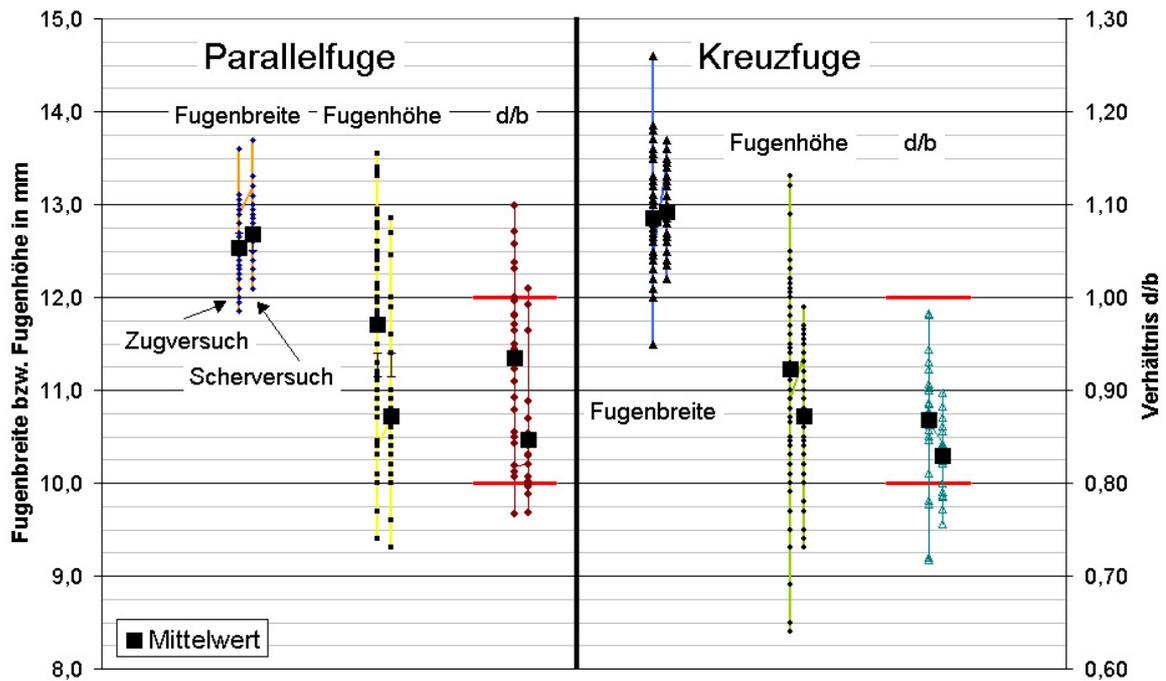


Abbildung 6-1: Ist-Fugenhöhe und Ist-Fugenbreite der geprüften Probekörper (Einzelwerte) sowie Verhältnis der Fugenhöhe d zur Fugenbreite b , berechnet aus den Mittelwerten für die Fugenhöhe d und die Fugenbreite b je Probekörper; rot markiert sind die in [LAU01] vorgegebenen Grenzwerte für das Verhältnis d/b

Tabelle 6-4: Fugenabmessungen der Probekörper (Mittelwerte aus insgesamt 25 Probekörpern je Parallelfuge und Kreuzfuge) für die zyklischen Dehn- / Stauchversuche, Werte ermittelt vor dem zyklischen Dehnen

		Parallelfuge	Kreuzfuge		
Fugenbreite	Mittelwert / mm	12,54	12,89		
	Standardabweichung / mm	0,29	0,46		
	Maximum / mm	13,35	14,60		
	Minimum / mm	12,10	11,50		
Fugenhöhe	Mittelwert / mm	11,71	11,19		
	Standardabweichung / mm	1,07	0,98		
	Maximum / mm	13,43	13,30		
	Minimum / mm	9,55	8,40		
Fugenlänge	Mittelwert / mm	75,35	187,41		
	Standardabweichung / mm	0,88	1,12		
	Maximum / mm	78,50	190,00		
	Minimum / mm	74,20	185,00		
Verhältnis Fugenhöhe / Fugenbreite (d / b)		< 0,8	1	< 0,8	4
		> 1,0	5	> 1,0	1

6.3 Zyklische Dehn– und Stauchversuche

Die Probekörper wurden der in [LAU01] im Abschnitt 5.4.4 „Dehn– bzw. Stauchzyklus“ vorgesehenen Prüfung unterzogen. Die Prüfung beginnt mit den zyklischen Dehnversuchen bei -20°C . Daran schließen sich die zyklischen Stauchversuche bei $+50^{\circ}\text{C}$ an. Die gesamte Prüfvorrichtung befindet sich während der Versuche in einer Klimakammer. Die Belastungskurve besitzt ein Trapezprofil.

Die Prüfung soll die mechanische Beanspruchung des Fugendichtstoffs in den Winter– und Sommermonaten nachbilden. Während der Wintermonate wird der Fugendichtstoff aufgrund der temperaturbedingten Längenabnahme der anschließenden Betonbauteile gedehnt. In den Sommermonaten dehnen sich die an den Fugendichtstoff anschließenden Betonbauteile aus, und der in den Fugen befindliche Fugendichtstoff wird gestaucht.

Prüfablauf:

Nachdem der Probekörper in die Prüfvorrichtung lastfrei bei $+20^{\circ}\text{C}$ eingebaut wurde, wird die Klimakammer, in der sich Prüfvorrichtung und Probekörper befinden, innerhalb von 2 Stunden von $+20^{\circ}\text{C}$ auf -20°C herunter gekühlt. Danach beginnen die zyklischen Dehnversuche. Die Fuge wird um 75% bezogen auf die Soll–Fugenbreite von 12 mm mit einer Geschwindigkeit von 4,5 mm/min gedehnt. Die Dehnung bleibt für 60 s konstant. Dann wird die Fuge mit der gleichen Geschwindigkeit so lange entlastet, bis die Kraft– gemessen an der Kraftmessdose 1– den Wert „Null“ erreicht. In dieser Position verbleibt die Fuge wiederum für 60 s. Dieser Zyklus wird 50mal wiederholt. Nach dem 50. Zyklus wird der Probekörper in die Ausgangslage verfahren. Die Klimakammer wird von -20°C innerhalb von 2 Stunden auf $+20^{\circ}\text{C}$ temperiert. Der Probekörper wird ausgebaut und visuell auf Kohäsions– und Adhäsionsversagen geprüft. Die Abmessungen des Fugendichtstoffs werden ermittelt.

Im zweiten Teil der Prüfung wird das zyklische Stauchverhalten des Fugendichtstoffs geprüft. Nachdem die Abmessungen des Probekörpers dokumentiert wurden, wird der Probekörper lastfrei bei $+20^{\circ}\text{C}$ in die Prüfvorrichtung eingebaut. Innerhalb von 3 Stunden wird die Klimakammer, in der sich Prüfvorrichtung und Probekörper befinden, auf $+50^{\circ}\text{C}$ erwärmt. Die zyklischen Stauchversuche beginnen. Die Fuge wird um 50% bezogen auf die Soll–Fugenbreite von 12 mm mit einer Geschwindigkeit von 4,5 mm/min gestaucht. In dieser Position verbleibt der Probekörper für 60 s. Dann wird der Probekörper ebenfalls mit 4,5 mm/min entlastet, bis die Kraft– gemessen an der Kraftmessdose 1– den Wert „Null“ erreicht. Diese Position wird für 60 s aufrechterhalten. Dieser Zyklus wird 100mal wieder-

holt. Danach ist der zyklische Stauchversuch beendet. Der Probekörper wird in die Ausgangslage verfahren. Die Klimakammer wird in drei Stunden auf +20°C abgekühlt. Der Probekörper wird ausgebaut und visuell auf Kohäsions- und Adhäsionsversagen untersucht. Die Abmessungen des Fugendichtstoffs werden ermittelt.

An zwei der fünf Probekörper wird ermittelt, welche Last im Dehnversuch Versagen verursacht. Dazu werden die Probekörper bei +20°C lastfrei in die Prüfvorrichtung eingebaut. Mit einer Geschwindigkeit von 4,5 mm/min wird die Fuge gleichmäßig bis zum Versagen gedehnt.

Der zeitliche Abstand zwischen den zyklischen Dehnversuchen und den zyklischen Stauchversuchen betrug 40 Tage. In dieser Zeit lagerten die Probekörper im Normklima 20/65. Die Proben wurden unmittelbar an die zyklischen Stauchversuche auf Versagen geprüft.

Die Tabelle 6-5 enthält eine Zusammenfassung der Prüfparameter.

Tabelle 6-5: Prüfparameter „Zyklische Dehn- und Stauchversuche“

	Parallelfuge / Kreuzfuge
Zu dehnende Fugenbreite b_d (theoretisch) / mm	12
Dehnweg (75% von b_d) / mm	9
Stauchweg (50% von b_d) / mm	6
Geschwindigkeit / mm/min	4,5
Haltezeiten entlasteter / belasteter Zustand / s	60

Die Abbildung 6-2 zeigt exemplarisch den Prüfablauf für den zyklischen Dehnversuch im Weg-Zeit- und Kraft-Zeit-Diagramm. Die Belastung erfolgt weggesteuert, die Entlastung kraftgesteuert.

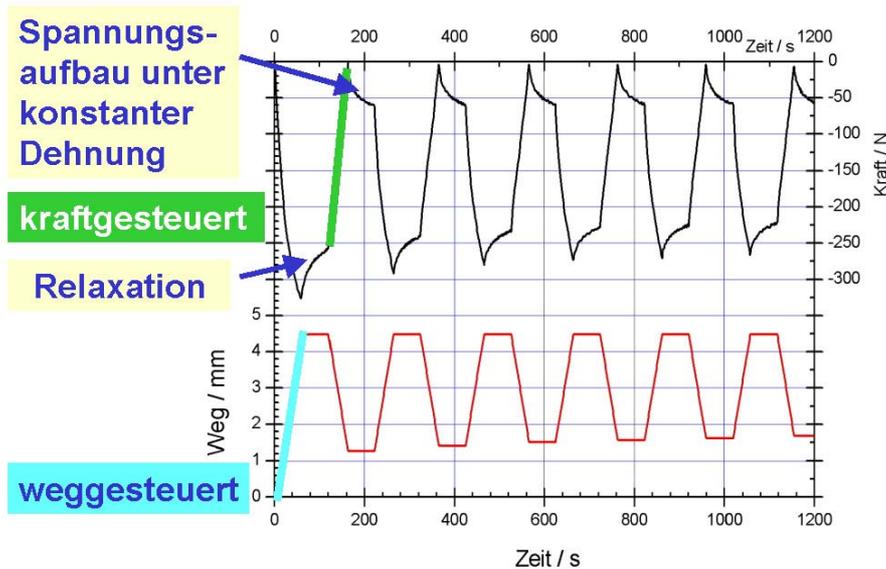


Abbildung 6-2: Prüfablauf dargestellt im Weg-Zeit- und Kraft-Zeit-Diagramm: weggesteuerte Belastung – Haltezeit – kraftgesteuerte Entlastung – Haltezeit

6.4 Zyklische Scherversuche

Die Probekörper wurden der in [LAU01] im Abschnitt 5.4.3 „Verhalten bei zyklischer Scherbeanspruchung“ vorgesehenen Prüfung unterzogen. Die gesamte Prüfvorrichtung befindet sich während des Versuchs in der Klimakammer. Der Graph der Belastung hat eine Sägezahnform.

Die Prüfung bildet die mechanische Beanspruchung des Fugendichtstoffs infolge Scheren, z.B. hervorgerufen durch das Überfahren der Kontaktflächen oder Baugrundsetzungen, ab. Diese Beanspruchung ist bei Temperaturen unter Null für den Fugendichtstoff am schärfsten. Der Fugendichtstoff ist bei Temperaturen unterhalb Null wegen der temperaturbedingten Stauchung des Kontaktmaterials gedehnt. Aus diesem Grund wird der Fugendichtstoff während des Versuchs zunächst um 25 % bezogen auf die Ausgangsfugenbreite gedehnt. Diese Dehnung wird zunächst aufrecht gehalten. In dieser Zeit stellt sich durch die Relaxationsvorgänge eine Gleichgewichtsspannung im Fugendichtstoff ein. Anschließend wird die Scherverformung durch Bewegung einer Kontaktplatte in den Fugendichtstoff eingetragen.

Prüfablauf:

Der Probekörper wird bei +20°C lastfrei in die Prüfvorrichtung eingebaut. Innerhalb von zwei Stunden wird die Klimakammer inklusive Prüfvorrichtung und Probekörper auf –20°C temperiert. Dann wird der Probekörper um 25% bezogen auf die Soll-Ausgangsfugenbreite von 12 mm gedehnt. Im Anschluss an eine 48-stündige

Dehnung beginnt der zyklische Scherversuch. Im gedehnten Zustand wird die Fuge um $\pm 75\%$ bezogen auf die Soll–Ausgangsfugenhöhe von 12 mm geschert. Dabei wird eine Kontaktplatte mit einer Geschwindigkeit von 9 mm/min um 9 mm nach oben bzw. nach unten versetzt bewegt. In den Umkehrpunkten sind keine Haltezeiten vorgesehen. Die Prüfung ist nach 100 Zyklen beendet. Dann wird der Probekörper in die Einbauposition verfahren. Die Klimakammer wird innerhalb von 2 Stunden auf $+20^{\circ}\text{C}$ erwärmt. Der Probekörper wird ausgebaut und auf Adhäsions– und Kohäsionsversagen visuell geprüft. Die Abmessungen werden ermittelt.

7 Die Auswertung der Versuche

7.1 Die Dehn- und Stauchzyklen

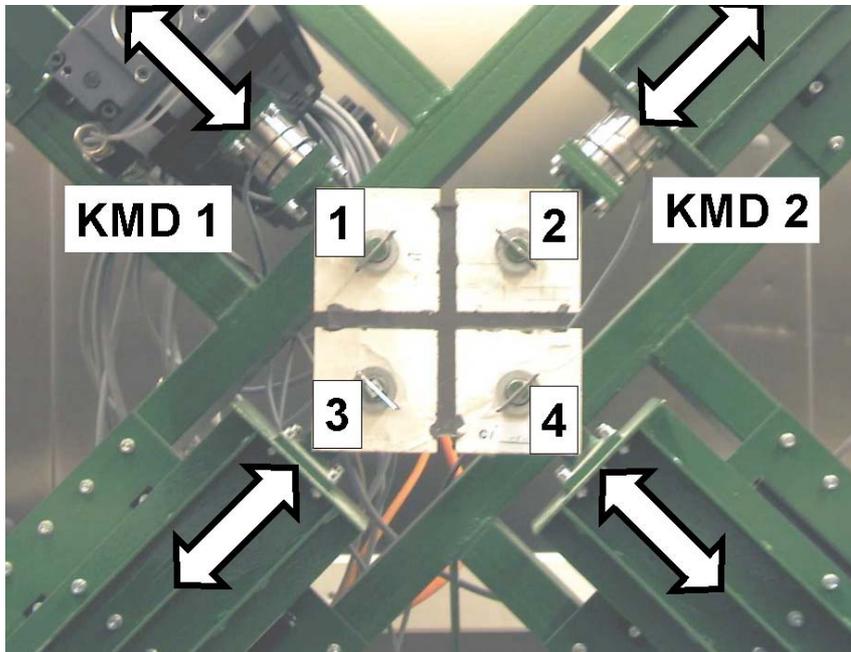


Abbildung 7-1: Eingespannter Probekörper mit Kreuzfuge: Die Pfeile markieren die Dehn- bzw. Stauchrichtung; beschriftet sind die Kraftmessdose 1 (KMD1), die der Steuerung und Datenerfassung dient, und die Kraftmessdose 2 (KMD 2), die ausschließlich der Datenerfassung dient.

Die Abbildung 7-1 zeigt einen eingespannten Probekörper mit einer Kreuzfuge. Während des Versuchs werden die Platten 1 bis 4 in Richtung ihrer Diagonalen gezogen bzw. gedrückt, so dass der in der Fuge applizierte Fugendichtstoff gedehnt bzw. gestaucht wird. Dabei werden die Kraftdaten durch die Kraftmessdosen KMD1 und KMD2 aufgezeichnet. Aus den ermittelten Kraftdaten wird die technische Spannung berechnet. Dazu werden die an den Kraftmessdosen KMD1 und KMD2 gemessenen Kräfte in ihre Komponenten zerlegt und auf die Ausgangsfläche des zu verformenden Fugendichtstoffs bezogen. Die Ausgangsfläche ergibt sich als Mittelwert aus den Fugenlängen in Richtung 1–2 und 1–3 und der mittleren Höhe des applizierten Fugendichtstoffs.

Die Verformungswege werden aus den Positionen der Antriebsmodule ermittelt. Anschließend wird aus den Verformungswegen und der mittleren Fugenbreite des Fugendichtstoffs die Dehnung bzw. Stauchung des Fugendichtstoffs ermittelt.

7.2 Die Scherzyklen

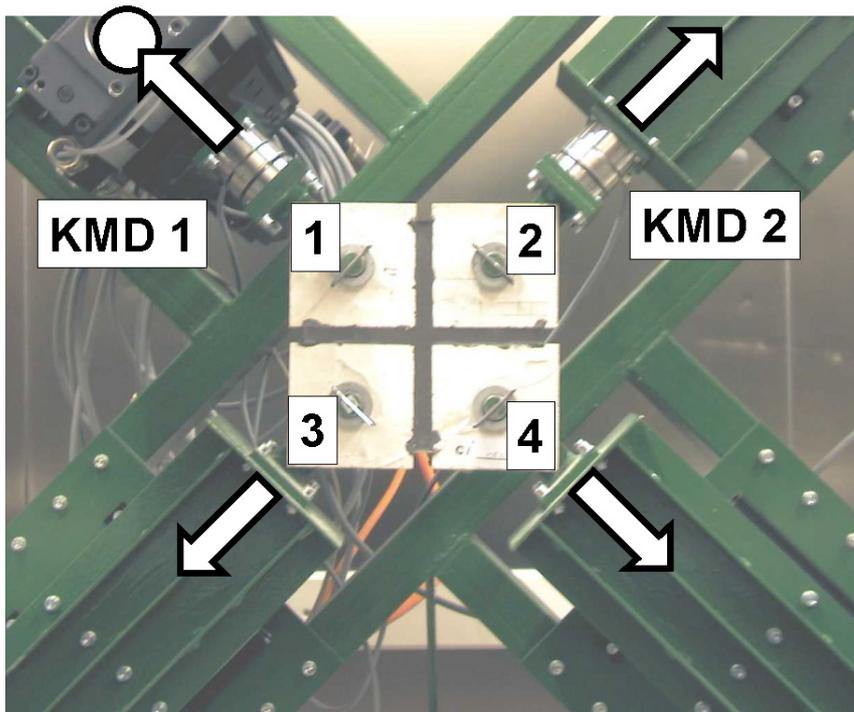


Abbildung 7-2: Eingespannter Probekörper mit Kreuzfuge: Die Pfeile markieren die Dehnrichtung, der Kreis die Antriebseinheit, die durch Bewegung in z–Richtung das Scheren hervorruft; beschriftet sind die Kraftmessdose 1 (KMD1), die der Steuerung und Datenerfassung dient, und die Kraftmessdose 2 (KMD 2), die ausschließlich der Datenerfassung dient.

Die Abbildung 7-2 zeigt einen eingespannten Probekörper mit einer Kreuzfuge. Während des Versuchs wird der Fugendichtstoff zunächst in Richtung der Kontaktplattenebene gedehnt. Die Pfeile zeigen die Richtung an. Nach der Relaxationszeit von 48 Stunden wird eine Scherverformung in den Fugendichtstoff eingetragen. Dazu wird die Platte 1 in z–Richtung, in Richtung der Flächennormalen der Kontaktplatte, bewegt. In der Abbildung ist das sich bewegende Antriebsmodul durch einen Kreis gekennzeichnet.

In der Auswertung wird für den Relaxationsvorgang die technische Spannung, wie in 7.1 beschrieben, berechnet. Für den Schervorgang werden die an den Kraftmessdosen KMD1 und KMD2 gemessenen Kraftwerte angegeben. Die Kräfte werden in der Ebene der Kontaktplatten gemessen. Die gemessenen Kraftwerte sind eine Überlagerung der Materialbeanspruchung infolge Dehnung und infolge Scherung. Eine Aufteilung der Kraft in den durch die Dehnung und den durch die Scherung hervorgerufenen Anteil ist nicht möglich. Der Dehnungswert für die Scherverformung wird aus der Position des Antriebsmoduls und der mittleren Höhe des Fugendichtstoffs ermittelt.

8 Die Prüfergebnisse

8.1 Hinweise zur Darstellung der Prüfergebnisse

Für jedes Material werden exemplarisch die Messkurven je einer Parallelfuge und einer Kreuzfuge erläutert. Dabei werden ausgewählte Kennwerte verglichen. Die Messergebnisse der untersuchten Materialien werden im Kapitel 9 einander gegenübergestellt.

Aus den aufgezeichneten Kraftwerten wurde, wie in Kapitel 7 erläutert, die Ingenieurspannung berechnet. Diese bezieht sich auf die gemittelte Ist-Querschnittsfläche des jeweiligen Probekörpers. Aus den Wegdaten wurde die technische Dehnung berechnet. Die Bezugsfugenhöhe ist die gemittelte Ist-Fugenhöhe des Probekörpers.

Der Fugendichtstoff wurde 7 Wochen vor dem Beginn der Dehnzyklen appliziert. Nach Beendigung der Dehnzyklen lagerten die Probekörper bis zum Beginn der Stauchzyklen für 40 Tage in der Klimakammer bei einem Normklima von 20°C und 65% relativer Luftfeuchte.

8.2 Material A

8.2.1 Die Dehnzyklen

8.2.1.1 Die Parallelfuge

Das linke Diagramm in Abbildung 8-1 zeigt den Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit. Erkennbar sind, dass sich die Spannung mit zunehmender Zyklenanzahl einem Endwert annähert. Die Spannungswerte zu Beginn sowie zum Ende der Haltezeit im gedehnten Zustand sind miteinander verbunden. Die Differenz zwischen beiden Kurven ist nahezu konstant. Der Spannungsabbau infolge Relaxation bleibt während der 50 Zyklen konstant.

Das rechte Diagramm stellt den Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Dehnung dar. Das Materialverhalten ist nichtlinear. Die Belastungskurve der Erstbelastung weicht von denen der weiteren Belastungen ab, wie Abbildung 8-2 zeigt.

Dieser Effekt wird in der Literatur als MULLINS-Effekt bezeichnet und ist typisch für Kunststoffe. Die zu beobachtende Entfestigung wird auf das Aufbrechen physikalischer Bindungen bei Erstbelastung zurückgeführt. (z.B. in Stomm99) Die Entlastungskurve verläuft nahezu linear.

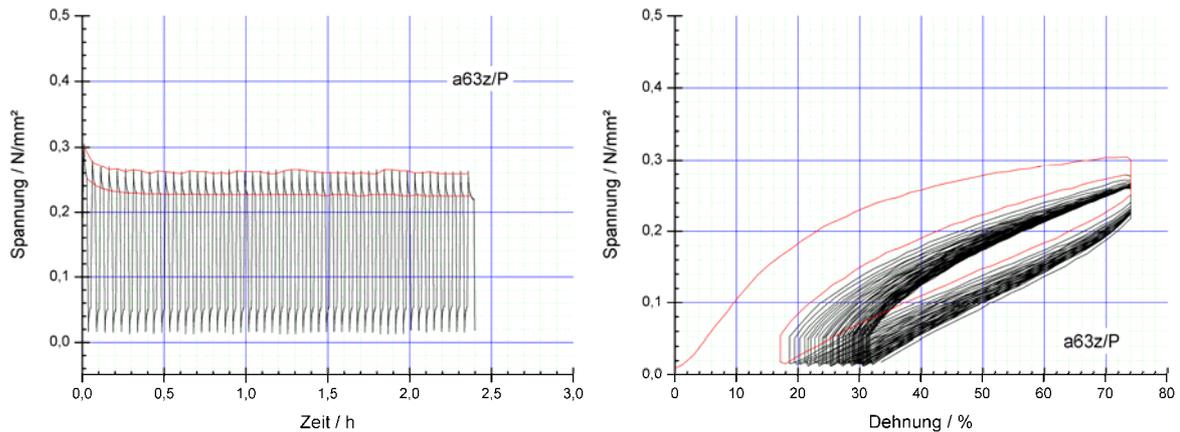


Abbildung 8-1: Zyklischer Dehnversuch an einer Parallelfuge vom Material A bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

Mit Zunahme der Zyklenanzahl wird das Material im oberen Belastungsbereich steifer, wie die Messkurve für den 50. Zyklus (fett blau dargestellt) durch ihren Anstieg zeigt.

Wird als Maß für die Steifigkeit der Sekantenmodul zwischen Belastungsbeginn und einer Dehnung von 10% definiert, so nimmt die Steifigkeit mit zunehmender Beanspruchung ab.

Nach Entlastung des Materials verbleibt nach einem Zyklus eine Restdehnung von + 17%; nach 50 Zyklen beträgt die Restdehnung + 32%.

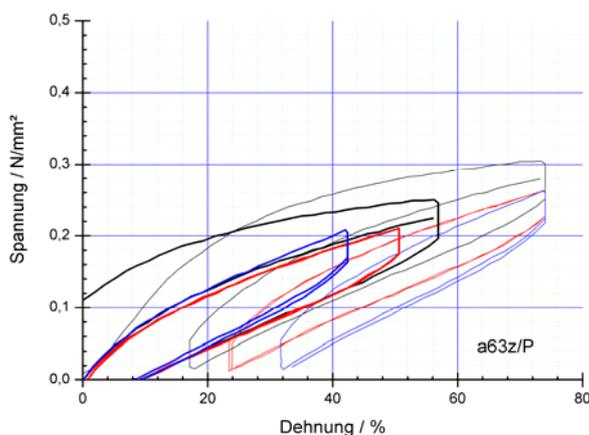


Abbildung 8-2: Zyklischer Dehnversuch an einer Parallelfuge vom Material A bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Dehnungs–Diagramm, dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven für den 1. Zyklus (schwarz), den 10. Zyklus (rot) und den 50. Zyklus (blau), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.2.1.2 Die Kreuzfuge

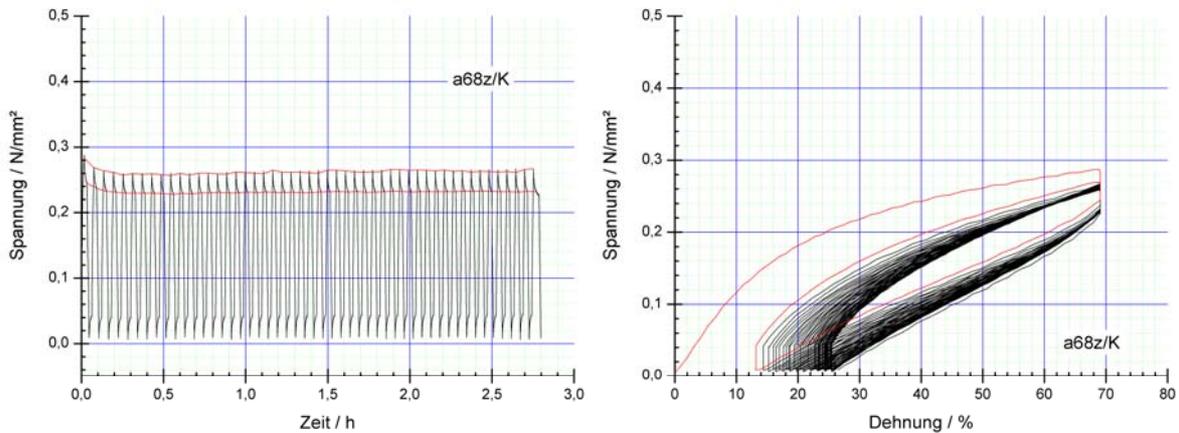


Abbildung 8-3: Zyklischer Dehnversuch an einer Kreuzfuge vom Material A bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

Die Messkurven unterscheiden sich von den an den Parallelfugen ermittelten sowohl in den Messwerten als auch in den Kurvenverläufen nur gering. Zu beobachten ist ebenfalls, dass sich mit zunehmender Zyklenanzahl die Spannungen einem Endwert annähern, der Spannungsabbau infolge Relaxation während der Haltezeiten im gedehnten Zustand über die 50 Zyklen konstant ist, die Belastungskurve der Erstbelastung von denen der weiteren Belastungen abweicht und das Material mit zunehmender Zyklenanzahl im oberen Dehnbereich steifer wird (Messkurvenverlauf ändert sich). Die Messergebnisse unterscheiden sich in den verbleibenden Restdehnungen nach einem Zyklus (+ 13% gegenüber +17 %) und nach 50 Zyklen (+25 % gegenüber +32 %).

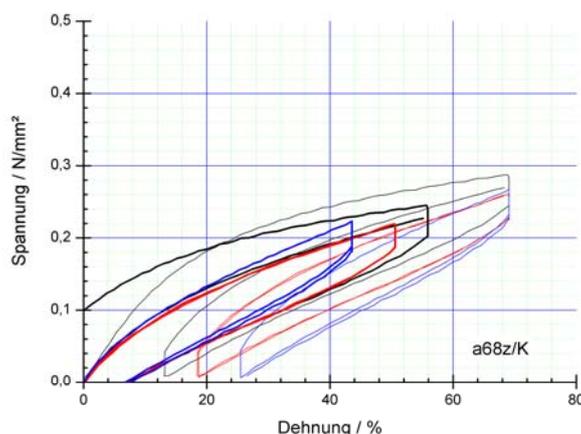


Abbildung 8-4: Zyklischer Dehnversuch an einer Kreuzfuge vom Material A bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Dehnungs–Diagramm, dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven für den 1. Zyklus (schwarz), den 10. Zyklus (rot) und den 50. Zyklus (blau), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.2.2 Die Stauchzyklen

8.2.2.1 Die Parallelfuge

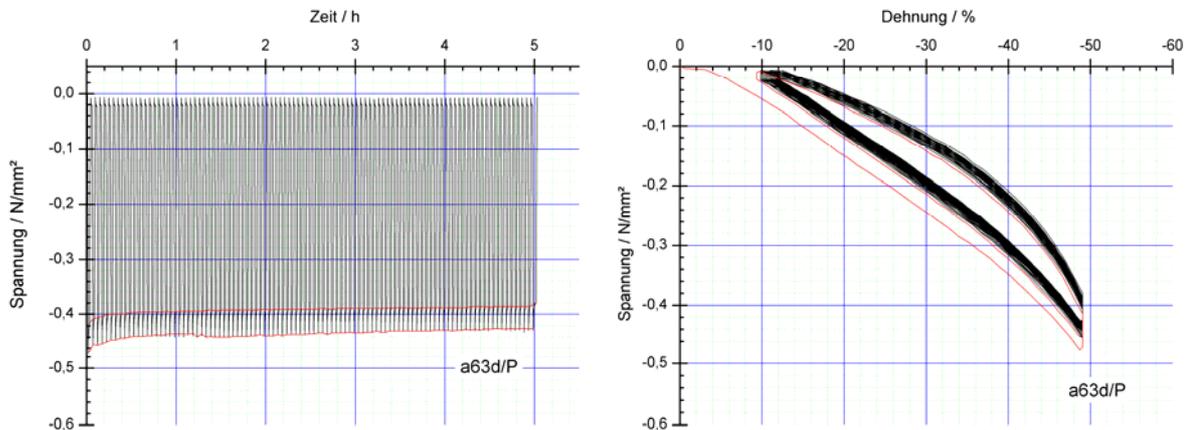


Abbildung 8-5: Zyklischer Stauchversuch an einer Parallelfuge vom Material A bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

Das linke Diagramm in Abbildung 8-5 zeigt den Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit. Die Maximalwerte der Spannung der Belastungszyklen nehmen mit zunehmender Zyklenanzahl ab und nähern sich einem Endwert an. Für den gestauchten Zustand sind die maximalen Spannungen miteinander verbunden; ebenso die minimalen Spannungswerte. Die Differenz der beiden Kurven ist nahezu konstant. Der Spannungsabbau infolge Relaxation bleibt über die 100 Zyklen konstant.

Das rechte Diagramm stellt den Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Dehnung dar. Das Materialverhalten ist, wie beim zyklischen Dehnen, nichtlinear. Die Belastungskurve der Erstbelastung weicht von denen der weiteren Belastungen ab. Aus Abbildung 8-6 lassen sich die bei Entlastung verbleibenden Restdehnungen ablesen. Sie betragen nach einem Zyklus –9 %, nach 50 Zyklen –11 % und nach 100 Zyklen –12 %.

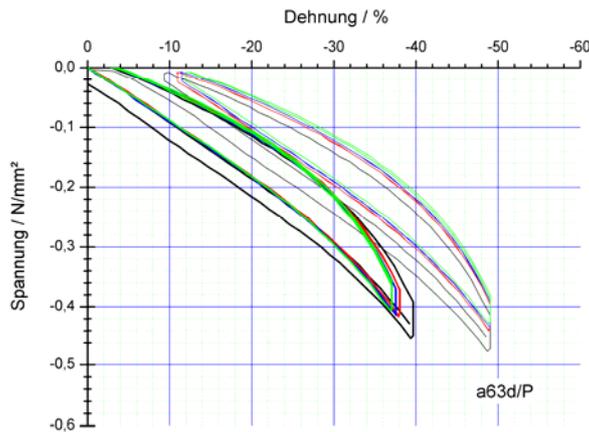


Abbildung 8-6: Zyklischer Stauchversuch an einer Parallelfuge vom Material A bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, dargestellt sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für den ersten Zyklus (schwarz), den 20. Zyklus (rot), den 50. Zyklus (blau) und den 100. Zyklus (grün), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.2.2.2 Die Kreuzfuge

Die Messkurven unterscheiden sich sowohl in den Messwerten als auch in den Kurvenverläufen kaum von denen der Parallelfuge. Es zeigen sich die Abnahme der maximalen Spannungen im Belastungszyklus mit zunehmender Zyklanzahl, die Annäherung der Spannungen an einen Endwert mit zunehmender Zyklanzahl, der konstante Spannungsabbau infolge Relaxation während der Haltezeiten im gestauchten Zustand über den betrachteten Zeitraum von 100 Zyklen sowie der Unterschied zwischen den Belastungskurven infolge Erstbelastung und den weiteren Belastungen. Die Messergebnisse unterscheiden sich lediglich in den verbleibenden Restdehnungen bei Entlastung, z.B. nach einem Zyklus -7 % gegenüber -9 %, nach 50 Zyklen -9 % gegenüber -11 % und nach 100 Zyklen -10 % gegenüber -12 %.

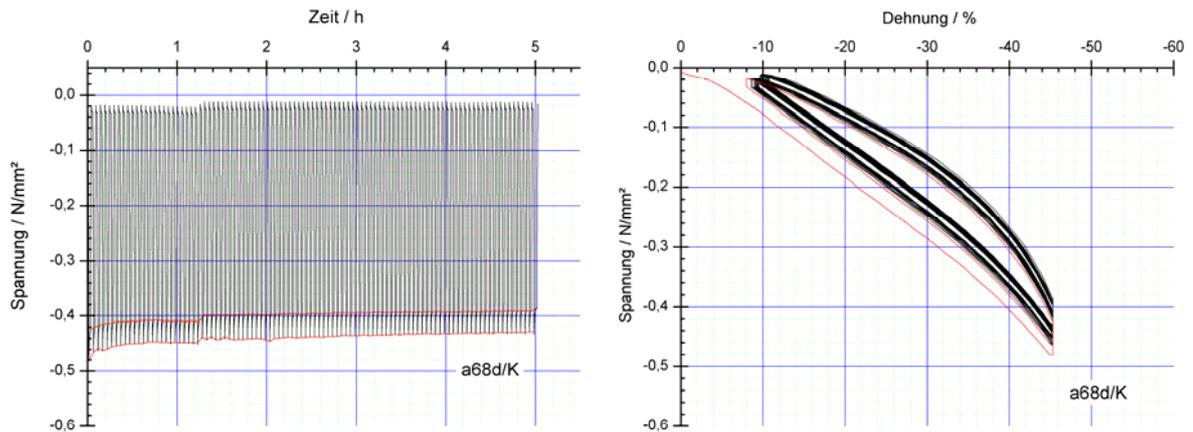


Abbildung 8-7: Zyklischer Stauchversuch an einer Kreuzfuge vom Material A bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

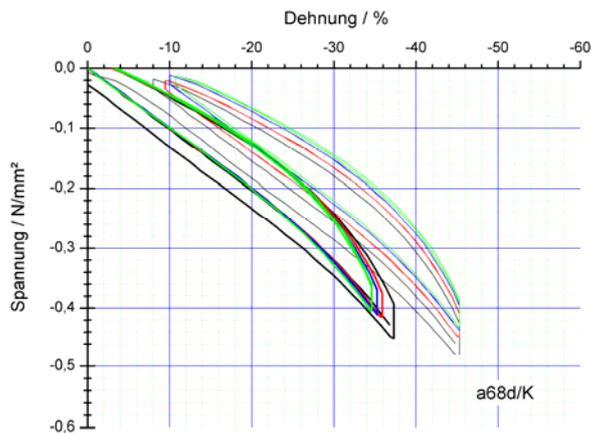


Abbildung 8-8: Zyklischer Stauchversuch an einer Kreuzfuge vom Material A bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Dehnungs–Diagramm, dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven für den ersten Zyklus (schwarz), den 20. Zyklus (rot), den 50. Zyklus (blau) und den 100. Zyklus (grün), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.2.3 Die Scherzyklen

8.2.3.1 Die Parallelfuge

Das linke Diagramm in Abbildung 8-9 zeigt den Spannungs–Zeit–Verlauf für die 48stündige Relaxation des Fugendichtstoffs bei einer Dehnung von 25% bei -20°C . Während der Relaxation wird die Spannung von ca. $0,17\text{ N/mm}^2$ auf ca. $0,07\text{ N/mm}^2$ abgebaut und beträgt ca. 41 % der maximalen Spannung. Der Graph lässt vermuten, dass die Gleichgewichtsspannung nach der Relaxationszeit noch nicht erreicht ist, und es zu einem weiteren, wenn auch minimalen, Spannungsabbau kommen wird. Das rechte Diagramm zeigt den Kraft–Dehnungs–Verlauf während der 100 Scherzyklen bei -20°C . Die mittlere aufzubringende Kraft beträgt ca. 70 N. Sie nimmt mit Zunahme der Scherzyklen ab. Im Nulldurchgang des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 40 N. Sie ist geringer als die Kraft, die sich nach der 48stündigen Relaxation eingestellt hat. Der Kräfteverlauf ist in beiden Auslenkungsrichtungen symmetrisch.

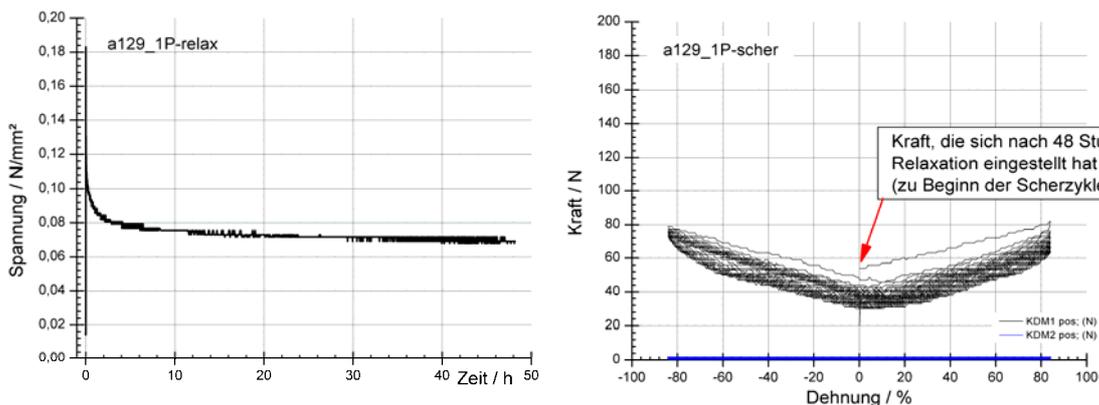


Abbildung 8-9: Zyklischer Scherversuch an einer Parallelfuge vom Material A bei -20°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm während der 48-stündigen Relaxation (links), Kraft–Dehnungs–Diagramm während der 100 Scherzyklen (rechts)

8.2.3.2 Die Kreuzfuge

Die Abbildung 8-10 zeigt im linken Diagramm den Spannungs–Zeit–Verlauf für die 48stündige Relaxation bei einer Dehnung von ca. 25 % bei -20°C . Während der Relaxation nimmt die Spannung von ca. $0,16\text{ N/mm}^2$ auf ca. $0,08\text{ N/mm}^2$ ab. Die maximale Spannung ist geringfügig geringer, der Spannungswert nach 48 Stunden geringfügig größer als bei der Parallelfuge. Das rechte Diagramm zeigt den Kraft–Dehnungs–Verlauf für die 100 Scherzyklen bei -20°C . Dargestellt sind die an beiden Kraftmessdosen gemessenen Werte, die sich geringfügig voneinander

unterschieden. Die mittlere während des Scherens aufzubringende Kraft beträgt für beide Richtungen ca. 130 N, während des Nulldurchgangs des Scherwegs beträgt die Kraft zwischen 80 N und 90 N. Diese Werte liegen unterhalb der Kraft, die sich nach 48 Stunden Relaxation eingestellt hat.

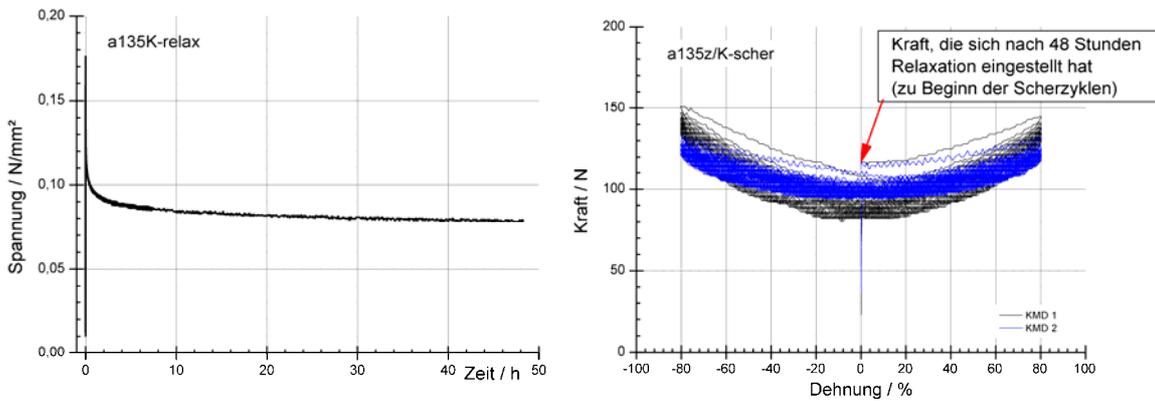


Abbildung 8-10: Zyklischer Scherversuch an einer Kreuzfuge vom Material A bei -20°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm während der 48-stündigen Relaxation (links), Kraft–Dehnungs–Diagramm während der 100 Scherzyklen (rechts)

8.3 Material B

8.3.1 Die Dehnzyklen

8.3.1.1 Die Parallelfuge

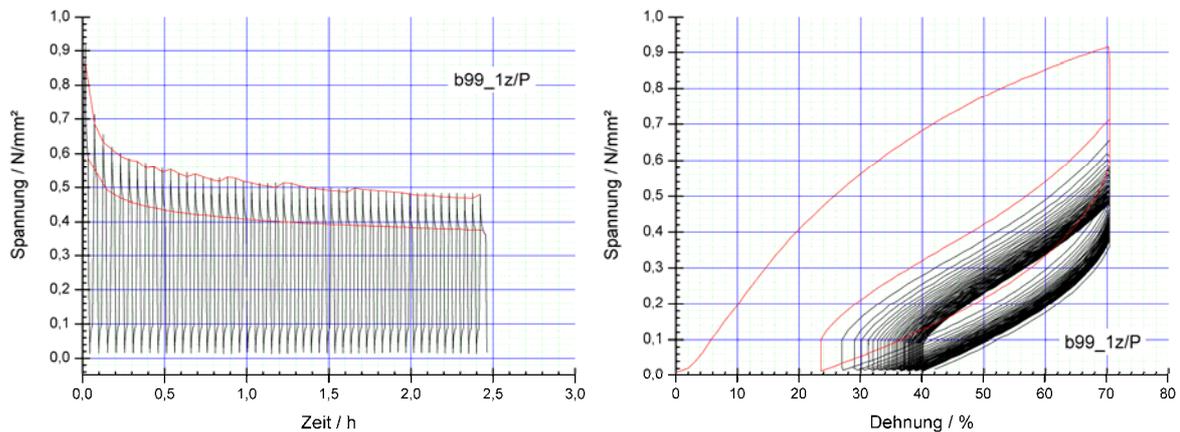


Abbildung 8-11 Zyklischer Dehnversuch an einer Parallelfuge vom Material B bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

Das linke Diagramm in Abbildung 8-11 stellt den Spannungs–Zeit–Verlauf während der Dehnzyklen dar. Die bei Erstbelastung bei maximaler Dehnung gemessene maximale Spannung beträgt $0,9 \text{ N/mm}^2$ und fällt bis zum Ende des Versuchs sehr stark ab. Es ist nach 50 Zyklen keine Annäherung an einen konstanten Spannungswert zu beobachten. Die Spannungsabnahme während der Relaxation in den Haltezeiten im gedehnten Zustand ist während des Versuchs nahezu konstant. Im rechten Diagramm ist die Spannung in Abhängigkeit von der Dehnung dargestellt. Der Kurvenverlauf zeigt einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung. Dies trifft sowohl für die Belastung als auch für die Entlastung zu. Die Kurve der Erstbelastung ist im Gegensatz zu den weiteren Belastungskurven konkav gekrümmt.

Die verbleibenden Restdehnungen bei Entlastung lassen sich für den ersten Zyklus mit 24 % und für den 50. Zyklus mit 40 % aus dem Diagramm in Abbildung 8-12 ablesen.

Die Steifigkeit, gemessen am Sekantenmodul bei 10% Dehnung, nimmt mit zunehmender Zyklenanzahl ab.

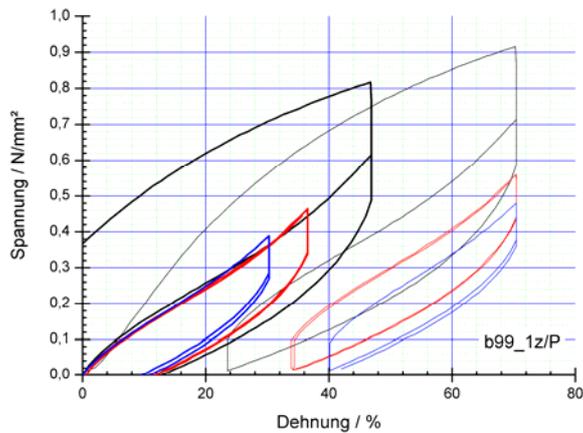


Abbildung 8-12: Zyklischer Dehnversuch an einer Parallelfuge vom Material B bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, dargestellt sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für den 1. Zyklus (schwarz), den 10. Zyklus (rot) und den 50. Zyklus (blau), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.3.1.2 Die Kreuzfuge

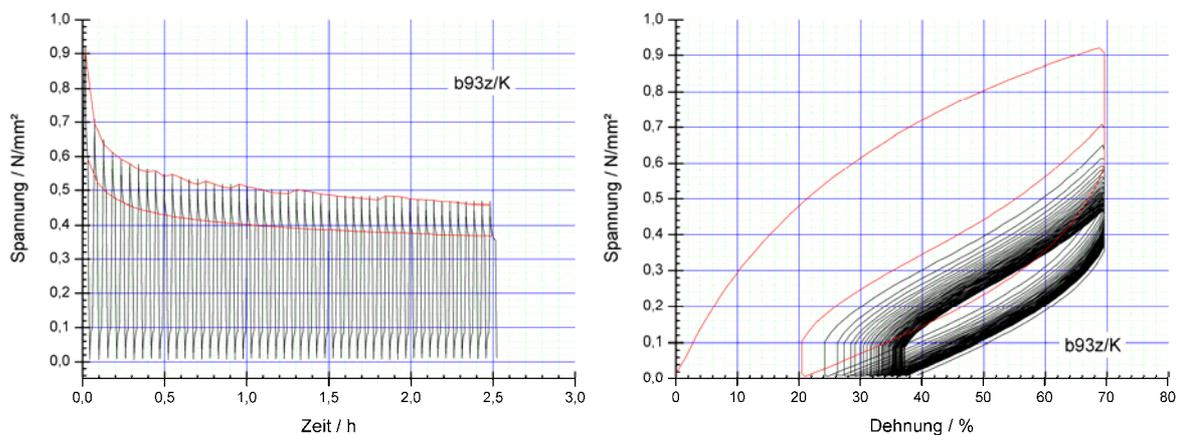


Abbildung 8-13: Zyklischer Dehnversuch an einer Kreuzfuge vom Material B bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs-Zeit-Diagramm (links) und Spannungs-Dehnungs-Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

Die Messkurven der Kreuzfuge sind in den Kurvenverläufen und in den Messwerten nahezu identisch mit denen der Parallelfuge.

Es sind ebenfalls der starke Spannungsabfall zwischen erster Belastungskurve und den weiteren Belastungskurven, der Unterschied im Verlauf der Belastungskurven, die Nichtlinearität der Spannungs-Dehnungs-Beziehung während der Be- und Entlastung und das Vorhandensein des MULLINS-Effekts zu beobachten.

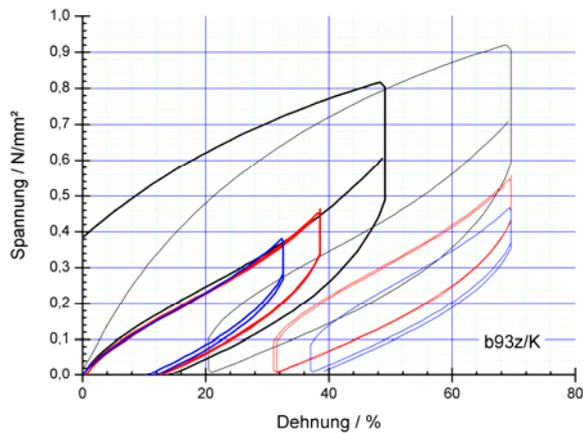


Abbildung 8-14: Zyklischer Dehnversuch an einer Kreuzfuge vom Material B bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, dargestellt sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für den 1. Zyklus (schwarz), den 10. Zyklus (rot) und den 50. Zyklus (blau), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.3.2 Die Stauchzyklen

8.3.2.1 Die Parallelfuge

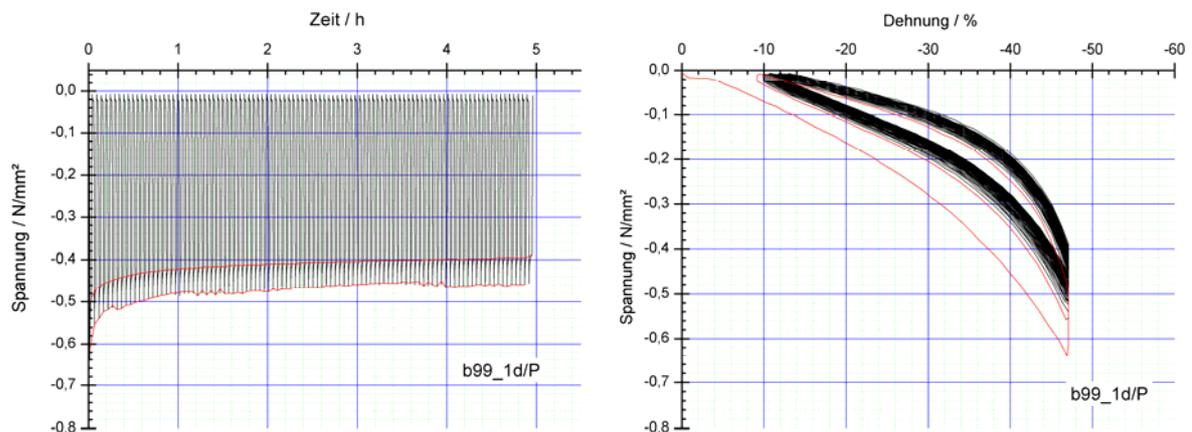


Abbildung 8-15: Zyklischer Stauchversuch an einer Parallelfuge vom Material B bei $+50^{\circ}\text{C}$ über 100 Zyklen: Spannungs-Zeit-Diagramm (links) und Spannungs-Dehnungs-Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

Das linke Diagramm in Abbildung 8-15 zeigt, dass die maximalen Spannungen mit zunehmender Zyklenanzahl deutlich abnehmen. Der Spannungsabbau infolge Relaxation im gestauchten Zustand ist über die Versuchszeit nahezu konstant. Die Verläufe der Be- und Entlastungskurven unterscheiden sich zwischen Erstbelastung und weiterer Belastung kaum.

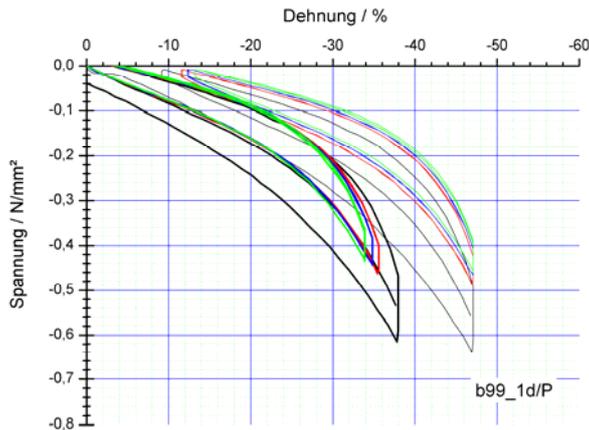


Abbildung 8-16: Zyklischer Stauchversuch an einer Parallelfuge vom Material B bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, dargestellt sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für den ersten Zyklus (schwarz), den 20. Zyklus (rot), den 50. Zyklus (blau) und den 100. Zyklus (grün), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.3.2.2 Die Kreuzfuge

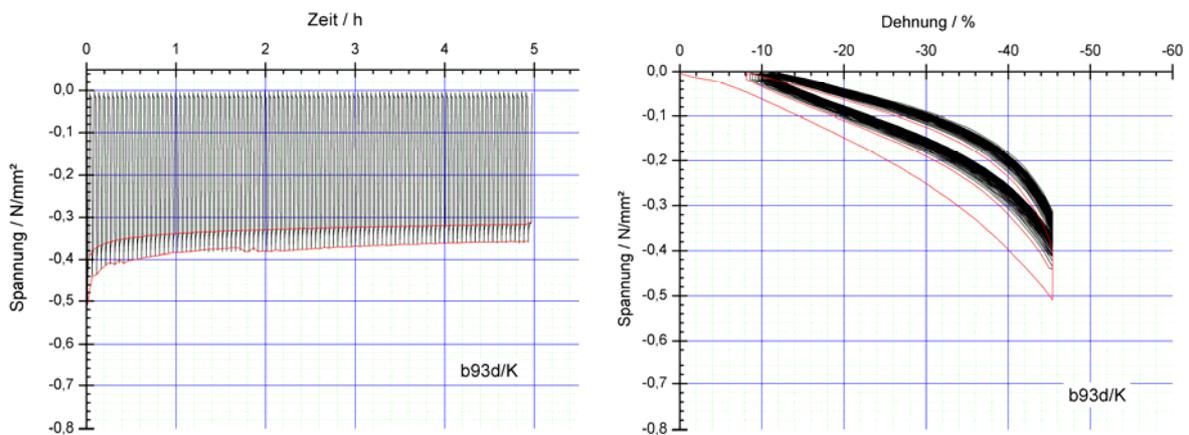


Abbildung 8-17: Zyklischer Stauchversuch an einer Kreuzfuge vom Material B bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs-Zeit-Diagramm (links) und Spannungs-Dehnungs-Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

Die Messkurven, die an Kreuzfugen ermittelt wurden, weisen, wie die an den Parallelfugen ermittelten Messkurven, einen Abfall der maximalen Spannungen bei zunehmender Zyklenzahl, eine konstante Spannungsabnahme während der Relaxationszeit im gestauchten Zustand, einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung sowie eine Übereinstimmung der Belastungskurven auf. Die verbleibenden Reststauchungen nach Entlastung liegen in der gleichen Größenordnung.

Die maximalen Spannungen, gemessen an der Kreuzfuge, sind ca. 10% geringer als an der Parallelfuge.

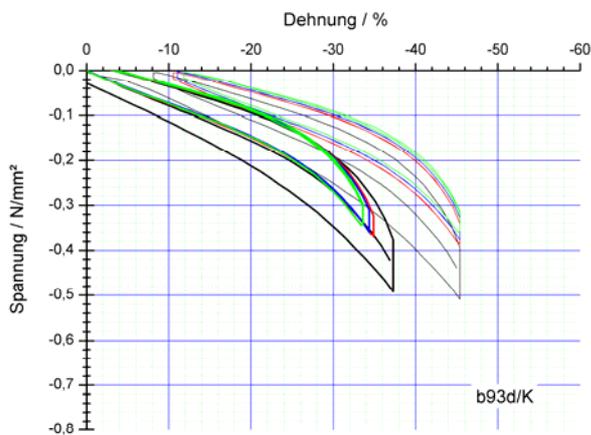


Abbildung 8-18: Zyklischer Stauchversuch an einer Kreuzfuge vom Material B bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, dargestellt sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für den ersten Zyklus (schwarz), den 20. Zyklus (rot), den 50. Zyklus (blau) und den 100. Zyklus (grün), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.3.3 Die Scherzyklen

8.3.3.1 Die Parallelfuge

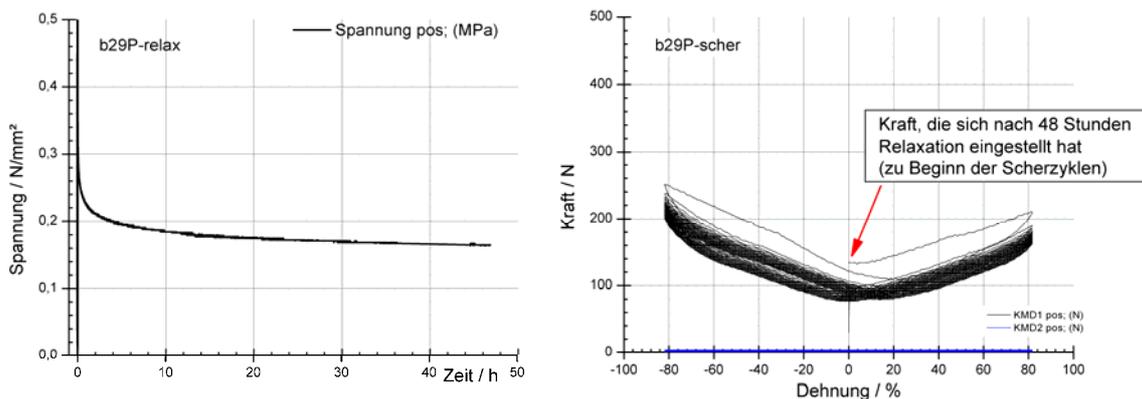


Abbildung 8-19: Zyklischer Scherversuch an einer Parallelfuge vom Material B bei -20°C über 100 Zyklen: Spannungs-Zeit-Diagramm während der 48-stündigen Relaxation (links), Kraft-Dehnungs-Diagramm während der 100 Scherzyklen (rechts)

In dem linken Diagramm der Abbildung 8-19 ist der Spannungs-Zeit-Verlauf für die 48-stündige Relaxation des Fugendichtstoffs bei einer Dehnung von 25% bei -20°C dargestellt. Während der Relaxation wird die Spannung von ca.

0,52 N/mm² auf ca. 0,16 N/mm² abgebaut und beträgt ca. 32 % der maximalen Spannung. Der Graph zeigt deutlich, dass die Gleichgewichtsspannung nach der Relaxationszeit noch nicht erreicht ist. Das rechte Diagramm zeigt den Kraft–Dehnungs–Verlauf während der 100 Scherzyklen bei –20 °C. Die mittlere aufzubringende Kraft beträgt ca. 210 N bzw. 150 N. Sie nimmt mit Zunahme der Scherzyklen ab. Im Nulldurchgang des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 90 N. Sie ist geringer als die Kraft, die sich nach der 48-stündigen Relaxation eingestellt hat. Der Kräfteverlauf ist für beide Auslenkungsrichtungen unsymmetrisch.

8.3.3.2 Die Kreuzfuge

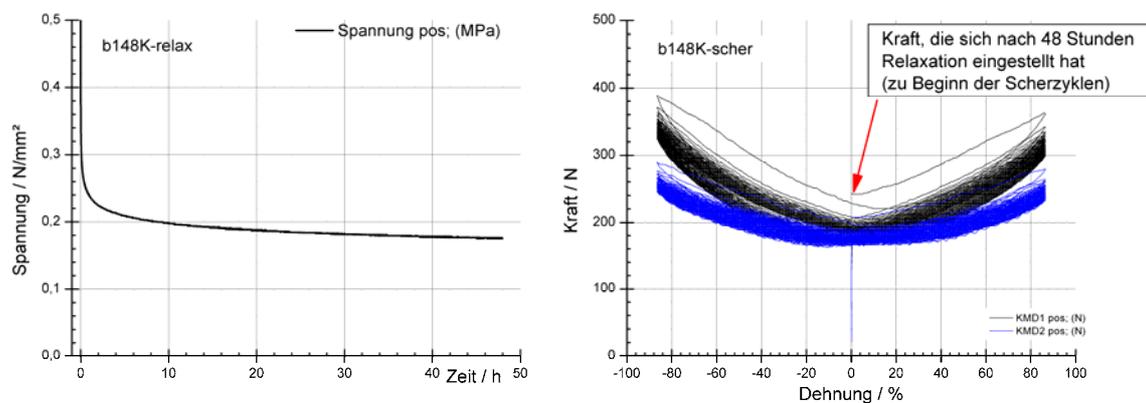


Abbildung 8-20: Zyklischer Scherversuch an einer Kreuzfuge vom Material B bei –20°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm während der 48-stündigen Relaxation (links), Kraft–Dehnungs–Diagramm während der 100 Scherzyklen (rechts)

Abbildung 8-20 zeigt im linken Diagramm den Spannungs–Zeit–Verlauf für die 48-stündige Relaxation bei einer Dehnung von ca. 25 % bei –20°C. Während der Relaxation nimmt die Spannung von ca. 0,51 N/mm² auf ca. 0,18 N/mm² ab. Die maximale Spannung ist geringfügig geringer, der Spannungswert nach 48 Stunden geringfügig größer als bei der Parallelfuge. Das rechte Diagramm zeigt den Kraft–Dehnungs–Verlauf für die 100 Scherzyklen bei –20°C. Dargestellt sind die an beiden Kraftmessdosen gemessenen Werte, die sich im Bereich der maximalen Auslenkung deutlich voneinander unterscheiden. Die mittlere während des Scherens aufzubringende Kraft beträgt, gemessen an der während des Scherens bewegten Platte (schwarze Kurve), ca. 310 N bzw. 330 N, während des Nulldurchgangs des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 190 N. Die mittleren Kräfte, gemessen an der nicht bewegten Platte (blaue Kurve), betragen 250 N, im Nulldurchgang des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 170 N. Die Kraftwerte im Nulldurchgang liegen unterhalb der Kraft, die sich nach 48 Stunden Relaxation eingestellt hat.

8.4 Material C

8.4.1 Die Dehnzyklen

8.4.1.1 Die Parallelfuge

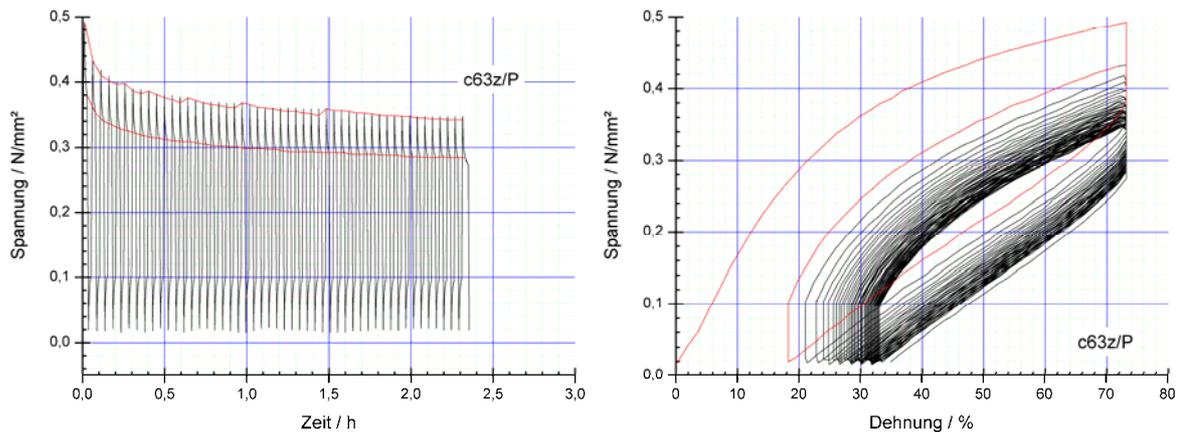


Abbildung 8-21: Zyklischer Dehnversuch an einer Parallelfuge vom Material C bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegtem ersten Zyklus

Das linke Diagramm in Abbildung 8-21 stellt die Spannung in Abhängigkeit von der Zeit dar. Bei Erstbelastung wurde eine maximale Spannung von $0,49\text{ N/mm}^2$ gemessen. Diese fällt auf $0,35\text{ N/mm}^2$ im 50. Zyklus ab. Der Kurvenverlauf lässt vermuten, dass eine Gleichgewichtsspannung noch nicht erreicht ist. Die Spannungsabnahme während der Relaxation ist mit ca. $0,07\text{ N/mm}^2$ nahezu konstant. Im rechten Diagramm ist die Spannung über die Dehnung aufgetragen. Die Spannung ist nichtlinear von der Dehnung abhängig. Die Entlastungskurve ist leicht S-förmig gekrümmt.

Die bei Entlastung verbleibende Restdehnung beträgt nach einem Zyklus 18 % und nach 50 Zyklen 33 %. Diese Werte lassen sich im Diagramm der Abbildung 8-22 ablesen.

Die Steifigkeit, gemessen als Sekantenmodul bei 10 % Dehnung, nimmt mit zunehmender Zyklenanzahl ab.

Der Belastungskurve vom ersten Zyklus unterscheidet sich von denen der weiteren Zyklen (MULLINS-Effekt).

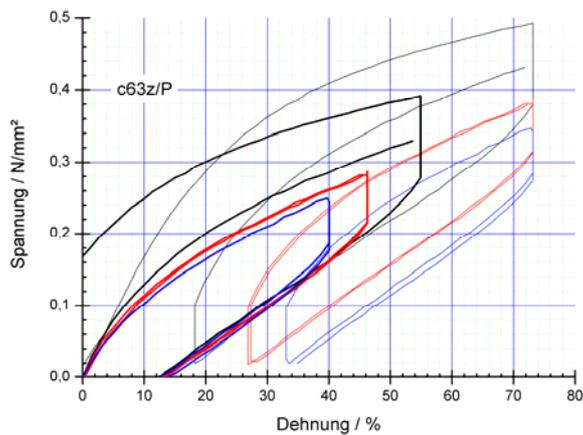


Abbildung 8-22: Zyklischer Dehnversuch an einer Parallelfuge vom Material C bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, dargestellt sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für den 1. Zyklus (schwarz), den 10. Zyklus (rot) und den 50. Zyklus (blau), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.4.1.2 Die Kreuzfuge

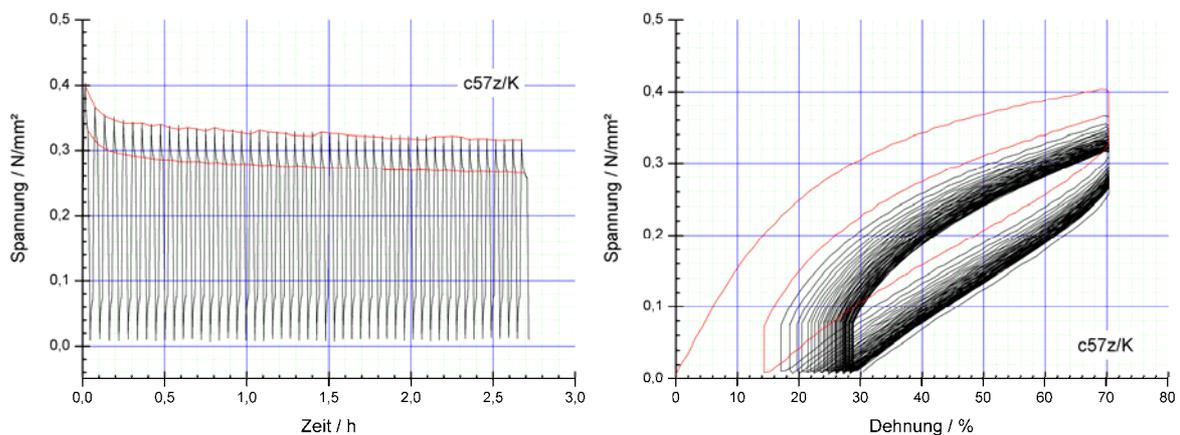


Abbildung 8-23: Zyklischer Dehnversuch an einer Kreuzfuge vom Material C bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs-Zeit-Diagramm (links) und Spannungs-Dehnungs-Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

Die an den Kreuzfugen ermittelten Messergebnisse unterscheiden sich von den an den Parallelfugen ermittelten durch die Größe der gemessenen Spannungswerte. An den Kreuzfugen sind die gemessenen Spannungen im Durchschnitt um ca. 20 % geringer als an den Parallelfugen. Weiterhin unterschiedlich sind die bleibenden Restdehnungen bei Entlastung. Ursache hierfür kann die geringere Enddehnung sein. Die Kurvenverläufe sind identisch. Neben dem Abfall der maximalen Spannung mit zunehmender Zyklenanzahl weisen die Messkurven den Unter-

schied zwischen den Messkurven infolge Erstbelastung und weiteren Belastungen und die leicht S-förmige Entlastungskurve auf.

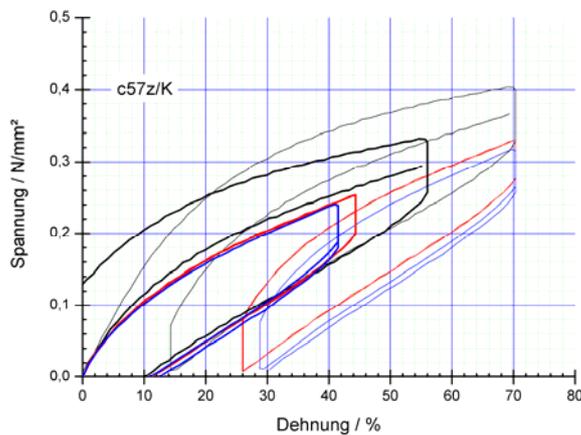


Abbildung 8-24: Zyklischer Dehnversuch an einer Kreuzfuge vom Material C bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs-Dehnungs-Diagramm, dargestellt sind die Spannungs-Dehnungs-Kurven für den 1. Zyklus (schwarz), den 10. Zyklus (rot) und den 50. Zyklus (blau), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.4.2 Die Stauchzyklen

8.4.2.1 Die Parallelfuge

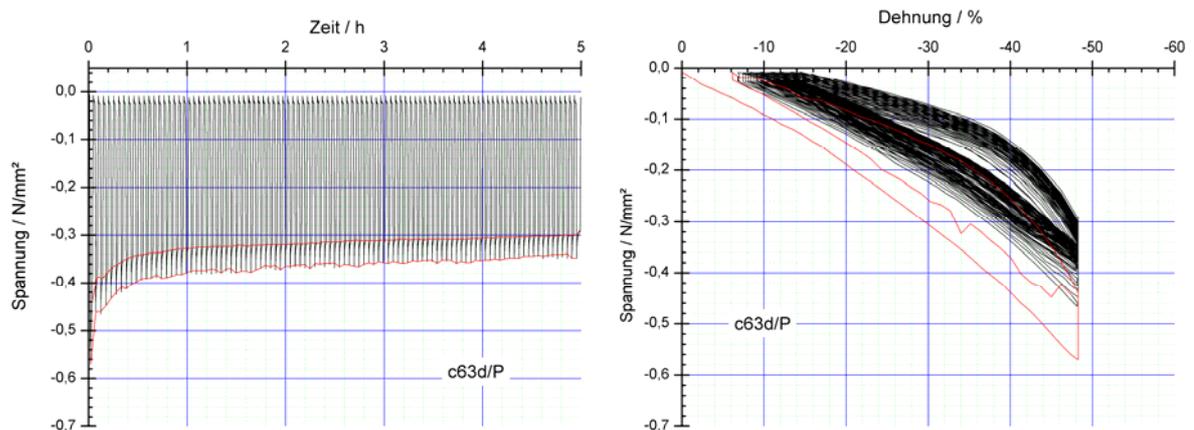


Abbildung 8-25: Zyklischer Stauchversuch an einer Parallelfuge vom Material C bei $+50^{\circ}\text{C}$ über 100 Zyklen: Spannungs-Zeit-Diagramm (links) und Spannungs-Dehnungs-Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

In Abbildung 8-25 ist im linken Diagramm die Spannung in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Bei Erstbelastung betrug die maximale Spannung im gedehnten Zustand $-0,57\text{ N/mm}^2$. Nach 100 Stauchzyklen beträgt diese nur noch

–0,35 N/mm². Die Spannung wird mit zunehmender Zyklusanzahl weiterhin abnehmen. Die Spannungsabnahme während der Relaxationszeit beträgt ca. 0,05 N/mm². Im rechten Diagramm ist die Spannung in Abhängigkeit von der Dehnung dargestellt. Die Spannung hängt sowohl bei Be- als auch Entlastung nicht-linear von der Dehnung ab. Die Belastungskurve der ersten Stauchung weicht von denen der weiteren Stauchungen ab. Aus Abbildung 8-26 lassen sich die bleibenden Stauchungen bei Entlastung ablesen. Sie betragen nach einem Zyklus –8 %, nach 50 Zyklen –12 % und nach 100 Zyklen –17 %.

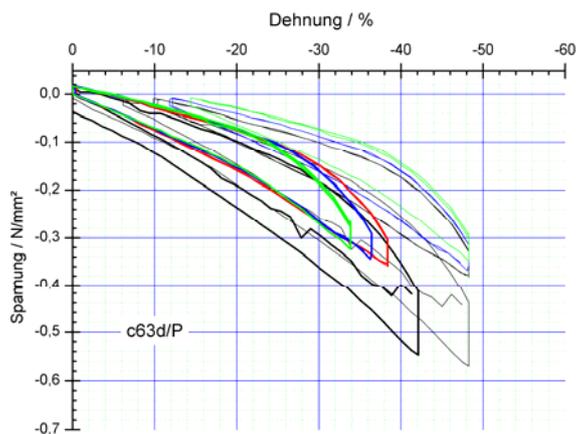


Abbildung 8-26: Zyklischer Stauchversuch an einer Parallelfuge vom Material C bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Dehnungs–Diagramm, dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven für den ersten Zyklus (schwarz), den 20. Zyklus (rot), den 50. Zyklus (blau) und den 100. Zyklus (grün), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.4.2.2 Die Kreuzfuge

Die Messkurven der Kreuzfuge unterscheiden sich kaum in den Kurvenverläufen und Messwerten von denen der Parallelfuge. Es lassen sich die Abnahme der maximalen Spannung mit zunehmender Zyklusanzahl, der nahezu konstante Spannungsabbau infolge Relaxation sowie der Unterschied in den Belastungskurven aus Erst- und Folgebelastrung feststellen.

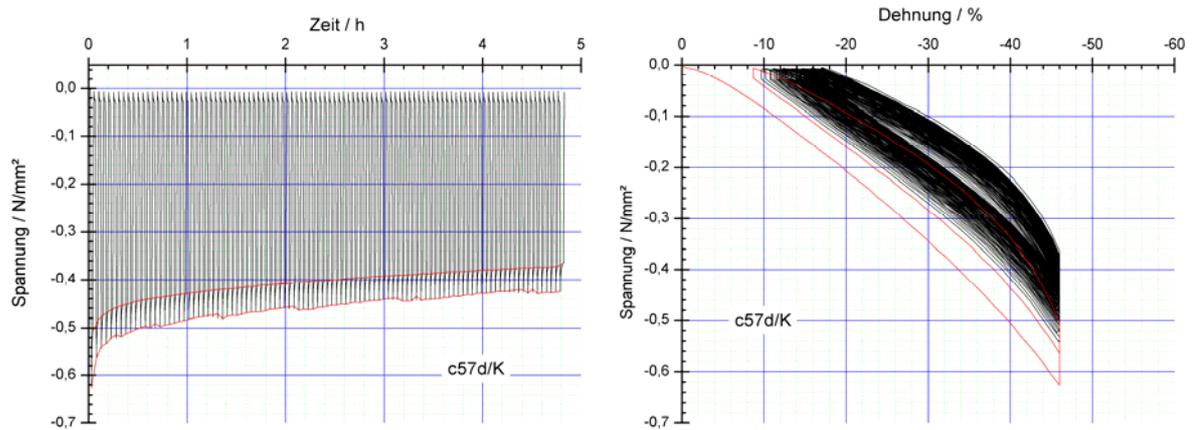


Abbildung 8-27: Zyklischer Stauchversuch an einer Kreuzfuge vom Material C bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

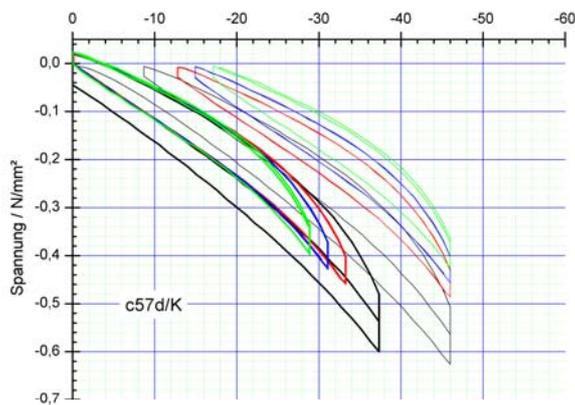


Abbildung 8-28: Zyklischer Stauchversuch an einer Kreuzfuge vom Material C bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Dehnungs–Diagramm, dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven für den ersten Zyklus (schwarz), den 20. Zyklus (rot), den 50. Zyklus (blau) und den 100. Zyklus (grün), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.4.3 Die Scherzyklen

8.4.3.1 Die Parallelfuge

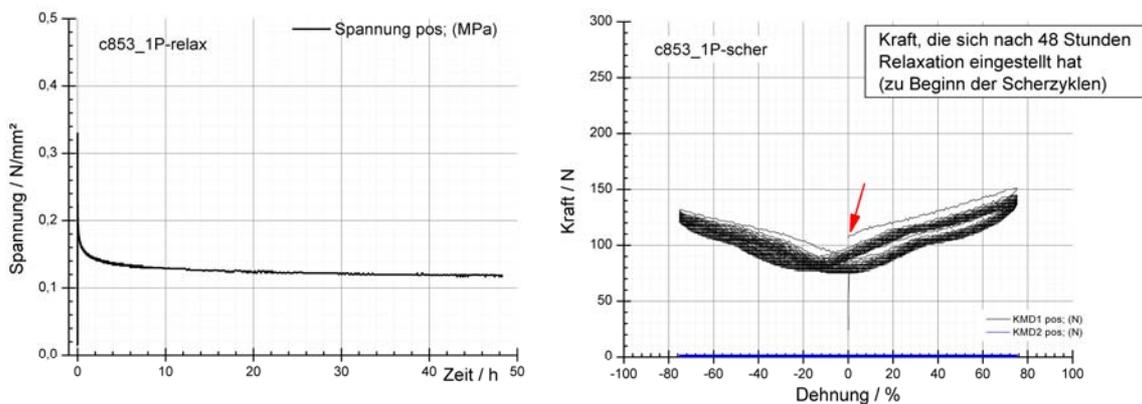


Abbildung 8-29: Zyklischer Scherversuch an einer Parallelfuge vom Material C bei -20°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm während der 48-stündigen Relaxation (links), Kraft–Dehnungs–Diagramm während der 100 Scherzyklen (rechts)

Im linken Diagramm der Abbildung 8-29 ist der Spannungs–Zeit–Verlauf für die 48-stündige Relaxation des Fugendichtstoffs bei einer Dehnung von 25% bei -20°C dargestellt. Während der Relaxation wird die Spannung von ca. $0,33\text{ N/mm}^2$ auf ca. $0,12\text{ N/mm}^2$ abgebaut und beträgt ca. 36 % der maximalen Spannung. Der Graph zeigt, dass die Gleichgewichtsspannung nach der Relaxationszeit noch nicht erreicht ist. Das rechte Diagramm zeigt den Kraft–Dehnungs–Verlauf während der 100 Scherzyklen bei -20°C . Die mittlere aufzubringende Kraft beträgt ca. 140 N bzw. 125 N. Sie nimmt mit Zunahme der Scherzyklen ab. Im Nulldurchgang des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 80 N. Sie ist geringer als die Kraft, die sich nach der 48-stündigen Relaxation eingestellt hat. Der Kräfteverlauf ist für beide Auslenkungsrichtungen unsymmetrisch.

8.4.3.2 Die Kreuzfuge

Das linke Diagramm in Abbildung 8-30 zeigt den Spannungs–Zeit–Verlauf für die 48-stündige Relaxation bei einer Dehnung von ca. 25 % bei -20°C . Während der Relaxation nimmt die Spannung von ca. $0,32\text{ N/mm}^2$ auf ca. $0,13\text{ N/mm}^2$ ab. Die maximale Spannung sowie der Spannungswert nach 48 Stunden stimmen nahezu mit den an der Parallelfuge ermittelten Werten überein. Das rechte Diagramm zeigt den Kraft–Dehnungs–Verlauf für die 100 Scherzyklen bei -20°C . Dargestellt sind die an beiden Kraftmessdosen gemessenen Werte, die sich im Bereich der maximalen Auslenkung deutlich voneinander unterscheiden. Die während des

Scherens aufzubringende mittlere Kraft beträgt, gemessen an der während des Scherens bewegten Platte (schwarze Kurve), ca. 200 N; während des Nulldurchgangs des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 150 N. Die mittleren Kräfte, gemessen an der nicht bewegten Platte (blaue Kurve), betragen 175 N; im Nulldurchgang des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 160 N. Die Kraftwerte im Nulldurchgang liegen unterhalb der Kraft, die sich nach 48 Stunden Relaxation eingestellt hat.

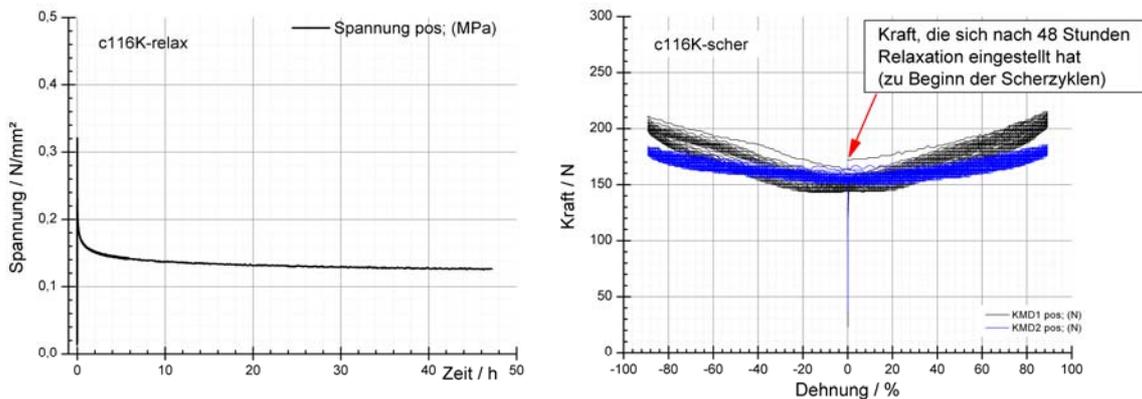


Abbildung 8-30: Zyklischer Scherversuch an einer Kreuzfuge vom Material C bei -20°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm während der 48-stündigen Relaxation (links), Kraft–Dehnungs–Diagramm während der 100 Scherzyklen (rechts)

8.5 Material D

8.5.1 Besonderheit bei der Prüfung von Material D

Vom Material D wurden in zwei Versuchsreihen insgesamt je 10 Parallelfugen und Kreuzfugen geprüft. Der Fugendichtstoff entstammte zwei verschiedenen Chargen. Bei der zweiten Versuchsreihe lagen zwischen Herstellung der Probekörper (Applikation des Fugendichtstoffs) und Beginn der Dehnzyklen 10 Wochen. In dieser Zeit lagerten die Probekörper in der Klimakammer bei einem Normklima von 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte. Die Probekörper der zweiten Versuchsreihe wurden sieben Wochen nach der zyklischen Dehnprüfung zyklisch gestaucht. Exemplarisch sollen in diesem Kapitel nur die Messergebnisse einer Parallelfuge und einer Kreuzfuge aus der ersten Versuchsreihe dargestellt werden. Ein Vergleich der Versuchsergebnisse aus den beiden Versuchsreihen wird im Kapitel 9 vorgenommen.

8.5.2 Die Dehnzyklen

8.5.2.1 Die Parallelfuge

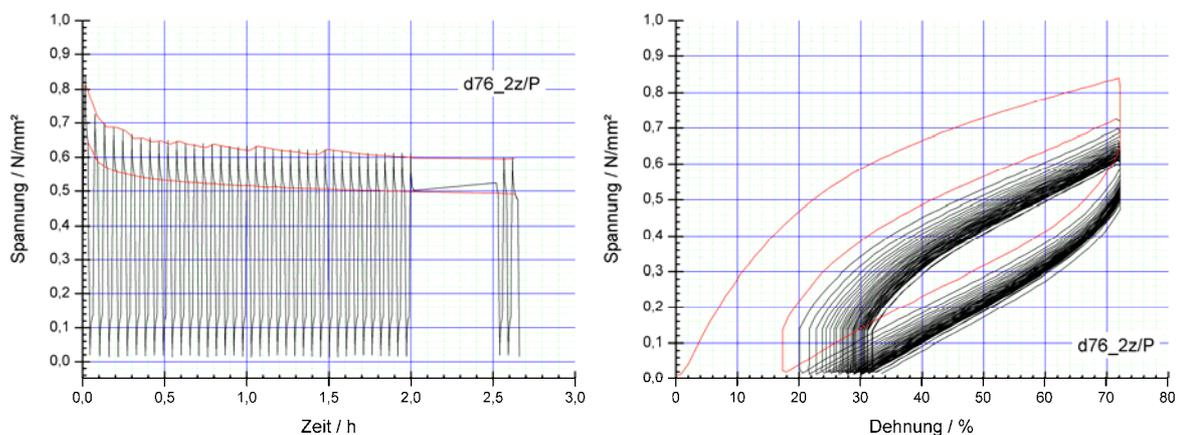


Abbildung 8-31: Zyklischer Dehnversuch an einer Parallelfuge vom Material D bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegtem ersten Zyklus

Im linken Diagramm der Abbildung 8-31 ist der Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Im gedehnten Zustand wurde bei Erstbelastung eine maximale Spannung von $0,93\text{ N/mm}^2$ gemessen. Im 50. Zyklus beträgt die maximale Spannung im gedehnten Zustand $0,65\text{ N/mm}^2$. Die Spannung im gedehnten Zustand nimmt mit zunehmender Zyklenzahl ab. Sie hat nach 50 Zyklen keinen Endwert erreicht. Die Spannungsabnahme während der Relaxationszeit ist wäh-

rend des gesamten Versuchs nahezu konstant. Die Belastungskurve infolge Erstbelastung hat einen steileren Anstieg als die der folgenden Belastungen. Das Material wird durch das Aufbrechen von Verbindungen weicher (MULLINS–Effekt).

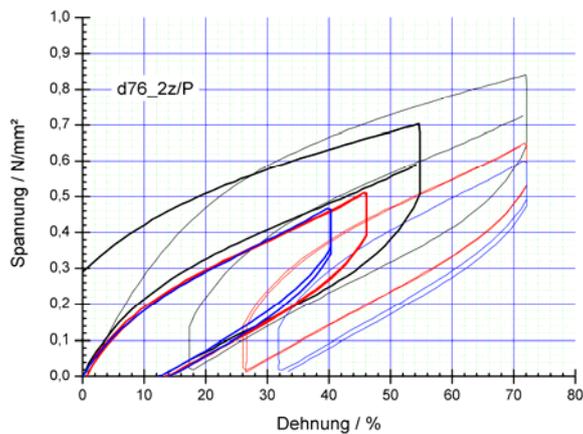


Abbildung 8-32: Zyklischer Dehnversuch an einer Parallelfuge vom Material D bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Dehnungs–Diagramm, dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven für den 1. Zyklus (schwarz), den 10. Zyklus (rot) und den 50. Zyklus (blau), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

Bei der kraftgesteuerten Entlastung verbleibt nach einem Zyklus eine Restdehnung von 17 %; nach 10 Zyklen beträgt die bleibende Restdehnung 26 % und nach 50 Zyklen 32 %, wie das Diagramm der Abbildung 8-32 zeigt.

Die Steifigkeit, gemessen am Sekantenmodul bei 10% Dehnung, nimmt zwischen der Erstbelastung und dem Zyklus 2 stark und zwischen den Zyklen 5 und 50 nur geringfügig ab.

8.5.2.2 Die Kreuzfuge

Die Kurvenverläufe der Messkurven ermittelt an Parallelfugen und Kreuzfugen sind nahezu identisch. Die Messwerte stimmen bis auf die Steifigkeit bei Erstbelastung überein. Die Steifigkeit, gemessen als Sekantenmodul bei 10 % Dehnung, war an den Parallelfugen geringer als an den Kreuzfugen.

Bei der Kreuzfuge sind ebenfalls die Abnahme der Steifigkeit bis zum Zyklus 5 und ihr Gleichbleiben bis zum Zyklus 50 zu beobachten.

Die Restdehnungen betragen 16 % im ersten Zyklus, 24 % im 10. Zyklus sowie 31 % im 50. Zyklus und liegen damit geringfügig unter den Werten, die an der Parallelfuge ermittelt wurden.

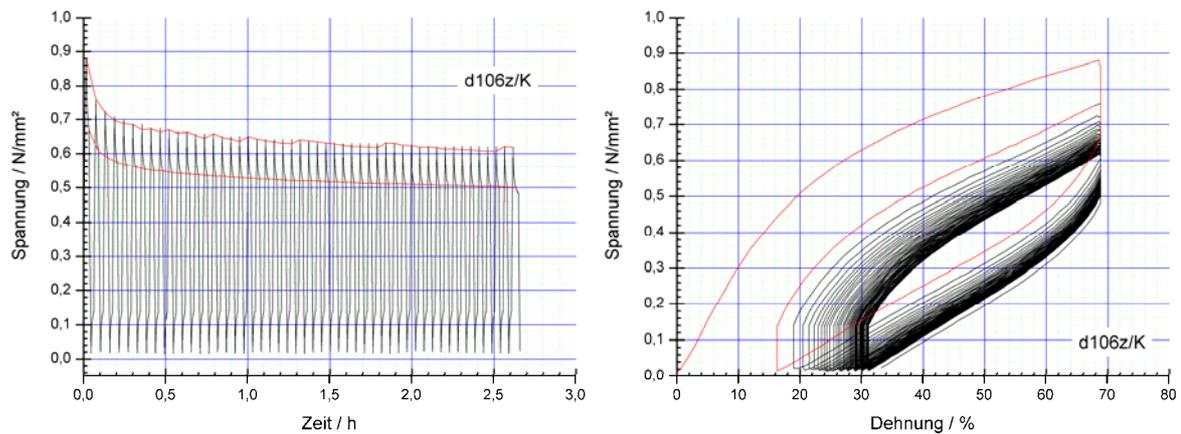


Abbildung 8-33: Zyklischer Dehnversuch an einer Kreuzfuge vom Material D bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

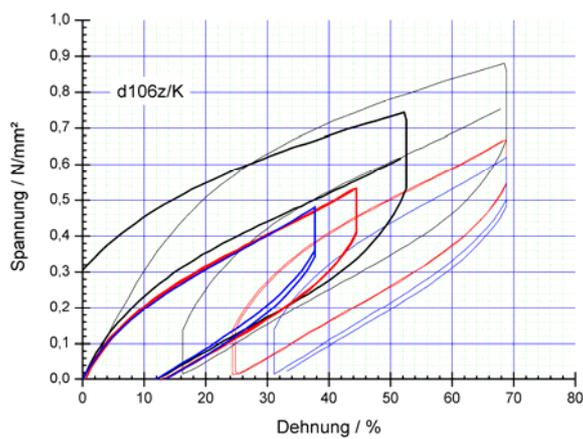


Abbildung 8-34: Zyklischer Dehnversuch an einer Kreuzfuge vom Material D bei -20°C über 50 Zyklen: Spannungs–Dehnungs–Diagramm, dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven für den 1. Zyklus (schwarz), den 10. Zyklus (rot) und den 50. Zyklus (blau), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

8.5.3 Die Stauchzyklen

8.5.3.1 Die Parallelfuge

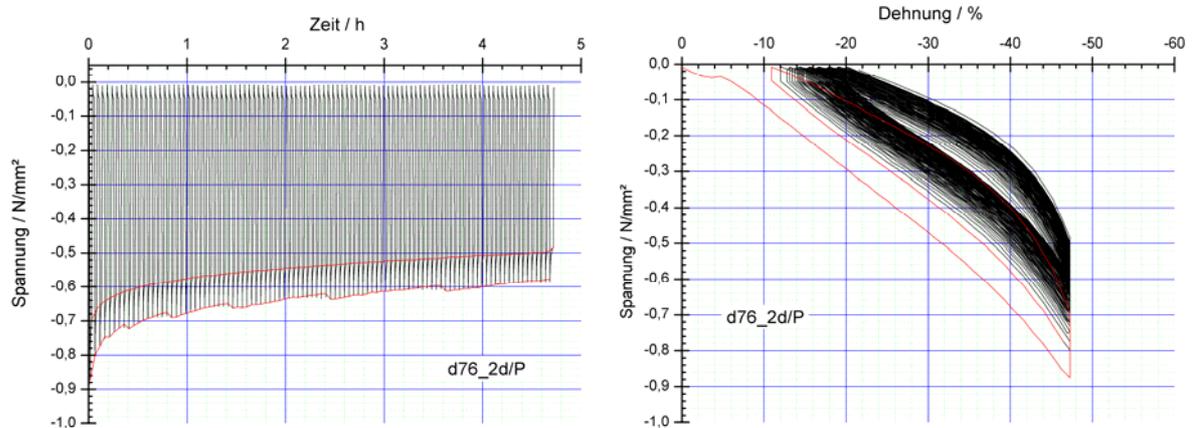


Abbildung 8-35: Zyklischer Stauchversuch an einer Parallelfuge vom Material D bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

Im linken Diagramm der Abbildung 8-35 ist deutlich die Abnahme der maximalen Spannung im gestauchten Zustand bei Zunahme der Zyklen zu sehen. Der Spannungsabbau infolge Relaxation im gestauchten Zustand ist hingegen über den untersuchten Zeitraum nahezu konstant. Das rechte Diagramm zeigt, dass sich die Kurvenverläufe aus Erst- und Folgebelastrung unterscheiden.

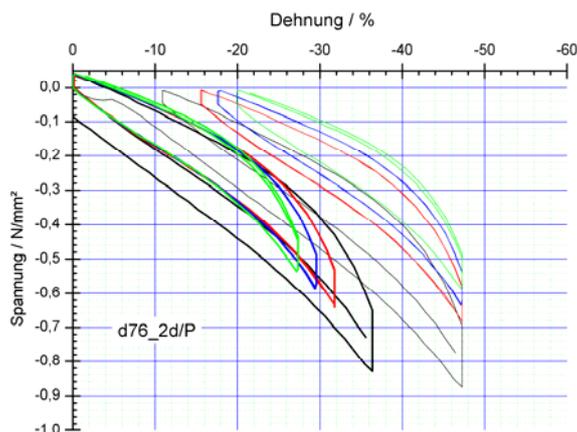


Abbildung 8-36: Zyklischer Stauchversuch an einer Parallelfuge vom Material D bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Dehnungs–Diagramm, dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven für den ersten Zyklus (schwarz), den 20. Zyklus (rot), den 50. Zyklus (blau) und den 100. Zyklus (grün), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

Aus dem Diagramm in Abbildung 8-36 lassen sich die bei Entlastung verbleibenden Reststauchungen ablesen. Sie betragen nach dem ersten Zyklus –11 %, nach 50 Zyklen –16 % und nach 100 Zyklen –18 %.

Sowohl die Belastung als auch die Entlastung weisen eine nichtlineare Beziehung zwischen Spannung und Dehnung auf.

8.5.3.2 Die Kreuzfuge

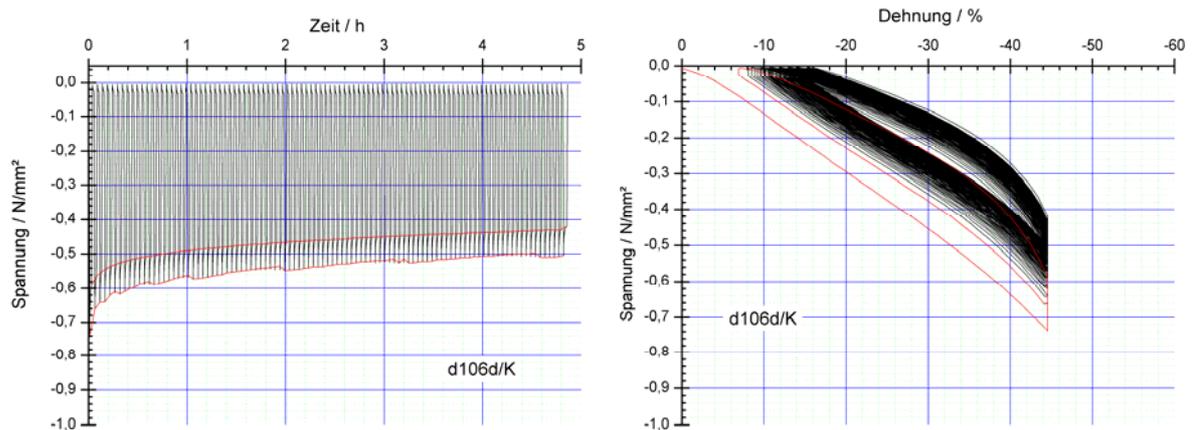


Abbildung 8-37: Zyklischer Stauchversuch an einer Kreuzfuge vom Material D bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm (links) und Spannungs–Dehnungs–Diagramm (rechts) mit rot angelegter Messkurve für den ersten Zyklus

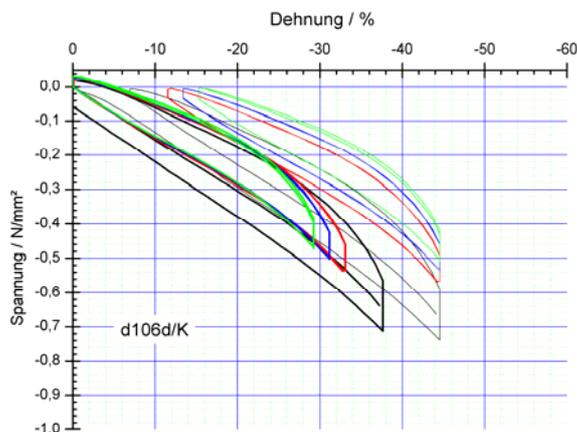


Abbildung 8-38: Zyklischer Stauchversuch an einer Parallelfuge vom Material D bei +50°C über 100 Zyklen: Spannungs–Dehnungs–Diagramm, dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven für den ersten Zyklus (schwarz), den 20. Zyklus (rot), den 50. Zyklus (blau) und den 100. Zyklus (grün), wie sie gemessen wurden (dünn), und in den Nullpunkt verschoben (fett)

Die Messkurve des zyklischen Stauchversuchs ermittelt an der Kreuzfuge unterscheidet sich kaum von der an der Parallelfuge ermittelten. Sowohl die Kurvenverläufe als auch die Messwerte stimmen überein.

8.5.4 Die Scherzyklen

8.5.4.1 Die Parallelfuge

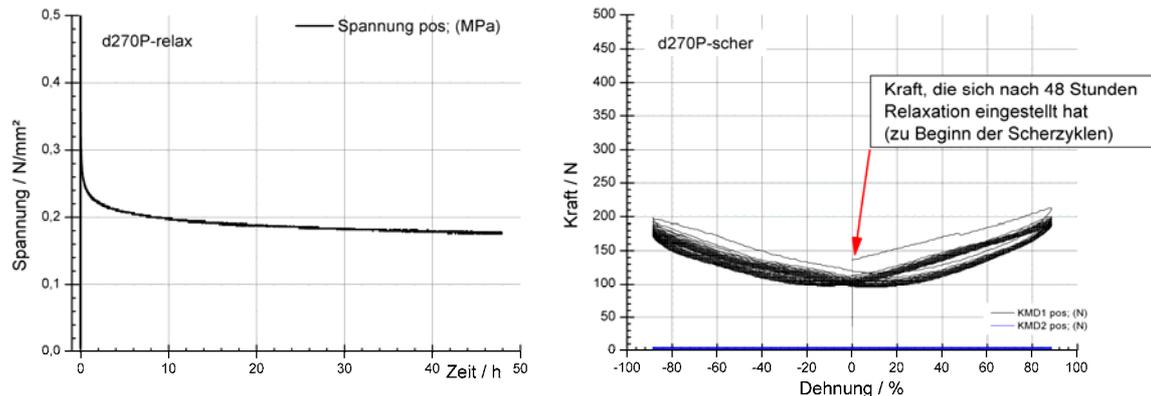


Abbildung 8-39: Zyklischer Scherverversuch an einer Parallelfuge vom Material D bei -20°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm während der 48-stündigen Relaxation (links), Kraft–Dehnungs–Diagramm während der 100 Scherzyklen (rechts)

Im linken Diagramm der Abbildung 8-39 ist der Spannungs–Zeit–Verlauf für die 48-stündige Relaxation des Fugendichtstoffs bei einer Dehnung von 25% bei -20°C dargestellt. Während der Relaxation wird die Spannung von ca. $0,50\text{ N/mm}^2$ auf ca. $0,18\text{ N/mm}^2$ abgebaut und beträgt ca. 35 % der maximalen Spannung. Der Graph verdeutlicht, dass die Gleichgewichtsspannung nach der Relaxationszeit noch nicht erreicht ist, und es zu einem weiteren Spannungsabbau kommen wird. Das rechte Diagramm zeigt den Kraft–Dehnungs–Verlauf während der 100 Scherzyklen bei -20°C . Die mittlere aufzubringende Kraft beträgt ca. 195 N bzw. 170 N . Sie nimmt mit Zunahme der Scherzyklen ab. Im Nulldurchgang des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 100 N . Sie ist geringer als die Kraft, die sich nach der 48-stündigen Relaxation eingestellt hat. Der Kräfteverlauf für beide Auslenkungsrichtungen ist symmetrisch.

8.5.4.2 Die Kreuzfuge

Der Spannungs–Zeit–Verlauf für die 48-stündige Relaxation bei einer Dehnung von ca. 25 % bei -20°C kann dem linken Diagramm der Abbildung 8-40 entnommen werden. Während der Relaxation nimmt die Spannung von ca. $0,50\text{ N/mm}^2$ auf ca. $0,17\text{ N/mm}^2$ ab. Die maximale Spannung sowie der Spannungswert nach

48 Stunden sind nahezu identisch zu den an der Parallelfuge ermittelten Werten. Das rechte Diagramm zeigt den Kraft–Dehnungs–Verlauf für die 100 Scherzyklen bei

–20°C. Dargestellt sind die an beiden Kraftmessdosen gemessenen Werte, die sich im Bereich der maximalen Auslenkung deutlich voneinander unterscheiden. Die während des Scherens aufzubringende mittlere Kraft beträgt, gemessen an der während des Scherens bewegten Platte (schwarze Kurve), ca. 340 N, während des Nulldurchgangs des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 230 N. Die mittleren Kräfte, gemessen an der nicht bewegten Platte (blaue Kurve), betragen 250 N. Im Nulldurchgang des Scherwegs beträgt die Kraft ca. 230 N (schwarze Kurve) bzw. ca. 200 N (blaue Kurve). Die Kraftwerte im Nulldurchgang liegen unterhalb der Kraft, die sich nach 48 Stunden Relaxation eingestellt hat

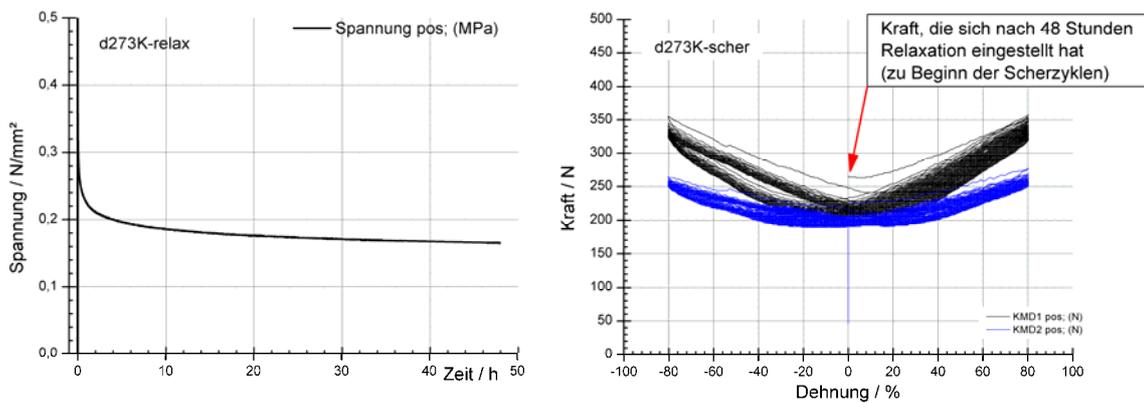


Abbildung 8-40: Zyklischer Scherversuch an einer Kreuzfuge vom Material D bei –20°C über 100 Zyklen: Spannungs–Zeit–Diagramm während der 48-stündigen Relaxation (links), Kraft–Dehnungs–Diagramm während der 100 Scherzyklen (rechts)

9 Gegenüberstellung der Messergebnisse

9.1 Die Dehnzyklen

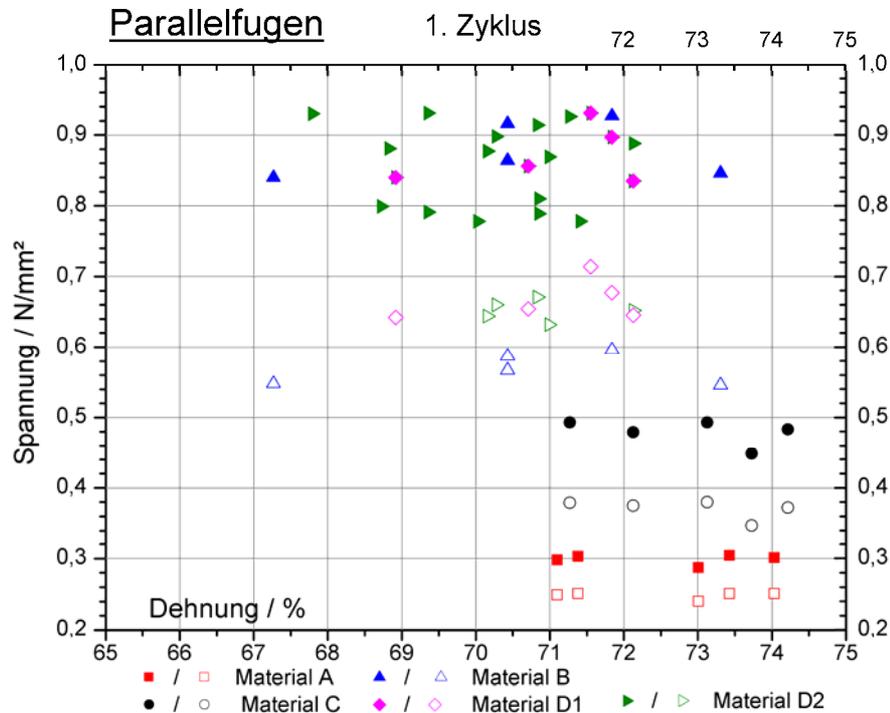


Abbildung 9-1: Gegenüberstellung der Spannungen gemessen am Beginn (ausgefüllte Symbole) und am Ende (unausgefüllte Symbole) des gedehnten Zustands bei Erstbelastung für die Parallelfuge. Für jedes Material sind die Spannungen der jeweils fünf untersuchten Probekörper in Abhängigkeit von der tatsächlichen Enddehnung dargestellt.

In Abbildung 9-1 sind für die Parallelfugen für den ersten Zyklus die Spannungen am Beginn und am Ende der Relaxationszeit für jeden Probekörper in Abhängigkeit von der tatsächlich aufgebrachten Enddehnung dargestellt. Die gießfähigen Materialien A (Quadrat) und C (Kreis) ließen sich besser applizieren, deswegen sind die Abweichungen von den Soll-Fugenabmessungen geringer und damit weichen die Enddehnungen mit Werten zwischen 71 % und 74 % nicht so stark von der angestrebten Enddehnung von 75% ab. Die Spannungswerte werden von den unterschiedlichen Dehnungen nicht beeinflusst.

Die standfesten Materialien B (Dreieck, Spitze nach oben) und D (Versuchsserie 1: Rhombus; Versuchsserie 2: Dreieck, Spitze nach rechts) weisen aufgrund der schwierigeren Verarbeitbarkeit eine größere Abweichung von den Soll-Fugenabmessungen auf. Die tatsächlich erreichten Enddehnungen des Materials B liegen zwischen 67 % und 73,5 %, die des Materials D zwischen 69 % und

72 %. Die Materialien B und D weisen deutlich höhere Spannungswerte als die untersuchten gießfähigen Materialien A und C auf. Es ist eine Korrelation zwischen Dehnung und Spannung zu erkennen.

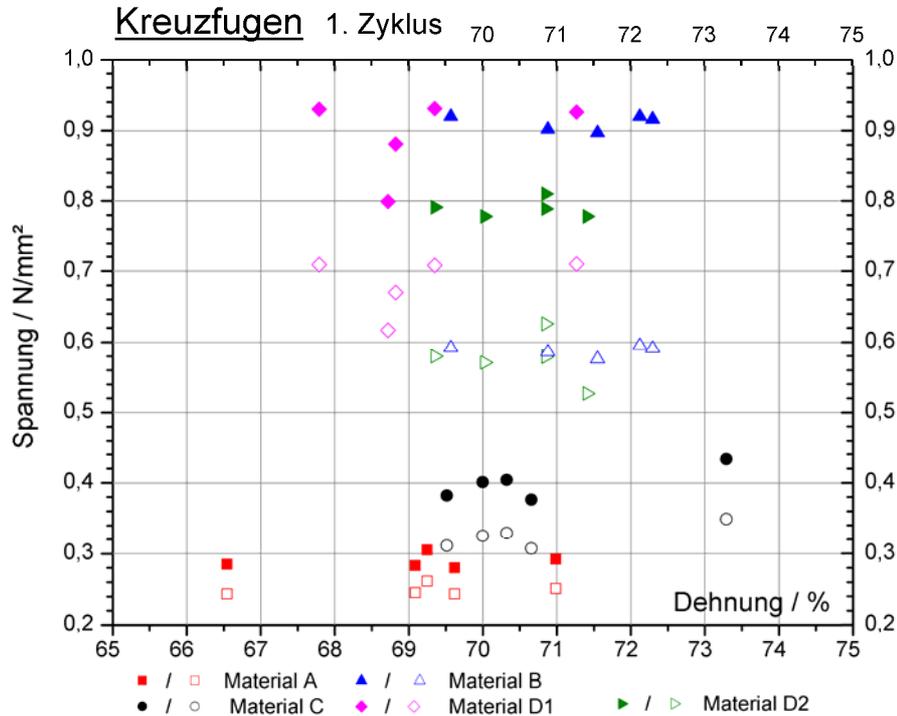


Abbildung 9-2: Gegenüberstellung der Spannungen gemessen am Beginn (ausgefüllte Symbole) und am Ende (unausgefüllte Symbole) des gedehnten Zustands bei Erstbelastung für die Kreuzfuge. Für jedes Material sind die Spannungen der jeweils fünf untersuchten Probekörper in Abhängigkeit von der tatsächlichen Enddehnung dargestellt.

Die Abbildung 9-2 zeigt für die Kreuzfuge die Spannung am Beginn und am Ende der Relaxationszeit für den ersten Zyklus. Die gießfähigen Materialien A und C weisen deutlich geringere Spannungswerte auf als die standfesten Materialien B und D. Außer für Material C lässt sich keine Korrelation zwischen Enddehnung und Spannungswert erkennen. Die Probekörper der zweiten Versuchsreihe des Materials D weisen geringere Spannungen auf als die Probekörper der ersten Serie.

Vergleicht man die Werte zwischen Parallel- und Kreuzfuge, so sind die Spannungswerte für das Material A annähernd gleich, obwohl die Enddehnungen der Parallelfuge größer sind als die der Kreuzfuge. Für das Material B wurden bei annähernd gleichen Enddehnungen Spannungen ermittelt, die einander ähnlich sind. Beim Material C sind die an der Kreuzfuge aufgebrachten Enddehnungen geringer als an der Parallelfuge, genauso verhalten sich die Spannungen. Beim Material D

sind die Spannungen und Enddehnungen der Versuchsserie 1 identisch. Bei der Versuchsserie 2 liegen die Spannungen der Kreuzfuge über denen der Parallelfuge.

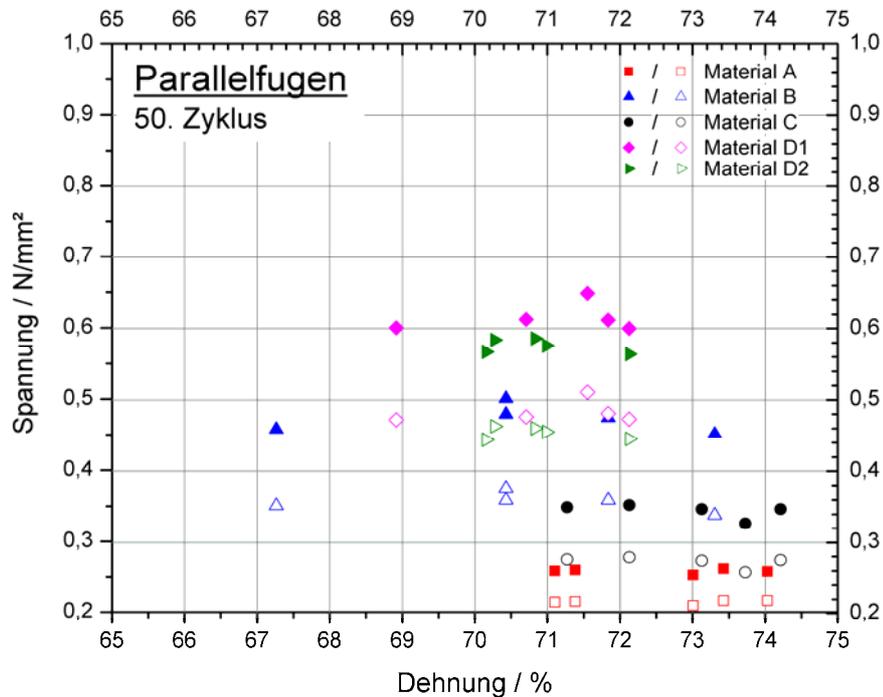


Abbildung 9-3: Gegenüberstellung der Spannungen gemessen am Beginn (ausgefüllte Symbole) und am Ende (unausgefüllte Symbole) des gedehnten Zustands bei Belastung im 50. Zyklus für die Parallelfuge. Für jedes Material sind die Spannungen der jeweils fünf untersuchten Probekörper in Abhängigkeit von der tatsächlichen Enddehnung dargestellt.

Die Spannungen im 50. Zyklus sind für die Parallelfugen in Abbildung 9-3 und für die Kreuzfugen in Abbildung 9-4 dargestellt. Deutlich wird aus den Grafiken, dass der Spannungsabfall der standfesten Materialien B und D stärker ist als der bei den gießfähigen Materialien A und C. Genaue Werte enthält die Tabelle 9-1.

Tabelle 9-1: Differenz zwischen maximaler Spannung bei Erstbelastung und bei Belastung im 50. Zyklus für Kreuz- und Parallelfugen (gemittelt aus 5 Probekörpern)

Differenz zwischen maximaler Spannung Erstbelastung und Belastung 50. Zyklus in N/mm²	A	B	C	D1	D2
Parallelfuge	0,04	0,40	0,13	0,26	0,29
Kreuzfuge	0,04	0,43	0,08	0,27	0,25

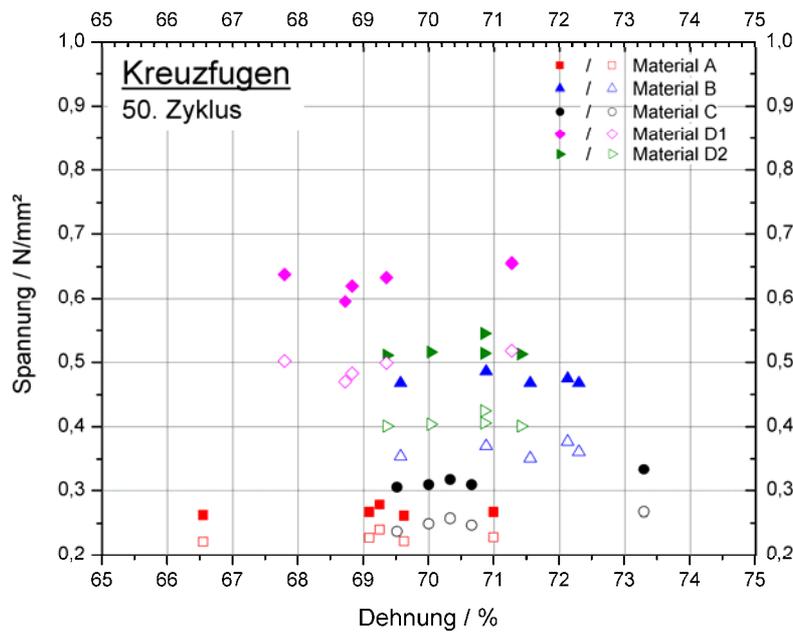


Abbildung 9-4: Gegenüberstellung der Spannungen ermittelt am Beginn (ausgefüllte Symbole) und am Ende (unausgefüllte Symbole) des gedehnten Zustands bei Belastung im 50. Zyklus für die Kreuzfuge. Für jedes Material sind die Spannungen der fünf untersuchten Probekörper in Abhängigkeit von der tatsächlichen Enddehnung dargestellt.

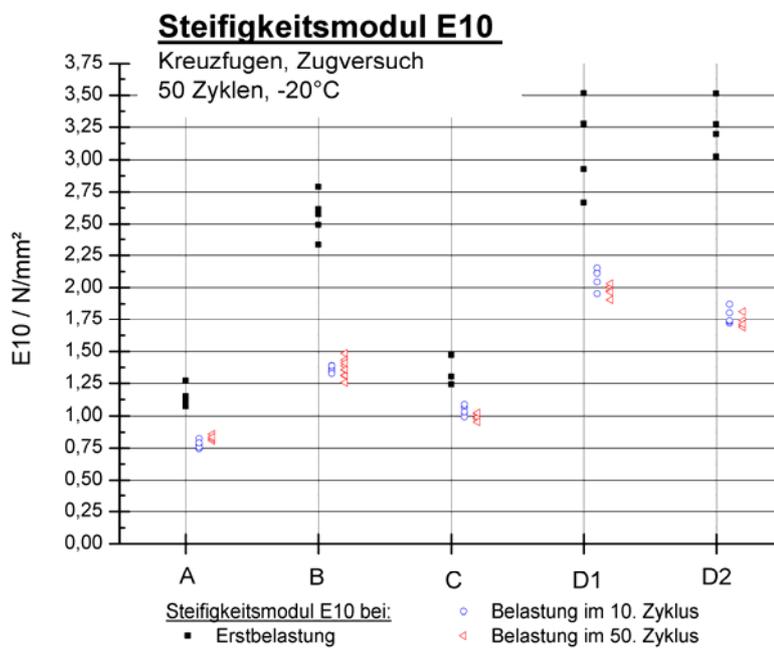


Abbildung 9-5: Sekantenmodul E10 als Steifigkeitsmaß bei Erstbelastung (Quadrat; schwarz), bei Belastung im 10. Zyklus (Kreis; blau) und 50. Zyklus (Dreieck; rot), dargestellt sind für jedes Material jeweils die Einzelwerte der 5 Probekörper, ermittelt an der Kreuzfuge

In Abbildung 9-5 werden die Steifigkeiten der Materialien einander gegenübergestellt. Die Steifigkeiten wurden als Sekantenmodule zwischen dem Belastungsbeginn (Dehnung = 0) und einer Dehnung von 10 % ermittelt. Ein Vergleich der Steifigkeitswerte für die Erstbelastung und die Belastung im 10. bzw. 50. Zyklus zeigt einen deutlichen Abfall der Steifigkeitswerte.

Die Steifigkeit der gießfähigen Materialien A (PUR) und C (Polysulfid) liegt deutlich unter der Steifigkeit der standfesten Materialien B (PUR) und D (Polysulfid). Auch ist der Steifigkeitsabfall von der Erstbelastung zur Belastung im 10. Zyklus bei den gießfähigen Materialien geringer als bei den standfesten Materialien. Bei allen Materialien ist zu beobachten, dass die Werte der im 10. und 50. Zyklus ermittelten Steifigkeiten nahezu gleich sind.

9.2 Die visuelle Begutachtung nach den Dehnzyklen

Bei den Probekörpern der Materialien A, B und C konnte bei der visuellen Begutachtung nach den 50 Dehnzyklen weder Adhäsions– noch Kohäsionsversagen festgestellt werden. Obwohl die Beanspruchungen, denen das Material B während der Zyklen ausgesetzt war, 47 Prozent größer waren, als die Zulassungsgrundsätze des Deutschen Instituts für Bautechnik forderten. Von den Probekörpern der ersten Versuchsserie des Materials D zeigte eine der fünf Parallelfugen Kohäsionsversagen; vier der fünf Kreuzfugen wiesen nach visueller Begutachtung Kohäsionsversagen auf. Aus diesem Grunde wurde eine zweite Versuchsserie gefahren. Die visuelle Begutachtung dieser Probekörper zeigte für die Parallelfugen kein Versagen. Bei den Kreuzfugen ließ sich bei drei Probekörpern Kohäsionsversagen feststellen, bei den zwei anderen Probekörpern ist die visuelle Versagensdetektion nicht eindeutig. Das Material versagt vorrangig im Kreuzbereich in der Nähe der Ecken der Kontaktplatten. Tabelle 9-2 zeigt die Ergebnisse der visuellen Begutachtung auf.

Tabelle 9-2: Ergebnis der visuellen Prüfung nach 50 Dehnzyklen bei –20°C: Anzahl der Probekörper mit Kohäsionsversagen / Adhäsionsversagen von 5 Probekörpern

Material	Parallelfuge	Kreuzfuge
A	0 / 0	0 / 0
B	0 / 0	0 / 0
C	0 / 0	0 / 0
D1	1 / 0	4 / 0
D2	0 / 0	3 [2] / 0

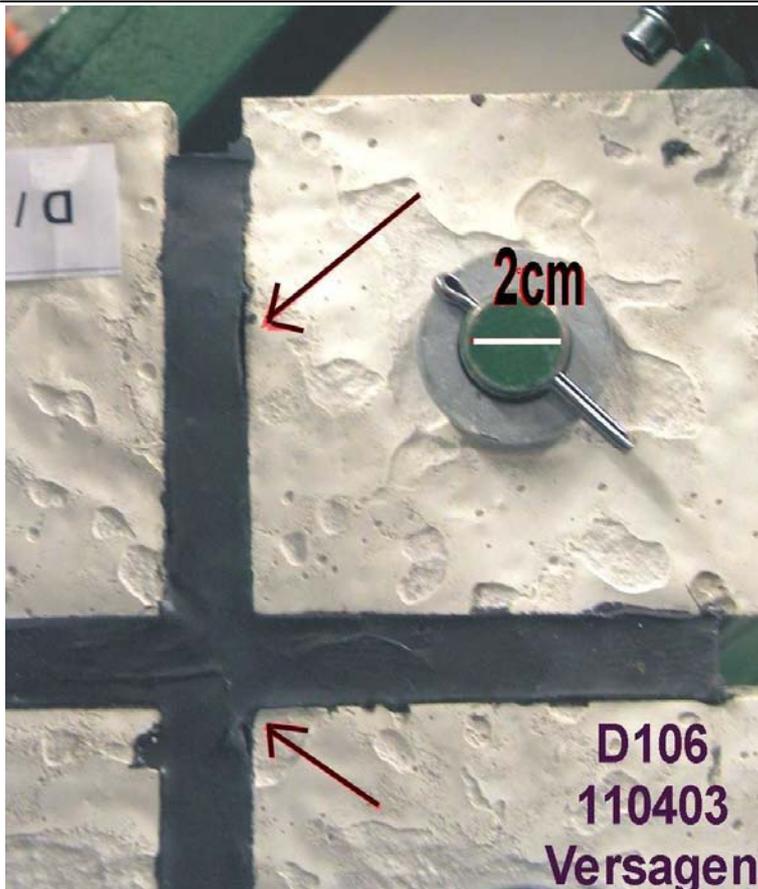


Abbildung 9-6: Probekörper Material D (Versuchsserie 2) nach 50 Dehnzyklen bei -20°C : Kohäsionsversagen an zwei Stellen

Wie Abbildung 9-6 zeigt, wurde auch an anderen Stellen ein Kohäsionsversagen festgestellt. Das Material löste sich nicht von der geprimerten Kontaktfläche ab, sondern versagte im Fugendichtstoff selbst, aber in unmittelbarer Nähe der Kontaktfläche. Hier sind bedingt durch die Verformungen die Spannungen im Fugendichtstoff am größten.

9.3 Die Stauchzyklen

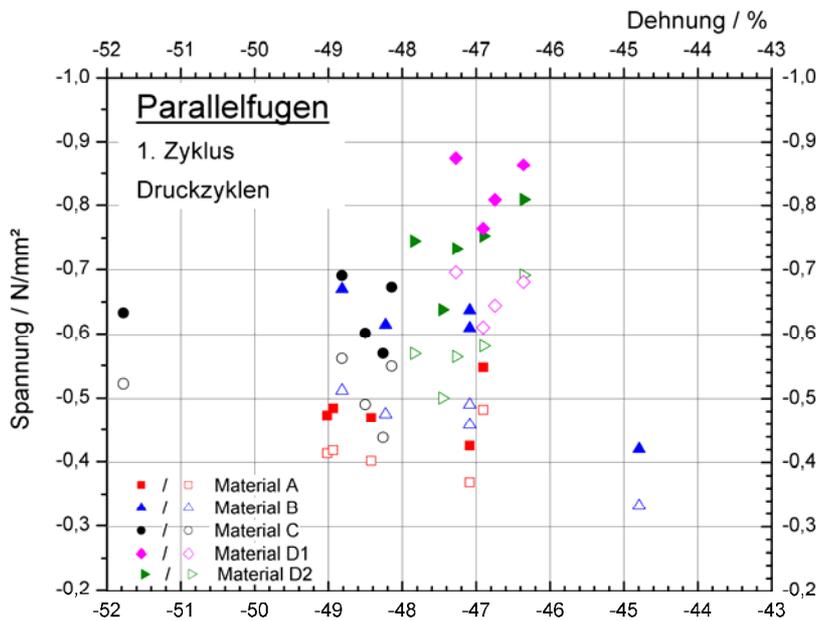


Abbildung 9-7: Gegenüberstellung der Spannungen gemessen am Beginn (ausgefüllte Symbole) und am Ende (unausgefüllte Symbole) des gestauchten Zustands bei Erstbelastung für die Parallelfuge. Für jedes Material sind die Spannungen der untersuchten Probekörper in Abhängigkeit von der tatsächlichen Endstauchung dargestellt.

Abbildung 9-7 zeigt für die Parallelfugen für den ersten Belastungszyklus die Spannungswerte am Beginn und am Ende der Relaxationszeit in Abhängigkeit von der tatsächlich aufgebrachten Endstauchung. Die niedrigsten Werte wurden am gießfähigen Material A (Quadrat) ermittelt. Die Werte für das gießfähige Material C (Kreis) und das standfeste Material B (Dreieck, Spitze nach oben) liegen in derselben Größenordnung. Die größten Spannungen wurden in der ersten Versuchsserie des standfesten Materials D (Rhombus) ermittelt. Die in der zweiten Versuchsserie (Dreieck, Spitze nach rechts) ermittelten Werte liegen im Mittel um 10% unter den Werten aus der Versuchsserie 1. Von der Versuchsserie 1 des Material D wurden nur die vier Probekörper geprüft, bei denen durch Inaugenscheinnahme nach den Dehnzyklen kein Versagen festgestellt wurde.

Die tatsächlichen Endstauchungen liegen, bis auf zwei Ausnahmen, zwischen 46,6% und 49% und damit unterhalb der angestrebten Endstauchung von 50%. Die Unterschiede lassen sich mit der Abweichung der Ist-Fugenabmessungen von den Soll-Fugenabmessungen durch die Applikationstechnik sowie mit der Änderung der Fugengeometrie durch die vorangegangenen Dehnzyklen erklären.

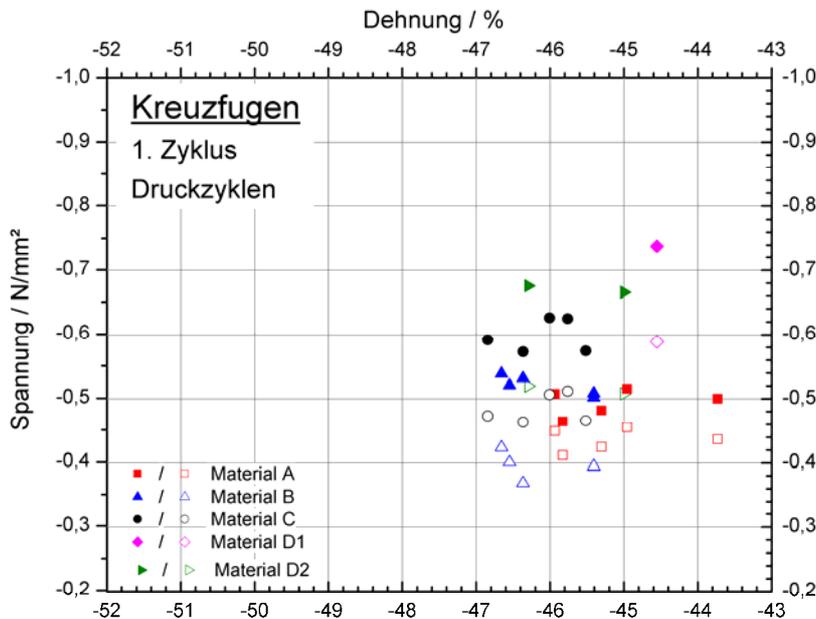


Abbildung 9-8: Gegenüberstellung der Spannungen gemessen am Beginn (ausgefüllte Symbole) und am Ende (unausgefüllte Symbole) des gestauchten Zustands bei Erstbelastung für die Kreuzfuge. Für jedes Material sind die Spannungen der untersuchten Probekörper in Abhängigkeit von der tatsächlichen Endstauchung dargestellt.

In der Abbildung 9-8 sind die Spannungswerte für den Beginn und das Ende der Relaxationszeit für den ersten Belastungszyklus der Kreuzfugen dargestellt. Die maximalen Spannungen des gießfähigen Materials A (Quadrat) und des standfesten Materials B (Dreieck, Spitze nach oben) liegen zwischen $-0,46 \text{ N/mm}^2$ und $-0,54 \text{ N/mm}^2$. Die Spannungswerte der Materialien C (Kreis) und D (Dreieck, Spitze nach rechts und Rhombus) sind deutlich höher. Vom Material D wurden nur die Probekörper geprüft, bei denen nach den Dehnzyklen durch Inaugenscheinnahme kein Versagen festgestellt werden konnte; die Anzahl der geprüften Probekörper reduzierte sich für die erste Versuchsserie auf einen und für die zweite Versuchsserie auf zwei.

Ein Vergleich zwischen den an der Parallel- und Kreuzfuge ermittelten Spannungswerten zeigt, dass für das Material A die Spannungswerte annähernd gleich sind. Es besteht eine Korrelation zwischen Enddehnung und Spannung.

Die Spannungswerte der Parallelfugen aus dem Material B sind ca. 10% größer als die der Kreuzfugen. Begründen lässt sich das mit den größeren Endstauchungen der Parallelfugen. Es ist eine Abhängigkeit zwischen Spannung und Stauchung festzustellen.

Für das Material C lässt sich feststellen, dass die an den Parallelfugen ermittelten Spannungswerte ca. 5% größer sind als die an den Kreuzfugen ermittelten Werte. Da die an den Parallelfugen erzielten Endstauchungen ebenfalls größer sind als an den Kreuzfugen, ist hierin die Ursache zu sehen.

Für das Material D ist eine vergleichende Betrachtung der Messwerte nur bedingt möglich, da aus der ersten Versuchsserie ein und aus der zweiten Versuchsserie zwei Probekörper mit Kreuzfuge geprüft wurden. Die an den drei Kreuzfugen ermittelten Spannungswerte lagen unter den an den Parallelfugen ermittelten Werten.

Die Abbildung 9-9 und Abbildung 9-10 zeigen die Spannungen am Beginn und am Ende der Relaxationsphase im 100. Belastungszyklus.

Die an den Parallelfugen ermittelten Spannungswerte sind für die Materialien B, C und D größer als die an den Kreuzfugen ermittelten Spannungswerte. Begründet wird dies durch die Abweichung der Endstauchung. Beim Material A ist im Mittel kein Unterschied festzustellen.

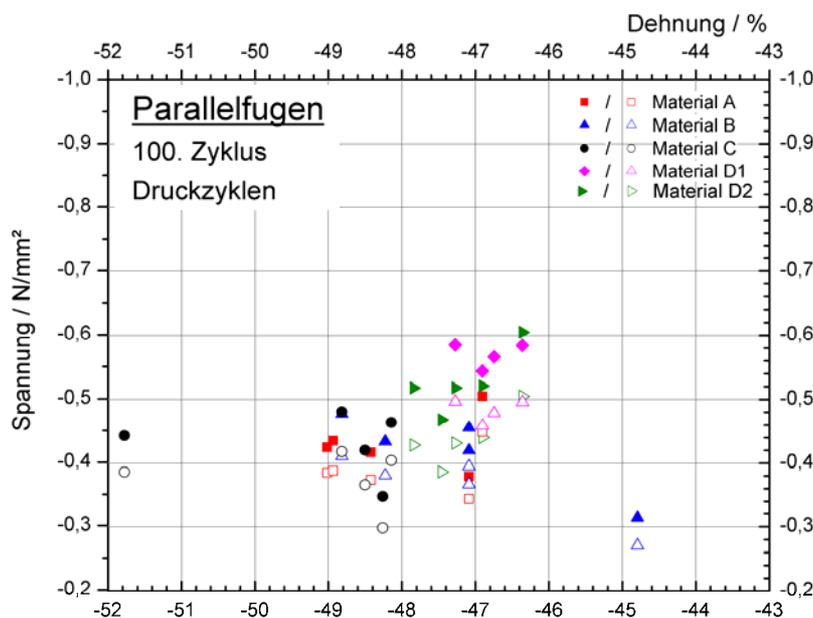


Abbildung 9-9: Gegenüberstellung der Spannungen gemessen am Beginn (ausgefüllte Symbole) und am Ende (unausgefüllte Symbole) des gestauchten Zustands bei Belastung im 100. Zyklus für die Parallelfuge. Für jedes Material sind die Spannungen der untersuchten Probekörper in Abhängigkeit von der tatsächlichen Endstauchung dargestellt.

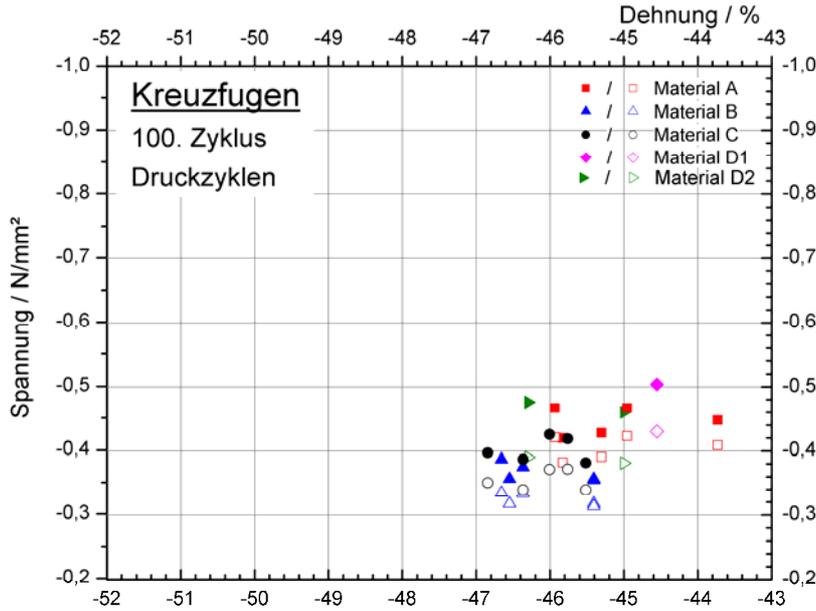


Abbildung 9-10: Gegenüberstellung der Spannungen gemessen am Beginn (ausgefüllte Symbole) und am Ende (unausgefüllte Symbole) des gestauchten Zustands bei Belastung im 100. Zyklus für die Kreuzfuge. Für jedes Material sind die Spannungen der untersuchten Probekörper in Abhängigkeit von der tatsächlichen Endstauchung dargestellt.

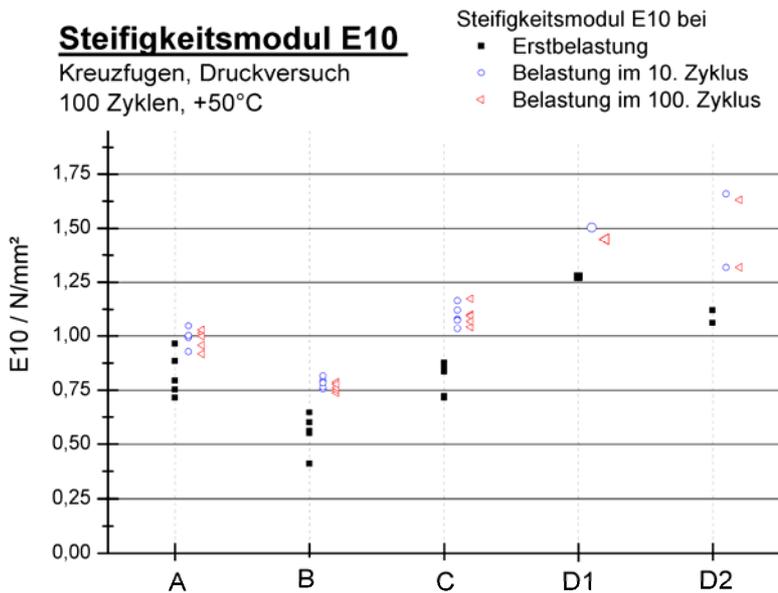


Abbildung 9-11: Sekantenmodul E10 als Steifigkeitsmaß bei Erstbelastung (Quadrat; schwarz), bei Belastung im 10. Zyklus (Kreis; blau) und 100. Zyklus (Dreieck; rot), dargestellt sind für jedes Material jeweils die Einzelwerte der untersuchten Probekörper ermittelt an der Kreuzfuge

Abbildung 9-11 zeigt für die Stauchzyklen die als Sekantenmodul bei 10% Stauchung ermittelten Steifigkeitsmoduln E10 für die Kreuzfugen. Die Steifigkeit nimmt mit zunehmender Zyklenzahl zu. Ein Vergleich zwischen den Moduln bei Belastung im 10. und 100. Zyklus zeigt, dass die Unterschiede minimal sind. Ein Unterschied besteht zum Steifigkeitsmodul ermittelt bei Erstbelastung.

9.4 Die visuelle Begutachtung nach den Stauchzyklen

Bei den Probekörpern der Materialien A, B und C konnten nach den 100 Stauchzyklen bei +50°C durch Inaugenscheinnahme kein Kohäsions- oder Adhäsionsversagen festgestellt werden. Beim Material D wurde an zwei der vier Parallelfugen aus der ersten Versuchsserie ein Kohäsionsversagen festgestellt. Die geprüfte Kreuzfuge wies ebenfalls Kohäsionsversagen auf. Bei den aus der zweiten Versuchsserie geprüften fünf Parallel- und zwei Kreuzfugen konnte durch Sichtprüfung kein Versagen festgestellt werden.

Die Prüfstauchungen waren für die Kreuzfugen bei den Materialien A und C um ca. 9% größer, beim Material B um ca. 47% und beim Material D um 25% größer als in der Zulassung gefordert.

Tabelle 9-3: Ergebnis der visuellen Prüfung nach 100 Stauchzyklen bei +50°C: angegeben sind die Anzahl der Probekörper mit Kohäsionsversagen / Adhäsionsversagen und in Klammern die Anzahl der geprüften Probekörper

Material	Parallelfuge	Kreuzfuge
A	0 / 0 (5)	0 / 0 (5)
B	0 / 0 (5)	0 / 0 (5)
C	0 / 0 (5)	0 / 0 (5)
D1	2 / 0 (4)	1 / 0 (1)
D2	0 / 0 (5)	0 / 0 (2)

9.5 Die Scherzyklen

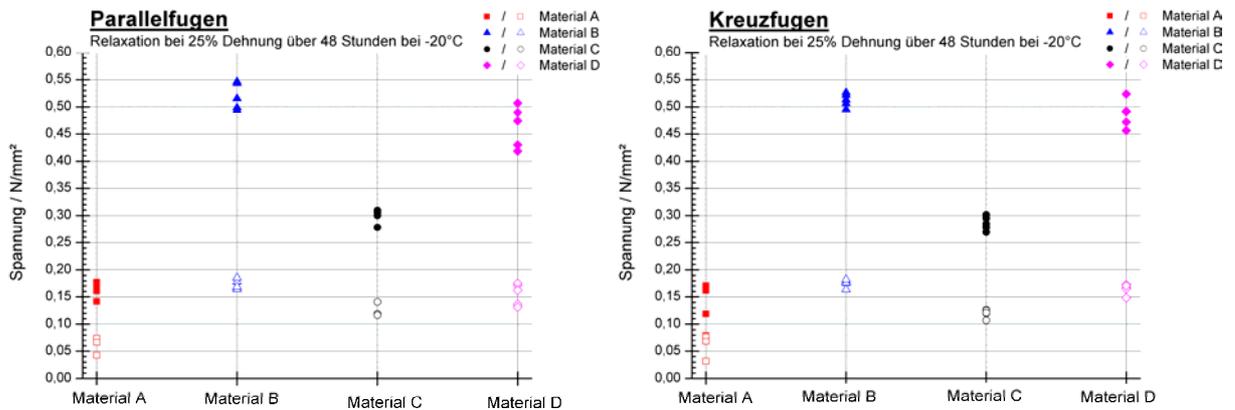


Abbildung 9-12: Spannungen am Beginn (ausgefüllte Symbole) und am Ende (unausgefüllte Symbole) der 48-stündigen Relaxation bei einer Dehnung von 25% bei -20°C gemessen an Parallelfugen (links) und Kreuzfugen (rechts): Für jedes Material sind die Spannungen der jeweils fünf geprüften Probekörper dargestellt.

Die Graphiken in Abbildung 9-12 enthalten für jeden Probekörper den Spannungswert, der sich unmittelbar, nachdem der Probekörper um 25% gedehnt wurde, eingestellt hat (ausgefülltes Symbol) sowie den Spannungswert, der nach der 48stündigen Relaxation (unausgefülltes Symbol) gemessen wurde. Für die gießfähigen Materialien A und C wurden im Mittel sofort nach der Belastung Spannungswerte von $0,16 \text{ N/mm}^2$ und $0,30 \text{ N/mm}^2$ gemessen, die erwartungsgemäß geringer waren als die bei den standfesten Materialien B und D gemessenen mittleren Spannungswerte von $0,52 \text{ N/mm}^2$ und $0,46 \text{ N/mm}^2$. Die an den Parallelfugen ermittelten Werte unterschieden sich nur geringfügig von den an den Kreuzfugen ermittelten Werten.

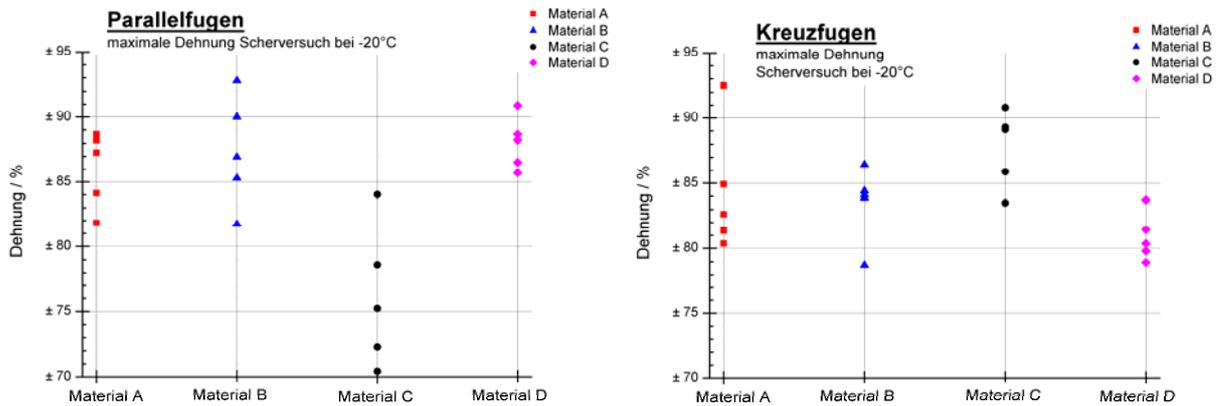


Abbildung 9-13: Scherversuche über 100 Zyklen bei -20°C: maximal in Scherrichtung aufgebrachte Dehnung

Abbildung 9-13 zeigt für jeden Probekörper der Materialien A bis D die bei den Scherversuchen maximal in Scherrichtung aufgebrachten Dehnungen. Die angestrebte Dehnung von ± 75% wurde in den Scherversuchen bei zwei Parallelfugen des Materials C unterschritten. Die anderen Probekörper wurden stärker beansprucht, als in den Zulassungsgrundsätzen gefordert.

9.6 Die visuelle Begutachtung nach den Scherzyklen

Bei der visuellen Begutachtung nach den Scherzyklen wurden bei den Probekörpern weder Risse noch Ablösungen festgestellt, obwohl die Scherbeanspruchung größer war als in den Zulassungsgrundsätzen [LAU01] gefordert.

Tabelle 9-4: Ergebnis der visuellen Prüfung nach 100 Scherzyklen bei -20°C: angegeben sind die Anzahl der Probekörper mit Kohäsionsversagen / Adhäsionsversagen von je fünf geprüften Probekörper

Material	Parallelfuge	Kreuzfuge
A	0 / 0	0 / 0
B	0 / 0	0 / 0
C	0 / 0	0 / 0
D	0 / 0	0 / 0

9.7 Auswirkungen der Fugengeometrie auf die Prüfergebnisse

Das Kapitel „6.2 Abmessungen der Probekörper“ enthält Aussagen zur Fugengeometrie. Die Abbildung 6–1 zeigt die Anzahl der Probekörper, die von den Grenzwerten des Verhältnisses von Fugenhöhe d zu Fugenbreite b (d/b)

($0,8 < d/b < 1,0$) abweichen. Die Auswertung zeigte keine Unterschiede zwischen den Prüfergebnissen der Probekörper, deren Fugengeometrie von der zulässigen Fugengeometrie abwich, und den Probekörpern, die der vorgeschriebenen Fugengeometrie entsprachen.

10 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

In den zyklischen Dehnversuchen bei -20°C wurde festgestellt, dass die Steifigkeit, gemessen als Sekantenmodul bei 10 % Dehnung, mit zunehmender Zyklenzahl abnimmt, die Steifigkeit der gießfähigen Materialien deutlich unter der der standfesten Materialien liegt und der Steifigkeitsabfall bei den gießfähigen Materialien schwächer ausgeprägt ist als bei den standfesten Materialien.

Die Belastungskurve infolge Erstbelastung hat einen steileren Anstieg als die der folgenden Belastungen. Das Material wird durch das Aufbrechen von Verbindungen weicher (MULLINS-Effekt). Dieser Effekt ist bei einer zyklischen Zugbeanspruchung stärker ausgeprägt als bei einer zyklischen Druckbeanspruchung.

Für die Materialien A, B und C konnte festgestellt werden, dass eine Prüfung, die strengere Anforderungen stellte, als die Zulassungsgrundsätze gemäß Zulassungsbescheid forderten, nicht zum Versagen der Materialien führte.

Aus den Untersuchungsergebnissen kann gefolgert werden, dass die Beanspruchungen, denen das Material D ausgesetzt wird, die in der Zulassung festgelegten Verformungen nicht überschreiten sollte.

Infolge zyklischer Scherbeanspruchungen bei -20°C nach vorangegangener 48-stündiger Relaxation bei 25% Dehnung konnten bei keinem der untersuchten Materialien Rissbildungen oder Ablösungen festgestellt werden.

Die visuelle Detektion von Kohäsions- bzw. Adhäsionsversagen erwies sich als schwierig. Risse bzw. Ablösungen ließen sich nur im gedehnten Zustand erkennen. Bei Probekörpern, an denen Risse oder Ablösungen visuell erkannt wurden, war dies aus den Spannungs- und Dehnungsverläufen nicht zu erkennen.

Die Versuche wurden mit einer Anzahl von fünf Probekörpern gefahren. Diese Prüfkörperanzahl wird für die Prüfung von standfesten Materialien anstelle der in den Zulassungsgrundsätzen [LAU01] festgelegten drei Prüfkörper empfohlen.

11 Materialverhalten

11.1 Besonderheiten im Materialverhalten

Den Spannungs–Dehnungs–Verlauf bei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten (6mm/min und 200mm/min) und bei verschiedenen Prüftemperaturen (+20°C und –20°C) zeigt die Abbildung 11-1 exemplarisch für das Material C. Die Grafik verdeutlicht einige Besonderheiten im Spannungs–Dehnungs–Verhalten, die typisch für das Materialverhalten der untersuchten Elastomere sind:

1. Die Spannung ist nichtlinear von der Dehnung abhängig.
2. Das Spannungs–Dehnungs–Verhalten ist von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig. Das Material verhält sich viskos.
3. Das Spannungs–Dehnungs–Verhalten ist von der Belastungstemperatur abhängig.
4. Wird das Material in mehreren Zyklen beansprucht, verhält es sich im ersten Belastungszyklus steifer als in den weiteren Belastungszyklen. Dieses Verhalten wird als MULLINS Effekt bezeichnet.

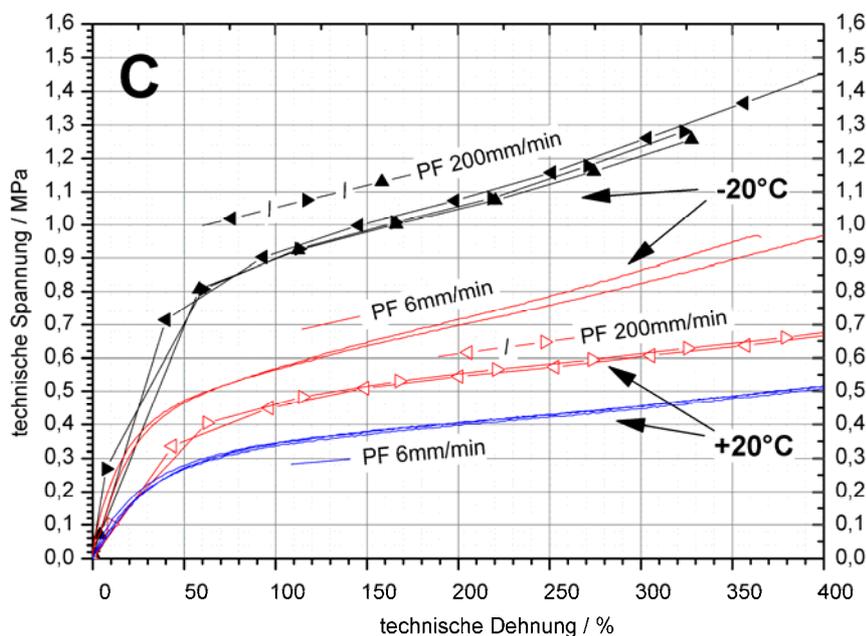


Abbildung 11-1: Spannungs–Dehnungs–Verlauf in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit und der Prüftemperatur am Beispiel des untersuchten Materials C bei Erstbelastung an der Parallelfuge

11.2 MULLINS Effekt

Elastomere zeigen bei zyklischer Zugbeanspruchung in Abhängigkeit vom Beanspruchungszyklus unterschiedliche Spannungsantworten. Bei gleicher Dehnung sind die im ersten Belastungszyklus gemessenen Spannungen größer als die in den folgenden Belastungszyklen gemessenen Spannungen. Der Unterschied verringert sich mit zunehmender Zyklenanzahl wie Abbildung 11-2 zeigt. Außerdem zeigt sich eine bleibende Dehnung bei Entlastung.

Dieser Effekt wurde nach MULLINS benannt, der ihn 1948 beschrieb [Mull48]. Er begründete die zunehmende Erweichung während der wiederholten Belastung mit der Abnahme der Steifigkeit der Füllstoffe. In ihrem Modell beschrieben MULLINS und TOBIN [Mull57] das Material als aus einer harten und einer weichen Phase bestehend. Die Spannungserweichung (engl.: stress softening) erklärten sie durch das Aufbrechen der harten Phase während der Deformation und deren Übergang in die weiche Phase. Somit nehmen die weichen Phasen mit zunehmender Verformung zu, was sich in der Spannungserweichung zeigt.

Als weitere Ursachen führten HARWOOD et al. in [Harw67] folgende Punkte an:

1. Neuordnung der Polymerketten im Zusammenhang mit dem Gleiten von Verschlaufungen sowie das Wandern von Netzwerkverbindungen
2. Strukturänderungen von Füllstoffen, insbesondere von Rußpartikeln
3. Gleiten von Polymerketten auf der Oberfläche der Füllstoffe sowie der Bruch von Bindungen zwischen den Polymerketten und den Füllstoffpartikeln
4. Bruch schwacher Bindungen
5. Verschiebung großer Partikel in der Polymermatrix

Von den genannten Punkten kommen die Neuordnung der Polymerketten, die Strukturänderung von Füllstoffen und das Versagen schwacher Bindungen als Erklärung für die Energieänderung infolge der Spannungserweichung in Betracht. Die in den Punkten 3 und 5 genannten Gründe bezeichneten HARWOOD et al. als spekulativ. Ihren Beitrag zur Energieumwandlung durch die Spannungserweichung stuften sie als sehr gering ein. Die Energieumwandlung infolge Spannungserweichung ist in Abbildung 11-2 exemplarisch als ausgefüllte Fläche zwischen den Spannungs–Dehnungs–Kurven infolge Erst– und Zweitbelastung dargestellt. Ebenso zeigt die Grafik die Hysterese im dritten Belastungszyklus als schraffierte Fläche zwischen der Belastungskurve und der zugehörigen Entlastungskurve.

MULLINS beobachtete, dass die Polymere ihre anfänglichen Spannungs–Dehnungs–Eigenschaften nach einer Ruhephase wieder aufweisen [Mull69]. Dieser Prozess findet kontinuierlich statt und kann durch Temperaturzufuhr oder Quellung beeinflusst werden.

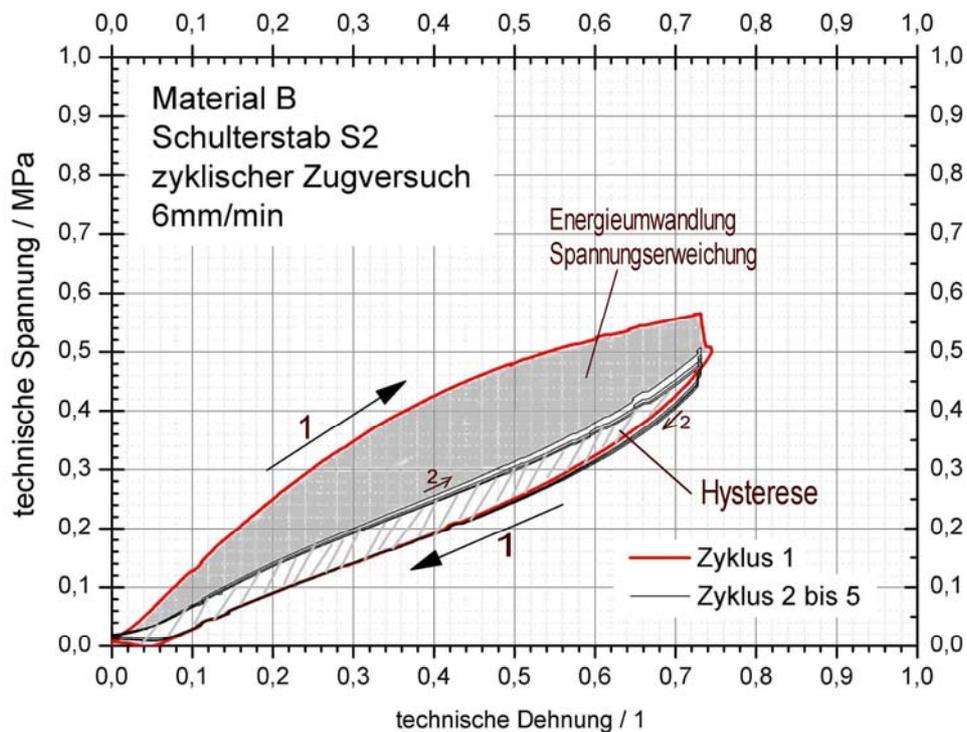


Abbildung 11-2: MULLINS–Effekt: Die Spannungs–Dehnungs–Kurve der Erstbelastung und –entlastung sind rot dargestellt und durch Pfeile gekennzeichnet. Schwarz dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven der zweiten bis fünften Be- und Entlastung; dargestellt sind die Energieumwandlung infolge Spannungserweichung als ausgefüllte Fläche zwischen Spannungs–Dehnungs–Kurve infolge Erst- und Zweitbelastung und die Hysterese als schraffierte Fläche zwischen den Spannungs–Dehnungs–Kurve infolge Belastung und zugehöriger Entlastung im dritten Zyklus

11.3 Materialgesetze zur Beschreibung des inkompressiblen Materialverhaltens

11.3.1 Phänomenologische und Statistische Materialgesetze – Allgemeine Ansätze

Das Materialverhalten wird durch Materialgesetze (konstitutive Gesetze) beschrieben. Damit ist es möglich, mathematisch den Zusammenhang zwischen den Größen Dehnung und Spannung zu erfassen. Für Stoffe, die gummielastische Eigenschaften aufweisen, sind in der Literatur zwei Gruppen von Materialgesetzen zu finden: phänomenologische Ansätze und statistische Ansätze.

Die Materialgesetze basieren auf der Änderung der spezifischen Formänderungsenergie W (engl. strain energy density). Dabei wird die spezifische Formänderungsenergie entweder als Funktion der drei Invarianten I_i des Green'schen Deformationstensors \mathbf{C} betrachtet, wie in den Gleichungen (11–1) bis (11–4) dargestellt, oder als Funktion der Hauptverstreckgrade λ_i . (s. u.a. [Arru93], [Yeoh93]) Durch die Verwendung der Invarianten wird die Unabhängigkeit der Ergebnisse vom verwendeten Koordinatensystem erreicht.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (11-1)$$

mit: $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (11-2)$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (11-3)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (11-4)$$

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{0i}} = \varepsilon_i + 1$$

W	spezifische Formänderungsenergie
λ_i	Hauptverstreckgrad in den Hauptachsenrichtungen
l_i	aktuelle Länge
l_{0i}	Ausgangslänge
ε_i	technische Dehnung

Die erste Invariante I_1 drückt eine Längenänderung der Raumdiagonalen des Würfels, die zweite Invariante I_2 eine Änderung der Oberfläche und die dritte Invariante I_3 die Volumenänderung des Würfels aus. [Stoj98]

Aus der partiellen Ableitung der Formänderungsenergie W ergeben sich die technischen Hauptspannungen f_i in Richtung i nach Gleichung (11–5):

$$f_i = \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \lambda_i} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \lambda_i} + \frac{\partial W}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \lambda_i} \quad (11-5)$$

Die Formänderungsenergiedichte W beschreibt ideal-elastisches Verhalten und setzt homogene, isotrope, inkompressible und rein elastische Werkstoffe, die einer quasistatischen Belastung ausgesetzt sind, voraus. Wird inkompressibles Materialverhalten vorausgesetzt, muss die dritte Invariante und damit Gleichung (11-4) den Wert „1“ annehmen.

Viskoelastische Effekte, wie Hystereseeffekte oder Spannungsrelaxation, können mit diesen Ansätzen nicht beschrieben werden. Die Formänderungsenergiedichte ist nur vom augenblicklichen Spannungszustand und nicht von der Belastungsgeschichte abhängig. Das Materialverhalten wird als HYPERELASTISCH bezeichnet.

Die statistisch motivierten Materialgesetze berücksichtigen die makromolekulare Struktur der Elastomere und sind damit physikalisch erklärbar. Ihre Materialparameter sind teilweise schwierig zu ermitteln, so dass zur Beschreibung des Materialverhaltens die phänomenologisch ermittelten Materialgesetze herangezogen werden (s. u. a. [Stomm99]).

Die phänomenologischen Materialgesetze weisen keine direkte physikalische Verbindung zu den Vorgängen auf, die die Verformungen hervorrufen. Sie beschreiben die makroskopisch erfassbaren elastischen Eigenschaften mathematisch.

11.3.2 Statistische Materialgesetze

11.3.2.1 Gauss-Statistik

Der makromolekulare Ansatz nach der Gauss-Statistik [Trel75] setzt voraus, dass:

1. das Material inkompressibel ist,
2. die Verteilung der Molekülketten der Gaussverteilung entspricht,
3. die Entropie des Polymers sich aus der Summe der Einzelentropien der das Polymer bildenden Molekülketten zusammensetzt.

Die Formänderungsenergiedichte W ergibt sich durch Berechnung der Einzelentropien der Molekülketten aus Gleichung (11-6).

$$W = \frac{1}{2} G (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (11-6)$$

mit: $G = k N T$
k Boltzmann–Konstante
N Anzahl der Ketten je Volumeneinheit
T absolute Temperatur

Für den einaxialen Zug- / Druckversuch erhält man die technische Hauptspannung in Beanspruchungsrichtung f_1 nach Gleichung (11–7). Dabei gilt wegen der Inkompressibilität $\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}$.

$$f_1 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} = G \left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \quad (11-7)$$

Für den allgemeinen Fall wird die Differenz der wahren Hauptspannungen t_i nach Gleichung (11–8) berechnet.

$$t_i - t_j = G (\lambda_i^2 - \lambda_j^2) \quad (11-8)$$

mit: t_i bzw. t_j wahre Hauptspannungen (Cauchy–Spannung)

Diesem Ansatz reicht eine Konstante zur Beschreibung des Materialverhaltens. Untersuchungen z.B. von Treloar [Trel75] zeigen, dass der Ansatz bei großen Verformungen nicht zur Vorhersage des Materialverhaltens von Elastomeren ausreicht.

11.3.2.2 Nichtgauss–Statistik

Kuhn und Grün (u.a. in [Trel75]) entwickelten einen anderen makromolekularen Ansatz, in dem sie die Langevin–Ketten–Statistik zur Beschreibung der Molekülkettenverteilung nutzten. Die Kraft–Dehnungs–Beziehung einer Kette ergibt sich mit diesem Ansatz zu:

$$F = \frac{kT}{l} L^{-1} \left(\frac{r}{nl} \right) = \frac{kT}{l} L^{-1} \left(\frac{\lambda}{\sqrt{n}} \right) \quad (11-9)$$

mit der inversen Langevin–Funktion $L^{-1} \left(\frac{r}{nl} \right)$, die wie folgt definiert ist:

$$\left(\frac{r}{nl}\right) = \coth \beta - \frac{1}{\beta} = L(\beta) \quad (11-10)$$

$$\beta = L^{-1}\left(\frac{r}{nl}\right)$$

mit:	r	End-zu-End Kettenlänge
	n	Anzahl der Kettenglieder
	l	Länge jedes einzelnen Kettenglieds
	k	Boltzmann-Konstante
	T	absolute Temperatur

Der Ansatz wurde dann durch andere Forscher z.B. Flory und Treloar [u.a. in Tre75] weiterentwickelt. Auf diese Ansätze wird hier nicht weiter eingegangen. Lediglich das 8-Ketten-Modell (engl. eight-chain-model) von ARRUDA und BOYCE [Arru93] soll erwähnt werden. Mit diesem mechanisch motivierten Materialgesetz wird das Materialverhalten dreidimensional beschrieben. Die Materialparameter sind unabhängig vom Verformungszustand.

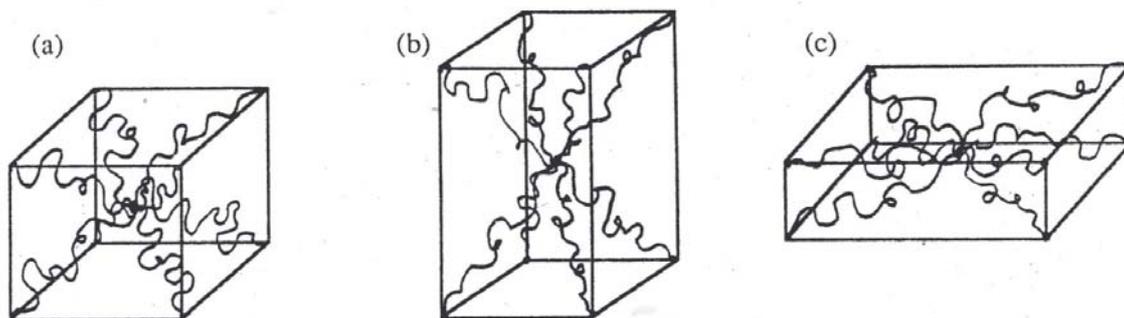


Abbildung 11-3: 8-Ketten-Modell nach Arruda und Boyce: (a) im undeformierten Zustand, (b) unter einaxialer Beanspruchung, (c) unter biaxialer Beanspruchung [Arru93]

Der Ansatz von ARRUDA und BOYCE geht von acht Molekülketten aus, die sich in einem Würfel entlang der Raumdiagonalen befinden. Abbildung 11-3 zeigt das Modell. Eine Deformation des Würfels hat die Beanspruchung aller acht Ketten zur Folge.

Zur Berechnung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung erhalten ARRUDA und BOYCE die Gleichung (11-11).

$$W = kNT\sqrt{n} \left[\beta_c \lambda_c + \sqrt{n} \ln \left(\frac{\beta_c}{\sinh \beta_c} \right) \right] \quad (11-11)$$

mit: $\beta_c = L^{-1} \left(\frac{\lambda_c}{\sqrt{n}} \right)$

λ_c Kettendehnung

$$\lambda_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{I_1}$$

I_1 Erste Invariante des Dehnungstensors

Aus der Gleichung (11–11) folgt für die fünf ersten Terme der Formänderungsenergie des 8–Ketten–Modells die Gleichung (11–12). Die dabei benutzte Reihenentwicklung der inversen Langevin–Funktion findet sich z.B. in [TREL54].

$$W = kNT \left[\frac{1}{2} (I_1 - 3) + \frac{1}{20n} (I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050n^2} (I_1^3 - 27) \right] + \quad (11-12)$$

$$kNT \left[\frac{19}{7000n^3} (I_1^4 - 81) + \frac{519}{673750n^4} (I_1^5 - 243) + \dots \right]$$

Untersuchungen von ARRUDA und BOYCE [Arru00] zeigen, dass das 8–Ketten–Modell Versuchsdaten gut abbilden kann.

11.3.3 Phänomenologische Materialgesetze

11.3.3.1 Ansatz nach MOONEY–RIVLIN

1940 formulierte MOONEY [Moon40] eine allgemeine Beziehung für die Spannungs–Dehnungs–Beziehung unter der Voraussetzung, dass das damit beschriebene Material isotrop ist, sowie Volumenänderungen und Hystereseeffekte infolge Verformung vernachlässigbar sind. Bei Beanspruchung durch einfaches Scheren (engl. simple shear) ist die Schubspannung proportional der Schubverformung. Gleichung (11–13) zeigt den von MOONEY formulierten Ansatz. Er ist der in der Technik am weitesten verbreitete phänomenologische Ansatz zur Berechnung der spezifischen Formänderungsenergie W [siehe u.a. Stoj98, Stomm99, Yeoh93].

$$W = C_{10} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_{01} (\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} - 3) = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (11-13)$$

mit: C_{10} / C_{01} Materialkonstanten

Unter den genannten Voraussetzungen muss W symmetrisch bezüglich der Hauptverstreckgrade λ_i sein.

Aus (11-13) ergibt sich für die Differenz zweier wahrer Hauptspannungen folgende Spannungs-Dehnungs-Beziehung:

$$t_1 - t_2 = 2(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)(C_{10} + \lambda_3^2 C_{01}) \quad (11-14)$$

Bei einaxialer Zug- / Druckbeanspruchung in λ_1 -Richtung ergibt sich mit $\lambda_1 = \lambda$:

$$\lambda_2^2 = \lambda_3^2 = \lambda^{-1} \quad (11-15)$$

Aus der Gleichung (11-14) folgt für die in Zugrichtung wirkende wahre Zugspannung t_1 :

$$t_1 = 2(\lambda^2 - \lambda^{-1})(C_{10} + C_{01} \lambda^{-1}) \quad (11-16)$$

Für die einaxiale Zug- / Druckbeanspruchung ergibt dieser Ansatz eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchsergebnissen und berechneten Daten wie Abbildung 11-4 zeigt.

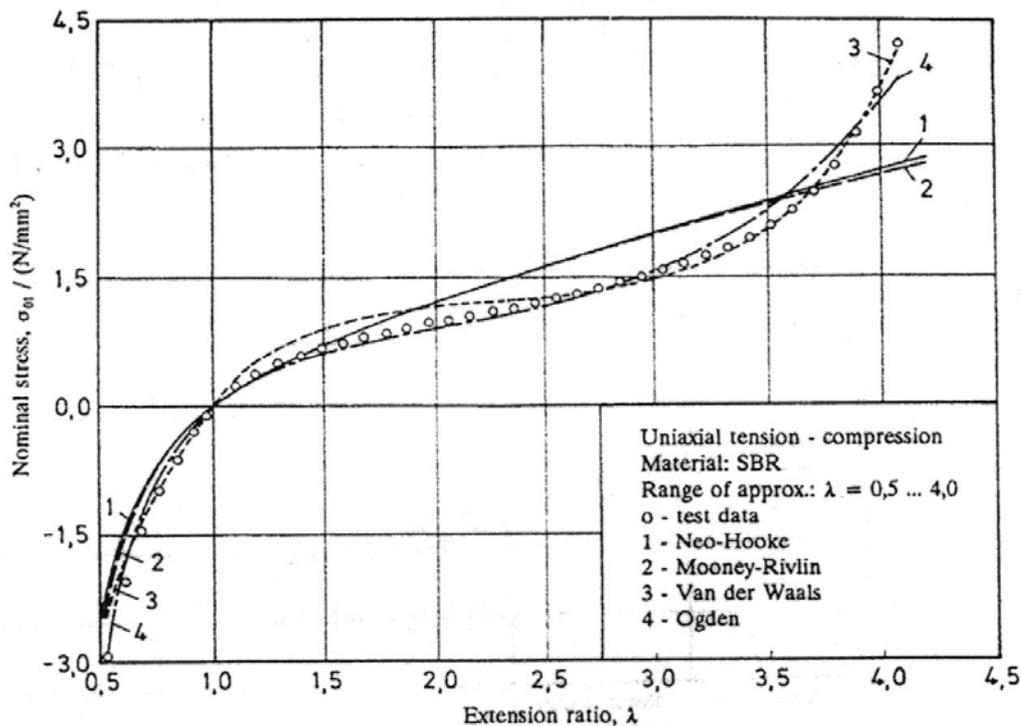


Abbildung 11-4: Voraussage der Spannungs-Dehnungs-Kurve für einen einaxialen Zug-Druck-Versuch mit verschiedenen Materialmodellen aus [Raos93]

Mit dem Ansatz nach MOONEY-RIVLIN lassen sich die Versuchswerte bis zu einer technischen Dehnung von 100% gut vorhersagen. Die Grenze in der Anwendbarkeit des Ansatzes liegt im Wendepunkt der Spannungs-Dehnungs-Linie. Dieser kann durch den Ansatz nach MOONEY-RIVLIN nicht abgebildet werden.

11.3.3.2 Ansatz nach RIVLIN

1948 formulierte RIVLIN [Rivl48] einen allgemeineren Ansatz. Er forderte für ein im unverformten Zustand inkompressibles und isotropes Material eine Formänderungsenergiefunktion, die eine symmetrische geradzahlige Potenzfunktion der drei Hauptverstreckgrade λ_i und damit der Dehnungsinvarianten I_i ist.

$$W = \sum_{i,j,k=0}^N C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 1)^k \quad (11-17)$$

mit: C_{ijk} Materialkennwerte

Durch die Forderung nach Volumenkonstanz (Inkompressibilität) vereinfacht sich Gleichung (11–17) zu:

$$W = \sum_{i,j=0}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (11-18)$$

Die Konstante C_{00} ist immer Null. Dadurch wird der spannungsfreie Zustand im unverformten Material gekennzeichnet. Verformt sich das Material homogen, ergibt sich für die wahren Hauptspannungen aus (11–18):

$$t_i = 2 \left(\lambda_i^2 \frac{\partial W}{\partial I_1} - \frac{1}{\lambda_i^2} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) + p \quad (\text{mit } i = 1, 2, 3) \quad (11-19)$$

mit: p beliebiger hydrostatischer Druck

Für die Differenz zweier Hauptspannungen gilt damit:

$$t_i - t_j = 2(\lambda_i^2 - \lambda_j^2) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_k^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (11-20)$$

Die bei einem einaxialen Zug- oder Druckversuch in Belastungsrichtung entstehende Cauchy-Spannung (wahre Spannung) berechnet sich zu:

$$t = 2 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (11-21)$$

mit: λ Hauptverstreckgrad in Belastungsrichtung

Für die technische Spannung f in Beanspruchungsrichtung ergibt sich dann:

$$f = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (11-22)$$

Die MOONEY-Form der Formänderungsenergiefunktion (Gleichung (11–13)) ist der Ansatz nach RIVLIN mit $i+j = 1$. Er wird in der Literatur als Ansatz nach MOONEY-RIVLIN bezeichnet. Der RIVLINSche Ansatz ergibt mit $i = 1$ und $j = 0$

den in Gleichung (11–23) dargestellten Ansatz. Er wird als NEO–HOOKE–Ansatz bezeichnet, da das Materialverhalten mit nur einer Konstante beschrieben wird, wie der E–Modul im Hookeschen Gesetz. Der Ansatz entspricht dem im Kapitel 11.3.2.1 beschriebenen molekularen Ansatz nach der Gauss–Statistik mit

$$C_{10} = \frac{1}{2} kNT.$$

$$W = C_{10} (I_1 - 3) \quad (11-23)$$

11.3.3.3 Ansatz nach YEOH

YEOH [Yeoh90] schlug folgenden Ansatz zur Berechnung der Formänderungsenergiegedichte W vor, in dem die Formänderungsenergie nur von der ersten Invarianten I_1 abhängig ist:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (11-24)$$

Voraussetzungen für die Gültigkeit dieses Ansatzes sind:

1. $\partial W / \partial I_1$ ist größer als $\partial W / \partial I_2$
2. $\partial W / \partial I_1$ ist unabhängig von I_2

Diese Voraussetzungen sind nicht generell erfüllt. YEOH stellte fest, dass mit Ruß gefüllte Kunststoffe diese beiden Voraussetzungen außerhalb des Bereichs kleiner Dehnungen erfüllen.

Der kubische Ansatz in (11–24) führt für einen einaxialen Zug– / Druckversuch auf folgende Spannungs–Dehnungs–Beziehung:

$$\frac{f}{\lambda - \lambda^{-2}} = 2C_{10} + 4C_{20}(I_1 - 3) + 6C_{30}(I_1 - 3)^2 \quad (11-25)$$

Die Kennwerte C_{10} , C_{20} und C_{30} lassen sich durch eine Kurvenanpassung ermitteln, wenn die reduzierte Spannung $\frac{f}{\lambda - \lambda^{-2}}$ gegen $(I_1 - 3)$ aufgetragen wird.

YEOH zeigte, dass die vorausberechneten Daten eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Daten aufweisen [Yeoh90] [Yeoh93]. Abbildung 11-5 zeigt exemplarisch den vorausgesagten Spannungs–Dehnungs–Verlauf für einen einaxialen Zugversuch. Die Materialkennwerte wurden aus den Messdaten eines Scherversuchs ermittelt.

Für die Verwendung des kubischen Ansatzes nach YEOH spricht, dass er in vielen gängigen FEM–Programmen implementiert ist. Der kubische Ansatz stellt

eine reduzierte Form des allgemeinen Ansatzes von RIVLIN dar. Im RIVLINSchen Ansatz dritter Ordnung entfallen die von I_2 –abhängigen Terme; die Konstanten C_{01} und C_{11} werden damit Null.

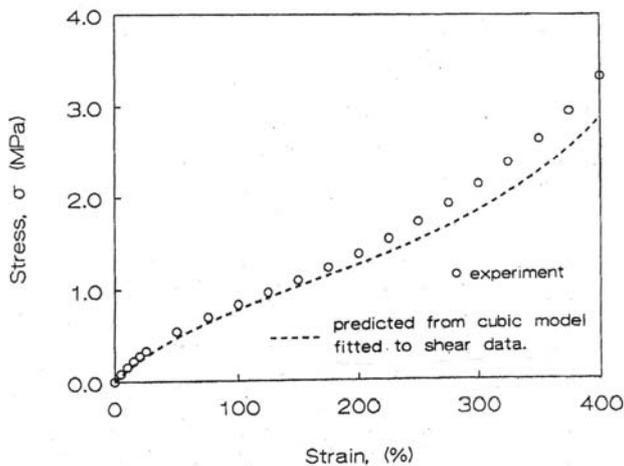


Abbildung 11-5: Mit dem Ansatz nach YEOH vorausgesagter Spannungs–Dehnungs–Verlauf für einen einaxialen Zugversuch; Kennwertermittlung aus einem Scherversuch aus [Yeoh93]

11.3.3.4 Ansatz nach VALANIS und LANDEL

Im Ansatz nach VALANIS und LANDEL [Vala67] wird die Formänderungsenergie als Summe von Einzelfunktionen der Hauptverstreckgrade λ_i definiert.

$$W = w(\lambda_1) + w(\lambda_2) + w(\lambda_3) = \sum_{i=1}^3 w(\lambda_i) \quad (11-26)$$

Gleichung (11–19) gilt für ein isotropes elastisches Material. Somit muss die Formänderungsenergie W eine symmetrische Funktion der Hauptverstreckgrade λ_i sein. VALANIS und LANDEL schlugen den Ansatz vor, da sich die Hauptverstreckgrade einfach und exakt ermitteln lassen.

Aus Gleichung (11–26) ergibt sich nach (11–27) die technische Spannung f_i sowie nach (11–28) die wahre Spannung t_i .

$$f_i = \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} + \frac{p}{\lambda_i} = w'(\lambda_i) + \frac{p}{\lambda_i} \quad (11-27)$$

$$t_i = \lambda_i w'(\lambda_i) + p \quad (11-28)$$

mit: p beliebiger hydrostatischer Druck

Für die Spannungs–Dehnungs–Beziehung, ausgedrückt als Differenz zwischen zwei Hauptspannungen, folgt:

$$t_i - t_j = \lambda_i w'(\lambda_i) - \lambda_j w'(\lambda_j) \quad (11-29)$$

mit: $w'(\lambda_i) = dw / d\lambda_i$

Die Ermittlung von $w'(\lambda_i)$ erfolgt experimentell z.B. aus dem reinen Scherversuch (engl. pure shear). Hier ist $\lambda_2 = 1$. Gleichung (11–29) vereinfacht sich dann:

$$t_1 - t_2 = \lambda_1 w'(\lambda_1) - c \quad \text{mit } c = [\lambda_2 w'(\lambda_2)]_{\lambda_2=1} = w'(1) \quad (11-30)$$

Im Fall des reinen Scherversuchs gilt weiterhin:

$$\lambda_3 = \lambda_1^{-1} \quad (11-31)$$

$$t_3 = 0 \quad (11-32)$$

somit folgt:

$$t_3 - t_2 = -t_2 = \lambda_1^{-1} w'(\lambda_1^{-1}) - c \quad (11-33)$$

Aus (11–23) und (11–26) lässt sich dann die Form der Funktion von $\lambda w'(\lambda)$ ermitteln.

VALANIS und LANDEL ermittelten den in Gleichung (11–34) dargestellten Zusammenhang, indem sie in der Literatur zur Verfügung stehende Versuchsdaten eines biaxialen Versuchs auswerteten.

$$w'(\lambda) = 2\mu \ln \lambda \quad (11-34)$$

$$w(\lambda) = 2\mu \lambda (\ln \lambda - 1) \quad (11-35)$$

Die Auswertung weiterer in der Literatur zur Verfügung stehender Versuchsdaten von einaxialen Zug- und Druckversuchen bestätigte den ermittelten Zusammenhang. VALANIS und LANDEL zeigten eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchsdaten und Vorhersagewerten unter Verwendung des in (11–35) dargestellten Zusammenhangs im Bereich von $0,6 < \lambda < 2,5$.

11.3.3.5 Ansatz nach OGDEN

Für inkompressible und isotrope Materialien schlug OGDEN [Ogde72] folgenden Ansatz vor:

$$W = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) \quad (11-36)$$

mit: λ_i Hauptverstreckgrad

μ_n, α_n Materialkonstanten

$\mu_n, \alpha_n \in P$

Die Cauchy–Hauptspannungen ergeben sich damit zu:

$$t_j = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mu_n \lambda_j^{\alpha_n} - p \quad (j = 1, 2, 3) \quad (11-37)$$

mit: p beliebiger hydrostatischer Druck

Für den einaxialen Versuch vereinfacht sich (11–37) zu:

$$f = \frac{1}{\lambda} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mu_n \left(\lambda^{\alpha_n} - \lambda^{\left(-\frac{1}{2}\alpha_n\right)} \right) \quad (11-38)$$

Wie die Abbildung 11-4 zeigt, lassen sich mit dem Ansatz nach OGDEN die Versuchsdaten gut vorhersagen.

11.4 Materialgesetze für die Beschreibung von nahezu inkompressiblem Material

In der Realität sind gummielastische Materialien nicht vollständig inkompressibel [Arru00]. Um ihr nahezu inkompressibles Materialverhalten beschreiben zu können, wird die Formänderungsenergiedichte in zwei Anteile aufgespalten, der deviatorischen Formänderungsenergie W_D und der hydrostatischen Formänderungsenergie W_H [Bath02].

$$W = W_D(J_1, J_2) + W_H(J_3) \quad (11-39)$$

mit: $J_3 = \sqrt{I_3}$ Volumenverhältnis

$$J_1 = I_1 J_3^{-\frac{2}{3}} = I_1 I_3^{-\frac{1}{3}}$$

$$J_2 = I_2 J_3^{-\frac{4}{3}} = I_2 I_3^{-\frac{2}{3}}$$

J_1, J_2, J_3 reduzierte Invarianten

Der deviatorische Anteil der Formänderungsenergiedichte berücksichtigt die Formänderungsenergie infolge der Verschiebungen. Er wird als Gestaltänderungsenergie bezeichnet und kann mit jedem der in Kapitel 11.3 beschriebenen Materialgesetze berechnet werden. Der hydrostatische Anteil der Formänderungsenergie ergibt sich aus der durch die Verformung hervorgerufenen Volumenänderung. Er wird als Volumenänderungsenergie bezeichnet. Im Kapitel 12 wird kurz dargestellt, wie dieser Ansatz in die Finite Elemente Methode implementiert ist.

11.5 Auswahl der Materialgesetze für die Simulationsrechnungen

Für die Simulationsrechnungen mit der FEM wurden folgende Materialgesetze ausgewählt:

1. Ansatz nach MOONEY–RIVLIN (MR)
2. Ansatz nach YEOH (YE)
3. Ansatz nach OGDEN (OG)

Die Literaturrecherche zeigte, dass diese Materialgesetze das Spannungs–Dehnungs–Verhalten zufriedenstellend darstellen s. u. a. [Raos93], [Yeoh93]. Eine Simulation mit den statistischen Materialgesetzen wurde nicht weiter verfolgt, da zum einen die Materialparameter schwer bestimmbar sind, zum anderen von ARRUDA und BOYCE [Arru93] gezeigt wurde, dass die am einaxialen Zugversuch bestimmten Materialparameter den biaxialen Versuch nicht zufriedenstellend abbilden können. Dies traf sowohl für das Drei–Ketten–Modell nach Wang und Guth als auch für das Vier–Ketten–Modell nach Treloar zu, die in dieser Arbeit nicht näher erläutert wurden.

Für die Simulationsrechnungen mit FEM liegen nur Versuchswerte aus dem einaxialen Zugversuch vor. Die ermittelten Materialparameter werden für die Berechnung des Spannungs–Dehnungs–Verhaltens der Parallelfuge und der Kreuzfuge verwendet.

Wie in Abschnitt 11.3.2 gezeigt, fließen in die statistischen Materialgesetze makromolekulare Größen ein. Von den untersuchten Fugendichtstoffen ist zwar die Polymerbasis bekannt. Alle weiteren Bestandteile, wie Füllstoffe, Weichmacher etc., sind unbekannt. Sowohl die Zugabemenge als auch die Qualität der Ausgangsstoffe schwanken. Damit sind die makromolekularen Kennwerte chargenabhängig.

Für die ausgewählten Materialgesetze sprach, dass sie im verwendeten FEM–Programm implementiert sind.

12 Finite-Elemente-Methode

12.1 Nichtlineare Strukturanalysen

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) wird zur numerischen Berechnung von Strukturproblemen benutzt. Die Strukturprobleme können linearer oder nichtlinearer Art sein. Die Nichtlinearität von Strukturanalysen kann sowohl aus geometrischen Nichtlinearitäten als auch aus nichtlinearen Materialgesetzen resultieren. Geometrische Nichtlinearitäten liegen bei großen Verschiebungen, Drehungen und / oder großen Verzerrungen vor.

Die untersuchten Materialien weisen ein nichtlineares Materialverhalten auf, wie in die Untersuchungen zeigten. Die betrachteten Verformungen betragen mehr als 2 % bzw. 4 % und sind damit als groß einzustufen [Mohr92] [Bath02]. Damit liegt ein nichtlineares Strukturproblem vor. Besonderheiten, die sich durch die Lösung der nichtlinearen Berechnung ergeben, werden in den folgenden Abschnitten kurz erläutert. Ausführliche Informationen hierzu finden sich z. B. in [Bath02], [Wrig01] und [Zien75] bzw. in den Dokumentationen der FEM-Programme. Für die Simulationsrechnungen wurde das FEM-Programm ANSYS in den Versionen 6.1 bis 8.1 verwendet.

12.2 Lösung nichtlinearer Probleme

Sind nichtlineare Probleme zu lösen, werden die Berechnungen schrittweise durchgeführt. Das zu berechnende Problem wird in Teilbereiche unterteilt, die nacheinander gelöst werden. Dazu wird die Belastung in mehreren Stufen, Inkrementen, aufgebracht. In den zu berechnenden Belastungsstufen wird die zu lösende Funktion linearisiert.

Während der nichtlinearen Berechnungen muss die Gleichung (12–1) für den Zeitpunkt $t + \Delta t$ gelöst werden.

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{(i-1)} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)} = 0 \quad (12-1)$$

mit: ${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{(i-1)}$ Vektor der äußeren Knotenpunktlasten zum Zeitpunkt $t+\Delta t$ im $(i-1)$ ten Iterationsschritt

${}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)}$ Vektor der Knotenpunktkräfte

Die Knotenpunktkräfte ${}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)}$ hängen nichtlinear von den Knotenpunktverschiebungen $\mathbf{U}^{(i)}$ ab. Deshalb wird (12–1) iterativ gelöst. Innerhalb des Iterationsvorgangs sind die Beziehungen (12–2) bis (12–4) zu lösen. Sowohl der Vektor der äußeren Knotenpunktlasten ${}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)}$ als auch der Vektor der Knotenpunktkräfte

${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{(i-1)}$ werden nach dem Prinzip der virtuellen Verschiebung ermittelt.

$$\Delta\mathbf{R}^{(i-1)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R}^{(i-1)} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)} \quad (12-2)$$

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}_T^{(i-1)} \cdot \Delta\mathbf{U}^{(i)} = \Delta\mathbf{R}^{(i-1)} \quad (12-3)$$

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{U}^{(i)} \quad (12-4)$$

mit: ${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(0)} = {}^t\mathbf{U}$ und ${}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(0)} = {}^t\mathbf{F}$

${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}_T^{(i-1)}$ Tangentensteifigkeitsmatrix

$\Delta\mathbf{U}^{(i)}$ inkrementeller Knotenpunktverschiebungsvektor

$\mathbf{U}^{(i+1)}$; $\mathbf{U}^{(i)}$ Verschiebungsvektoren

$\Delta\mathbf{R}^{(i-1)}$ Lastinkrement (out-of-balance Lastvektor)

In die Tangentensteifigkeitsmatrix gehen die geometrischen und stofflichen Nichtlinearitäten ein:

$$\mathbf{K}_T = \mathbf{K}_L + \mathbf{K}_{NL} \quad (12-5)$$

mit: \mathbf{K}_L inkrementelle lineare Steifigkeitsmatrix

\mathbf{K}_{NL} inkrementelle nichtlineare Steifigkeitsmatrix

Zur Lösung wird z.B. das Newton–Raphson–Iterationsverfahren verwendet.

12.3 Newton–Raphson–Iteration

12.3.1 Reguläre Newton–Raphson–Iteration

Bei der regulären oder vollen Newton–Raphson–Iteration wird zunächst aus (12–2) der nicht ausbalancierte Lastvektor $\Delta\mathbf{R}^{(i-1)}$ ermittelt. Mit $\Delta\mathbf{R}^{(i-1)}$ wird aus (12–3) das Verschiebungsinkrement $\Delta\mathbf{U}^{(i)}$ berechnet, wobei die aktuelle Tangentensteifigkeitsmatrix ${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}_T^{(i-1)}$ für den (i–1)ten Iterationsschritt aus der Beziehung (12–6) folgt.

$$\left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} \right|_{{}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i-1)}} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{K}_T^{(i-1)} \quad (12-6)$$

Im nächsten Iterationsschritt wird mit dem Verschiebungsinkrement $\Delta\mathbf{U}^{(i)}$ aus Gleichung (12–4) die Verschiebung $\mathbf{U}^{(i+1)}$ berechnet. Der Iterationsvorgang ist beendet, wenn der nicht ausbalancierte Lastvektor $\Delta\mathbf{R}^{(i-1)}$ oder das Verschiebungsinkrement $\Delta\mathbf{U}^{(i)}$ festgelegte Konvergenzkriterien erreichen bzw. unterschreiten. [s. u. a. Bath02]

Bei der regulären Newton–Raphson–Iteration wird in jedem Iterationsschritt die aktuelle Tangentensteifigkeitsmatrix \mathbf{K}_T berechnet. Die Abbildung 12-1 zeigt

grafisch, wie das reguläre Newton–Raphson–Verfahren arbeitet.

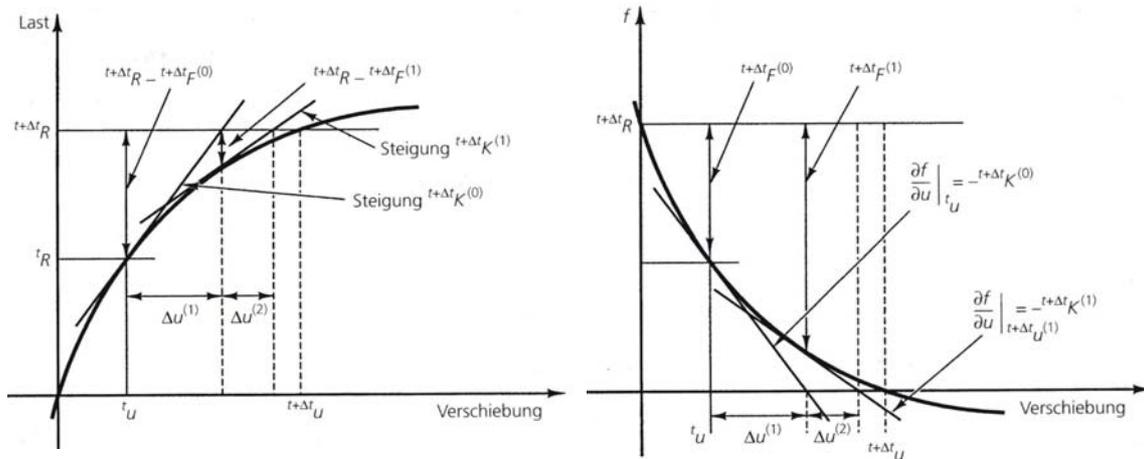


Abbildung 12-1: Reguläre Newton–Raphson–Iteration bei der Lösung eines Systems mit einem Freiheitsgrad; links: Last–Verschiebungs–Beziehung, rechts: Iteration für die Nullstelle der in (12–1) verwendeten Funktion [Bath02]

12.3.2 Modifizierte Newton–Raphson–Iteration

Da die reguläre Newton–Raphson–Iteration sehr rechenintensiv ist, sind Modifikationen dieses Verfahrens entwickelt worden. So wird beim „Anfangssteifigkeits“-Verfahren in jedem Iterationsschritt in (12–3) mit der Anfangssteifigkeitsmatrix ${}^0\mathbf{K}_T$ gerechnet. Bei diesem Ansatz kann die Lösung sehr langsam konvergieren bzw. es ist sogar eine divergierende Lösung möglich [Bath02]. Die linke Grafik in Abbildung 12-2 zeigt dieses Verfahren schematisch.

Eine weitere Modifikation stellt das modifizierte Newton–Raphson–Verfahren dar. Hierbei wird die Steifigkeitsmatrix \mathbf{K}_T zu den Zeiten $0, \Delta t, 2 \Delta t \dots$ oder t berechnet. Die Häufigkeit der Berechnung ist von der Nichtlinearität des zu berechnenden Systems abhängig, wobei die Steifigkeitsmatrix mit zunehmender Nichtlinearität häufiger berechnet wird. In Abbildung 12-2 stellt die rechte Grafik dieses Verfahren dar. Sowohl das „Anfangssteifigkeits–Verfahren“ als auch das modifizierte Newton–Raphson–Verfahren stehen im verwendeten FEM–Programm ANSYS nicht für die Lösung von Berechnungen mit großen Verformungen zur Verfügung.

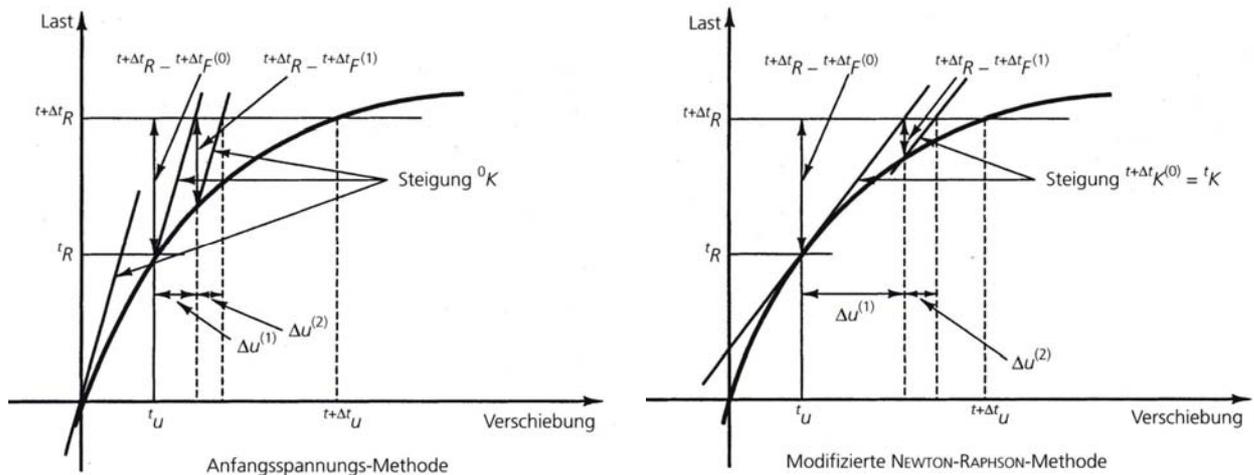


Abbildung 12-2: links: „Anfangssteifigkeits“-Verfahren, rechts: modifiziertes Newton–Raphson–Verfahren; beide Verfahren bei der Lösung eines Systems mit einem Freiheitsgrad [Bath02]

12.4 Konvergenzkriterien

Sind definierte Konvergenzkriterien erfüllt, wird die Iteration abgebrochen. Das out-of-balance-Konvergenzkriterium gilt als erreicht, wenn Gleichung (12–7) erfüllt ist.

$$\|\Delta \mathbf{R}\| < \varepsilon_R R_{ref} \quad (12-7)$$

mit: $\Delta \mathbf{R}^{(i-1)} = {}^{t+\Delta t} \mathbf{R}^{(i-1)} - {}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(i-1)}$

${}^{t+\Delta t} \mathbf{R}^{(i-1)}$ Vektor der äußeren Knotenpunktlasten

${}^{t+\Delta t} \mathbf{F}^{(i-1)}$ Vektor der Knotenpunktkräfte

R_{ref} vorgegebener Referenzwert

ε_R vorgegebene Toleranz

In den durchgeführten Simulationsrechnungen werden keine äußeren Knotenpunktlasten eingetragen. Der Referenzwert R_{ref} wird mit 1,0 vorgegeben, die Toleranz ε_r mit 0,001. Die Konvergenz wird mit der L2–Norm (Euklidische Norm) nach Gleichung (12–8) geprüft.

$$\|\mathbf{R}\| = \left(\sqrt{\sum R_i^2} \right) \quad (12-8)$$

12.5 Einbindung des Materialgesetzes in das FEM–Modell

Die untersuchten Materialien weisen gummielastisches Materialverhalten auf. Die Spannungsantworten ${}^t S_{ij}$ werden aus einem Funktional der Formänderungsenergie W gemäß Gleichung (12–9) abgeleitet.

$${}^tS_{ij} = \frac{\partial W}{\partial {}^t\varepsilon_{ij}} \quad (12-9)$$

Zur Berechnung der Formänderungsenergiedichte W existieren verschiedene Materialgesetze, die in Kapitel 11 beschrieben sind.

Der in der FEM verwendete Ansatz wird im Folgenden exemplarisch für das Mooney–Rivlin–Gesetz erläutert. Nach dem Mooney–Rivlin–Ansatz berechnet sich die Formänderungsenergie ${}^t\tilde{W}$ vom Zeitpunkt 0 bis zum Zeitpunkt t gemäß Gleichung (12–10):

$${}^t\tilde{W} = C_{10}({}^tI_1 - 3) + C_{01}({}^tI_2 - 3) \quad \text{mit } {}^tI_3 = 1 \quad (12-10)$$

Die Invarianten I_i werden durch die Komponenten des rechten Cauchy–Green–Deformationstensors \mathbf{C} ausgedrückt:

$${}^tI_1 = {}^tC_{kk}$$

$${}^tI_2 = \frac{1}{2} \left[({}^tI_1)^2 - {}^tC_{ij} {}^tC_{ij} \right] \quad (12-11)$$

$${}^tI_3 = \det {}^t\mathbf{C}$$

Für den Fall der vollkommenen Inkompressibilität nimmt tI_3 den Wert „1“ an. Dies entspricht jedoch nicht der Realität, weshalb besser ein nahezu inkompressibles Material angenommen wird. In diesem Fall muss der Kompressionsmodul K sehr viel größer sein als der Schubmodul G . Das wird berücksichtigt, wenn die Bedingung ${}^tI_3 = 1$ nicht einbezogen wird. Dafür muss zusätzlich ein Term für die hydrostatische Arbeit in der Berechnung der Formänderungsenergie erfasst werden.

$${}^t\tilde{W} = C_{10}({}^tI_1 - 3) + C_{01}({}^tI_2 - 3) + W_H({}^tI_3) \quad (12-12)$$

Da alle Terme der Gleichung (12–12) zum Druck beitragen, kann (12–12) nicht für die Verschiebungs–/ Druckformulierung verwendet werden. Die Invarianten I_i müssen in die reduzierten Invarianten J_i nach Gleichung (12–13) umgerechnet werden.

$${}^tJ_1 = {}^tI_1 ({}^tI_3)^{-1/3}$$

$${}^tJ_2 = {}^tI_2 ({}^tI_3)^{-2/3} \quad (12-13)$$

$${}^tJ_3 = ({}^tI_3)^{1/2}$$

Mit diesen ergibt sich für die Formänderungsenergie die Gleichung (12–14), die in

die Gleichung (12–9) eingesetzt wird.

$${}^t_0\bar{W} = C_{10}({}^t_0J_1 - 3) + C_{01}({}^t_0J_2 - 3) + \frac{1}{2}K({}^t_0J_3 - 1)^2 \quad (12-14)$$

12.6 Verwendete Strukturelemente

Für Berechnungen mit großen Verformungen und von Materialien mit hyperelastischen Eigenschaften stehen in ANSYS die SOLID–Elemente der Reihe 18x sowie die Elemente HYPERx zur Verfügung. Die verwendeten Volumenelemente sind Strukturelemente, die speziell für nichtlineare Materialgesetze entwickelt wurden.

HYPER 86

Das 3D–Element HYPER 86 ist für die Berechnungen mit dem hyperelastischen Ansatz nach MOONEY–RIVLIN ausgelegt. Es wird aus 8 Eckknoten gebildet, die in den Richtungen x, y und z je einen Freiheitsgrad besitzen. Die Verwendung dieses Elements wird empfohlen, wenn ein nahezu inkompressibles Materialverhalten vorliegt. Durch Eingabe der Querkontraktionszahl ν ist es möglich, eine Kompressibilität des Materials vorzugeben.

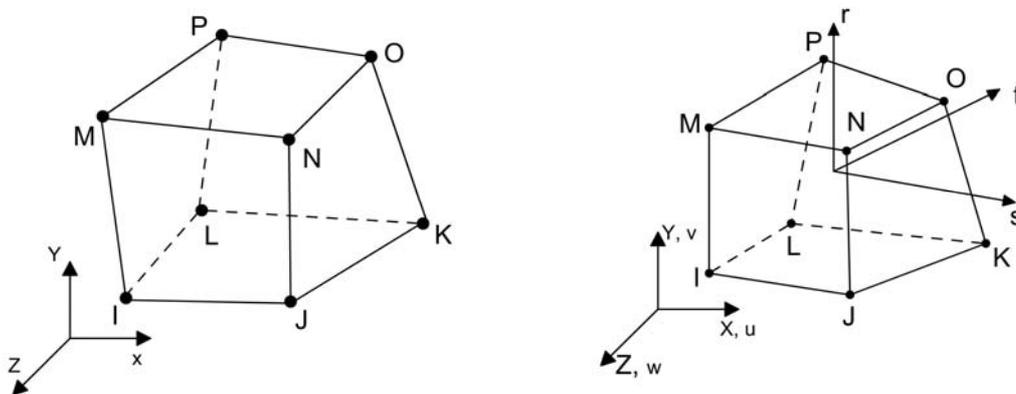


Abbildung 12-3: HYPER 86 (3D–Struktur–Element): links: mit Elementkoordinatensystem, rechts: mit normalisiertem Koordinatensystem [ANSYS]

SOLID 185 und SOLID 186

Das 3D–Element SOLID 185 und SOLID 186 lassen u. a. eine Berechnung mit den hyperelastischen Materialgesetzen nach MOONEY–RIVLIN, YEOH und OGDEN zu. Beide Elemente werden durch 8 Eckknoten aufgespannt. Die Elemente SOLID 186 besitzen zusätzlich auf jeder Elementkante einen Mittelknoten. Jeder Knoten hat drei Freiheitsgrade und ermöglicht Verschiebungen in x-, y- und z-Richtung. Je nach Kompressibilität stehen in der Element-

formulierung die Berechnung mit der reinen Verschiebungsformulierung (engl.: pure displacement) oder mit einer gemischten Verschiebungs– und Druckformulierung („mixed u/p“) zur Verfügung. Bei inkompressiblem Materialverhalten ist die Simulation mit der gemischten Formulierung erforderlich. Soll bei der Simulation die Kompressibilität berücksichtigt werden, muss die reine Verschiebungsformulierung verwendet werden.

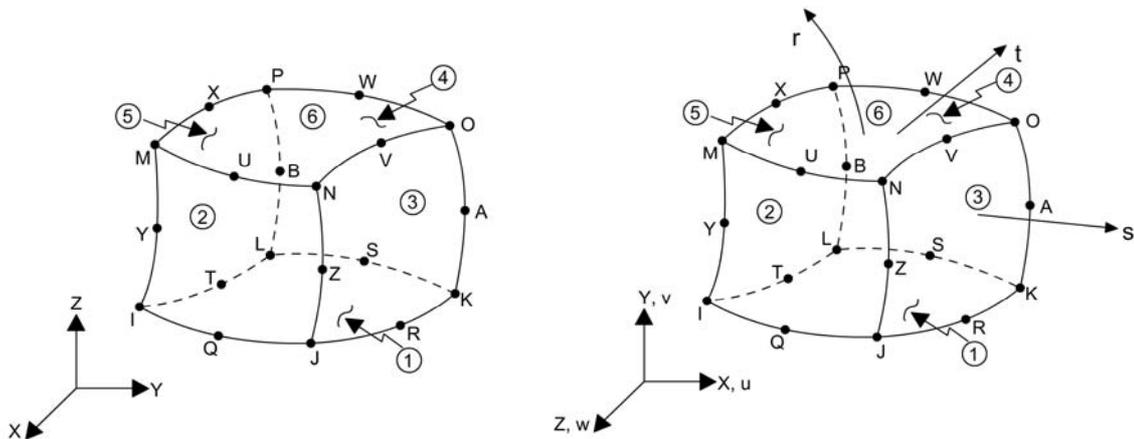


Abbildung 12-4: SOLID 186 (3D–Struktur–Element): links: mit Elementkoordinatensystem, rechts: mit normalisiertem Koordinatensystem [ANSYS]

13 Simulationsrechnungen

13.1 Durchgeführte Simulationsrechnungen

Tabelle 13-1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Simulationsrechnungen. Für die Simulationsrechnungen wurden die Materialien B und C ausgewählt. Auf Simulationsrechnungen für die Materialien A und D musste verzichtet werden. Die Herstellung der Probekörper aus dem Material A erwies sich als problematisch. Die Ergebnisse waren nicht reproduzierbar. Das Material D wird aufgrund seiner speziellen Anwendung nur auf Nachfrage gefertigt und stand damit für die Herstellung von Probekörpern nur sporadisch zur Verfügung. Die für die Simulation erforderlichen Materialkennwerte bzw. Messkurven zur Ermittlung der Materialkennwerte konnten durch die Hersteller nicht zur Verfügung gestellt werden.

Tabelle 13-1: Überblick über die durchgeführten Simulationsrechnungen

Material	B		C
Belastungsgeschwindigkeit	6 mm / min		200 mm / min
Belastungszyklus	1	4	1
Materialgesetze	Mooney, Ogden, Yeoh	Ogden, Yeoh	Mooney, Ogden, Yeoh

Die zur Kennwertermittlung verwendeten Schulterstäbe entstammen einer anderen Charge als die untersuchten Parallel- und Kreuzfugen.

13.2 Strukturmechanisches Modell

Mit dem FEM-Programm ANSYS wurden der einaxiale Zugversuch an einem Schulterstab S 2 nach DIN 53 504 sowie die Zugversuche an einer Parallelfuge und an einer Kreuzfuge nachgerechnet. Für die Parallel- und Kreuzfuge ist während der Simulation auf die Abbildung der Kontaktkörper aus Mörtel verzichtet worden, so dass nur die Verformungen des Fugendichtstoffs abgebildet wurden. Die Vereinfachungen können aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften vorgenommen werden. Die Mörtelkörper ($E_{\text{Mörtel}} \geq 25.000 \text{ N/mm}^2$) sind im Vergleich zum Fugendichtstoff ($E_{10\%}$ ca. 2 N/mm^2) sehr steif, so dass die eingetragenen Verschiebungen nur eine Verformung des Fugendichtstoffs zur Folge haben.

Die Abbildung 13-2 zeigt den Probekörper Schulterstab. Abbildung 13-1 zeigt die in den Simulationsrechnungen verwendeten Abmessungen der Probekörper Parallelfuge und Kreuzfuge. Diese entsprechen den idealen Abmessungen des Fugendichtstoff während der Versuche. Der schwarz angelegte Teil der Kreuzfuge stellt die in der Simulation verwendete Viertelprobe dar. Sie wurde unter Ausnutzung der Symmetriebedingungen gewählt. Mit dieser Vereinfachung ließen sich die Elementzahl und somit auch der Rechenaufwand erheblich reduzieren.

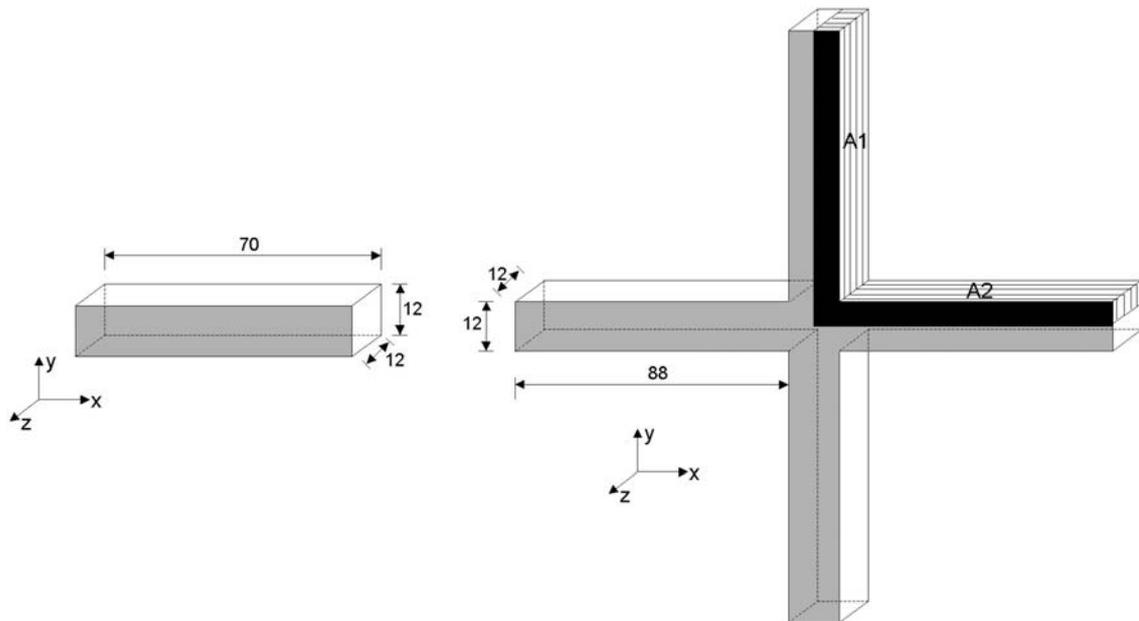


Abbildung 13-1: Strukturmechanische Modelle: links: Parallelfuge, rechts: Kreuzfuge

Die in Abbildung 13-1 parallel zur x-z-Ebene liegenden Flächen der Parallelfuge werden mit einer Verschiebung in y-Richtung beaufschlagt, um den Fugendichtstoff zu dehnen. Die mit A1 und A2 gekennzeichneten Flächen der Kreuzfuge in Abbildung 13-1 werden mit den jeweils gleichen Verschiebungen in y- und x-Richtung beaufschlagt, um den Fugendichtstoff zu dehnen.

13.3 Verwendete Materialkennwerte

13.3.1 Voraussetzungen für die Bestimmung der Materialkennwerte

Zur Ermittlung der Materialkennwerte wurden einaxiale Zugversuche am Schulterstab S2 nach DIN 53 504 [DIN4] bei +20°C mit verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführt. Die für die berührungslose Messung der Längenänderung verwendeten optischen Wegaufnehmer arbeiteten bei –20°C nicht, so dass für diese Temperatur keine Spannungs–Dehnungs–Kurven ermittelt werden konnten. Die Abbildung 13-2 zeigt schematisch den Schulterstab S2.

λ	Streckungsverhältnis in Zugrichtung
W	Formänderungsenergiegedichte
$I_1; I_2$	erste und zweite Invariante des Deformationstensors

Der Ausdruck $\frac{f}{\lambda - \lambda^{-2}}$ wird als reduzierte Spannung bezeichnet.

Eingabeparameter für das Modell nach MOONEY–RIVLIN

Zur Ermittlung der Materialkennwerte für das Materialmodell nach Mooney–Rivlin bietet sich der Auftrag der reduzierten Spannung $\frac{f}{\lambda - \lambda^{-2}}$ gegen den Reziprokwert der Streckung $\frac{1}{\lambda}$ an. Die Darstellung der Messwerte in dieser Art wird MOONEY–Plot genannt. Für das 2–parametrische Mooney–Rivlin–Modell ergibt sich eine Geradengleichung (Gleichung (13–3)). Der Materialkennwert C_{10} bildet den Schnittpunkt mit der Ordinatenachse; der Materialkennwert C_{01} ist der Anstieg der Geraden.

$$\frac{1}{2} \frac{f}{\lambda - \lambda^{-2}} = \left(C_{10} + \frac{1}{\lambda} C_{01} \right) \quad (13-3)$$

mit: $C_{10}; C_{01}$ Materialkennwerte

Eingabeparameter für das Modell nach YEOH

Die Materialkennwerte lassen sich durch Auftrag der reduzierten Spannung gegen den Term $(I_1 - 3)$ durch Regression nach Gleichung (13–4) ermitteln.

$$\frac{1}{2} \frac{f}{\lambda - \lambda^{-2}} = \left(C_{10} + 2C_{20}(I_1 - 3) + 3C_{30}(I_1 - 3)^2 \right) \quad (13-4)$$

Eingabeparameter für das Modell nach OGDEN

Zur Ermittlung der Materialkennwerte für das Ogden–Modell wurde die gemessene technische Spannung f gegen den Verstreckgrad λ aufgetragen. Die Parameter werden nach der Gleichung (13–5) ermittelt:

$$f = \frac{1}{\lambda} \left[\sum_{n=1}^N \mu_n \left(\lambda^{\alpha_n} - \lambda^{-\frac{\alpha_n}{2}} \right) \right] \quad (13-5)$$

mit: $\mu_n; \alpha_n$ Materialparameter

Die Auswertung erfolgte unter Verwendung des Ogden–Modells mit $N = 2$.

Die Tabelle 13-2 enthält die ermittelten Materialparameter sowie die Fehlernorm für das Material C.

Tabelle 13-2: Materialkennwerte und Fehlernorm für das Material C für die Materialmodelle nach Mooney, Yeoh und Ogden. (analytisch aus dem Zugversuch am Schulterstab S 2)

	MOONEY	YEOH	OGDEN	
Materialkennwerte	$C_{10} = 0,04822$	$C_{10} = 0,1423$	$\mu_1 = 0,07052$	$\alpha_1 = 2,21211$
	$C_{01} = 0,13664$	$C_{20} = -0,00474$ $C_{30} = 0,00012$	$\mu_2 = 79,43$	$\alpha_2 = 0,00644$
Fehlernorm	0,00001	0,00017	0,00002	

Für das Material B wurde auf die analytische Bestimmung der Eingabeparameter verzichtet. Sie wurden direkt mit dem FEM–Programm bestimmt.

13.3.3 Numerisch bestimmte Materialkennwerte

Das Programm ANSYS beinhaltet eine Routine, mit der die Materialkennwerte aus den gemessenen Spannungs–Dehnungs–Kurven bestimmt werden. Die Ermittlung erfolgt programmintern– wie bei der analytischen Bestimmung– durch Regressionsanalyse. Dabei wird die Formänderungsenergie, wie im „12.5 Einbindung des Materialgesetzes in das FEM–Modell“ beschrieben, in einen deviatorischen und einen hydrostatischen Anteil aufgeteilt. Bei der Berechnung der Materialparameter wird vollständige Inkompressibilität vorausgesetzt, die dritte Invariante I_3 nimmt den Wert „Eins“ an. Der dritte Term in Gleichung (12–12) wird zu Null und die reduzierten Invarianten J_1 und J_2 in Gleichung (12–13) werden zu den Invarianten des Deformationstensors I_1 und I_2 . Die Materialkennwerte werden demzufolge mit den Gleichungen (13–3) bis (13–5) bestimmt, wie bei der analytischen Kennwertermittlung.

Die Materialkennwerte und die Fehlernorm für das **Material C** sind in Tabelle 13-3 angegeben. Die Unterschiede zwischen den analytisch und numerisch bestimmten Materialkennwerten sind minimal. Während der weiteren Berechnungen werden die numerisch bestimmten Materialkennwerte benutzt.

Für das **Material B** lagen für einen einaxialen Zugversuch Messwerte für eine zyklische Belastung in fünf Zyklen bis zu einer technischen Enddehnung von ca. 75 Prozent vor. Zur Bestimmung der Materialparameter wurden die Spannungs–Dehnungs–Kurven sowohl für den ersten Belastungszyklus als auch für den vierten Belastungszyklus ausgewertet. Die Werte sind in Tabelle 13–4 und Tabelle 13–5 zusammengefasst.

Tabelle 13-3: Materialkennwerte und Fehlernorm für das Material C für die Materialmodelle nach Mooney, Yeoh und Ogden (numerisch aus dem Zugversuch am Schulterstab S 2)

	MOONEY	YEOH	OGDEN	
Materialkennwerte	$C_{10} = 0,045984$ $C_{01} = 0,14317$	$C_{10} = 0,13022$ $C_{20} = -0,0032412$ $C_{30} = 6,7879e-5$	$\mu_1 = 0,070926$ $\mu_2 = 510,3786$	$\alpha_1 = 2,20956$ $\alpha_2 = 0,001$
Fehlernorm	0,0003236	0,00352	0,0002338	

Tabelle 13-4: Materialkennwerte und Fehlernorm für das Material B für die Materialmodelle nach Mooney, Yeoh und Ogden für den ersten Belastungszyklus (numerisch aus dem Zugversuch am Schulterstab S 2)

	MOONEY	YEOH	OGDEN
Materialkennwerte	$C_{10} = 0,09756$ $C_{01} = 0,188729$	$C_{10} = 0,253893$ $C_{20} = -0,022613$ $C_{30} = 0$	$\mu_1 = 1,6528892$ $\alpha_1 = 0,657861$
Fehlernorm	0,001744	0,00352	0,00141

Tabelle 13-5: Materialkennwerte und Fehlernorm für das Material B für die Materialmodelle nach Yeoh und Ogden für den vierten Belastungszyklus (numerisch aus dem Zugversuch am Schulterstab S 2)

	YEOH	OGDEN	
Materialkennwerte	$C_{10} = 0,13412$ $C_{20} = -0,0048148$ $C_{30} = 0,012083$	$\mu_1 = 1,501229e-6$ $\mu_2 = 0,2000857$	$\alpha_1 = 20,663824$ $\alpha_2 = 2,5448656$
Fehlernorm	0,000459	0,0003668	

13.4 Analytische und numerische Ermittlung der Spannungs– Dehnungs–Kurve für den einaxialen Zugversuch

Der Zugversuch wurde analytisch und numerisch mit den numerisch bestimmten Materialkennwerten aus Tabelle 13-3 für **Material C** berechnet. Die so ermittelten Kurven sind den Versuchsdaten gegenübergestellt.

Zur analytischen Berechnung wurden die Gleichungen (13–3) bis (13–5) verwendet.

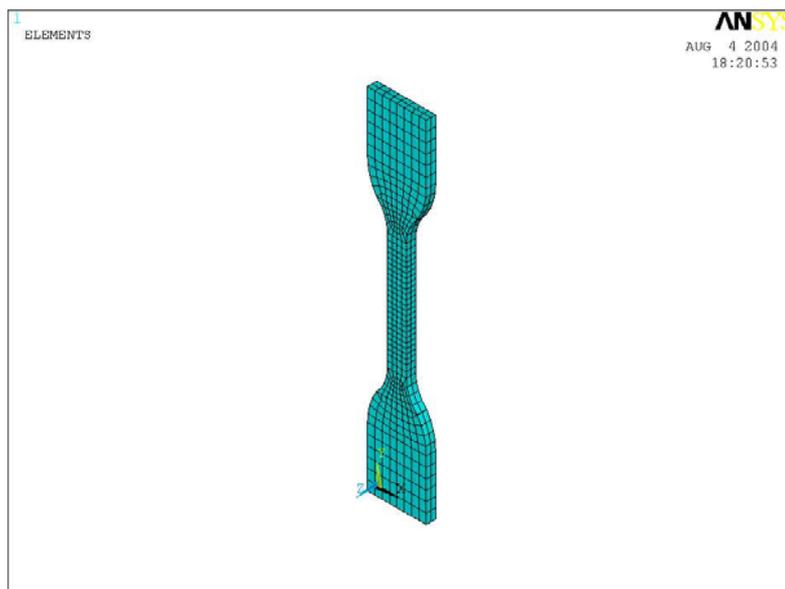


Abbildung 13-3: S2 –Stab mit Elementierung unter Verwendung von Hyper 86– bzw. Solid 185–Elementen

Zur Darstellung der aus der Simulation gewonnenen Ergebnisse wurde die technische Spannung aus den Reaktionskräften und der Ausgangsfläche, die Dehnung aus der Relativverschiebung zwischen zwei im ungedehnten Zustand vom Mittelpunkt je 10 mm entfernten Knotenpunkten ermittelt (siehe Abbildung 13-2 auf Seite 89).

Unter Verwendung des gleichen Materialgesetzes sind die als Symboldiagramm in Abbildung 13-4 dargestellten Ergebnisse aus der analytischen Berechnung deckungsgleich mit den als Liniendiagramm dargestellten Ergebnissen aus der Simulation. Sowohl das Materialgesetz nach Mooney als auch das Materialgesetz nach Ogden zeigen eine gute Vorhersage der Versuchsergebnisse. Die Simulationsergebnisse unter Verwendung des Ansatzes von Yeoh weichen geringfügig von den Messwerten ab, wobei im Bereich mittlerer Dehnungen ($1 < \varepsilon < 2,5$) die Spannungsantwort größer vorhergesagt wird; im Bereich geringer und großer Dehnungen fällt die vorhergesagte Spannungsantwort geringer aus als das beobachtete Materialverhalten.

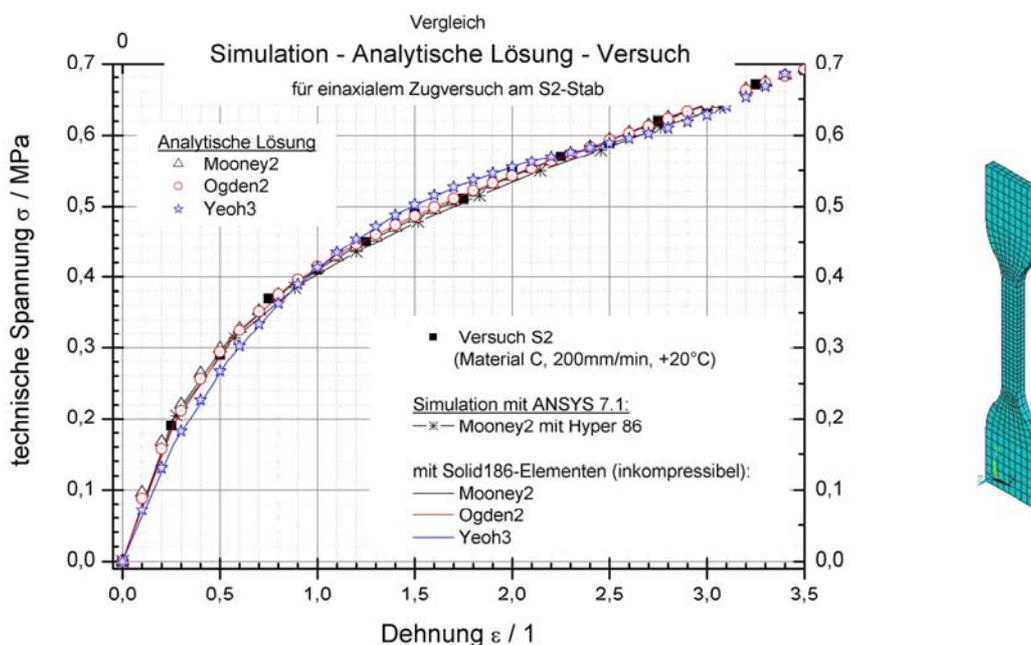


Abbildung 13-4: Vergleich von Messergebnis (ermittelt am Schulterstab S 2, 200mm/min, +20°C), Simulationsergebnis (FEM–Programm ANSYS) und analytischer Lösung für das Material C [Die Zahl hinter dem Namen des Materialgesetzes gibt die verwendete Ordnung an.]

Für das **Material B** wurde auf die analytische Berechnung verzichtet. Abbildung 13–5 zeigt die numerisch ermittelten Spannungs–Dehnungs–Kurven sowie die Messkurven für die erste und vierte Belastung der in Abbildung 11–2 dargestellten Beanspruchung in fünf Zyklen. Die Beanspruchung im vierten Belastungsfall konnte nicht mit dem Ansatz nach Mooney–Rivlin simuliert werden.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen stimmten sehr gut mit den Messergebnissen überein.

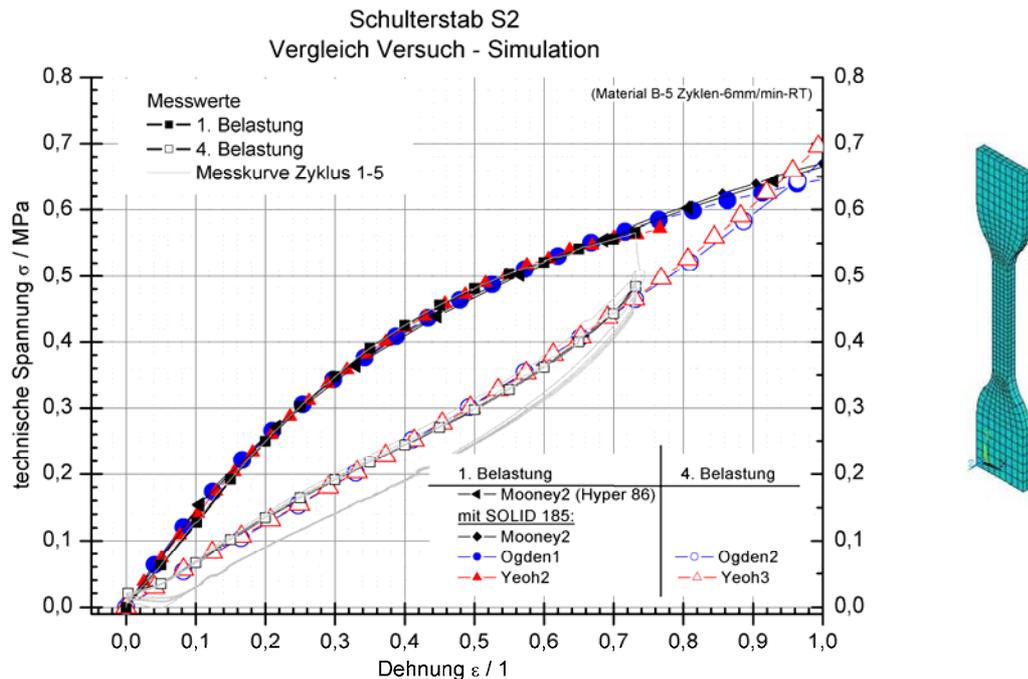


Abbildung 13-5: Vergleich von Messergebnissen (ermittelt am Schulterstab S 2, 6mm/min, +20°C) und Simulationsergebnis (FEM-Programm ANSYS) für das Material B

13.5 Simulation des Zugversuchs an der Parallelfuge

Die Simulation des Zugversuchs an der Parallelfuge wurde in zwei Schritten durchgeführt. In der ersten Stufe wurden etwaige Einflüsse, die sich z.B. aus der Geometrie der Probe ergeben, ignoriert. In die Simulationsrechnungen wurden die gleichen Materialparameter wie bei der Berechnung des Schulterstabs eingesetzt. Im zweiten Schritt wurde berücksichtigt, dass nicht von einer vollständigen Inkompressibilität ausgegangen werden kann. Ursache hierfür sind die geometrisch bedingte Behinderung der Querverformung sowie mögliche Einflüsse aus dem Material. Im Gegensatz zum Schulterstab mit seinen im Verhältnis geringen Abmessungen kann bei dem als Parallelfuge applizierten Material nicht von einer vollständigen Porenfreiheit ausgegangen werden.

Der hydrostatische Anteil in Gleichung (12–12) muss also berücksichtigt werden. Hierfür sind im FEM-Programm Materialkoeffizienten vorgegeben. Ihre Anzahl ist abhängig vom Grad des verwendeten Materialgesetzes. Wird z.B. das Materialgesetz nach Ogden mit $N = 2$ verwendet, sind zwei Parameter zur Berücksichtigung der Kompressibilität vorhanden. Unabhängig vom verwendeten Materialgesetz wird der erste Parameter d_1 aus dem Kompressionsmodul K berechnet. Dieser lässt sich aus der Querkontraktionszahl ν und dem E-Modul abschätzen.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (13-6)$$

Der Materialparameter d_1 ergibt sich dann aus Gleichung (13–7), wobei der E-Modul als Sekantenmodul aus dem Spannungs–Dehnungs–Verlauf des einaxialen Zugversuchs abgeschätzt wurde.

$$d_1 = \frac{2}{K} \quad (13-7)$$

Die Querkontraktionzahl ν wurde mit 0,4 eingesetzt. Die weiteren Parameter d_i ($i > 1$) werden abgeschätzt.

Vollständige Inkompressibilität vorausgesetzt, sagen die Simulationsrechnungen ein steiferes Materialverhalten voraus. Unter Berücksichtigung der Kompressibilität kann der Spannungs–Dehnungs–Verlauf zufriedenstellend vorausgesagt werden.

Für **Material C** bilden die Simulationsergebnisse die Messergebnisse sehr gut ab, wie die Abbildung 13-6 zeigt. Dargestellt sind die Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung der Kompressibilität. Die entsprechenden Materialkennwerte sind in der Grafik angegeben.

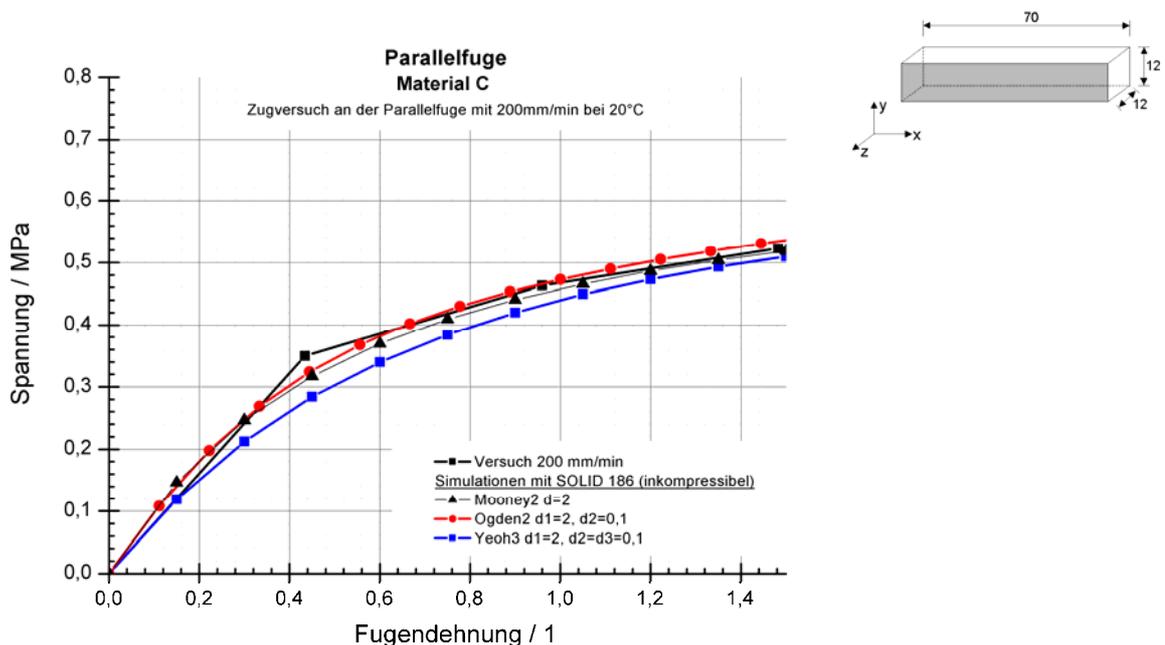


Abbildung 13-6: Vergleich Spannungs–Dehnungsverlauf aus der Messung mit den Ergebnissen der Simulationsrechnung für die Materialgesetze nach Mooney, Ogden und Yeoh für das Material C (200 mm/min, 20°C, Parallelfuge)

Für **Material B** zeigt die Abbildung 13–7 den vorausgesagten und den gemessenen Spannungs–Dehnungs–Verlauf für den ersten Belastungszyklus in der linken Grafik und für den vierten Belastungszyklus in der rechten Grafik. Die

Messkurven des vierten Belastungszyklus sind in den Nullpunkt verschoben. Für die verwendeten Materialgesetze stimmen die Spannungs–Dehnungs–Verläufe recht gut überein. Die Simulation der Erstbelastung mit dem Materialgesetz nach Mooney unter Verwendung der Elemente HYPER 86 führt zu einem steiferen Spannungsverlauf.

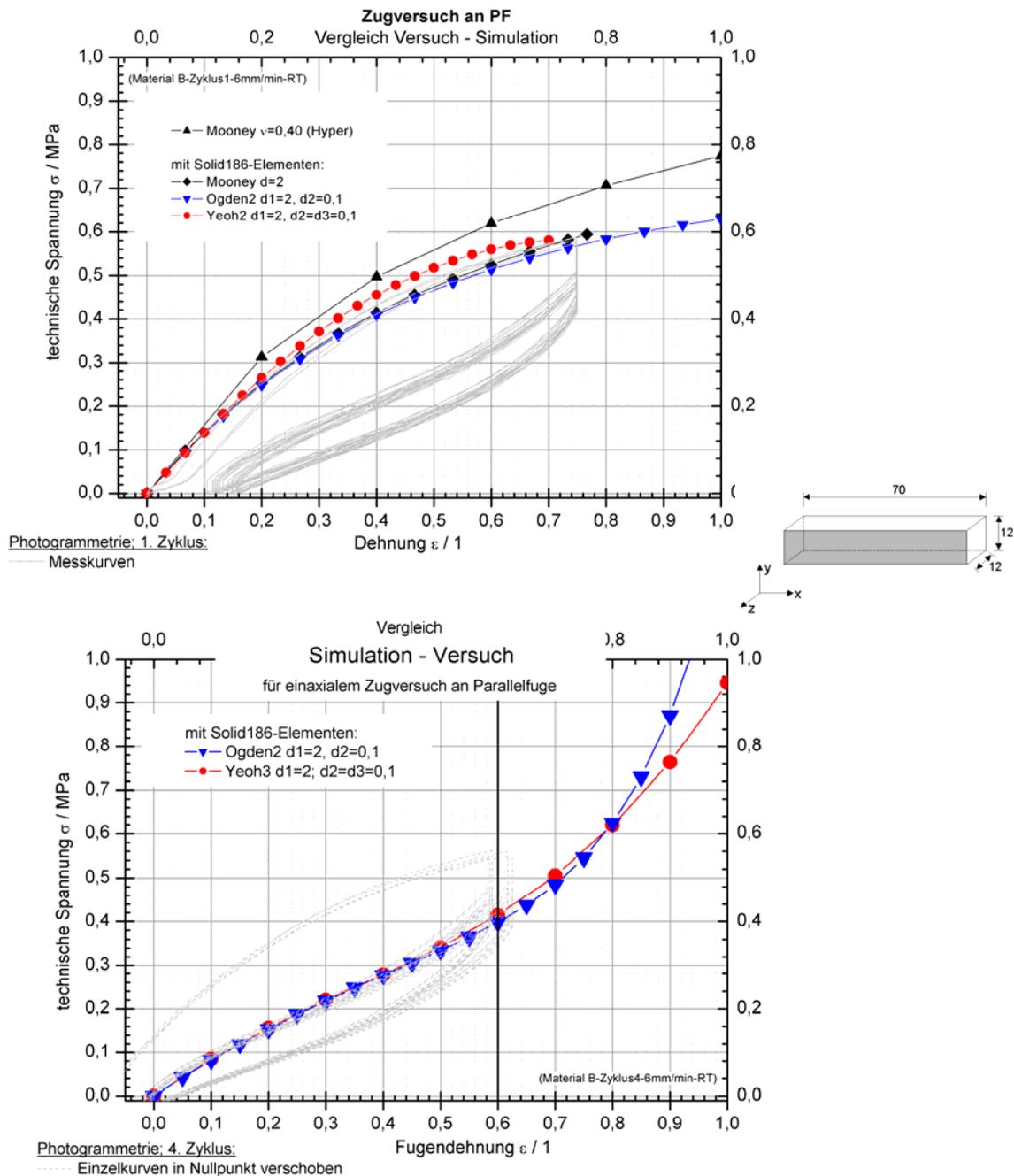


Abbildung 13-7: Vergleich Simulationsergebnisse und Messergebnisse für das Material B (6 mm/min, 20°C, Parallelfuge): oben: erster Zyklus, unten: vierter Zyklus

13.6 Simulation des Zugversuchs an der Kreuzfuge

Die Zugversuche an der Kreuzfuge wurden mit denselben Materialkennwerten, die für die Simulation der Parallelfuge verwendet wurden, durchgeführt.

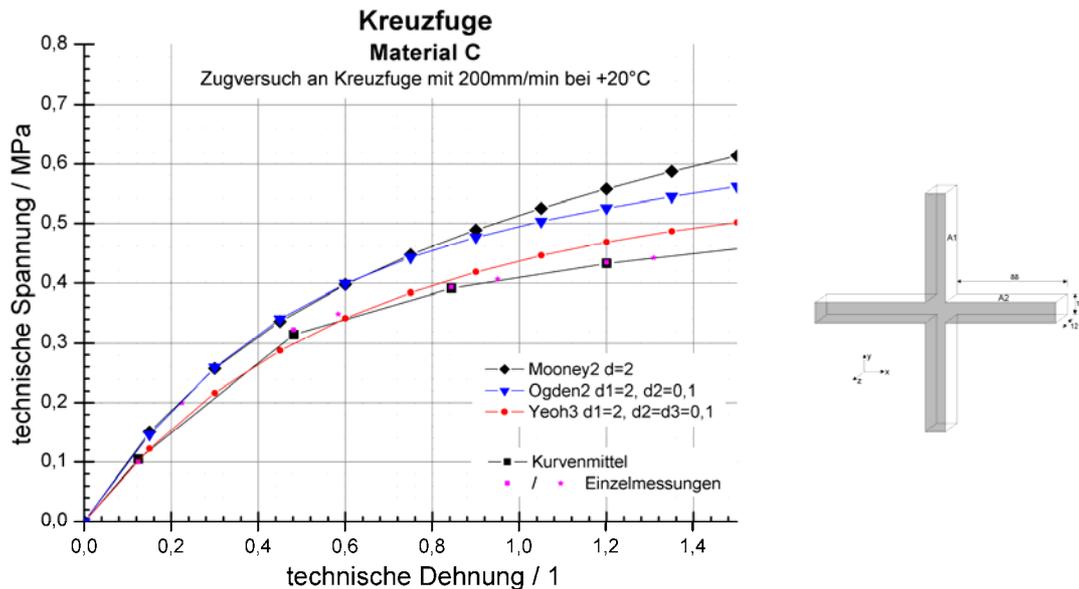


Abbildung 13-8: Vergleich Messergebnis und Simulationsergebnis für das Material C (200 mm/min, 20°C, Kreuzfuge)

Die Abbildung 13-8 zeigt die Simulations- und Messergebnisse für das **Material C**. Die Simulationsergebnisse fallen steifer als die Messergebnisse. Die Differenz kann mit den unterschiedlichen Materialchargen begründet werden. Die Simulationsergebnisse mit dem Ansatz nach Yeoh zeigen die geringste Abweichung von den Messergebnissen. Die Simulationsergebnisse mit den Ansätzen nach Ogden und Mooney weichen mit zunehmender Fugendehnung stärker von den Messergebnissen ab. Die Abweichung der Simulationsergebnisse von den Messergebnissen beträgt bis zu einer technischen Dehnung von 80% ca. 20%. Auf die Möglichkeit, die Simulationsergebnisse durch Variation der d-Parameter an die Messergebnisse anzupassen, wurde verzichtet, da mit den verwendeten Parametersätzen die an der Parallelfuge erzielten Messergebnisse zufriedenstellend abgebildet werden.

Die Simulationsergebnisse für das **Material B** sind in Abbildung 13–9 dargestellt. Für den ersten Belastungszyklus ist die Simulation mit dem Ansatz nach Yeoh nur bis zu einer technischen Dehnung von 45% möglich, so dass dieses Simulationsergebnis in die weitere Auswertung nicht einbezogen wird. Der Ansatz nach Mooney–Rivlin unter Verwendung der Elemente HYPER 86 liefert ein zu steifes

Materialverhalten. Mit den Ansätzen nach Mooney-Rivlin und Ogden unter Verwendung der SOLID 186-Elemente wird das Materialverhalten zufriedenstellend vorausgesagt. Der vierte Belastungszyklus kann mit den Ansätzen nach Ogden und Yeoh zufriedenstellend abgebildet werden.

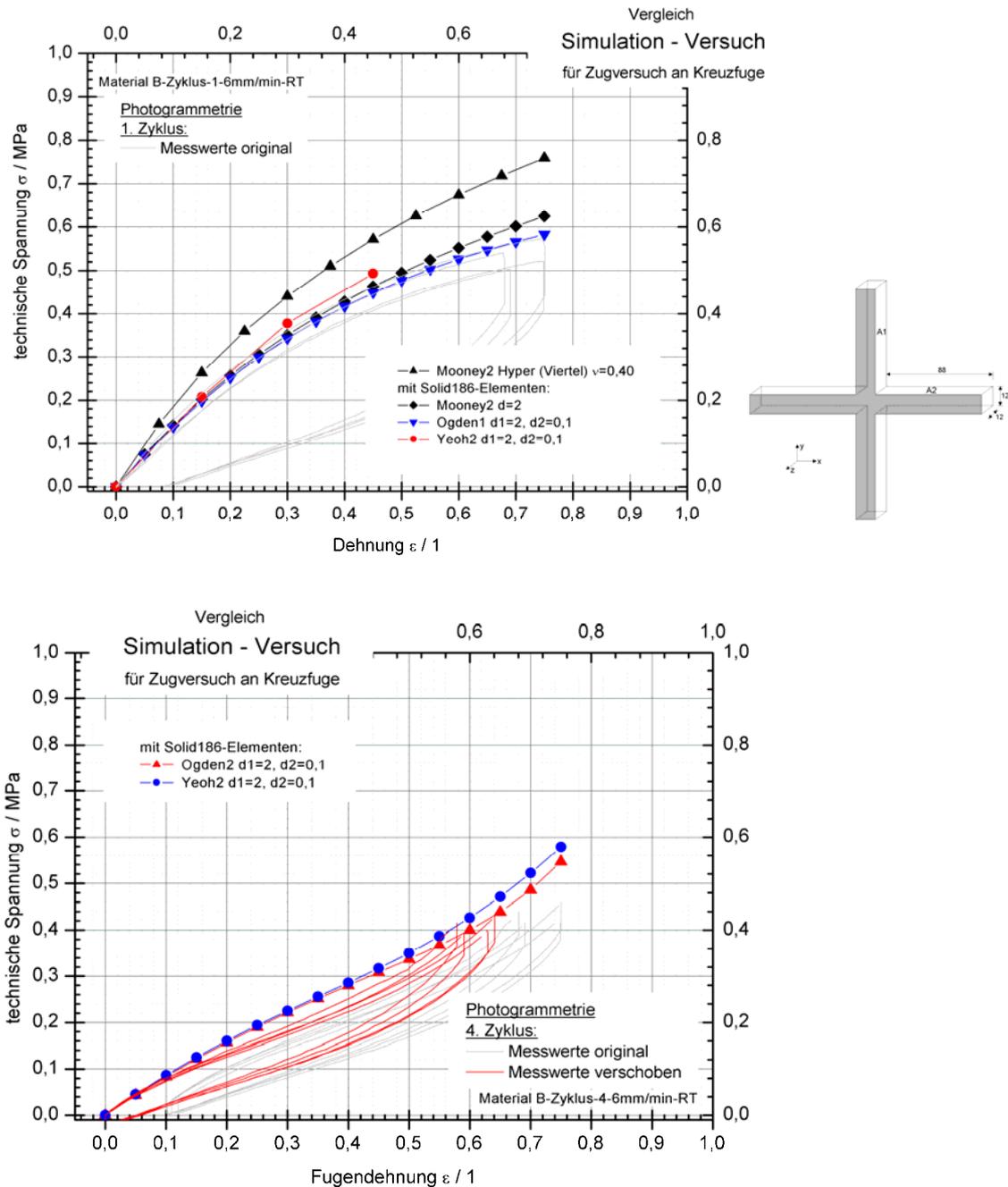


Abbildung 13-9: Vergleich Simulationsergebnisse und Messergebnisse für das Material B (6 mm/min, 20°C, Kreuzfuge), oben: erster Belastungszyklus; unten: vierter Belastungszyklus (Die Messergebnisse sind in den Nullpunkt verschoben.)

14 Die 3D–photogrammetrischen Untersuchungen

14.1 Ziel der Untersuchungen

Durch die 3D–photogrammetrischen Aufnahmen sollen Erkenntnisse zur Qualität der Prüfvorrichtung sowie zu den lokalen makroskopischen Verformungen des Fugendichtstoffs in der x-y-Ebene und in der z-Richtung, der Normalenrichtung zur x-y-Ebene, gewonnen werden. Die Aufnahme und Auswertung der 3D–photogrammetrischen Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden.

14.2 Der Versuchsaufbau

Für die 3D–photogrammetrischen Aufnahmen wurde ein Kamerasystem, bestehend aus zwei Kameras Megaplus 4.2i der Firma Kodak, verwendet. Durch den Einsatz einer zweiten Kamera ist es möglich, die Verformungen dreidimensional zu erfassen. Die Abbildung 14-1 zeigt den Versuchsaufbau.

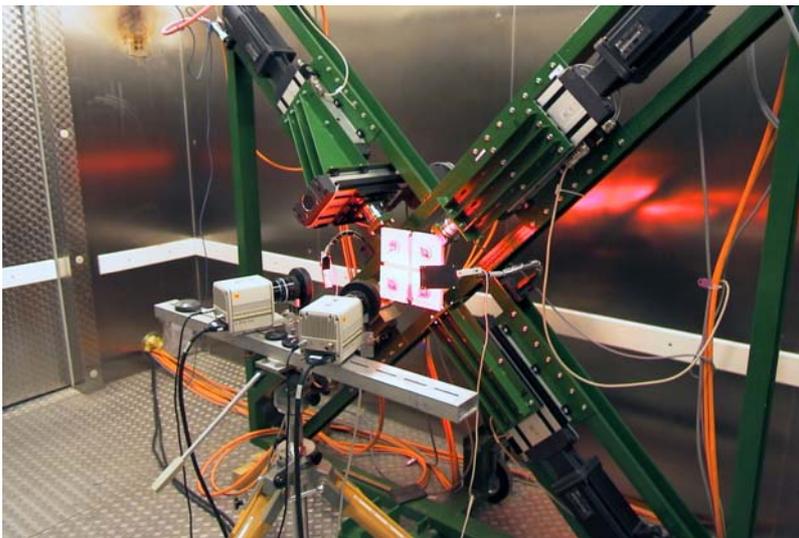


Abbildung 14-1: Während der photogrammetrischen Aufnahmen: im Vordergrund die beiden Kameras; im Hintergrund die Prüfvorrichtung mit einem als Kreuzfuge applizierten Probekörper.

Die Aufnahmen fanden im Klimaraum bei Normtemperatur $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ während der zyklischen Dehnversuche an den Materialien A, B, C und D statt. Für jedes Material wurden die Versuche von je drei als Parallel– bzw. Kreuzfuge applizierten Probekörpern gefilmt. Aufgenommen wurde beginnend mit dem ersten Zyklus jeder 10. Zyklus. Durch diese Vorgehensweise ist es möglich, die sukzessive Betrachtung der Verformungsvorgänge mit einem vertretbaren Maß an Datenmaterial aufzunehmen. Auf die Oberfläche des Fugendichtstoffs wurde unmittelbar vor dem Ver-

sich ein pulverförmiges Spray aufgebracht. Die dadurch entstehende feine Textur erleichtert die Punktzuordnungen während der Auswertung. Alle 2 Sekunden wurde ein Bild aufgenommen.

14.3 Die Auswertung der 3D–photogrammetrischen Aufnahmen

14.3.1 Der Bearbeitungsstand

Aufgrund der großen Deformationen ist die Auswertung der Aufnahmen zeit- und rechenintensiv. Die Ursachen liegen in den sich ergebenden Zuordnungsproblemen der auszuwertenden Punkte innerhalb eines Bildpaars (Bilder der Kamera 1 und 2) sowie zwischen den folgenden Bildern. Somit ist zum 30. September 2004 nur der erste Belastungszyklus eines Versuchs an der aus dem Material C gefertigten Parallelfuge ausgewertet.

14.3.2 Die Vorgehensweise bei der Auswertung

Für die Auswertung der photogrammetrischen Aufnahmen wurde dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung ein Netz vorgeben, um die aus den photogrammetrischen Aufnahmen gewonnenen Daten mit den Ergebnissen aus der Finite Elemente Simulation vergleichen zu können.

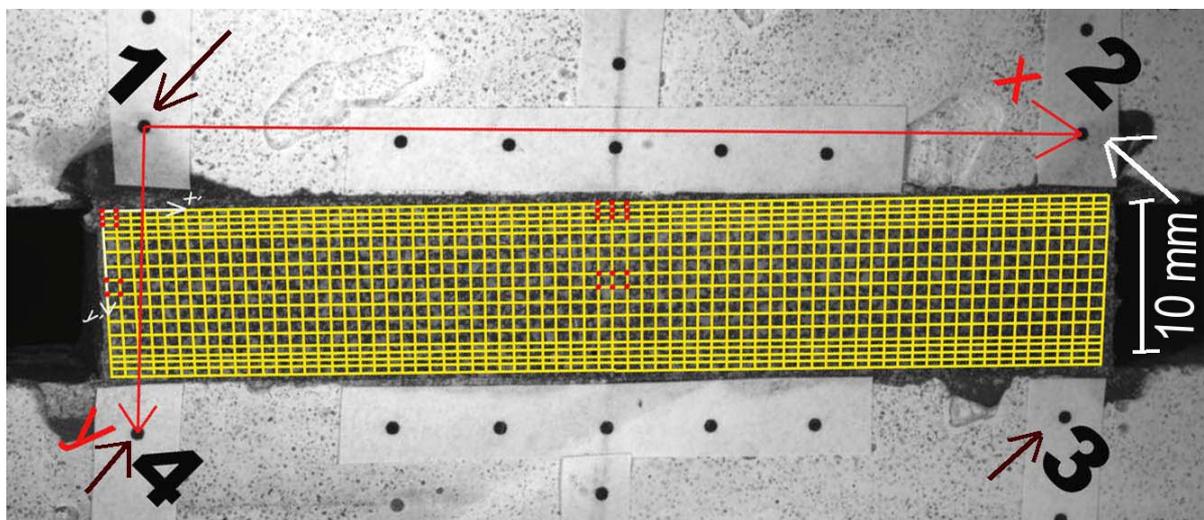


Abbildung 14-2: Ausschnitt einer photogrammetrischen Aufnahme von einem als Parallelfuge gefertigten Probekörper mit auf den Mörtelplatten fixierten Messmarken; gelb: Raster, das der TU Dresden für die Auswertung vorgeben wurde; rot: Bezugskoordinatensystem; weiß: Koordinatensystem für das Netz; die Nummern bezeichnen die vier ausgewerteten Messmarken (siehe Pfeile)

Die Abbildung 14-2 zeigt einen Ausschnitt aus einem als Parallelfuge gefertigten Probekörper. Sichtbar sind die auf den Mörtelplatten befindlichen Messmarken. Die

vier nummerierten Messmarken geben das Bezugskordinatensystem (rot dargestellt) vor. Die x–Achse verläuft parallel zur Fugenflanke, die y–Achse in der Ebene der Fugenoberfläche rechtwinklig zur x–Achse und die z–Achse orthonormal zur x–y–Ebene. Die Abbildung zeigt ebenfalls das für die photogrammetrische Auswertung verwendete Punktraster (gelb dargestellt).

Während der photogrammetrischen Auswertung wurden die vorgegebenen Netzkoordinaten den Abmessungen des Probekörpers angepasst. Das hatte eine Streckung und leichte Drehung des Netzes zur Folge. Als Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung stellte das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung die Netzkoordinaten vor Beginn der Verformung sowie die Verschiebungen während der Belastung, Haltezeit und Entlastung zur Verfügung.

14.4 Die Verschiebungen der Mörtelplatten

Abbildung 14-3 zeigt die Verschiebungen, die die vier nummerierten Messmarken während des ersten Belastungszyklus vollziehen. Die maximale Auslenkung in x–Richtung beträgt 0,6 mm.

Die Rotation der Mörtelplatten trägt eine geringe Biegebeanspruchung in den Fugendichtstoff ein.

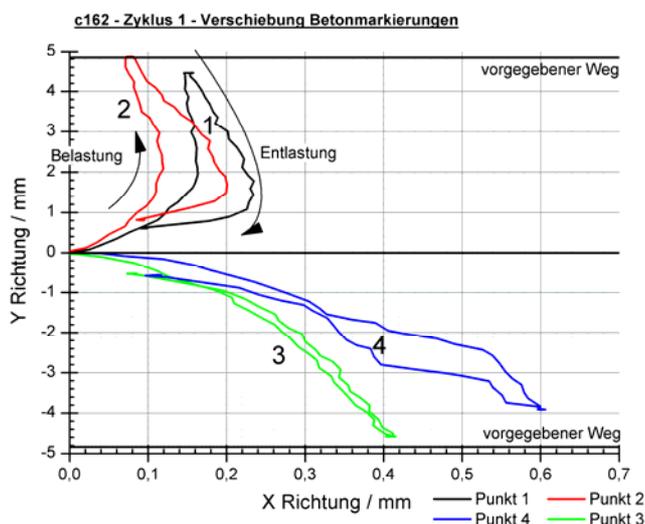


Abbildung 14-3: Verschiebung der nummerierten Messmarken (siehe Abbildung 14-2) während des ersten Belastungszyklus in der x–y–Ebene.

Der an den vier Messmarken gemessene Verschiebungsweg weicht von dem der Berechnung zu Grunde liegenden Verschiebungsweg ab. Die maximale Abweichung mit 0,94 mm zeigt die Messmarke 4. Die mittlere maximale Verschiebung der vier Messmarken beträgt in y–Richtung 4,47 mm. Mit diesem Wert beträgt die Fu-

gendehnung 70% und ist damit um 7% geringer als die Soll–Fugendehnung von 75%. Die größten Abweichungen zeigen die Messpunkte 3 und 4. Die Abweichungen werden bewusst in Kauf genommen. Sie liegen in dem Spiel zwischen den Bolzen der Prüfeinrichtung und den Mörtelplatten. Des Weiteren unterliegen die photogrammetrische Datenerfassung und Datenauswertung Fehlern.

Da bislang nur ein Messzyklus ausgewertet vorliegt, lassen sich keine allgemeinen Aussagen treffen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Abweichungen in y–Richtung zwischen angenommener Verschiebung und tatsächlicher Verschiebung in der beobachteten Größenordnung liegen werden, und dass in den Probekörper geringe Biegebeanspruchungen um die x–Achse eingetragen werden.

14.5 Der Vergleich der photogrammetrischen Daten mit den Ergebnissen aus den Simulationsrechnungen

14.5.1 Die Vorbereitung der Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen

Wie in Kapitel 14.3.2 erwähnt, konnten die mit dem FEM–Programm ermittelten Daten nicht direkt mit den Ergebnissen der photogrammetrischen Aufnahmen verglichen werden. Da der ausgewertete Probekörper eine Fugenlänge von 75 mm und eine Fugenbreite von 13 mm aufwies, wurde eine neue Simulationsrechnung unter Berücksichtigung dieser Fugengeometrie durchgeführt. Dabei wurde der Abstand der Knotenpunkte gleichmäßig vergrößert, so dass die Anzahl der Knotenpunkte erhalten blieb.

Die photogrammetrischen Daten liegen für das Material C für eine Belastungsgeschwindigkeit von 6 mm/min bei Raumtemperatur vor. Gerade für diese Beanspruchungskonstellation liegen keine am Schulterstab ermittelten Versuchsdaten vor. Dieses ist aber die Voraussetzung für die Durchführung der Simulationsrechnungen, da aus den Daten des Schulterstabs die Materialkennwerte ermittelt werden. Es liegen aber für einen parallelfankigen Probekörpern aus dem Material C Spannungs–Dehnungs–Kurven vor, die bei einer Temperatur von +20°C sowie Beanspruchungsgeschwindigkeiten von 200 mm/min und 6 mm/min ermittelt wurden (vergleiche Abbildung 11-1). Aus den Messwerten und der Spannungs–Dehnungs–Kurve des Schulterstabs (200 mm/min, +20°C), wurde der entsprechende Spannungs–Dehnungs–Verlauf für einen Versuch am Schulterstab (6 mm/min, +20°C) gerechnet. Aus dem berechneten Kurvenverlauf wurden die Materialkennwerte der Modelle MR, YE und OG bestimmt und damit die Simulationsrechnungen durchgeführt. Die Abbildung 14-4 zeigt den Spannungs–Dehnungs–Verlauf für den Probekörper Parallelfuge für die Belastungsgeschwindigkeiten von 6 mm/min und

200 mm/min. Ebenfalls dargestellt sind die Spannungs–Dehnungs–Kurven die an je vier Probekörpern aus zwei unterschiedlichen Chargen im Versuch ermittelt wurden. Das Diagramm zeigt, dass mit den Materialkennwerten, die aus der extrapolierten Messkurve ermittelt wurden, der dazugehörige Versuch abgebildet werden kann. Gleichzeitig wird die Schwankung der Materialeigenschaften deutlich. Die Spannungsantwort der photogrammetrisch erfassten Probekörper fällt bei gleicher Dehnung geringer aus als bei den Probekörpern, deren Messkurven den Simulationsrechnungen zu Grunde liegen.

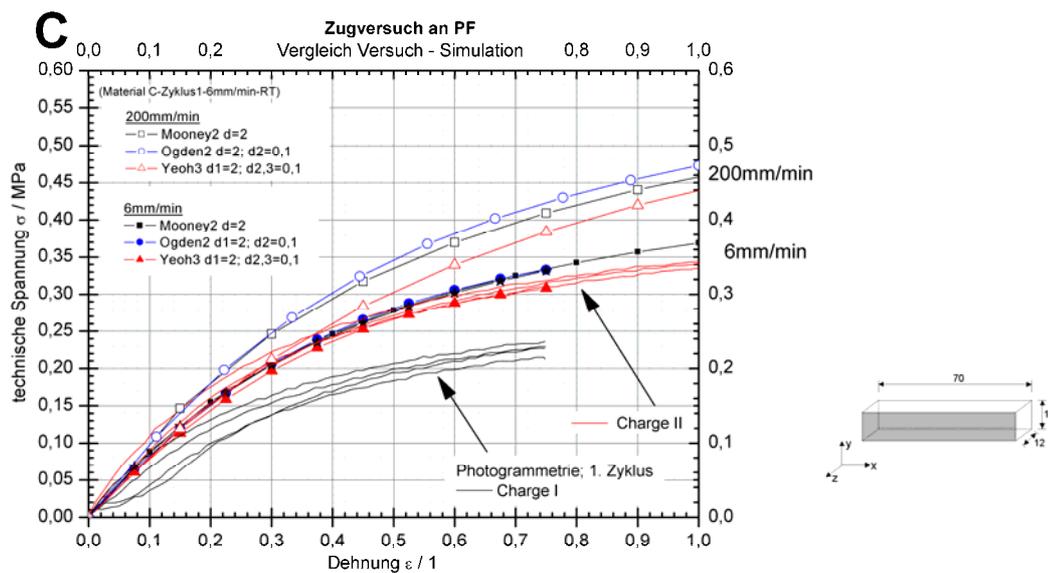


Abbildung 14-4: Spannungs–Dehnungs–Diagramm für Material C bei Raumtemperatur: Vergleich der Simulationsergebnisse für eine Belastungsgeschwindigkeit von 200 mm/min (unausgefüllte Symbol–Linien) und 6 mm/min (ausgefüllte Symbol–Linien) mit den Versuchsergebnissen ermittelt bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 6 mm/min an Probekörpern aus zwei verschiedenen Materialchargen

Aus den Simulationsrechnungen werden die Knotenkoordinaten für die Fugenoberfläche ($z = 0$) für den nicht gedehnten Zustand sowie die Knotenverschiebungen für eine Dehnung von 70 % ermittelt. Zum Vergleich mit den Ergebnissen der photogrammetrischen Aufnahmen müssen die Simulationsergebnisse auf das Koordinatensystem der Photogrammetrie transformiert werden.

Die Abbildung 14-5 zeigt das Punktraster, das für die Auswertung der photogrammetrischen Aufnahmen Verwendung fand, sowie das transformierte FEM–Knotenraster. Als Bezugspunkt für die Transformation des FEM–Netzes wurden der linke sowie der rechte obere Punkt des photogrammetrischen Rasters gewählt. Aus diesen wurde der Drehwinkel für die Transformation berechnet.

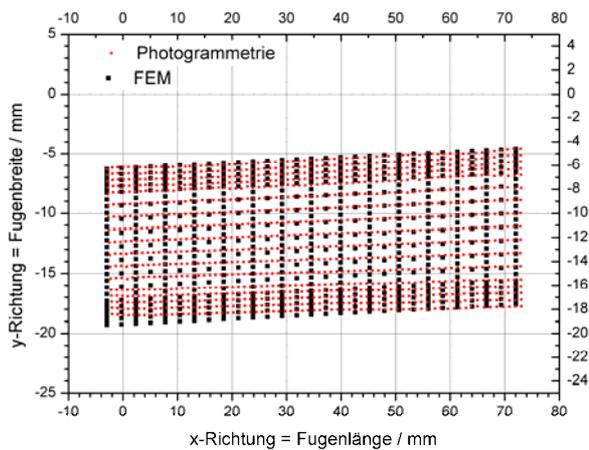


Abbildung 14-5: Gegenüberstellung der Punktraster: rot: photogrammetrische Auswertung; schwarz: FEM-Knotenraaster (transformiert)

14.5.2 Der Vergleich der Ergebnisse für die Verformungen in der x–y–Ebene

Die mit den Ansätzen nach Mooney–Rivlin, Ogden und Yeoh ermittelten Simulationsergebnisse wurden für die im Versuch erreichte Enddehnung von ca. 70% mit den photogrammetrischen Aufnahmen verglichen. Die Abbildung 14–6 zeigt die Punktraster für die einzelnen Simulationsrechnungen sowie die photogrammetrische Aufnahme.

Der Vergleich verdeutlicht, dass die Simulationsergebnisse mit den im photogrammetrischen Verfahren ermittelten Verformungen in der x–y–Ebene gut übereinstimmen. Exemplarisch zeigt die Markierung in der Abbildung 14–6a den Bereich mit der größten Abweichung. Wie Abbildung 14-5 zeigt, stimmen in diesem Bereich das Punktraster der realen Fuge mit dem der Simulation nicht überein; die Abmessungen der Fuge sind geringer. Eine weitere Ursache kann in der Lasteinbringung durch die Prüfvorrichtung liegen; dieser Einfluss wird aber als sehr gering eingeschätzt.

Zum besseren Vergleich zeigt die Grafik d in Abbildung 14–6 die Simulationsergebnisse im nicht transformierten Zustand. Die Simulationsergebnisse unterscheiden sich untereinander geringfügig in den mittleren Randbereichen ($0 < x < 20\text{mm}$ und $55\text{mm} < x < 75\text{mm}$ und $2,5\text{mm} < y < 10\text{mm}$) in Abhängigkeit davon, welches Materialgesetz den Simulationsrechnungen zu Grunde liegt.

Trotz der geringfügigen Abweichungen zwischen Photogrammetrie und Simulation ist die Übereinstimmung für alle Gesetze MR, OG und YE für eine Belastungsgeschwindigkeit von 6 mm/min sehr gut.

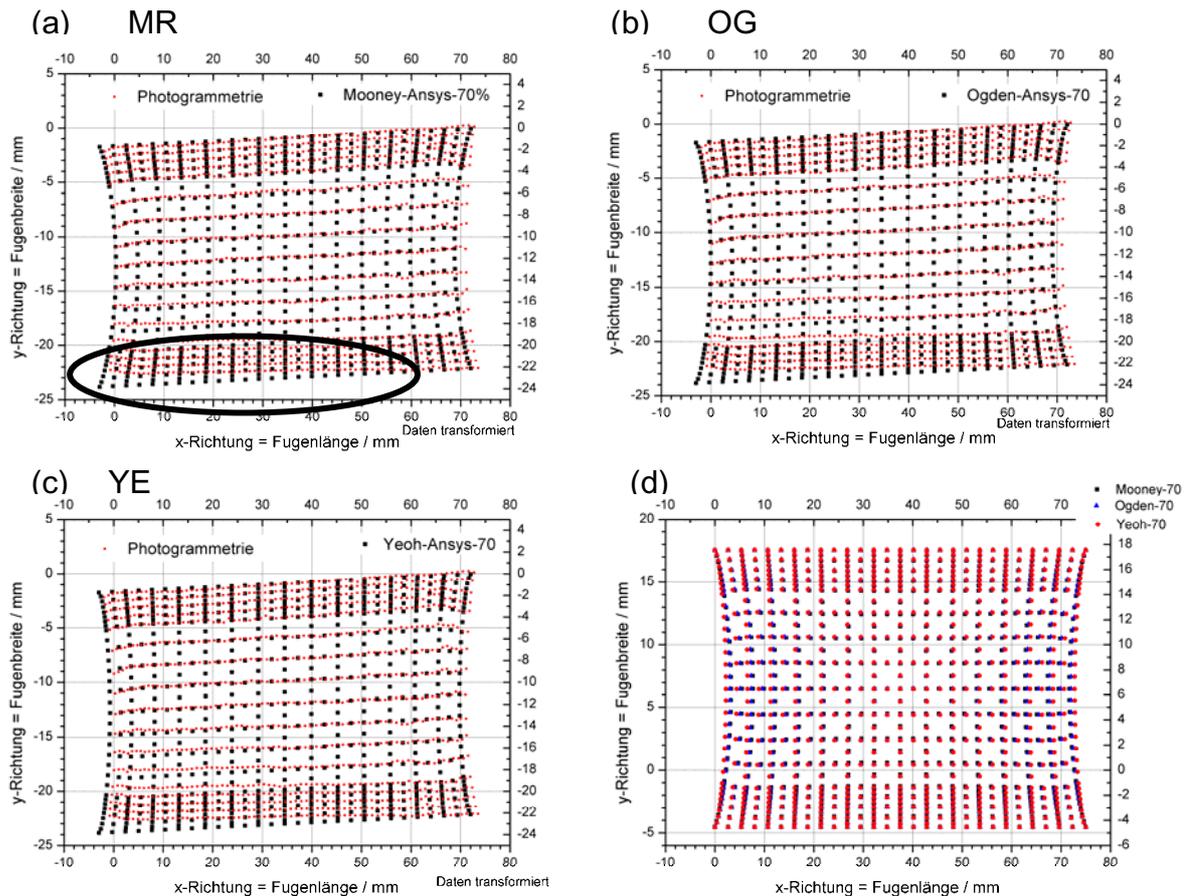


Abbildung 14-6: Vergleich der photogrammetrischen Aufnahmen mit den Simulationsergebnissen für eine Fugendehnung von 70% und eine Belastungsgeschwindigkeit von 6 mm/min: (a) Mooney–Rivlin, (b) Ogden, (c) Yeoh, (d) Vergleich miteinander (nicht transformiert)

Die Abbildung 14-7 zeigt exemplarisch die aus den photogrammetrischen Aufnahmen ermittelte Verformung im Vergleich zu einem Simulationsergebnis für eine Belastungsgeschwindigkeit von 200 mm/min. Hier ist ein deutlicher Unterschied zwischen Simulationsergebnis und Versuch sichtbar. Die höhere Belastungsgeschwindigkeit führt neben der im Spannungs–Dehnungs–Diagramm sichtbaren steiferen Materialantwort zu einer stärkeren Verformung des Materials in der x–y–Ebene. Die lokale Beanspruchung nimmt zu.

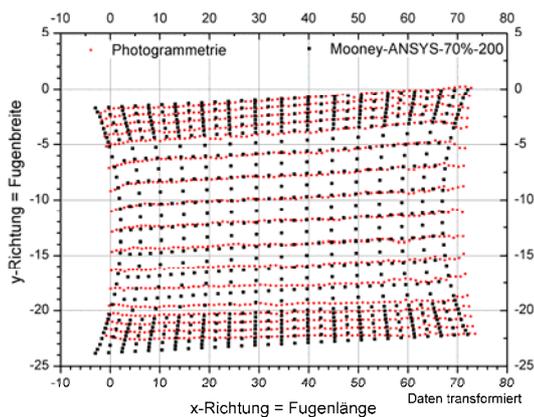


Abbildung 14-7: Vergleich der photogrammetrischen Daten mit einem Simulationsergebnis für eine Belastungsgeschwindigkeit von 200 mm/min: Simulationsrechnung mit dem Ansatz nach Mooney–Rivlin (Raumtemperatur)

14.5.3 Der Vergleich der Ergebnisse für die Verformungen in z–Richtung

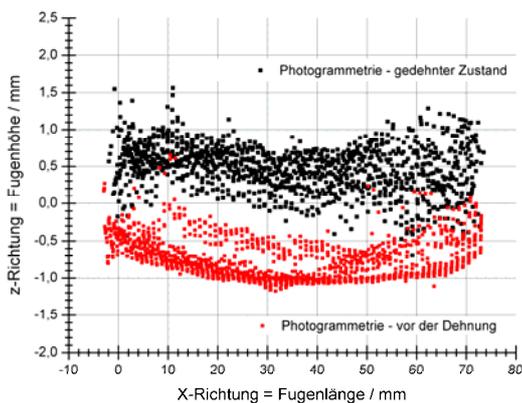


Abbildung 14-8: Photogrammetrisch ermittelte z–Koordinaten für die reale Fuge: rot: vor der Dehnung; schwarz: im gedehnten Zustand (nicht transformiert)

Die Schwierigkeiten bei der Punktzuordnung Probe–Photogramm in z–Richtung sind in Abbildung 14-8 erkennbar. Die Abbildung zeigt die mittels 3D–Photogrammetrie ermittelten Koordinaten der Fuge in z–Richtung. Die vor Beginn des Dehnvorgangs ermittelten Koordinaten bilden die untere Punktwolke im Diagramm. Die absoluten Werte liegen im Bereich von ca. –1 mm bis 0,5 mm. Der hier verwendete Fugendichtstoff hat eine gießfähige Verarbeitungskonsistenz, so dass das Material sich im Verarbeitungszustand weitestgehend selbst nivelliert. Im Bereich der Fugenflanken sowie im Endbereich der Fuge weist die Oberfläche größere z–Koordinaten ($z > -0,5\text{mm}$) auf als im mittleren Fugenbereich. Die obere Punktwolke im Diagramm zeigt die z–Koordinaten für den gedehnten Zustand. Durch die

Deformation öffnen sich Poren, die einerseits die Zuordnung der Punkte während der Auswertung erschweren. Andererseits führen die dadurch entstehenden „Mini-krater“ zu Erhöhungen und Vertiefungen, die durch Simulationsrechnungen nicht abgebildet werden können.

Die Abbildung 14-9 zeigt die mittels 3D–Photogrammetrie ermittelten Verschiebungen in z–Richtung im Vergleich zu den Simulationsergebnissen. In den Grafiken sind die Verschiebungen in z–Richtung für jeden Punkt in Abhängigkeit von seiner x–Koordinate dargestellt. Eine Darstellung der absoluten z–Koordinaten erscheint nicht sinnvoll, da die Oberfläche der photogrammetrisch vermessenen Probe Unebenheiten aufweist.

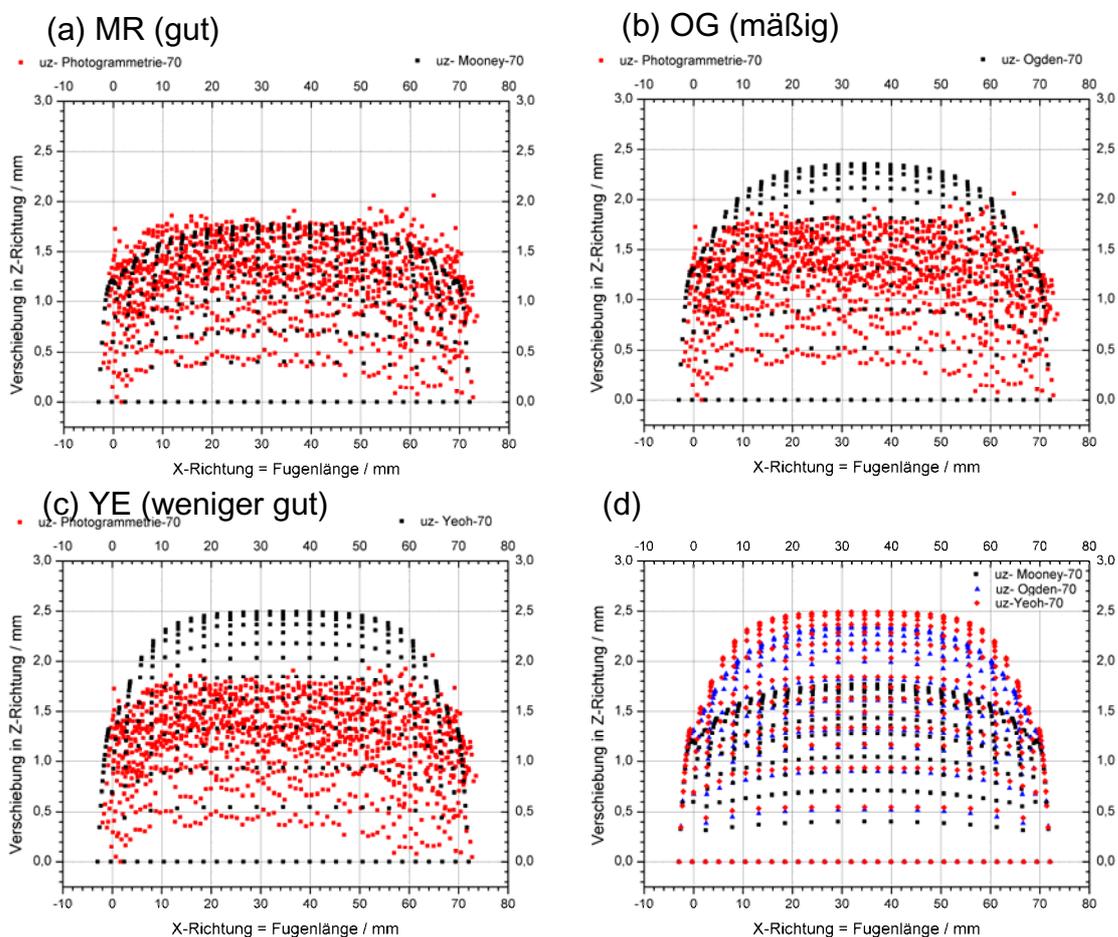


Abbildung 14-9: Vergleich der Ergebnisse der photogrammetrischen Aufnahmen mit den Ergebnissen aus den Simulationsrechnungen für eine Fugendehnung von ca. 70%; (a) Mooney–Rivlin; (b) Ogden; (c) Yeoh; (d) Vergleich der Simulationsergebnisse miteinander

Die größte Übereinstimmung mit den photogrammetrischen Ergebnissen zeigen die Simulationsergebnisse, die mit dem Ansatz nach Mooney–Rivlin erzielt wurden. Die damit ermittelten Verschiebungen in z–Richtung liegen in derselben Größenord-

nung wie die photogrammetrisch ermittelten Verschiebungen. Die in den Simulationsrechnungen mit den Ansätzen nach Ogden und Yeoh ermittelten Verschiebungen sind größer. Die größten Verschiebungen folgen aus den Simulationsrechnungen mit dem Ansatz nach Yeoh. Die mit dem Ansatz nach Yeoh ermittelten maximalen Verschiebungen betragen 2,5 mm und weichen damit um 30% von den photogrammetrisch ermittelten Verschiebungen ab. Für den Ansatz nach Ogden beträgt die Abweichung ca. 26%.

Die Ergebnisse der 3D–Photogrammetrie zeigen deutlich, dass während des Versuchs die Fugenflanken in z–Richtung verschoben wurden. Die Ursache hierin liegt in der Art der Fixierung der Probe auf der Prüfvorrichtung. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass es aufgrund der großen Deformationen des Fugendichtstoffs zu Zuordnungsproblemen während der photogrammetrischen Auswertung kam.

15 Auswertung der Simulationsergebnisse

15.1 Festigkeitshypothesen

Ziel der Arbeit war herauszufinden, bei welchen Dehnungen die Materialbeanspruchungen in einer Parallelfuge denen in einer Kreuzfuge entsprechen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass lokale Beanspruchungsmaxima vorhanden sind.

Liegen, wie im zu untersuchenden Fall, unterschiedliche Geometrien vor, so werden Vergleichsspannungen σ_v und / oder Vergleichsdehnungen ε_v ermittelt. Mit diesen Vergleichsgrößen lässt sich der mehraxiale Spannungszustand mit dem einaxialen vergleichen. Dabei wird ermittelt, wie weit die Beanspruchungen im mehraxial beanspruchten Bauteil von den kritischen Kenngrößen entfernt sind. Die kritischen Kenngrößen ergeben sich aus dem einaxialen Spannungszustand und werden z.B. im Zugversuch ermittelt. Je nach Werkstoffverhalten können verschiedene Festigkeitshypothesen herangezogen werden. Einige von ihnen werden im folgenden kurz erläutert. Ein Überblick ist in [Sähn93] enthalten.

Festigkeitshypothesen gestatten aus den inneren Beanspruchungen die Berechnung eines Vergleichswerts, der einen direkten Zusammenhang mit der Schädigung des Werkstoffs aufweist. Die Vergleichsspannungen und –dehnungen werden aus einen Vergleich bestimmter Spannungskomponenten, Dehnungskomponenten oder Energieanteile gebildet.

Die Festigkeitshypothese muss, wenn mit einem örtlichen Konzept gearbeitet wird, auf ein Einheitsvolumen oder eine Einheitsfläche normiert sein.

Eine einfache und häufig verwendete Festigkeitshypothese ist die der größten Hauptnormaldehnung nach Gleichung (15–1)

$$\varepsilon_v = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \quad (15-1)$$

Eine weitere Festigkeitshypothese ist die der größten Hauptnormalspannung nach Gleichung (15–2). In diesem Ansatz wird meistens die Cauchy–Spannung verwendet.

$$\sigma_v = \max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \quad (15-2)$$

mit: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

Für kleine Verformungen wird von Böhm [Böhm00] eine Kombination der drei Lagrangeschen Dehnungen nach Gleichung (15–3) verwendet.

$$\zeta_v = \max(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3) \quad (15-3)$$

In der Bruchmechanik wird für Elastomere die Formänderungsenergiedichte nach Gleichung (15–4) eingesetzt.

$$W = \int \sigma_{ij} \partial \varepsilon_{ij} \quad (15-4)$$

Von Flamm et. al [Flam03] wird als neue Festigkeitshypothese die Formänderungsenergiedichte in der Hauptbeanspruchungsrichtung, die aus den 2. Piola–Kirchhoffschen–Hauptnormalspannungen und den dazugehörigen Lagrange–schen Dehnungen berechnet wird, verwendet.

$$W_{HR} = \max\left(\int S_1 \partial \xi_{S1}, \int S_2 \partial \xi_{S2}, \int S_3 \partial \xi_{S3}\right) \quad (15-5)$$

In den Festigkeitshypothesen nach den Gleichungen (15–1), (15–2) und (15–5) muss nach Zug– und Druckbeanspruchung unterschieden werden, wenn unter beiden Beanspruchungen eine Schädigung erwartet wird.

In ihren Untersuchungen stellten Flamm et. al. [Flam03] fest, dass die Festigkeitshypothesen, die die größte Cauchy–Hauptspannung (Gleichung (15–2)) bzw. die Formänderungsenergiedichte in Hauptbeanspruchungsrichtung (Gleichung (15–5)) verwenden, nahezu „uneingeschränkt“ verwendet werden können. Ausgehend von den Ergebnissen, die Böhm [Böhm00] und Flamm [Flamm03] veröffentlichten, wird für die vergleichende Betrachtung die Hauptspannungshypothese herangezogen.

15.2 Ermittlung der lokalen Beanspruchungen

Durch Simulationsrechnungen mit der Finiten Elemente Methode lassen sich die inneren Beanspruchungen ermitteln. Vergleichend werden dann die maximalen Hauptspannungen an den lokalen Beanspruchungsmaxima betrachtet. Die Simulationsrechnungen zeigen, dass der Probekörper Kreuzfuge seine maximale Beanspruchung im Eckpunkt Fugendichtstoff / Kontaktkörper hat. Wie im Kapitel 8 gezeigt, wurde in diesem Bereich Versagen festgestellt.

Die Parallelfugen zeigen ihre maximale Beanspruchung in den Endbereichen der Fugen. Da die Fugen im Anwendungsfall keinen derart ausgebildeten Endbereich aufweisen, wird dieser Bereich nicht weiter betrachtet. Stattdessen werden die Hauptspannungen, die sich im Fugenmittelpunkt sowie an der Kontaktfläche Fugendichtstoff / Kontaktkörper im Randbereich einstellen, betrachtet. Die Abbildung 15-1 zeigt die betrachteten Punkte.

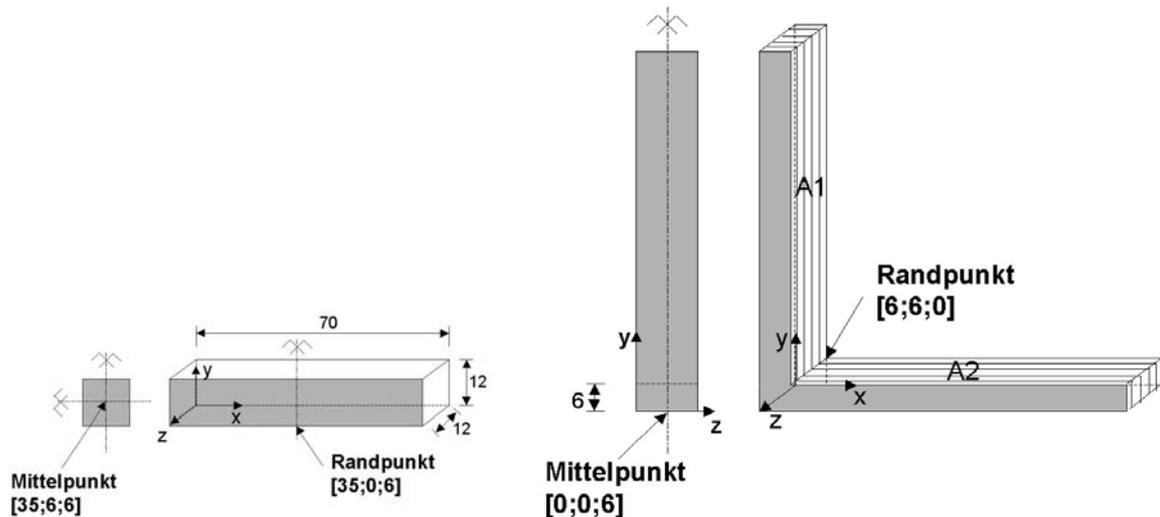


Abbildung 15-1: Schematische Darstellung der in den Simulationsrechnungen verwendeten Probekörper Parallelfuge (links) und Kreuzfuge (rechts), markiert sind die in den Vergleichsbetrachtungen zugrunde gelegten Punkte.

Exemplarisch werden die Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen für das Material B für den ersten und vierten Belastungszyklus bei einer Geschwindigkeit von 6 mm/min sowie für das Material C für den ersten Belastungszyklus bei den Geschwindigkeiten von 6 mm/min und 200 mm/min bei Raumtemperatur verglichen.

15.3 Vergleich der im Material B entstehenden Beanspruchungen

15.3.1 Material B: Beanspruchung im 1. Zyklus

Die Abbildung 15-2 zeigt die in den Simulationsrechnungen ermittelten Hauptspannungen S_1 . Das Formelzeichen S_1 wird im Folgenden für die Hauptspannung σ_1 verwendet. Bei der Parallelfuge ist deutlich der Anstieg der Hauptspannung S_1 im Fugenendbereich zu erkennen. Diese Spannungswerte blieben im Vergleich unberücksichtigt. Bei der Kreuzfuge ist die Spannungskonzentration im Bereich der Ecke sichtbar. Die Spannungsspitze ist eine Folge der Querschnittänderung. Das Gitter in der rechten Grafik der Abbildung 15-2 zeigt die Elementierung der Kreuzfuge. Die Isolinien stellen den Verlauf der Hauptspannung S_1 dar.

Die Beanspruchung des Fugendichtstoffs in der Fugenausbildung „Parallelfuge“ und „Kreuzfuge“ wurde für die in Abbildung 15-1 dargestellten Knotenpunkte ermittelt. Die Abbildung 15-3 zeigt den Spannungsverlauf an diesen Punkten für die Parallel- und Kreuzfuge in Abhängigkeit von der Fugendehnung. Die Spannungs-Dehnungs-Verläufe, die mit den Ansätzen nach Mooney-Rivlin und Ogden ermittelt wurden, stimmen fast überein.

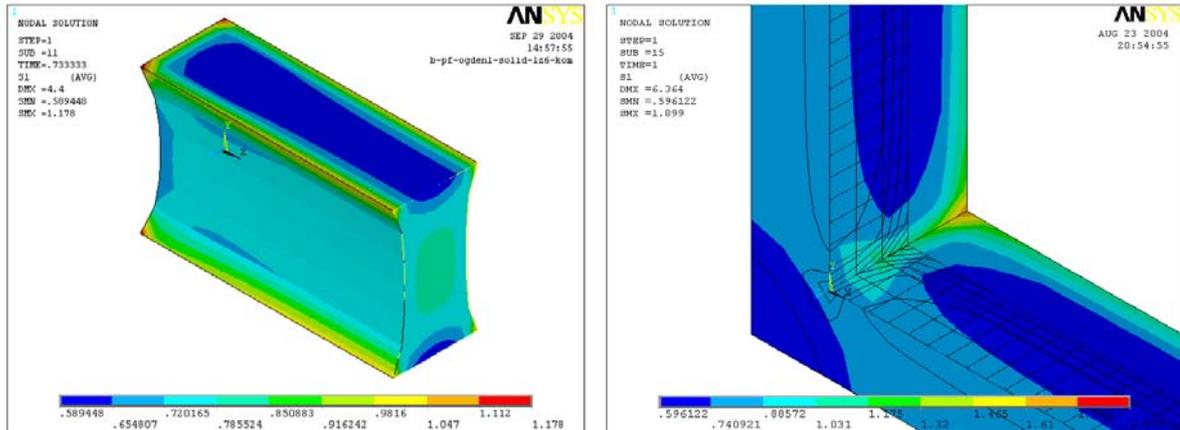


Abbildung 15-2: Verlauf der Hauptspannung S1: links: Parallelfuge geschnitten parallel zur y–z–Ebene bei x=35 mm für eine Fugendehnung von ca. 73%; rechts: Kreuzfuge geschnitten parallel zur x–y–Ebene bei z=6 mm für eine Fugendehnung von 75% (Material B, 1. Zyklus, 6 mm/min)

Erwartungsgemäß liegen die Hauptspannungen S1 im Eckbereich der Kreuzfuge über den Hauptspannungen S1 im Flankenbereich der Parallelfuge.

Die Pfeile im Diagramm zeigen exemplarisch, dass eine Fugendehnung der Kreuzfuge um 15% im Ecknoten dieselbe Hauptspannung S1 hervorruft, wie eine Fugendehnung der Parallelfuge um 30% im Randknoten. Mit zunehmender Fugendehnung wird dieses Verhältnis größer.

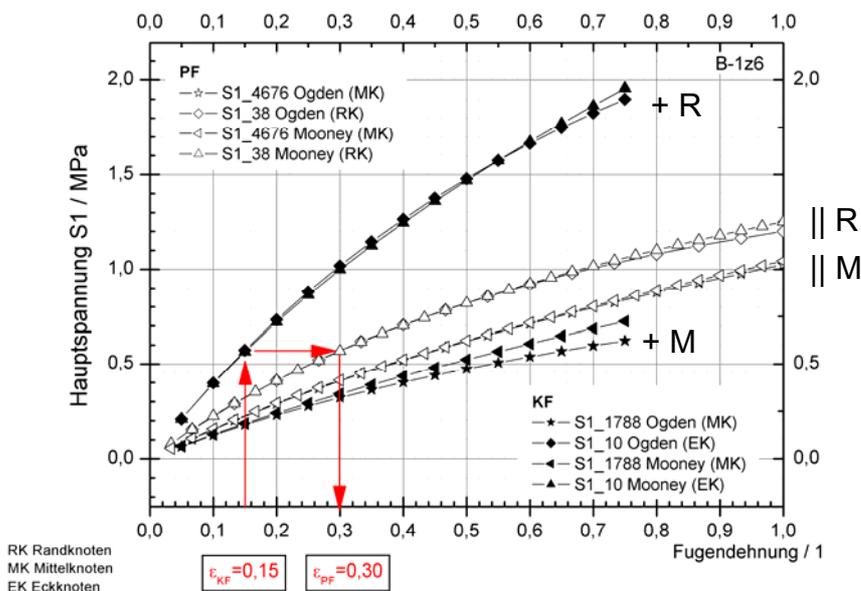


Abbildung 15-3: Hauptspannung S1 nach Mooney–Rivlin und Ogden in Abhängigkeit von der Fugendehnung für die Parallelfuge (PF; ||) und Kreuzfuge (KF, +) für ausgewählte Punkte (Material B, 1. Zyklus, 6 mm/min; M: Mitte; R: Rand)

15.3.2 Material B: Beanspruchung im 4. Zyklus

Auf die Darstellung weiterer Hauptspannungsverläufe anhand der FEM–Modelle wird verzichtet, da sich die Grafiken qualitativ nicht unterscheiden.

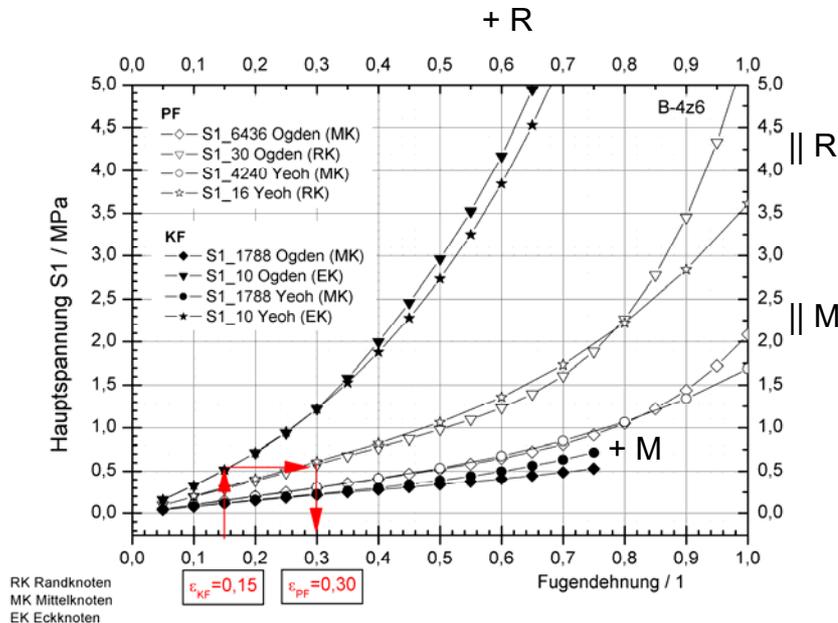


Abbildung 15-4: Hauptspannung S_1 nach Mooney–Rivlin und Ogden in Abhängigkeit von der Fugendehnung für die Parallelfuge (PF; ||) und Kreuzfuge (KF, +) für ausgewählte Punkte (Material B, 4. Zyklus, 6 mm/min; M: Mitte; R: Rand)

Die Abbildung 15-4 zeigt den Verlauf der Hauptspannung S_1 für die Mittelknoten, den Eckknoten der Kreuzfuge sowie den Randknoten der Parallelfuge. Die Spannungs–Dehnungs–Verläufe für die Knotenpunkte sind nahezu identisch. Im Vergleich zum ersten Belastungszyklus sind die absoluten Spannungswerte größer. Wird die Kreuzfuge um 15% gedehnt, so muss die Parallelfuge um 30% gedehnt werden, damit die Hauptspannung des Eckknotens (EK) identisch mit der des Randknotens (RK) ist. Bei größeren Fugendehnungen verringert sich das Verhältnis.

15.3.3 Vergleich der lokalen Beanspruchungen im ersten und vierten Belastungszyklus

Die Abbildung 15-5 zeigt für den ersten und vierten Belastungszyklus die technischen Spannungen sowie die am Eck– bzw. Randknoten mit dem Ansatz nach Ogden ermittelten Hauptspannungen S_1 .

Die roten Pfeile markieren die auf den parallelfankigen Probekörper gemäß Zulassungsgrundsatz und Zulassung aufzubringende Dehnung (siehe Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2). Eine technische Dehnung des Probekörpers Kreuzfuge um 25%

bis 27% führt bei diesem zu der gleichen lokalen Hauptspannung S1.

Die in der Simulation ermittelten absoluten Werte der lokalen Hauptspannungen S1 unterscheiden sich in den beiden untersuchten Belastungszyklen; das Verhältnis der technischen Dehnungen ist nahezu identisch.

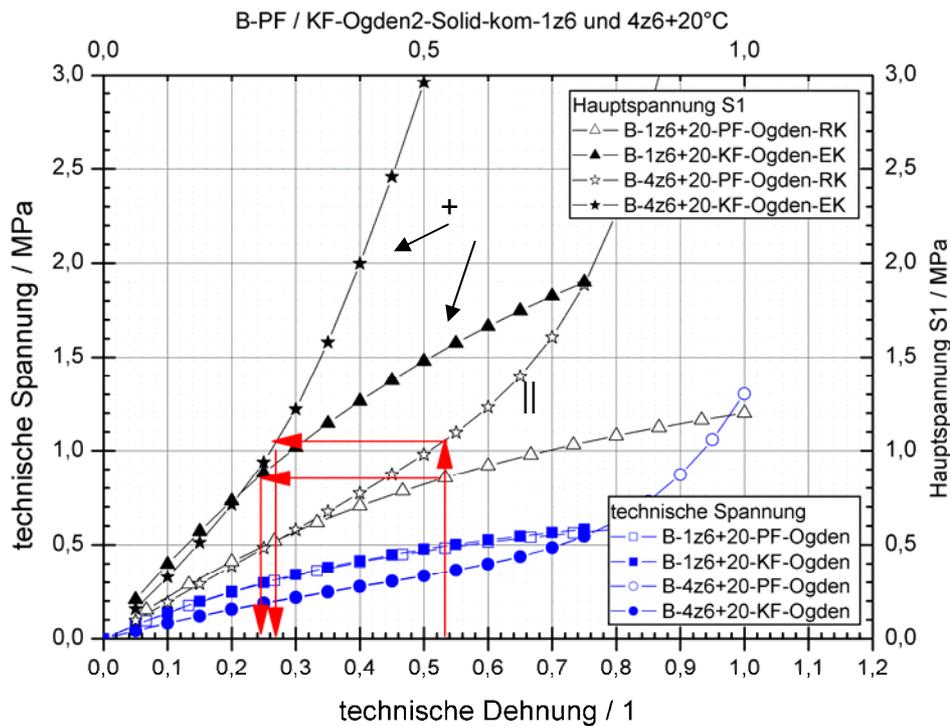


Abbildung 15-5: Vergleich der technischen Spannung sowie der Hauptspannung S1 nach Ogden für den Eckknoten bzw. Randknoten in Abhängigkeit von der technischen Dehnung: (Material B, 1. und 4. Zyklus, 6 mm/min; PF, ||: Parallelfuge; KF, +: Kreuzfuge; EK: Eckknoten; RK: Randknoten)

15.4 Vergleich der im Material C entstehenden Beanspruchungen

15.4.1 Material C: Beanspruchung bei 6 mm/min

Die Simulationsrechnungen basieren auf einer extrapolierten Spannungs–Dehnungs–Kurve (siehe Kapitel 14.5.1).

Die Abbildung 15-6 zeigt den in den Simulationsrechnungen mit den Ansätzen nach Mooney–Rivlin, Ogden und Yeoh ermittelten Verlauf der Hauptspannung S1 für den ausgewählten Randpunkt der Parallelfuge sowie den Eckpunkt der Kreuzfuge. Die an der Parallelfuge mit den Ansätzen nach Ogden und Yeoh ermittelten Spannungsverläufe stimmen fast überein. Mit dem Ansatz nach Mooney–Rivlin

wird eine geringere Hauptspannung S1 vorausgesagt. Für die Kreuzfuge stimmen die mit den Ansätzen nach Ogden und Yeoh ermittelten Spannungen bis zu einer Fugendehnung von ca. 160% überein. Bei größeren Dehnungen liefert der Ansatz nach Yeoh deutlich zu große Spannungswerte. Mit dem Ansatz nach Mooney–Rivlin ergeben sich geringere Spannungswerte.

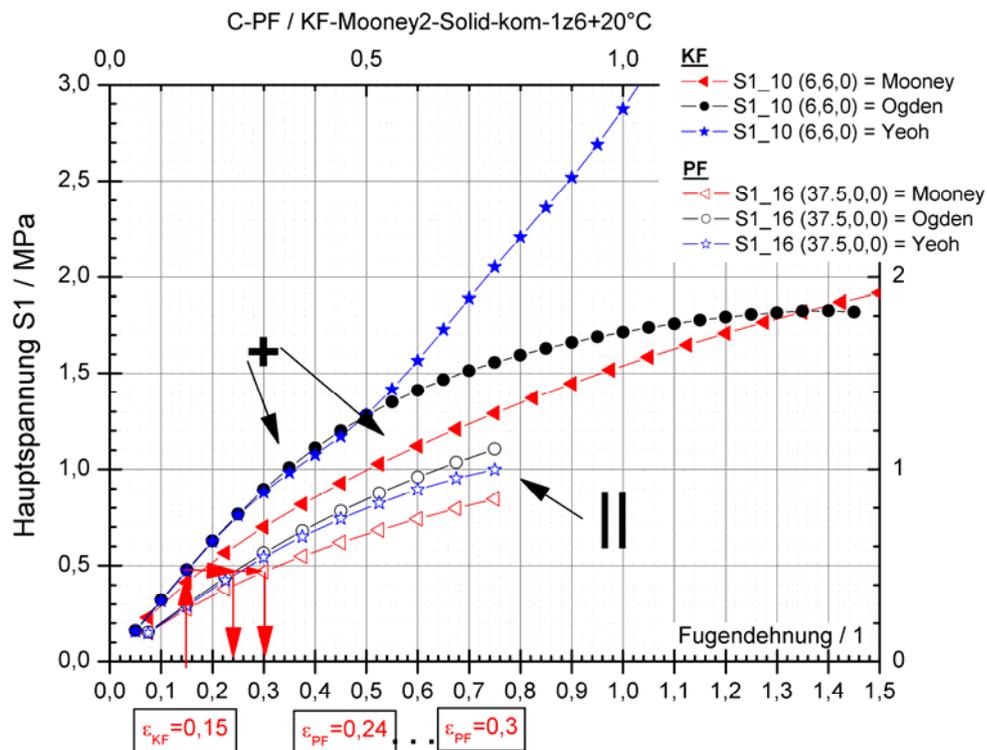


Abbildung 15-6: Hauptspannung S1 nach Mooney–Rivlin, Ogden und Yeoh in Abhängigkeit von der Fugendehnung für die Parallelfuge (PF, ||) und Kreuzfuge (KF, +) für ausgewählte Punkte (Rand- und Eckpunkt) (Material C, 1. Zyklus, 6 mm/min)

Die Grafik zeigt, dass für die gleiche Hauptspannung in den zu vergleichenden Knotenpunkten die Kreuzfuge um 15% und die Parallelfuge um 24% bis 30% gedehnt werden muss. Dieses Verhältnis bleibt bei Zunahme der Dehnung konstant.

15.4.2 Material C: Beanspruchung bei 200 mm/min

In der Abbildung 15-7 sind die mit den Ansätzen nach Mooney–Rivlin, Ogden und Yeoh ermittelten Verläufe der Hauptspannung S1 für den Randknoten der Parallelfuge und den Eckknoten der Kreuzfuge dargestellt. Die Spannungswerte nach Ogden und Yeoh stimmen für die Kreuzfuge und für die Parallelfuge nahezu überein. Die mit dem Ansatz nach Mooney–Rivlin ermittelten Spannungswerte sind geringer. Eine Fugendehnung um 27% bis 34% führt beim Randpunkt der

Parallelfuge auf den gleichen Spannungswert, den der Eckpunkt der Kreuzfuge bei einer Fugendehnung von 15% erreicht. Nimmt die Fugendehnung zu, vergrößert sich dieses Verhältnis.

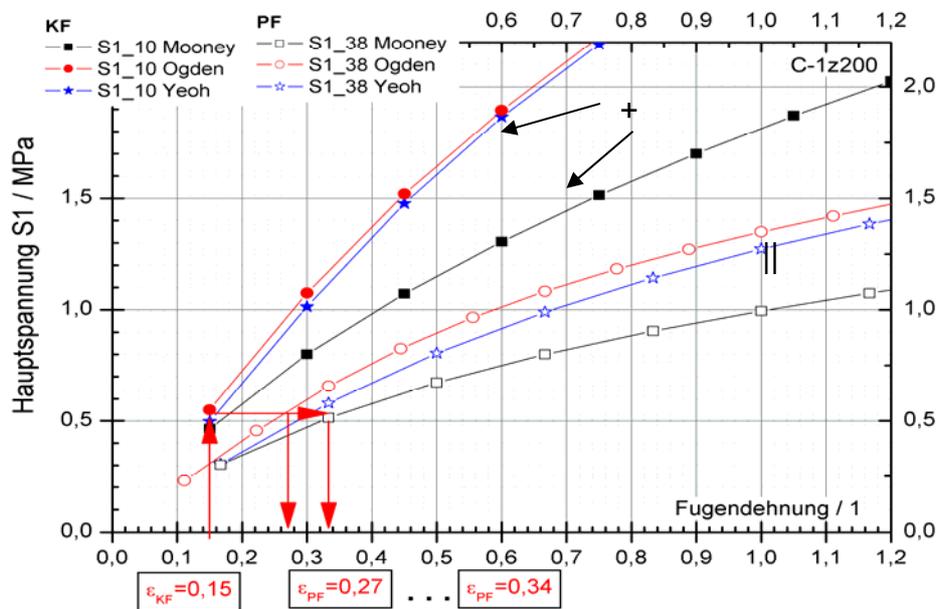


Abbildung 15-7: Hauptspannung S1 nach Mooney–Rivlin, Ogden und Yeoh in Abhängigkeit von der Fugendehnung für die Parallelfuge (PF; ||) und Kreuzfuge (KF; +) für ausgewählte Punkte (Rand- und Eckpunkt) (Material C, 1. Zyklus, 200 mm/min)

15.4.3 Vergleich der lokalen Beanspruchungen für die Beanspruchungsgeschwindigkeiten 6 mm/min und 200 mm/min

In der Abbildung 15-8 sind die technischen Spannungen sowie die mit dem Ansatz nach Ogden ermittelten Hauptspannungen S1 für den Rand- bzw. Eckknoten dargestellt.

Die Pfeile markieren die in den Probekörper Parallelfuge gemäß Zulassungsgrundsatz und Zulassung einzuprägende Dehnung (siehe Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2). Eine technische Dehnung der Kreuzfuge um 30% bei 200 mm/min bzw. um 36% bei 6 mm/min führen in dieser zu der gleichen lokalen Hauptspannung S1.

Die größere Belastungsgeschwindigkeit führt zu einer Zunahme der lokalen Hauptspannung S1. Für den betrachteten Fall wird der höhere Wert bereits bei einer geringeren technischen Dehnung erreicht.

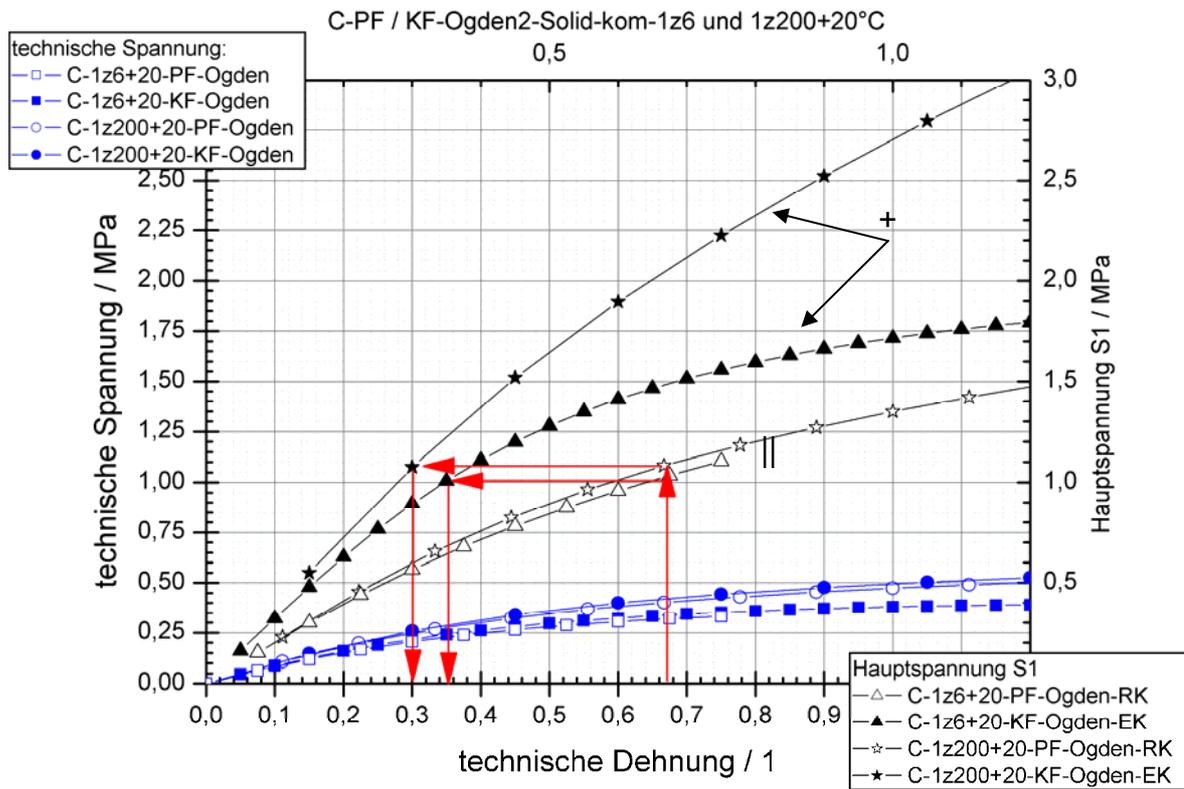


Abbildung 15-8: Vergleich der technischen Spannung sowie der Hauptspannung S1 nach Ogden für den Eckknoten bzw. Randknoten in Abhängigkeit von der technischen Dehnung (Material C, 1. Zyklus, 6 mm/min und 200 mm/min; PF, ||: Parallelfuge; KF, +: Kreuzfuge; EK: Eckknoten; RK: Randknoten)

16 Zusammenfassende Bewertung und Empfehlungen für weitere Forschungsarbeiten

Die Zulassungsgrundsätze für Fugendichtstoffe des Deutschen Instituts für Bau-technik [LAU01] sehen bei einer durch den Hersteller anzugebenden zulässigen Gesamtverformung (Summe aus Stauch- und Dehnbeanspruchung) von $n\%$ (z.B. 25%) folgende im Versuch bei zyklischer Beanspruchung aufzubringende Stauch- und Dehnverformung vor (siehe Tabelle 6-2):

- ◆ $\pm 2n\%$ bei einaxialer Beanspruchung (z.B. $\pm 50\%$)
- ◆ $+3n\%$ und $-2n\%$ bei Beanspruchung von Kreuz- und T-Stößen (z.B. $+75\%$ und -50%)

Die Prüfungen werden am parallelfankigen Probekörper vorgenommen. Die Verhältnisse gelten bis zu einer zulässigen Gesamtverformung von 25%. Demzufolge wird vorausgesetzt, dass infolge Zugbeanspruchung bei derselben technischen Dehnung die lokale Beanspruchung in der Kreuzfuge der 1,5fachen lokalen Beanspruchung in der Parallelfuge entspricht. Bei Druckbeanspruchung wird vorausgesetzt, dass bei derselben technischen Stauchung in der Parallelfuge und in der Kreuzfuge die gleichen lokalen Beanspruchungen vorliegen.

Die Simulationsrechnungen zeigen für die Zugbeanspruchung, dass bei einer identischen lokalen Beanspruchung- ausgedrückt als Hauptspannung S_1 - die Parallelfuge mindestens eine um den Faktor 2 größere Fugendehnung aufnehmen kann als die Kreuzfuge.

Das würde bedeuten, dass bei mehraxialer Beanspruchung (T- oder Kreuzstoß) auf den parallelfankigen Probekörper eine Prüfdehnung von $+4n\%$ aufzubringen ist. Unter Beibehaltung der Prüfdehnung für die mehraxiale Beanspruchung (T- oder Kreuzstoß) von $+3n\%$ ergibt sich für eine einaxiale Beanspruchung (Parallelfuge) eine Prüfdehnung von $+1,5n\%$. Eine Beibehaltung der Prüfdehnungen würde für die Beanspruchung als Parallelfuge einen größeren Sicherheitsfaktor bedeuten als für die Beanspruchung als Kreuzfuge. Die Tabelle 16-1 stellt die Verhältnisse dar.

Tabelle 16-1: Gegenüberstellung der Prüfdehnungen für die einaxiale und mehraxiale Beanspruchung unter Berücksichtigung der Zulassungsgrundsätze [LAU01] sowie der Simualtionsergebnisse

zulässige Gesamtver- formung	Prüfdehnung PF bei Belastung als ...		Faktor zwischen PF und KF	Bemerkung
	PF	KF		
1	2	3	4	5
n%	2n%	3n%		Gemäß Zulas- sungsgrundsatz
	2n%	3n%	1,5	
	2n%	4n%	2	Simulation
	1,5n%	3n%	2	gewollt
	2n% < 1,5n%			Differenz

Diesen Aussagen liegt die Auswertung der Simulationsergebnisse an lokal eingegrenzten Knotenpunkten bzw. einem finiten Element zu Grunde. Werden neben den lokalen Punkten die umliegenden Bereiche betrachtet, so zeigt sich sowohl für ein Fugendehnungsverhältnis Parallelfuge zu Kreuzfuge von 4n% zu 2n% als auch von 3n% zu 2n%, dass im gesamten Probekörper Parallelfuge in jedem (Knoten)Punkt größere Beanspruchungen aufzunehmen sind als im Probekörper Kreuzfuge. In diesem konzentrieren sich die maximalen Beanspruchungen lokal im Bereich der geometrischen Singularität, der Ecke. Aus diesem Grund scheint das gewählte Fugendehnungsverhältnis Parallelfuge zu Kreuzfuge von 3n% zu 2n% für die untersuchten Materialien begründet zu sein.

Die Abbildungen auf den Seiten A-1 bis A-8 des Anhangs zeigen für die Hauptspannung S1 und die Hauptdehnung e1 die Spannungs- und Dehnungsverteilungen für die Probekörper Parallelfuge und Kreuzfuge. Dargestellt ist für die vier in den Simulationsrechnungen untersuchten Spannungs-Dehnungs-Kurven die gemäß Zulassung auf den parallelfankigen Probekörper aufzubringende Prüfdehnung von 3m%, wenn eine Beanspruchung als T- oder Kreuzstoß geprüft wird. Zum Vergleich sind die Simulationsergebnisse für den Probekörper Kreuzfuge für eine Fugendehnung von 2m% sowie für eine Fugendehnung von 1,5m% dargestellt. Eine Dehnung der Kreuzfuge um 2m% entspricht den Festlegungen in den Zulassungsgrundsätzen. Wird die Kreuzfuge um 1,5m% gedehnt, so sind die lokalen Beanspruchungsmaxima an den ausgewählten

Punkten für Parallel- und Kreuzfuge identisch (siehe Kapitel 15).

Die Materialien weisen in ihrem Spannungs–Dehnungs–Verlauf eine chargen-abhängige Streuung auf. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, durch weitere Versuche diese Schwankungen zu erfassen und mit den ermittelten extremen Spannung–Dehnungs–Verläufen Simulationsrechnungen durchzuführen. Damit können die oben getroffenen Aussagen für einen größeren Schwankungsbereich überprüft werden.

Wie die Abbildung 11-1 zeigt, bewirkt eine Temperaturerniedrigung die gleiche Materialversteifung wie eine Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit. Durch Versuche, die den Zusammenhang quantitativ ermitteln, könnte die Möglichkeit geschaffen werden, die lokalen Beanspruchungen in Simulationsrechnungen zu ermitteln.

Die lokalen Beanspruchungen infolge Druckbeanspruchung wurden bislang nicht ermittelt. Zur Überprüfung der Annahmen sind weitere Untersuchungen und Simulationsrechnungen auf diesem Gebiet zu empfehlen.

ANHANG

Die Grafiken der nachfolgenden Seiten zeigen die Simulationsergebnisse, die mit dem Ansatz nach OGDEN ermittelt wurden. Einen Überblick über die dargestellten Simulationsergebnisse gibt die Tabelle:

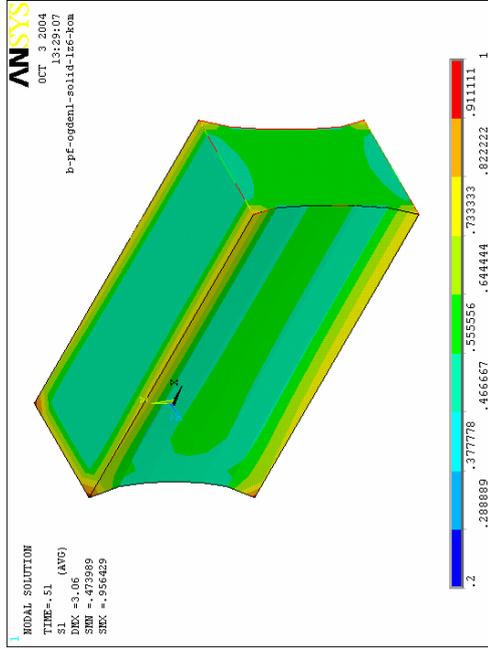
	Feldnummer	S1	e1	PF	KF	Dehnung
1	1.1; 2.1; 3.1; 4.1	X		X		gemäß Zulassung = 3m%
2	1.2; 2.2; 3.2; 4.2	X			X	gemäß Zulassung = 2m%
3	1.3; 2.3; 3.3; 4.3	X			X	Lokales Maximum wie in Zeile 1 = 1,5m%
4	5.1; 6.1; 7.1; 8.1		X	X		gemäß Zulassung = 3m%
5	5.2; 6.2; 7.2; 8.2		X		X	gemäß Zulassung = 2m%
6	5.3; 6.3; 7.3; 8.3		X		X	Lokales Maximum wie in Zeile 1 = 1,5m%

	Feldnummer	Material	Zyklus	Geschwindigkeit	Skalierung
1	1.n / 5.n	B	1	6 mm/min	0,2 bis 1,0
2	2.n / 6.n	B	4	6 mm/min	0,2 bis 1,0
3	3.n / 7.n	C	1	6 mm/min	0,2 bis 1,0
4	4.n / 8.n	C	1	200 mm/min	0,2 bis 1,5

Die Dehnung „m%“ entspricht der zulässigen Gesamtverformung des Fugendichtstoffs gemäß allgemein bauaufsichtlicher Zulassung.

Die Farbskalierung der dargestellten Eigenschaft maximale Hauptspannung S1 bzw. maximale Hauptdehnung e1 ist äquidistant. Die Einheit der Spannung ist N/mm²; die der Dehnung 1.

1.1



Material B: Zyklus 1, Belastungsgeschwindigkeit 6mm/min

Hauptspannung S1:

Feld 1.1: Parallelfuge: Fugendehnung: 51%

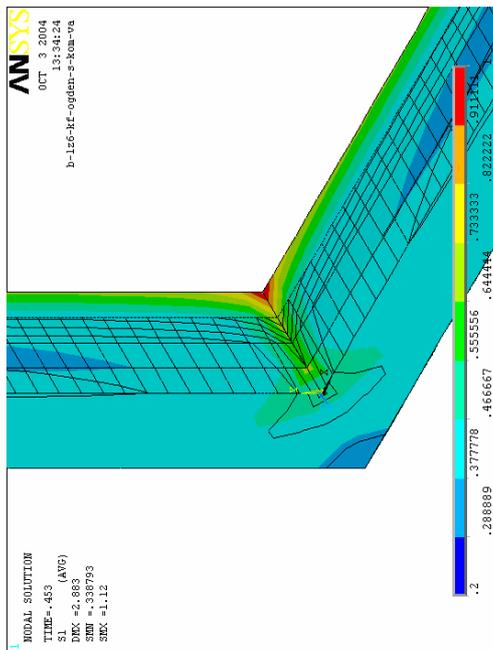
Feld 1.2: Kreuzfuge: Fugendehnung: 34%; [PF:KF = 3:2]

Feld 1.3: Kreuzfuge: Fugendehnung 25,5%; [PF:KF = 3:1,5]

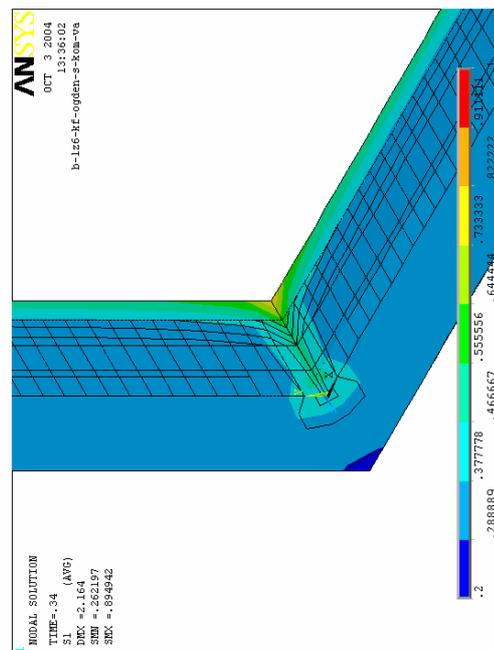
Parallelfuge: halber Probekörper; Schnittfläche parallel zur y-z-Ebene bei x = 35 mm

Kreuzfuge: achter Probekörper; Schnittfläche parallel zur x-y-Ebene bei z = 6 mm

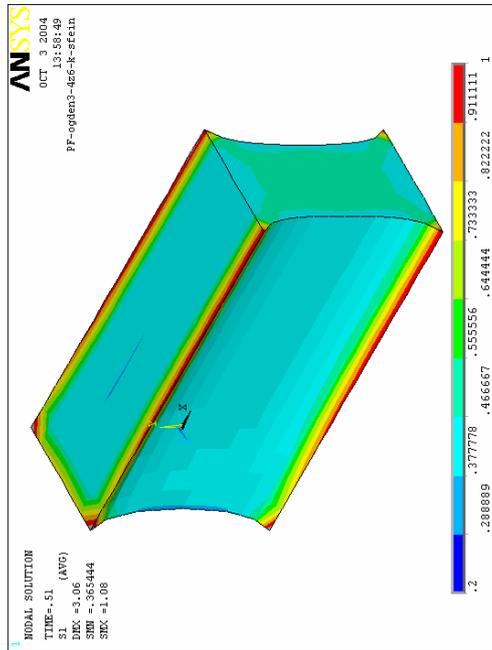
1.2



1.3



2.1



Material B: Zyklus 4, Belastungsgeschwindigkeit 6mm/min

Hauptspannung S1:

Feld 2.1: Parallelfuge: Fugendehnung: 51%

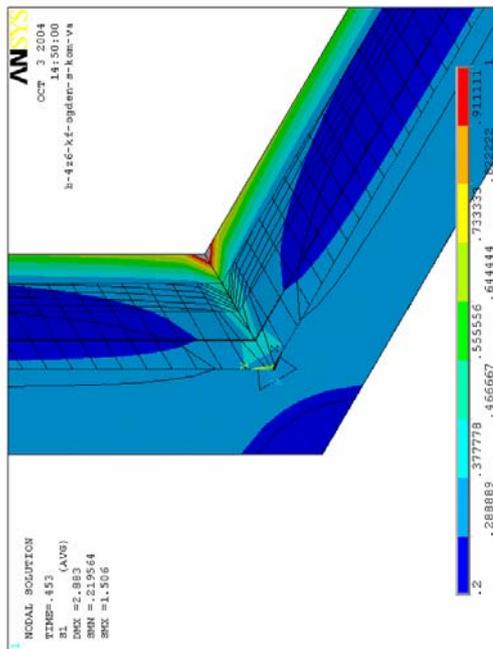
Feld 2.2: Kreuzfuge: Fugendehnung: 34%; [PF:KF = 3:2]

Feld 2.3: Kreuzfuge: Fugendehnung 25,5%; [PF:KF = 3:1,5]

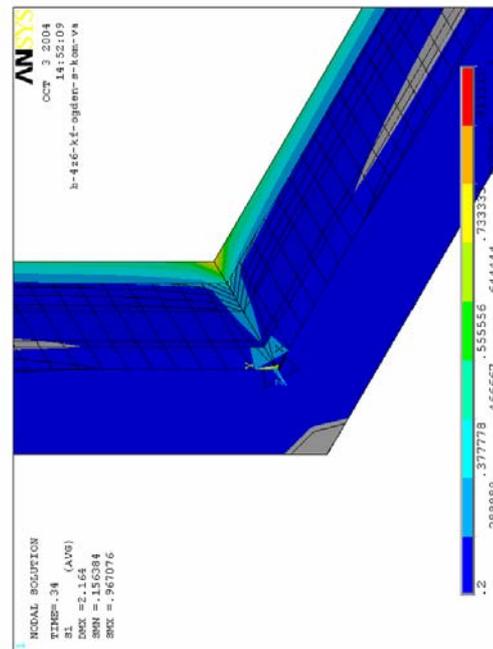
Parallelfuge: halber Probekörper; Schnittfläche parallel zur y-z-Ebene bei x = 35 mm

Kreuzfuge: achteil Probekörper; Schnittfläche parallel zur x-y-Ebene bei z = 6 mm

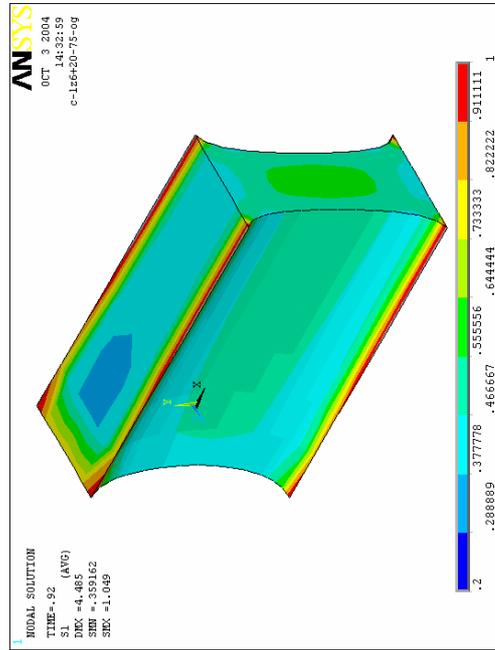
2.2



2.3



3.1



Material C: Zyklus 1, Belastungsgeschwindigkeit 6mm/min

Hauptspannung S1:

Feld 3.1: Parallelfuge: Fugendehnung: 69%

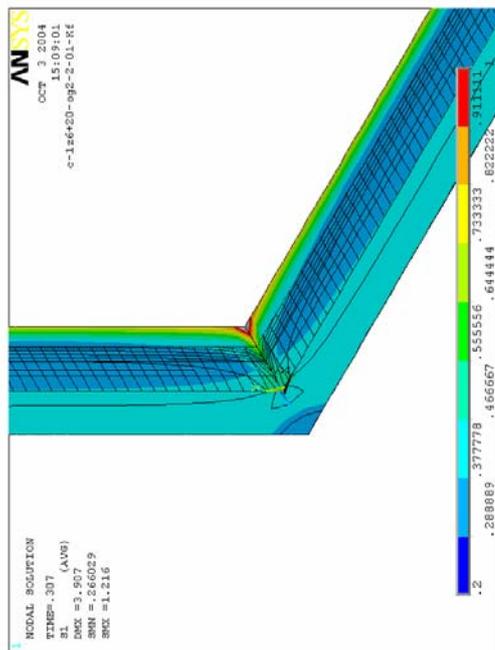
Feld 3.2: Kreuzfuge: Fugendehnung: 46%; [PF:KF = 3:2]

Feld 3.3: Kreuzfuge: Fugendehnung 34,5%; [PF:KF = 3:1,5]

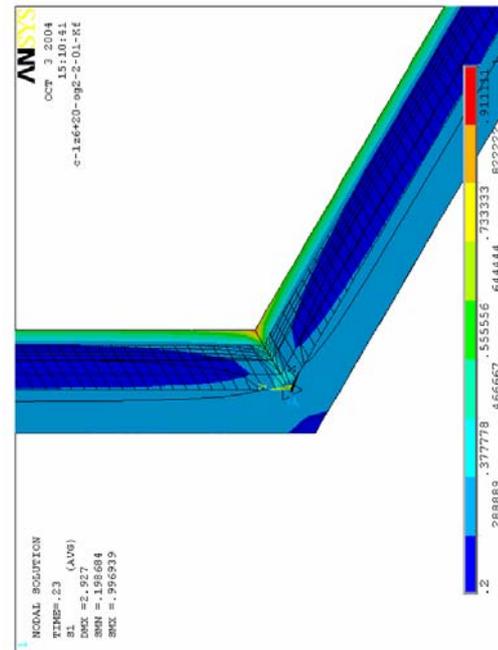
Parallelfuge: halber Probekörper; Schnittfläche parallel zur y-z-Ebene bei x = 35 mm

Kreuzfuge: achter Probekörper; Schnittfläche parallel zur x-y-Ebene bei z = 6 mm

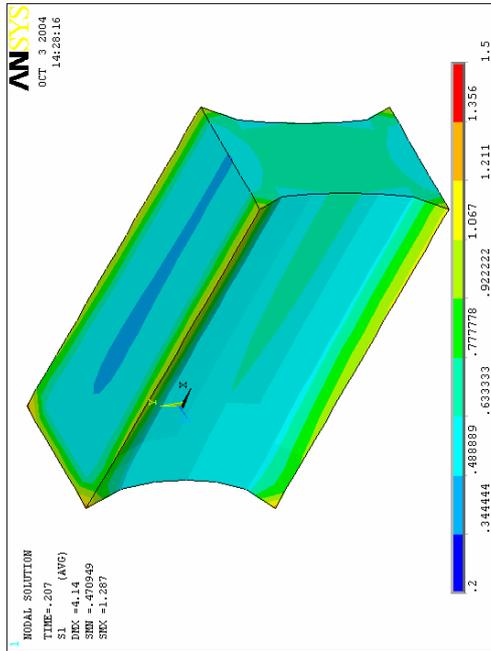
3.2



3.3



4.1



Material C: Zyklus 1, Belastungsgeschwindigkeit 200mm/min

Hauptspannung S1:

Feld 4.1: Parallelfuge: Fugendehnung: 69%

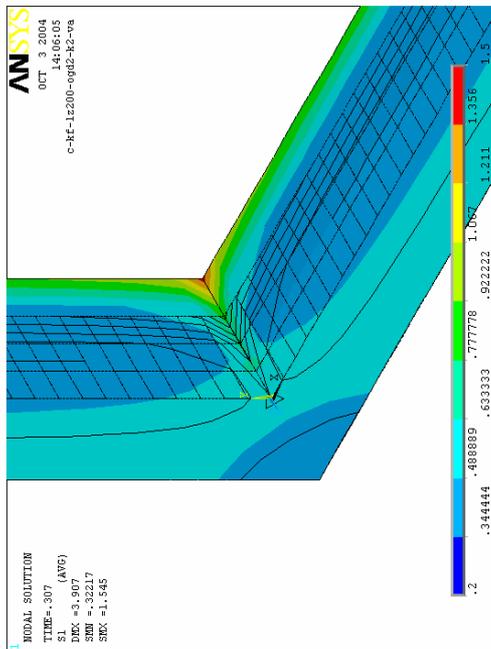
Feld 4.2: Kreuzfuge: Fugendehnung: 46%; [PF:KF = 3:2]

Feld 4.3: Kreuzfuge: Fugendehnung 34,5%; [PF:KF = 3:1,5]

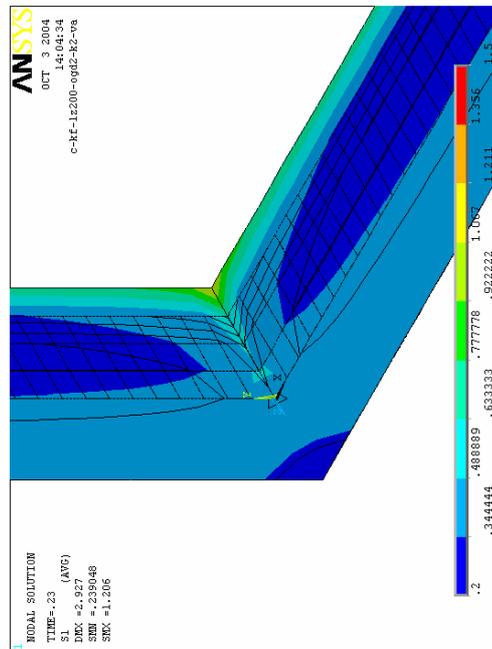
Parallelfuge: halber Probekörper; Schnittfläche parallel zur y-z-Ebene bei x = 35 mm

Kreuzfuge: achter Probekörper; Schnittfläche parallel zur x-y-Ebene bei z = 6 mm

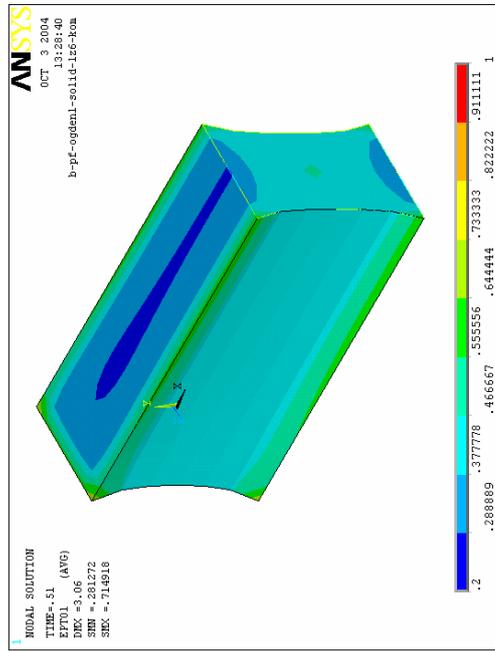
4.2



4.3



5.1



Material B: Zyklus 1, Belastungsgeschwindigkeit 6mm/min

Hauptdehnung e 1:

Feld 5.1: Parallelfuge: Fugendehnung: 51 %

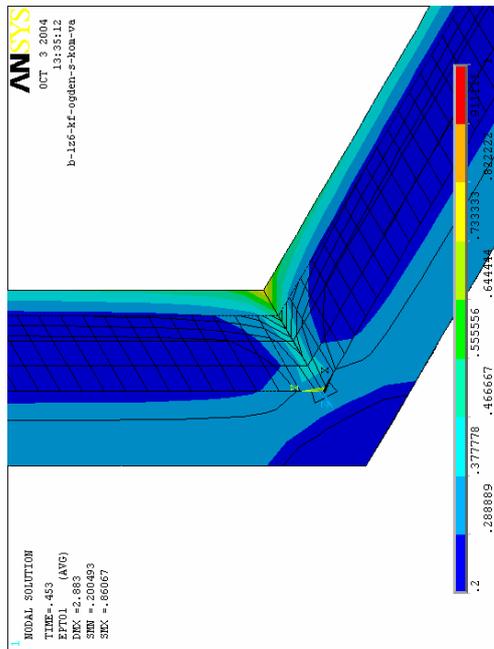
Feld 5.2: Kreuzfuge: Fugendehnung: 34%; [PF:KF = 3:2]

Feld 5.3: Kreuzfuge: Fugendehnung 25,5%; [PF:KF = 3:1,5]

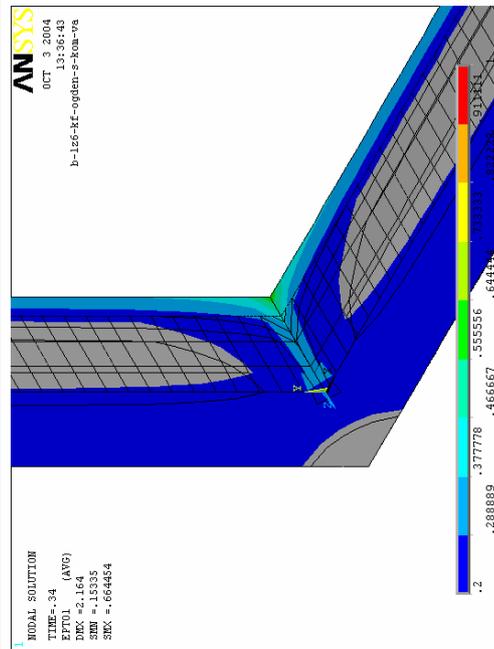
Parallelfuge: halber Probekörper; Schnittfläche parallel zur y-z-Ebene bei x = 35 mm

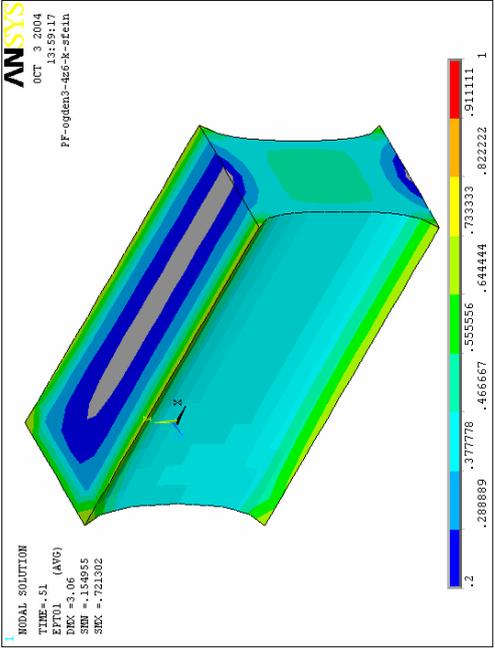
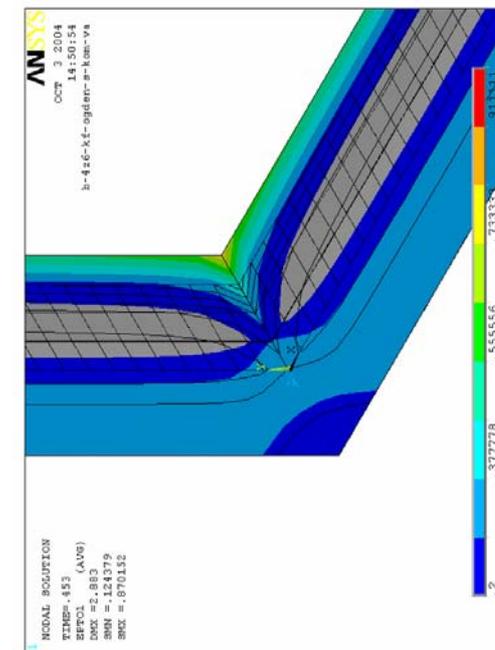
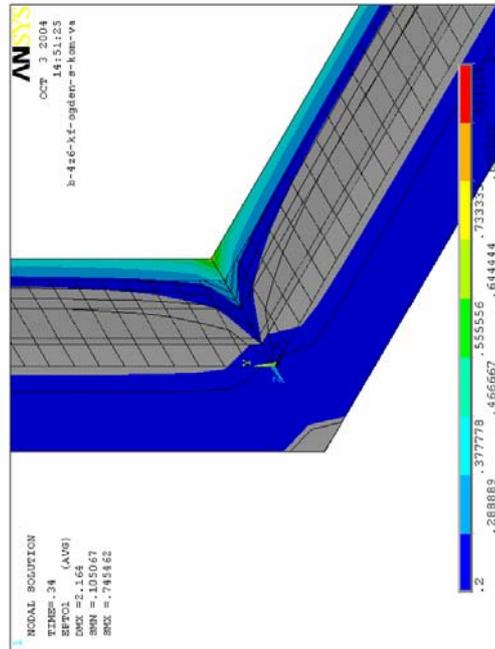
Kreuzfuge: achter Probekörper; Schnittfläche parallel zur x-y-Ebene bei z = 6 mm

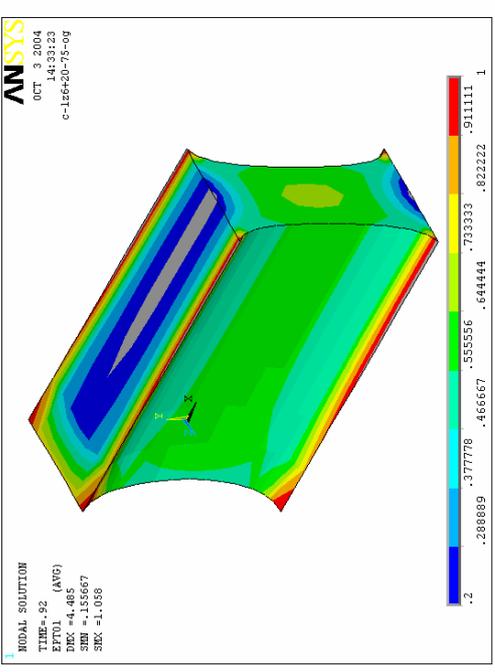
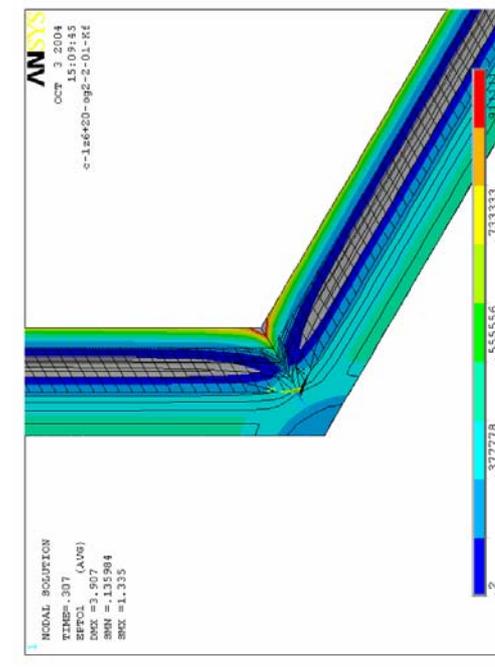
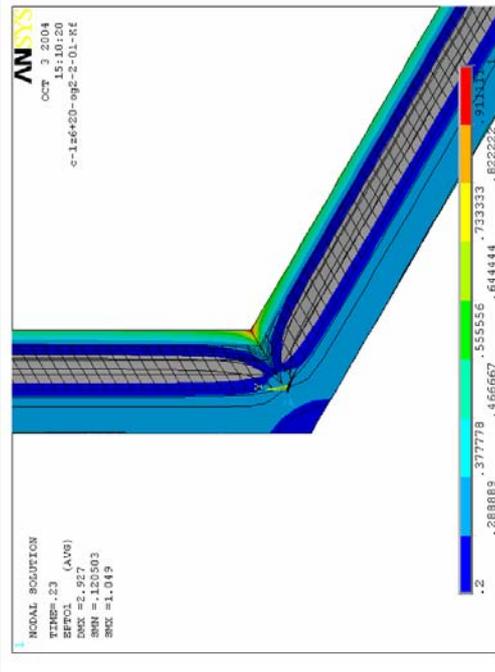
5.2

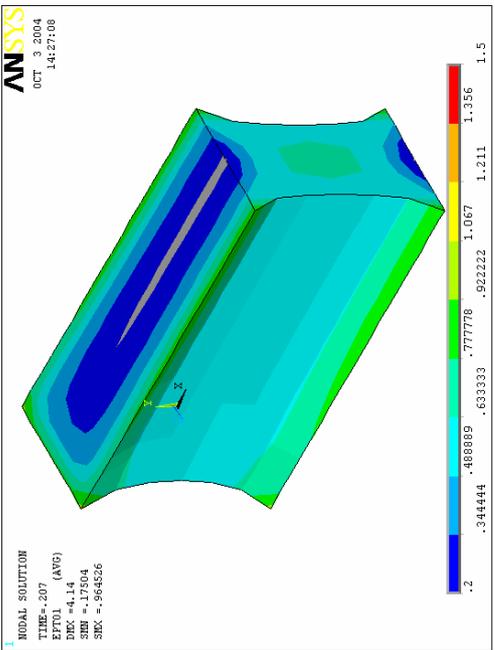
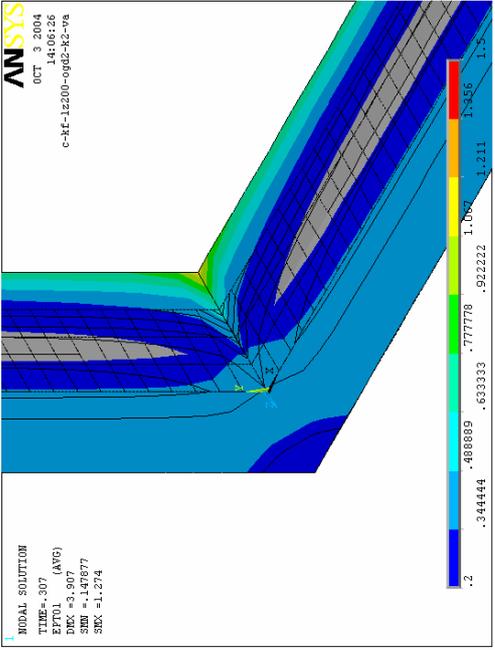
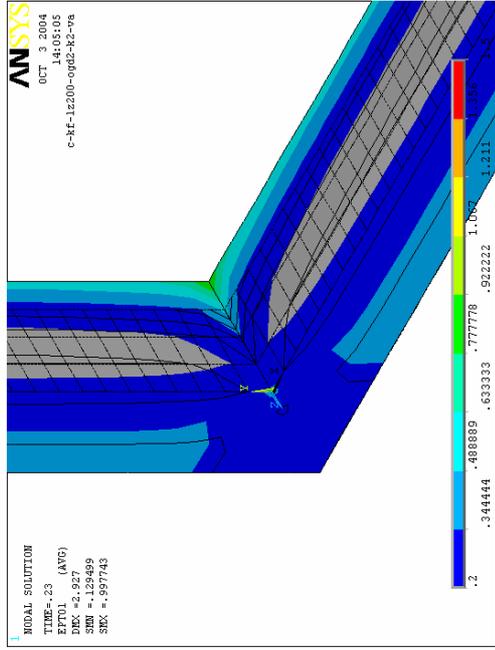


5.3



<p>6.1</p>  <p>ANSYS OCT 3 2004 13:59:17 PF-09den3-466-k-stein</p> <p>1 MODAL SOLUTION TIME = .51 (AVG) EPTOL = 3.06 SPP = .154955 SIX = .721302</p> <p>.2 .288889 .377778 .466667 .555556 .644444 .733333 .822222 .911111 1</p>	<p>Material B: Zyklus 4, Belastungsgeschwindigkeit 6mm/min Hauptdehnung e1: Feld 6.1: Parallelfuge: Fugendehnung: 51% Feld 6.2: Kreuzfuge: Fugendehnung: 34%; [PF:KF = 3:2] Feld 6.3: Kreuzfuge: Fugendehnung 25,5%; [PF:KF = 3:1,5] Parallelfuge: halber Probekörper; Schnittfläche parallel zur y-z-Ebene bei x = 35 mm Kreuzfuge: achteil Probekörper; Schnittfläche parallel zur x-y-Ebene bei z = 6 mm</p>
<p>6.2</p>  <p>ANSYS OCT 3 2004 14:50:54 b-4z6-kf-ogdenr-m-km-va</p> <p>MODAL SOLUTION TIME = .453 (AVG) EPTOL = 2.883 SPP = .124379 SIX = .870132</p> <p>.2 .288889 .377778 .466667 .555556 .644444 .733333 .822222 .911111 1</p>	<p>6.3</p>  <p>ANSYS OCT 3 2004 14:51:25 b-4z6-kf-ogdenr-m-km-va</p> <p>MODAL SOLUTION TIME = .34 (AVG) EPTOL = 1.64 SPP = .105067 SIX = .745462</p> <p>.2 .288889 .377778 .466667 .555556 .644444 .733333 .822222 .911111 1</p>

<p>7.1</p>  <p>ANSYS OCT 3 2004 14:33:23 c-1e6+20-992-2-01-KF</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=92 (AVG) EPTOL =4.485 SDE =.155667 SDX =1.058</p>	<p>Material C: Zyklus 1, Belastungsgeschwindigkeit 6mm/min Hauptdehnung e1: Feld 7.1: Parallelfuge: Fugendehnung: 69% Feld 7.2: Kreuzfuge: Fugendehnung: 46%; [PF:KF = 3:2] Feld 7.3: Kreuzfuge: Fugendehnung 34,5%;[PF:KF = 3:1,5] Parallelfuge: halber Probekörper; Schnittfläche parallel zur y-z-Ebene bei x = 35 mm Kreuzfuge: achtel Probekörper; Schnittfläche parallel zur x-y-Ebene bei z = 6 mm</p>
<p>7.2</p>  <p>ANSYS OCT 3 2004 15:09:45 c-1e6+20-992-2-01-KF</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=307 (AVG) EPTOL =3.907 SDE =.135984 SDX =1.335</p>	<p>7.3</p>  <p>ANSYS OCT 3 2004 15:10:20 c-1e6+20-992-2-01-KF</p> <p>NODAL SOLUTION TIME=23 (AVG) EPTOL =5.87 SDE =.125503 SDX =1.019</p>

<p>8.1</p>  <p>ANSYS OCT 3 2004 14:27:08</p> <p>1 NODAL SOLUTION TIME = .207 (AVG) EPTOL = .14:05:26 DEK = 4.14 SMI = .17504 SMX = .564526</p>	<p>Material C: Zyklus 1, Belastungsgeschwindigkeit 200mm/min Hauptdehnung e1: Feld 8.1: Parallelfuge: Fugendehnung: 69% Feld 8.2: Kreuzfuge: Fugendehnung: 46%; [PF:KF = 3:2] Feld 8.3: Kreuzfuge: Fugendehnung 34,5%; [PF:KF = 3:1,5]</p> <p>Parallelfuge: halber Probekörper; Schnittfläche parallel zur y-z-Ebene bei x = 35 mm Kreuzfuge: achteil Probekörper; Schnittfläche parallel zur x-y-Ebene bei z = 6 mm</p>
<p>8.2</p>  <p>ANSYS OCT 3 2004 14:05:26 c-kf-1z200-0962-k2-09</p> <p>1 NODAL SOLUTION TIME = .307 (AVG) EPTOL = .14:05:26 DEK = 3.907 SMI = .147577 SMX = 1.274</p>	<p>8.3</p>  <p>ANSYS OCT 3 2004 14:05:05 c-kf-1z200-0962-k2-09</p> <p>1 NODAL SOLUTION TIME = .23 (AVG) EPTOL = .14:05:05 DEK = 2.927 SMI = .129499 SMX = .597743</p>