

# Charakterisierung von RTM-Laminaten unter Druckbelastung

**MASTERARBEIT**

von

Mario Lintschinger

erstellt an der

Polymer Competence Center Leoben GmbH

eingereicht am

Institut für

Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe  
an der Montanuniversität Leoben



**Betreuung:** Dipl.-Ing. Elisabeth Ladstätter, Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald Pinter

**Begutachtung:** o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Reinhold W. Lang

Leoben, November 2007

## **ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Diplomarbeit von mir selbst verfasst wurde und dass ich dabei keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe.

Leoben, im November 2007

Mario Lintschinger

## Danksagung

Die vorliegende Masterarbeit wurde im K<sub>plus</sub>-Projekt „Liquid moulding LM) technology, fatigue design concept and repair technology in aircraft applications“ (Projekt-Nr. II 1.7) an der Polymer Competence Center Leoben GmbH im Rahmen des Kompetenzzentren-Programms K<sub>plus</sub> des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie unter Beteiligung der Montanuniversität Leoben (Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe (IWPK)), der Airbus Deutschland GmbH (Bremen, D) und der Fischer Advanced Composites Components AG (FACC AG) (Ried/Innkreis, A), erstellt und mit Mitteln des Bundes und der Länder Steiermark und Oberösterreich gefördert.

Für die Ermöglichung, Durchsicht und Korrektur der vorliegenden Arbeit möchte ich dem Vorstand des Institutes für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Herrn o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Reinhold W. Lang, danken.

Insbesondere möchte ich mich bei meiner Betreuerin, Frau Dipl.-Ing. Elisabeth Ladstätter, bedanken, die mit viel Geduld und ihrem Fachwissen nicht unwesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Weiters möchte ich mich bei meinem Projektleiter, Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald Pinter, für seinen wissenschaftlichen Spürsinn und fachlichen Beistand bedanken.

Für den antreibenden und unterstützenden Rückhalt, ohne den dieses Studium und schlussendlich diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, möchte ich mich bei meiner Lebenspartnerin Sandra und meinen zwei Unruhestiftern Laura und Jan Lintschinger bedanken.

Leoben, November 2007

## KURZFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war, die Druckeigenschaften und das Ermüdungsverhalten unter Druck belasteter Lamine zu untersuchen. Die Prüfmaterialien wurden im „Resin Transfer Moulding“ (RTM) Verfahren hergestellt. Die untersuchten Lamine unterschieden sich in der Kompaktierung der eingesetzten Gewebe (bebindert, vernäht) und im verwendeten Harzsystem.

Ein zweiter Schwerpunkt wurde auf die Evaluierung eines geeigneten Messaufbaus für die Dehnungsmessung unter Druck zyklisch belasteter Prüfkörper gelegt. Durch die geringe Einspannlänge bei Druckprüfungen, sind standardmäßige Extensometer nicht geeignet, und Dehnmessstreifen neigen dazu sich von der Prüfoberfläche abzulösen. Die Ergebnisse mit unterschiedlichen Prüfanordnungen haben jedoch gezeigt, dass für eine korrekte Messung der Dehnung eine direkte Messung am Prüfkörper notwendig ist.

In den quasi-statischen Untersuchungen zeigte sich der negative Einfluß der Vernähung durch einen Abfall der Druckfestigkeit. Die Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens fand durch die Darstellung der Verläufe des dynamischen Moduls bzw. des Sekantenmoduls sowie isozyklischer Spannungs-Dehnungs-Verläufe statt. Im wesentlichen konnten nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Formulierungen festgestellt werden, wobei im untersuchten Last- und Zyklbereich bei allen Materialien ausgeprägtes Kriechen bei geringer Werkstoffschädigung festgestellt werden konnte. Tendenziell neigten die kompaktierten Materialien zu etwas geringeren Kriechraten.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis was to investigate the property profile of laminates under quasi-static and fatigue compression loading. The investigated laminates were produced with the resin transfer moulding (RTM) technology and differed in the way of compaction of the fabrics (with binders and stitched) and the used resin systems.

A second focus was the development and evaluation of an adequate set-up for the measurement of strains in cyclic compression tests. As a result of the short free grip length in compression tests, usually there is not enough space for the attachment of mechanical contact extensometers. Alternatively, strain gauges often lose their contact in cyclic tests. In this respect, however, the results with different testing arrangements have shown that for a correct acquisition of strain a direct measurement on the specimen is necessary.

The negative effect of stitching became obvious in the quasi-static tests by a decrease in compression strength. The characterisation of the fatigue behaviour was done by analysing the dynamic modulus and secant modulus as a function of cycle numbers as well as looking at the iso-cyclic stress strain behaviour of the laminates. Basically only small differences could be detected between the different formulations. In the investigated load and cycle range a distinct material creep was obvious with minor signs for material damage. A slight tendency for lower creep rates was found for the compacted materials.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNGEN</b> .....	<b>1</b>
<b>2 GRUNDLAGEN</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 RTM-Verfahren</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2 Kompaktierung von textilen Halbzeugen</b> .....	<b>5</b>
<b>2.3 Druckbeanspruchung</b> .....	<b>7</b>
2.3.1 Versagensmechanismen unter monotoner Druckbelastung .....	7
2.3.2 Versagensmechanismen unter zyklischer Belastung .....	9
<b>2.4 Methoden zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens</b> .....	<b>11</b>
2.4.1 Wöhlerversuche .....	11
2.4.2 Hysterese-Messverfahren .....	12
2.4.3 Isozyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramme .....	14
<b>3 EXPERIMENTELLES</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1 Werkstoffe und Testplattenherstellung</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2 Prüfkörper</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3 Versuchsdurchführung</b> .....	<b>18</b>
3.3.1 Bestimmung der Druckfestigkeit .....	18
3.3.2 Bestimmung des Ermüdungsverhaltens .....	19
3.3.3 Datenaufzeichnung der Dehnungswerte.....	20
<b>3.4 Normalisierung von Testergebnissen</b> .....	<b>25</b>
<b>4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION</b> .....	<b>26</b>
<b>4.1 Quasi-statische Druckeigenschaften</b> .....	<b>26</b>
<b>4.2 Druck-Ermüdungsverhalten</b> .....	<b>26</b>

---

4.2.1	Wöhlerversuche .....	26
4.2.2	Modulbewertung.....	30
4.2.3	Isozyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramme .....	37
5	AUSBLICK UND SCHLUSSFOLGERUNG .....	46
6	LITERATUR.....	48
7	ANHANG .....	51
A.	<b>Isozyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramme .....</b>	<b>51</b>
B	<b>Zykluszahlabhängige Modulverläufe.....</b>	<b>56</b>

## 1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNGEN

Die verstärkte Anwendung von Faserverbundwerkstoffen in der Luft und Raumfahrt, sowie Automobiltechnik und Maschinenbau verdankt diese Werkstoffgruppe nicht zuletzt dem hervorragenden Verhältnis von Festigkeit, Steifigkeit und Gewicht, der guten Korrosionsbeständigkeit, dem guten Dämpfungsverhalten und der hohen Formstabilität (Lang et al., 1986).

Eine wesentliche Einschränkung für die weitere Entwicklung neuer Komponenten besteht in der vorhandenen Asymmetrie von Zug- und Druckeigenschaften. Heutzutage ist der limitierende Faktor hinsichtlich noch breiterer Anwendung in der Luftfahrt die Druckfestigkeit. So hat sich die Zugfestigkeit in der letzten Dekade durch Forschungsbemühungen um 50% erhöht. Diese Verbesserungen schlugen sich aber nicht auf die Druckfestigkeit nieder. Um ein einigermaßen ausgewogenes Resultat zwischen Zug und Druckfestigkeit zu erzielen, müsste die Druckfestigkeit um 30% gesteigert werden (Effendi et al., 1995).

Das Thema der Druckprüfung und der Druckeigenschaften beschäftigt seit Mitte der 60er-Jahre des 20. Jahrhunderts die Forschung und stellt noch heute eine wissenschaftliche Herausforderung dar. Durch Rechnereinsatz und moderne FEM Programme wird gegenwärtig versucht, die theoretischen Ansätze numerisch zu beweisen und nachzuvollziehen. Die Probleme liegen einerseits in der Tatsache, dass es sich bei Druckbeanspruchung um ein Stabilitätsproblem handelt und somit schon kleinste Veränderungen in der Werkstoff- zusammensetzung erhebliche Auswirkungen auf die ertragbaren Kräfte haben können. Zum anderen versagt ein hochentwickelter Mehrphasenwerkstoff in vielfältiger Weise wie durch Delamination infolge von Fehlstellen der einzelnen Lagen, Ausknicken des Prüflings bzw. Bauteils. Dabei finden unterschiedliche Mechanismen während des Versagens statt, die sich auch teilweise gegenseitig überlagern. Das eigentliche Druckversagen findet sehr plötzlich und größtenteils ohne Vorwarnung statt. Dadurch ist der Versagenshergang sehr schlecht zu beobachten, was die Bruchanalyse neben den zahlreichen inhärenten Vorgängen erschwert.

Die derzeitig noch vorherrschende Fertigungsmethode von hochbelasteten CFK- (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) Bauteilen in der Luft- und Raumfahrt stellt die Prepreg-Technologie dar. Prepregs sind vorimprägnierte Fasern, die mittels



der kosten und materialintensiven Autoklav–Technologie zu den fertigen Bauteilen verarbeitet werden. Merkmale dieser Technologie sind lange Formbelegungszeiten, sowie die Fertigung geringer Stückzahlen. Nachteilig zeigen sich auch die hohen Investitionskosten und laufenden Betriebskosten für die Errichtung einer Fertigungsanlage mit Autoklav–Technologie (Kruckenberg und Paton, 1998).

Eine neue Variante zur Herstellung von komplexen bzw. dickwandigen Bauteilen durch Faserverbundwerkstoffe bietet das RTM („Resin Transfer Moulding“)-Verfahren. Mittels Forcierung der integralen Bauweise konnten die Gesamtherstellkosten gesenkt werden, da der Materialeinsatz (z.B. Gewebeverschnitt und Hilfsmaterialeinsatz) und die laufenden Betriebskosten reduziert werden konnten. Auf Grund dessen konnten die gesamten Herstellkosten bei komplexen Bauteilen gesenkt werden. Der verfahrenstechnische Unterschied zwischen der RTM- und Prepreg-Technologie besteht darin, dass bei der RTM-Technologie in ein Werkzeug trockenes Gewebe eingelegt und anschließend Harz injiziert und ausgehärtet wird (Kruckenberg und Paton, 1998).

Das Ziel dieser Arbeit war, die Druckeigenschaften von im RTM-Verfahren hergestellten Laminaten unter quasi-statischer und zyklischer Belastung zu ermitteln. Die untersuchten Lamine unterschieden sich in der Kompaktierung der eingesetzten Gewebe und im verwendeten Harzsystem. Das erste Materialsystem bestand aus nicht kompaktierten und kompaktierten Standardgeweben (über Binder und vernähen). Beim zweiten Materialsystem waren Thermoplastfasern in das Karbongewebe eingewebt. Diese lösten sich während des Aushärtvorgangs in der Harzmatrix auf und erhöhen dadurch die Schlagzähigkeit. Die Charakterisierung der zyklischen mechanischen Eigenschaften wurde durch die Darstellung der Verläufe des dynamischen Moduls bzw. des Sekantenmoduls sowie isozyklischer Spannungs-Dehnungs-Verläufe bewerkstelligt.

## 2 GRUNDLAGEN

### 2.1 RTM-Verfahren

Das „Resin Transfer Moulding“ (RTM)-Verfahren ist ein Harzinjektionsverfahren und wird als Alternative zur konventionellen Prepreg-Technologie eingesetzt. Durch die gezielte Nutzung der spezifischen Möglichkeiten des RTM-Verfahrens kann neben einer drastischen Reduzierung der Herstellungskosten vor allem eine Reduzierung der Teileanzahl und Montageschritte erreicht werden (Kruckenberg und Paton, 1998).

Das RTM-Verfahren ist ein Prozess, der enge Fertigungstoleranzen bezüglich Bauteilgewicht, Faservolumengehalt und Bauteilmaße gestattet, wobei hohe Faservolumenanteile von über 60% realisierbar sind. Bei diesem Verfahren (s. Abb. 2.1) wird ein trockenes Faserhalbzeug in ein mehrheitlich zweigeteiltes, beheiztes Werkzeug gelegt und durch ein Harz niedriger Viskosität mit Überdruck imprägniert. Das Verstärkungsmaterial wird oft vorgeformt, um es schneller in die Form einlegen zu können, wodurch eine gute Reproduzierbarkeit gewährleistet wird (Rudd et al., 1997).

Beim Imprägnieren des Faserhalbzeuges durchströmt das Harz die Faserlagen und tritt, nachdem es die Fasern durchtränkt hat, an den Entlüftungsöffnungen aus. Um trockene Bereiche und Lufteinschlüsse zu vermeiden, folgt der Injektion eine Spülphase, in der zusätzliches Harz durch das Bauteil strömt. Potenziell vorhandene Lufteinschlüsse innerhalb des Laminats können dabei über die Entlüftungsöffnungen herausgespült und auf ein Minimum reduziert werden. Die dafür erforderliche Harzmenge kann in Abhängigkeit der Bauteilgröße 10 bis 20% des Bauteilvolumens umfassen. Nach dem Spülvorgang härtet der Faserverbundkunststoff in der Werkzeugform aus und kann anschließend entnommen werden (Rudd et al., 1997).

Der zeitintensivste Verarbeitungsschritt ist die Aushärtedauer des eingesetzten Harzsystems. Die Qualitätseigenschaften des Endproduktes werden entscheidend von der Harzinjektion und dem Aushärten des Harzes beeinflusst. Eine unvollständige Imprägnierung des Bauteils führt in dessen Innerem zu trockenen Bereichen und Poren. Die Produkteigenschaften werden hierdurch deutlich

herabgesetzt, so dass das Bauteil nicht eingesetzt werden kann und als Ausschuss anfällt (Rudd et al., 1997).

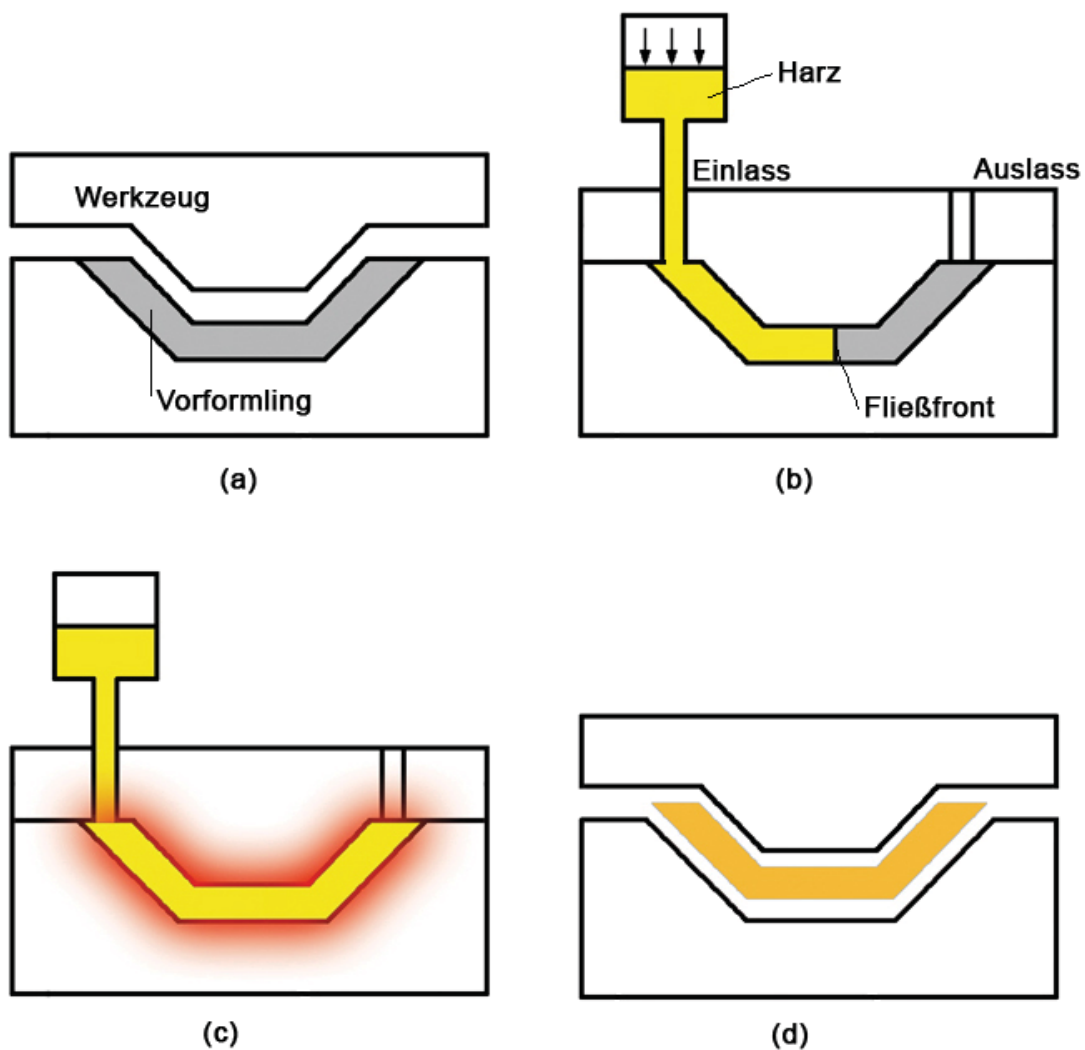


Abb. 2.1: Methodik des RTM-Prozesses (Loendersloot und Akkerman, 2001; überarbeitet von Kitzmüller, 2007):

- (a) Einlegen des Faserhalbzeuges in die Werkzeugform
- (b) Imprägnierung
- (c) Aushärtung
- (d) Entnahme des Endproduktes.

## 2.2 Kompaktierung von textilen Halbzeugen

Der Begriff Halbzeug kann in Zusammenhang mit Faserverbundwerkstoffen auf mehrere Arten definiert werden. Zum Einen werden Halbzeuge aus Fasern, wie Fäden, Vliese o.ä., als Faserhalbzeuge bezeichnet, zum Anderen werden Gewebe, Gestricke und Multiaxialgelege als textile Halbzeuge bezeichnet. Der generelle Vorteil dieser textilen Halbzeuge liegt in der wirtschaftlicheren Verarbeitung (Woerndle, 2002).

Da zur formtreuen Schichtung und der dreidimensionalen Positionierung von Faserhalbzeugen zur Zeit vorwiegend manuelle Techniken angewendet werden, ist eine Kompaktierung von trockenen Halbzeugen dringend erforderlich. Sie verhindert das Ausfransen der Fasern beim Zuschneiden der Halbzeuge und anderen Arbeitsschritten. Zusätzlich werden Ausrichtungsfehler beim Auflegen der Gewebelagen durch eine Stabilisierung der Gewebelagen zueinander vermindert und eine Einstellung bzw. Realisierung der gewünschten Faservolumenanteile ermöglicht (Herrmann et al., 2000).

Prinzipiell kann zwischen zwei Binderarten unterschieden werden. Binder, die sich mit den Fasern verbinden und nicht im Harz löslich sind, bieten die Möglichkeit der Kompaktierung der Gewebelagen. Dies führt zu einer Verringerung der Dicke (d.h. höherer Faservolumenanteil) und besserer Einhaltung der Toleranzen im gesamten Formteil. Binder, die mit dem Harz kompatibel sind, bieten die Möglichkeit des gezielten Aufbaus der interlaminaeren Bereiche zwischen den Gewebelagen. Man muss aber berücksichtigen, dass die Eigenschaften des Binders die Permeabilität bei der Harzinjektion beeinflussen (Tanoglu et al., 2001; Painold, 2003).

Die in dieser Arbeit verwendeten Binder zur Kompaktierung der eingesetzten Gewebhalbzeuge beruhen auf folgenden Verarbeitungsverfahren.

Nachdem das pulvrige Bindersystem (Powder Coating) auf die Gewebeoberfläche aufgetragen wurde, werden die einzelnen Gewebelagen unter Druck miteinander verpresst. Das Bindersystem befähigt zum Thermoformen des Faserhalbzeugs, wobei sich der Binder auf der Gewebeoberfläche des Halbzeugs ablagert und als Verstärkung dient. Bei diesem Verfahren wird während des Thermoformprozesses der Binder durch Druck und Hitze erweicht. Hierbei geht der Binder nicht

vollständig in den flüssigen Zustand über, sondern bleibt ein klebriger Feststoff. Dies ist wichtig, damit der Binder während des Aushärtens nicht tief in die Faserbündel eindringen kann, was zu einer Behinderung des Fließvorgangs des Harzes führen würde. Dabei nimmt die Viskosität mit steigender Temperatur zwischen 35°C und 70°C sprunghaft ab und bleibt dann bis ungefähr 100°C konstant. Anschließend wird der Binder während des Abkühlvorgangs wieder verfestigt, wobei die benachbarten Gewebelagen miteinander verbunden werden. Während des Verfestigungsvorgangs kann die gewünschte Form und Dicke des Halbzeugs unter Verwendung eines geeigneten Werkzeugs und unter Anwendung von Druck und Hitze erreicht werden (Tanoglu et al., 2001; Painold, 2003).

Ein weiteres Kompaktierungsverfahren stellt das Vernähen von Gewebelagen dar. Im Anschluss an die Faserhalbzeugherstellung findet der Nähprozess als weiterer Schritt in der Prozesskette statt. Im Allgemeinen gilt die Vernähung – trotz der Verbesserung der "out-of-plane"-Eigenschaften (mechanische Eigenschaften senkrecht zur Faserebene) – als schädlich für die "in-plane"-Eigenschaften (mechanische Eigenschaften in der Faserebene). Ursache dafür sind die Umlenkungen des Fasermaterials (Ondulationen) durch die Nähfäden, welche negative Auswirkungen auf die "in-plane"-Eigenschaften des Nähguts haben. Durch Untersuchungen wurde gezeigt, dass die durch die Nähfäden verursachten Störungen wie Harznester, Spannungskonzentrationen und Kraftumlagerungen für die Entstehung von Rissen verantwortlich sind (Sickinger et al., 2000; Sickinger und Herrmann, 2001).

Der am häufigsten eingesetzte Stichtyp ist der Doppelsteppstich. Er weist sehr gute Nahtfestigkeit und die Möglichkeit zur Verwendung verschiedener Garntypen auf Ober- und Unterseite auf. Der Doppelsteppstich bietet auch eine sehr gute Handhabbarkeit der vernähten Halbzeuge bei der Dickenverstärkung von Faserverbundstrukturen an. Die Kombination unterschiedlicher Garntypen als Nadel- bzw. Greiferfaden bietet die Möglichkeit, die Verknotung der beiden interagierenden Nähfäden zu minimieren, das für die Reduktion von Fehlstellen im Laminat essentiell wichtig ist. Ein weiterer Vorteil dieses Stichtyps ist, dass Doppelsteppstichnähte nur schwer aufgetrennt werden können, was im Falle der Vorbereitung von Faserhalbzeugen von großer Bedeutung ist. Die geringe

Dehnfähigkeit der Nähte erlaubt zudem eine sehr exakte Vorbereitung der Halbzeug-Einzelteile, was beispielsweise für den späteren Zuschnitt bzw. die Positionierung von zusätzlichen lokalen Verstärkungsapplikationen wichtig ist (Weimer, 2002). Eine detaillierte Erklärung für die Durchführung des Nähprozesses findet sich in der Arbeit von Painold (Painold, 2003).

### 2.3 Druckbeanspruchung

Durch die steigende Verbreitung von Faserverbundwerkstoffen in strukturellen Anwendungen, ist es notwendig das Verhalten bei Druckbeanspruchung zu untersuchen. Häufig liegen die Druckfestigkeiten um einige Prozentpunkte unter jenen der Zugfestigkeiten.

Die Druckfestigkeit von unidirektionalen Faserverbundwerkstoffen wird durch den Knickwiderstand der Fasern kontrolliert. Überschreitet die Druckbelastung die für die Faser noch ertragbare Belastungsgrenze so kommt es zum Euler Knicken von Faserbündeln und die Fasern beulen seitlich aus (Hull und Clyne, 1996).

Für die Abschätzung der zu erwartenden Belastung hat Leonhard Euler eine nach ihm benannte Formel für die Knickkraft  $F_K$  für den linear elastischen Bereich entwickelt (Glg. 2.1).

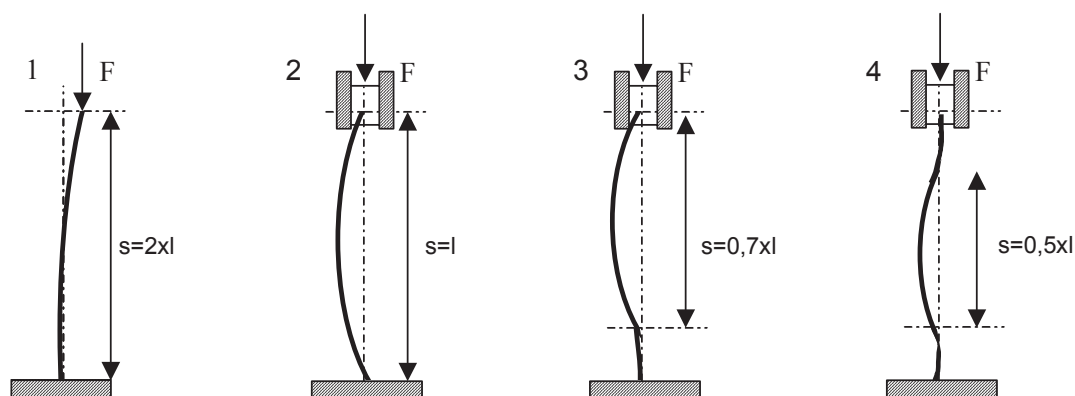
$$F_K = \frac{\pi^2 * E * I_{\min}}{s^2} \quad (2.1)$$

wobei  $E$  der Elastizitätsmodul,  $I_{\min}$  das kleinste axiale Flächenträgheitsmoment und  $s$  die freie Knicklänge ist. Die freie Knicklänge  $s$  wird je nach Grundbelastungsfall definiert (s. Abb. 2.2) (Steger et. al., 1993).

#### 2.3.1 Versagensmechanismen unter monotoner Druckbelastung

Das Versagen von druckbelasteten Verbunden wird durch Mikrobeulen der Fasern innerhalb der Matrix eingeleitet. Die Faser biegt sich und rotiert um die Längsachse. Durch die Faserdrehung aus der Belastungsebene kommt es schlussendlich durch eine lokale Schubinstabilität zu einem Faserbruch an zwei höchstbelasteten Punkten und es bildet sich eine Knickzone aus (s. Abb. 2.3). Auf die angrenzenden intakten Fasern wird die noch wirkende Last übertragen und es

kommt zu einer Spannungsüberhöhung. Wird die Last nicht zurückgenommen, findet unter einem vom Material abhängigen Schädigungswinkel der Rissfortschritt statt (Budiansky, 1983; Garland et al., 2001).



**Abb. 2.2:** Abbildung der vier Grundbelastungsfälle (Steger et. al, 1993)

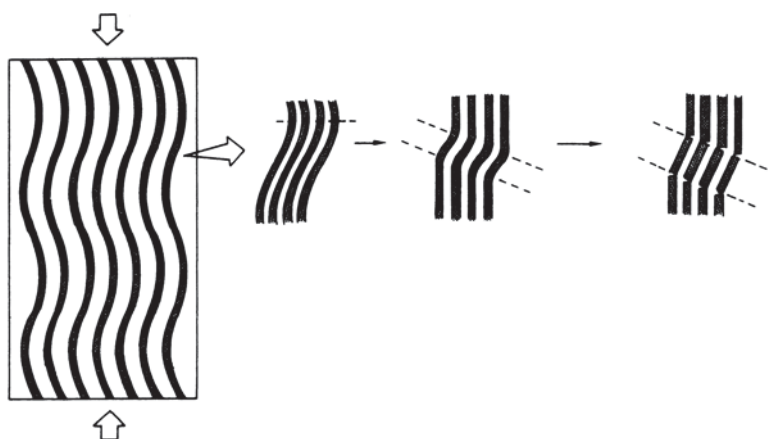
Belastungsfall 1  $s = 2 \times l$  einseitig eingespannt, ein Ende frei

Belastungsfall 2  $s = l$  beidseitig gelenkig geführt

Belastungsfall 3  $s = 0,7 \times l$  einseitig eingespannt, eine Seite gelenkig geführt

Belastungsfall 4  $s = 0,5 \times l$  beidseitig eingespannt

Der Matrix unterliegt bei Druckbeanspruchung parallel zur Faserrichtung die Aufgabe die Fasern zu stützen. Aufgrund dessen führt eine steife Matrix zu Faserbruch und zu einer hohen Druckfestigkeit, während Matrizen mit einer geringeren Steifigkeit zu Versagen unter Beulen neigen und eine geringe Druckfestigkeit aufweisen (Ehrenstein, 2006; Soutis et. al., 2000; Garland et al., 2001). Weiteres lässt sich die Druckfestigkeit durch den Faserverdrehwinkel und die Matrix-Schubfestigkeit beeinflussen (Hull und Clyne, 1996). Die Matrix wird vorwiegend auf Schub beansprucht und je größer die Matrixsteifigkeit ist, desto größer wird auch der Schubmodul  $G$ . Somit lässt sich die Druckfestigkeit nahezu proportional mit der Matrixsteifigkeit steigern. Jene Harze, die eine engere chemische Vernetzung erreichen sind dadurch auch hochmoduliger und vorteilhafter (Lang et. al, 1986; Schürmann, 2004; Ehrenstein, 2006).



**Abb. 2.3:** Mechanismus der Knickzonenformation infolge Schubinstabilität in einem in Faserrichtung belasteten Verbund (Ehrenstein, 2006).

### 2.3.2 Versagensmechanismen unter zyklischer Belastung

Ermüdung ist der Hauptversagensmechanismus für Bauteile unter zyklischer Belastung. Zyklische Belastungen verursachen im Material Schädigung, die durch ihre kumulative Wirkung zu einer Steifigkeitsabnahme oder zum vollständigen Versagen führen kann. Das Bruchverhalten von Faserverbundwerkstoffen kann durch mehrere Versagensmechanismen wie z.B. Matrixbruch, Faser-Matrix-Ablösung, Faserbruch, Delamination etc. beschrieben werden (Mao und Mahadevan, 2002).

Durch zyklische Beanspruchung von Bauteilen kann es zum Versagen unterhalb seiner Zug- bzw. Druckfestigkeiten kommen. Prinzipiell kann man zwischen 2 Versagensmechanismen von Kunststoffen unter dynamischer Belastung unterscheiden, nämlich mechanische Ermüdung und thermisches Versagen. Bei Beanspruchungen mit niedrigen Kräften und Frequenzen ist mechanisches Ermüdungsversagen relevant. Bei höheren Kräften und Frequenzen kommt es durch die hohe Energiedissipation und der geringen Wärmeleitfähigkeit der Kunststoffe zu einem stetigen Temperaturanstieg, der schlussendlich zum thermischen Versagen führt (Sauer und Richardson, 1980; Lang und Manson, 1987; Oberbach, 1987; Hertzberg und Manson, 1989; Altstädt, 1993).

CFK (kohlenstofffaserverstärkte Kunststoff)-Werkstoffe sind gegenüber Schwingbelastung weit weniger empfindlich als mechanisch vergleichbare andere



Werkstoffe. Sind jedoch etwaige Fehlstellen in CFK Werkstoffen vorhanden, so ist eine geringe Schadenstoleranz bemerkbar.

Bei der Herstellung von Bauteilen sind Defekte (z.B. Risse, Inhomogenitäten, Fehlstellen) nicht auszuschließen. An diesen Defekten kann es zu Rissinitiierung und in weiterer Folge zu Risswachstum im Bauteil kommen. An der Spitze des Risses bildet sich eine Spannungskonzentration aus. Wird eine kritische Spannungskonzentration an der Risspitze erreicht, so führt dies bei statischer Belastung zum Bruch des Bauteils. Bei zyklischer Last kann es auch bei Belastungen unterhalb der kritischen Spannungskonzentration zu einem stabilen Rissfortschritt kommen, der schlussendlich das Versagen des Bauteils einleitet. Dieser Effekt infolge stabilen Risswachstums lässt sich auf Ermüdung des Werkstoffes zurückführen (Hertzberg und Manson, 1980).

Die Ermüdungsbeanspruchung kann sich in zwei Versagensformen äußern. Findet die Ermüdung zwischen zwei Schichten statt, die in weiterer Folge zu Schichtdelaminationen führen, so spricht man von interlaminarer Ermüdung. Dies lässt sich mit der linear elastischen Bruchmechanik (LEBM) beschreiben, denn der Schadensverlauf ähnelt dem eines Einzelrissfortschritts. Die Annahme ist, dass sich ein Werkstoff bis zum Bruch makroskopisch elastisch verhält. Nur an der Risspitze treten lokalisierte plastische Verformungen in Form von plastischen Zonen auf (Heutling et. al., 1998; Trappe et. al., 2002; Woerdle, 2002). Dies tritt im Laminat nur unter Querkraftschubbeanspruchung oder infolge der Dehnungsunverträglichkeit der Einzelschichten an freien Rändern auf und hängt stark von der konstruktiven Bauteilgestaltung ab (Trappe et. al., 2002).

Andererseits gibt es die intralaminare Ermüdung von Faser, Matrix oder Faser-Matrix-Anbindung. Dies äußert sich in Laminaten mit unterschiedlicher Faserorientierung durch die Ausbildung statistisch verteilter Mikrorisse und kann mit kontinuumsmechanischen Ansätzen beschrieben werden. Diese Versagensform tritt infolge des Membranspannungszustandes der Einzelschicht auf und hängt wesentlich von der Werkstoffanstrengung ab (Trappe et al., 2001).

In einem Laminat treten nicht nur in Faserrichtung, sondern auch orthogonal dazu Quer-Zug-Druck und Schub Beanspruchung auf. Die Harzmatrix- und Faser-Matrix-Bindung werden auf Zwischenfaserbruchbeanspruchung belastet, was zu

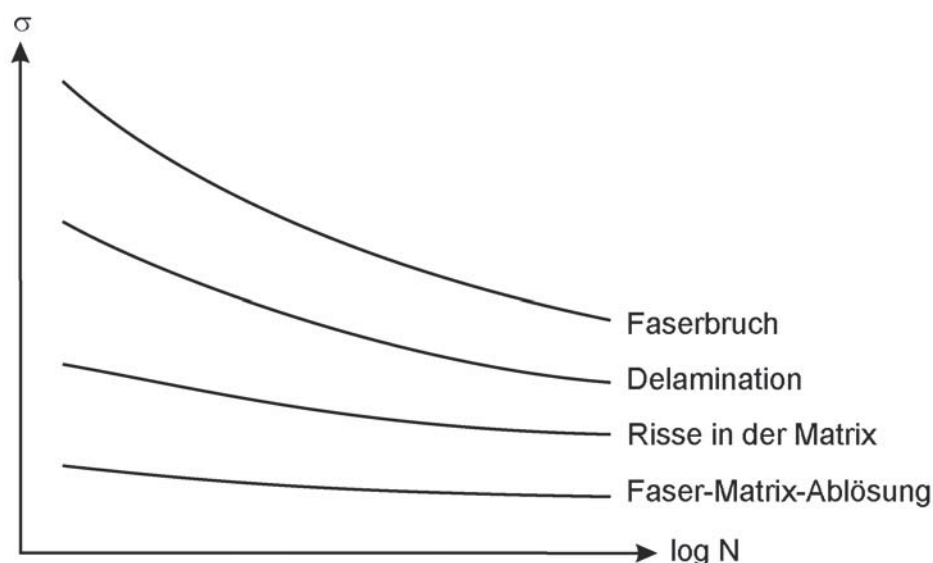
einer frühzeitigen Bildung von Mikrorissen mit zunehmender Lastwechselzahl führt. Diese Mikrorisse treten vermehrt in der Harzmatrix auf und führen zu einem Auflösen der Faser-Matrix-Bindung und Fasern mit geringer Festigkeit neigen zum Versagen. Somit steigt der Schädigungsgrad mit zunehmender Lastspielzahl bis zum endgültigen Versagen des Bauteils (Mao und Mahadevan, 2002, Trappe et. al., 2002).

## **2.4 Methoden zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens**

### **2.4.1 Wöhlerversuche**

Ein Prüfkörper wird einer zyklischen, meist sinusförmigen Beanspruchung mit konstantem Spannungsverhältnis zwischen Unterlast und Oberlast (R-Wert) ausgesetzt und die Zyklenzahl bis zum Versagen bestimmt. Für die Ermittlung der Kennwerte einer Wöhlerkurve werden mehrere Lasthorizonte geprüft.

Zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens eines Werkstoffes werden die verschiedenen Lastniveaus mit den zugehörigen Lastzyklen bis zum Versagen doppeltlogarithmisch aufgetragen und man erhält somit die sogenannte Wöhler-Kurve (s. Abb. 2.4). Für die Ermittlung der Wöhler-Kurven werden entweder die Mittelspannung oder das Spannungsverhältnis  $R$  konstant gehalten. Das Spannungsverhältnis lässt erkennen um welche Ermüdungsbelastung es sich handelt. Dabei weist ein  $R$ -Verhältnis von  $0 \leq R < 1$  auf zugschwellende,  $1 < R \leq \infty$  auf druckschwellende und  $-1 \leq R < 0$  auf wechselnde Belastung hin. Die in Abb. 2.4 dargestellten Verläufe zeigen den Zusammenhang von Belastung und Zykluszahl in Abhängigkeit der möglichen Schädigung im Material. Für Faserbruch sind höchste Belastungen notwendig, wobei Faser-Matrix-Ablösungen die geringsten Belastungen erfordern. In den mittleren Belastungsebenen treten Delaminationen im Laminat und Risse in der Matrix auf.



**Abb. 2.4:** Schematische Wöhlerkurve für verschiedene Ermüdungsversagensarten (Talreja, 2001, überarbeitet von Kitzmüller, 2007).

#### 2.4.2 Hysterese-Messverfahren

Wird ein Faserverbundwerkstoff mit Polymermatrix einer Belastung mit sinusförmigem Spannungsverlauf mit konstanter Amplitude im viskoelastischen Bereich ausgesetzt, bildet sich der Dehnungsverlauf ebenfalls sinusförmig aus. Aber aufgrund der Viskoelastizität des Werkstoffes kommt es einerseits zu einer Phasenverschiebung des Dehnungssignals und andererseits durch Kriechprozesse und Materialschädigung im Laufe der Belastung zu einer Zunahme der Dehnungsamplitude. Durch Auftragung von zeitlich zugeordneten Spannungs-Dehnungs-Paaren in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm erhält man daraus die sogenannten Hysteresen, die den Werkstoffzustand charakterisieren. Als Folge der Änderung der Dehnungsamplitude tritt eine Veränderung des Hystereseverlaufs bei dynamischen Versuchen auf, die mittels der Änderung der Steifigkeiten charakterisiert werden können (Lazan, 1968).

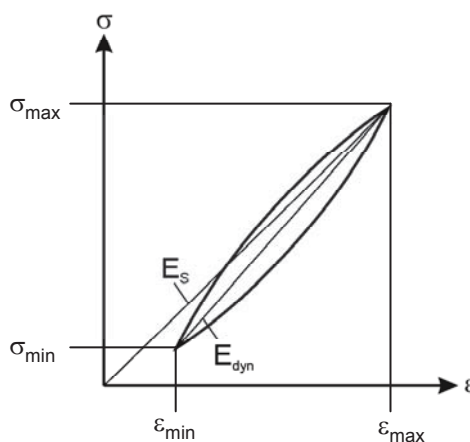
Die Lage der Hysteresiskurve wird anhand zweier Moduli beschrieben (Abb. 2.5). Diese zwei Moduli sind einerseits der Sekantenmodul  $E_s$  und andererseits der dynamische Modul  $E_{dyn}$ , die wie folgt berechnet werden können.

$$E_s = \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon_{\max}} \quad (2.2)$$

$$E_{\text{dyn}} = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \right| \quad (2.3)$$

wobei  $E_s$  der Sekantenmodul,  $E_{\text{dyn}}$  der dynamische Modul,  $\sigma_{\max}$  die Maximalspannung,  $\sigma_{\min}$  die Minimalspannung,  $\varepsilon_{\max}$  die Maximaldehnung und  $\varepsilon_{\min}$  die Minimaldehnung ist.

Der Sekantenmodul  $E_s$  ist ein Maß für die kumulierte Werkstoffreaktion bis zur ertragenen Zykluszahl. Er enthält neben dem akkumulierten Schädigungsanteil auch den viskoelastischen Kriechanteil. Der dynamische Modul  $E_{\text{dyn}}$  beschreibt die instantane Werkstoffreaktion als „single-cycle“-Effekt zur angegebenen Zykluszahl. Sein Abfall, der einer geringeren Steigung der Hysteresiskurve entspricht, kennzeichnet die Werkstoffschädigung, unter Vernachlässigung der geringfügig hysteretischen Prüfkörpererwärmung (Zahnt, 2003).



**Abb. 2.5:** Definition des Sekantenmoduls  $E_s$  und des dynamischen Moduls  $E_{\text{dyn}}$  im Zugschwellbereich (Zahnt, 2003).

Zur besseren Visualisierung kann ein relativer Sekantenmodul  $E_{s,\text{rel}}$  und ein relativer dynamischer Modul  $E_{\text{dyn},\text{rel}}$  nach Glg. 2.4 und 2.5 berechnet werden.

$$E_{\text{dyn},\text{rel}} = \frac{E_{\text{dyn}}(N)}{E_{\text{dyn},0}} \quad (2.4)$$

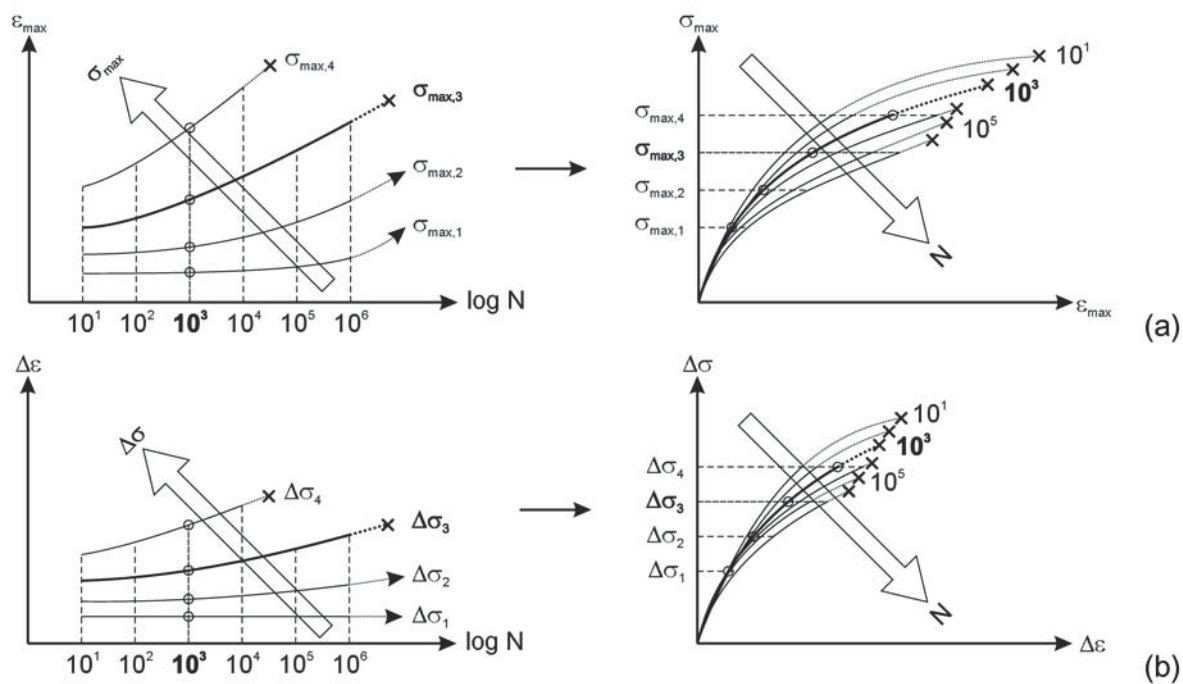
$$E_{s,rel} = \frac{E_s(N)}{E_{s,0}} \quad (2.5)$$

wobei  $E_{s,rel}$  der relative Sekantenmodul,  $E_s(N)$  der relative Sekantenmodul nach  $N$  Lastzyklen,  $E_{s,0}$  der relative Sekantenmodul nach dem ersten gemessenen Lastzyklus,  $E_{dyn,rel}$  der relative dynamische Modul,  $E_{dyn}(N)$  der relative dynamische Modul nach  $N$  Lastzyklen und  $E_{dyn,0}$  der relative dynamische Modul nach dem ersten gemessenen Lastzyklus ist.

### 2.4.3 Isozyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Eine neue Methode zur Auswertung von Hysteresemessungen stellen die sogenannten isozyklischen Spannungs-Dehnungs-Diagramme dar (Zahnt, 2003). Im isozyklischen  $\sigma_{max}-\varepsilon_{max}$ -Diagramm werden die Paare maximale Spannung und maximale Dehnung aufgetragen (s. Abb. 2.6a). Analog zum Sekantenmodul  $E_s$  beschreibt diese Auftragung die kumulierte Werkstoffreaktion bis zur angegebenen Zykluszahl. Das Diagramm enthält die Deformationsanteile durch viskoelastischen Effekte und durch akkumulierte Werkstoffschädigung.

Die Paare aus Spannungs- und Dehnungsschwingweite ergeben das isozyklische  $\Delta\sigma-\Delta\varepsilon$ -Diagramm (s. Abb. 2.6b). Ebenso wie der dynamische Modul beschreibt es die instantane Werkstoffreaktion zur angegebenen Zykluszahl und kennzeichnet die Werkstoffschädigung. Das  $\Delta\sigma-\Delta\varepsilon$ -Diagramm ist vorwiegend für das Festlegen von Schädigungsgrenzen von Interesse. Durch den Vergleich von beiden Auswertemethoden können Rückschlüsse auf kumuliert viskoelastische und Schädigungs-Effekte gezogen werden (Zahnt, 2003).



**Abb. 2.6:** Schematische Darstellung der Konstruktion isozyklischer  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramme anhand des Zugschwellbereichs (Zahnt, 2003):

- (a) isozyklisches  $\sigma_{max}$ - $\epsilon_{max}$ -Diagramm
- (b) isozyklisches  $\Delta\sigma$ - $\Delta\epsilon$ -Diagramm

### 3 EXPERIMENTELLES

#### 3.1 Werkstoffe und Testplattenherstellung

Die Testplattenherstellung erfolgte im „Resin Transfer Moulding“ (RTM)–Verfahren. Dabei wurden 8 Lagen trockenen Kohlenstofffasergewebes mit den zugehörigen Epoxidharzsystemen verarbeitet. Vor der Verarbeitung wurden die Gewebe mit unterschiedlichen Methoden kompaktiert. Ein Gewebe setzt sich aus Kett- und Schussfäden zusammen, wobei die Faserrichtung durch die Produktionsrichtung der Webmaschine vorgegeben wird. Jene in Längsrichtung parallel eingespannten Faserbündel sind die Kettfäden. Die in Querrichtung eingebrachten Faserbündel sind die Schussfäden (Woerndle, 2002).

Von der Fa. Hexcel Fabrics (Villeurbanne Cedex, F) (s. Tabelle 3.1) kamen ein Kohlenstofffasergewebe HTA-5H-6k-370 und der Bindergewebetyp G0926 D1304 INJ E01 2F<sup>TM</sup>, welches sich vom nicht kompaktierten Gewebe nur durch das zusätzlich aufgebrachte Bindersystem E01 unterscheidet, zur Anwendung. Bei einem Laminattyp erfolgte die Kompaktierung des Kohlenstofffasergewebes durch Vernähen, wobei jeweils 2 Geweblagen vernäht wurden. Als Nähfaden kam das Polyestergergarn LT220 der Fa. Gütermann (Gutach, D) zum Einsatz. Von der Firma Cytec Engineered Materials (Phoenix, USA), wurde das neuentwickelte, mit thermoplastischen Fasern verwebte PRIFORM<sup>TM</sup>–Gewebe zur Verfügung gestellt. Mit Ausnahme des PRIFORM<sup>TM</sup>–Gewebes wurden die Faserhalbzeuge mit dem luftfahrtzertifizierten Epoxidharz RTM6<sup>TM</sup> der Fa. Hexcel Composites (Dagneux, F) injiziert. Das PRIFORM<sup>TM</sup>–Gewebe wurde mit dem zugehörigen Epoxidharz PRIFORM<sup>TM</sup> 977-2 der Fa. Cytec Engineered Materials (Östringen, D) imprägniert. In Tabelle 3.2 sind die untersuchten Formulierungen mit ihren in der Arbeit verwendeten Kurzbezeichnungen gegenüber gestellt.

**Tabelle 3.1:** Bedeutung der Gewebebezeichnung.

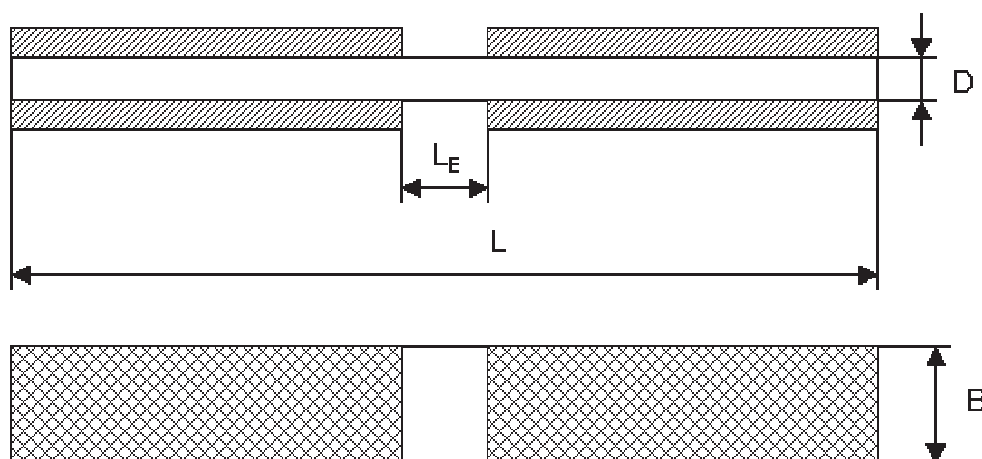
Kurzform	Bedeutung
HTA	Bezeichnung der Kohlenstofffaser (Fa. Tenax GmbH, Oberbruch, D)
5H	Webstil (5 Harness)
6K	Anzahl der Kohlenstofffaserfilamente (6.000)
370	Faserflächengewicht <i>FAW</i> (370 g/m <sup>2</sup> )

**Tabelle 3.2:** Kurzbezeichnungen der verwendeten Materialien.

Faserhalbzeug	Harz	Kompaktierung	Kurzbezeichnung
HTA-5H-6k-370	RTM6	keine	INJW
HTA-5H-6k-370	RTM6	Binder E01	INJBC1
HTA-5H-6k-370	RTM6	4x2 Gewebelagen vernäht	INJST 4x2
Priform	Priform	keine	PRIW
HTA-5H-6k-370	977-20		

### 3.2 Prüfkörper

Für die Bestimmung der statischen Druckfestigkeit wurden entsprechend der Norm DIN EN 2850 rechteckige Probekörper mit Aufleimern in einer Druckvorrichtung verwendet (s. Abb. 3.1). Die Probekörperlänge  $L$  betrug 80 mm und die Breite 10 mm. Die freie Einspannlänge  $L_E$  betrug 5 mm.



**Abb. 3.1:** Darstellung eines Ermüdungsprüfkörpers nach DIN EN 2850 zur Bestimmung der Druckfestigkeit mit Aufleimern, wobei  $B$  die Breite,  $D$  die Dicke,  $L$  die Länge und  $L_E$  die freie Einspannlänge ist.

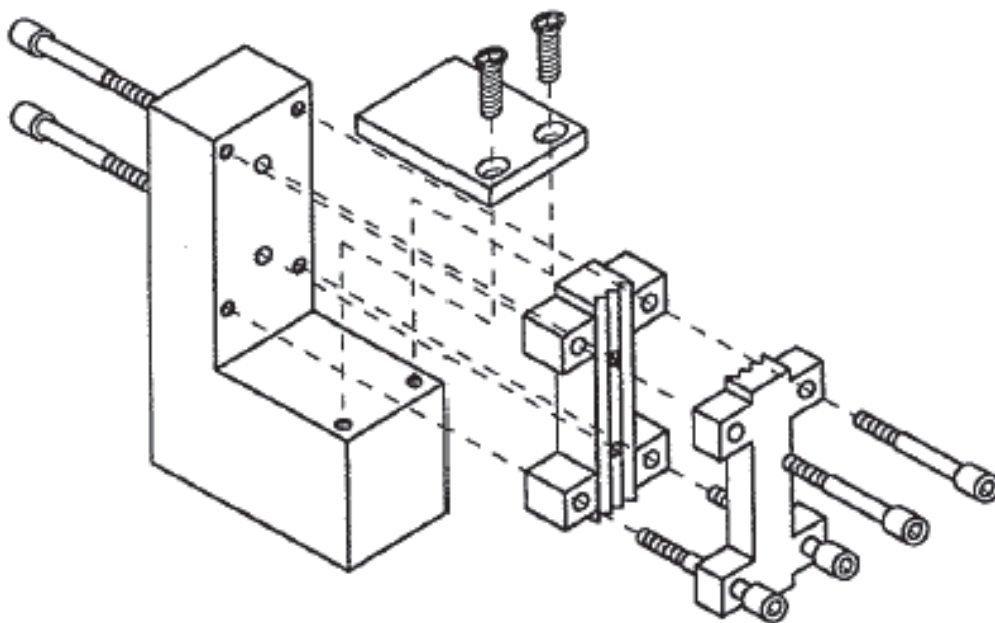
Für die Ermüdungsversuche war es notwendig die Probekörperabmessungen wie folgt an die Anforderungen der Belastung anzupassen. Die Probekörperlänge  $L$  wurde auf 150 mm, die Breite  $B$  auf 25 mm und die Dicke  $D$  auf 3 mm festgelegt. Aus den Druckfestigkeitswerten konnte mit Hilfe der Euler Knickgleichung die freie Einspannlänge berechnet werden. Diese wurde auf 30 mm begrenzt.



### 3.3 Versuchsdurchführung

#### 3.3.1 Bestimmung der Druckfestigkeit

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit wurden die Druckversuche auf einer Universalprüfmaschine der Type Instron 4505 (Fa. Instron Corporation, High Wycombe, UK) nach DIN EN 2850 (1998) durchgeführt. Zur Stabilisierung und Fixierung des Prüfkörpers (Knickstütze) wurde die in der Norm vorgeschlagene Einspannvorrichtung verwendet (s. Abb. 3.2).



**Abb. 3.2:** Darstellung der Einspannvorrichtung nach DIN EN 2850.

Die Druckfestigkeit  $\sigma_{DB}$  wurde mittels nachfolgender Gleichung ermittelt:

$$\sigma_{DB} = \frac{P_R}{B \cdot D} \quad (3.1)$$

wobei  $\sigma_{DB}$  die Druckfestigkeit,  $P_R$  die Bruchkraft,  $B$  die Breite und  $D$  die Dicke des Probekörpers ist.

### 3.3.2 Bestimmung des Ermüdungsverhaltens

#### 3.3.2.1 Hysteresemessungen

Die Proben wurden in Ermüdungsversuchen einer druck-schwellenden-Belastung entweder bis zum Versagen oder bis maximal  $10^6$  Lastwechsel ausgesetzt. Bei jenen Probekörpern, die eine maximale Lastwechselzahl von  $10^6$  erreichten, wurde anschließend die Restdruckfestigkeit  $\sigma_{DB,Rest}$  bestimmt. Für die Ermüdungsversuche wurden vier Belastungsstufen gewählt. Diese entsprachen für die Materialien INJW, INJBC und INJST 4x2 jeweils 35%, 50%, 55% und 60% der statischen Druckfestigkeit. Für PRIW ergaben sich bei Vorversuchen höhere Zykluswerte als bei den drei restlichen Materialsystemen, deshalb wurde hier ein höheres Belastungsschema gewählt. Die Belastungsstufen dafür waren 35%, 50%, 60% und 70% der statischen Druckfestigkeit. Die Ermüdungsversuche wurden auf einer servohydraulischen, voll digitalisierten Prüfmaschine der Type MTS 810 (Fa. MTS Systems GmbH, Berlin, D) bei einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt. Das Spannungsverhältnis wurde auf  $R = 10$  (Verhältnis von Druck-Unterlast zu Druck-Oberlast) festgelegt.

Die Datenaufnahme erfolgte mit der 790.20 Fatigue Test Application Software (Fa. MTS Systems GmbH, Berlin, D). Hierbei wurden vom Programm Hysteresen nach logarithmischen Intervallen mit einer Speicherrate von 60 Datenpunkten pro Kurve gespeichert. Aus diesen Kurven konnten jene für die Berechnung des Sekantenmodul  $E_s$  und des dynamischen Modul  $E_{dyn}$  notwendigen Parameter nach den folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$E_s = \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon_{\max}} \quad (3.2)$$

$$E_{dyn} = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}} \right| = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.3)$$

wobei  $E_s$  der Sekantenmodul,  $E_{dyn}$  der dynamische Modul,  $\sigma_{\max}$  die Maximalspannung,  $\sigma_{\min}$  die Minimalspannung,  $\varepsilon_{\max}$  die Maximaldehnung,  $\varepsilon_{\min}$  die Minimaldehnung,  $\Delta\sigma$  die Spannungsschwingweite,  $\Delta\varepsilon$  die Dehnungsschwingweite ist.

### 3.3.3 Datenaufzeichnung der Dehnungswerte

Um eine mechanische Charakterisierung eines Werkstoffes auf Ermüdung durchführen zu können, ist es notwendig die Materialantwort auf seine Belastung zu messen. Dies wird durch Aufzeichnung der Dehnung, der Kraft und der zugehörigen Zykluszahl erreicht. Die aufgezeichneten Daten werden mittels Berechnung zu Materialkennwerten z.B. Sekantenmodul, dynamischer Modul umgewandelt. Um eine hohe Reproduzierbarkeit zu erhalten, ist eine hohe Genauigkeit in der Datenaufnahme erforderlich. Im Zuge der durchgeführten Druckprüfungen boten sich nachfolgende Messinstrumente zur Aufzeichnung der Dehnungen an.

Einfachste und sehr gut reproduzierbare Variante ist die Anwendung eines Extensometers. Dieses wird am Umfang des Probekörpers mittels Spannhilfen befestigt. Die direkte Befestigung am Probekörper ermöglicht eine exakte Dehnungsaufnahme. Hierfür ist eine Probekörperlänge, die ungefähr dem zweifachen der Extensometerabmaße entspricht, von Nöten. Für die Verwendung bei Druckprüfungen scheidet diese Variante daher aufgrund der begrenzten freien Messlänge aus. Im Zugversuch mit ähnlichen Laminaten hat sich zudem gezeigt, dass aufgrund von oberflächlichen Delaminationen es zum Rutschen des Extensometers kommen kann und somit die gemessenen Dehnungswerte unbrauchbar werden (Painold, 2003).

Eine weitere Möglichkeit der direkten Dehnungsaufnahme am Probekörper kann durch Dehnmessstreifen (DMS) bewerkstelligt werden. Der DMS wird durch eine Verklebung am Probekörper befestigt. Damit ist eine präzise Dehnungsaufnahme gegeben. Als einschränkender Punkt hat sich aber ergeben, dass unter zyklischer Belastung ein Ablösen des DMS von der Prüfkörperoberfläche möglich ist. Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch das Auftreten von oberflächlichen Delaminationen, wodurch eine fasrige Oberfläche mit scharfen Kanten erzeugt wird und eine Störung oder völliger Ausfall des DMS möglich und eine Datenaufnahme nicht mehr möglich ist.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung der Kolbendaten des in der Maschine eingebauten induktiven Wegaufnehmers („Linear Variable Differential

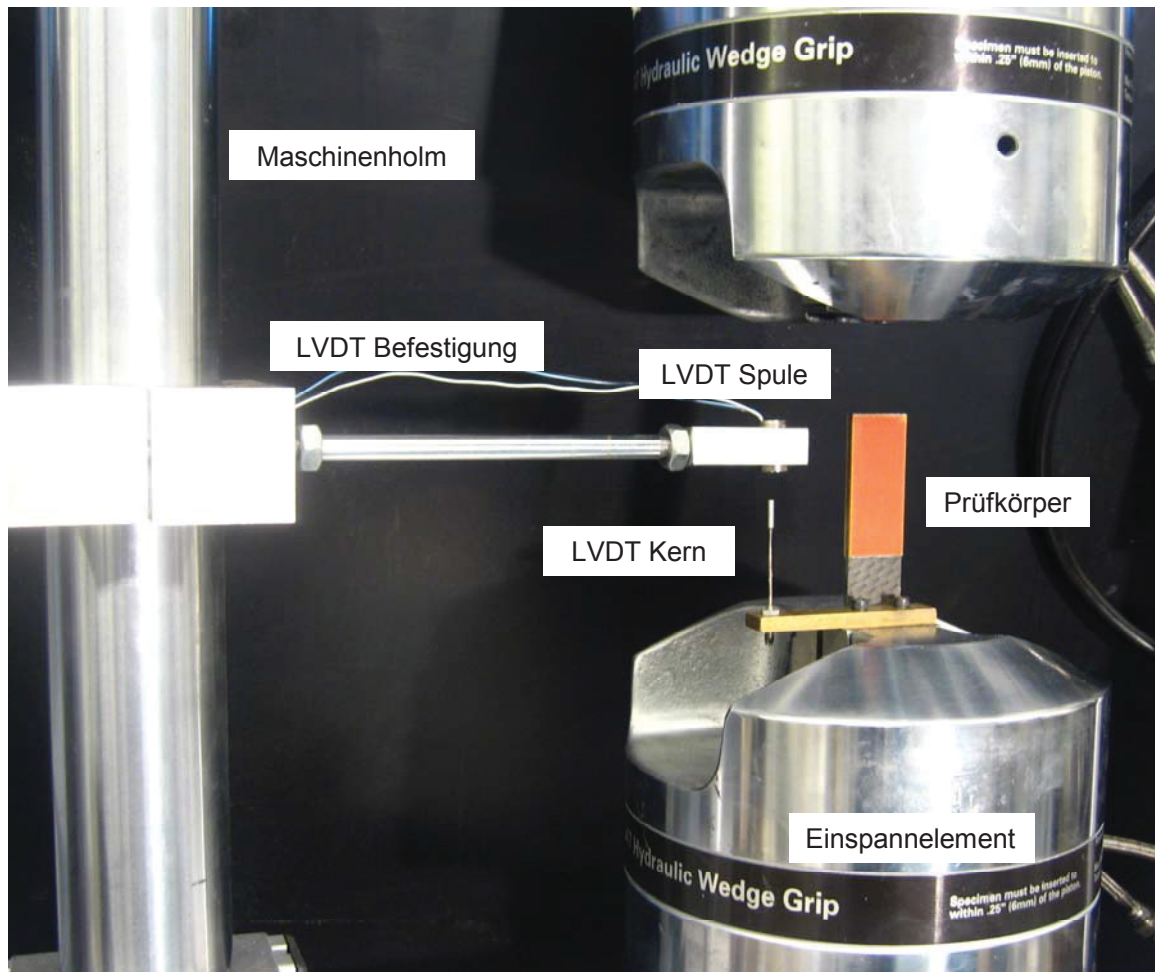
Transducer“). Untersuchungen von Painold (Painold, 2003) haben jedoch gezeigt, dass sich der Einfluss der Maschinennachgiebigkeit in der Messung widerspiegelt, was sich in erniedrigten Moduli äußert.

Aufgrund der Einschränkungen der oben beschriebenen Methoden wurden in dieser Arbeit zwei zusätzliche Messaufbauten erprobt, um das Dehnungsverhalten von Composites unter Druckbeanspruchung zu erfassen.

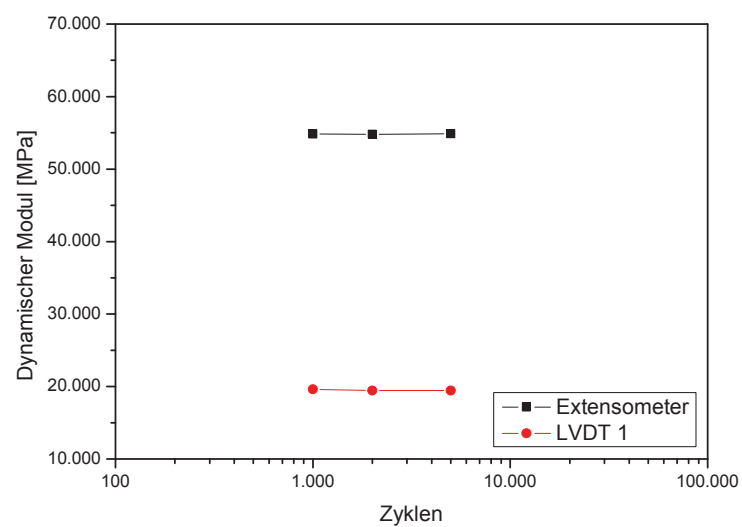
Für den ersten Messaufbau (s. Abb. 3.5) wurde ein LVDT, welches extern befestigt wurde, gewählt. Zum Einsatz kam deshalb ein induktiver Wegaufnehmer der Type W1 EL/0 (Fa. HBM, Darmstadt, D) der sich durch hohe Robustheit und Wartungsfreiheit auszeichnet. Als Verstärker wurde ein Spider 8 (Fa. HBM, Darmstadt, D) gewählt. Die gemessenen Werte wurden in die Software Catman Professional (Fa. HBM, Wien, A) eingelesen und gespeichert.

Der Kern des LVDT wurde direkt an der Einspannbacke Type MTS 647 Hydraulic Wedge Grip (Fa. MTS Systems GmbH, Berlin, D) montiert. Um einen Vergleich zwischen LVDT und einem Extensometer durchführen zu können, wurde ein Versuch mit einem Prüfkörper mit verlängerter Einspannlänge durchgeführt. Dieser Versuch wurde mit 10 Hz Prüffrequenz und gemäß der verlängerten Einspannlänge angepassten Last, um Euler Knickung zu vermeiden, durchgeführt. Für die Spulenbefestigung wurde eine Befestigungsklemme gefertigt, die mittels einer Verlängerung an den Holmen montiert wurde. Trotz Ausnützung der Leichtbaueigenschaft von Aluminium, war es nicht möglich die Schwingungen, die sich aufgrund der Messfrequenz von 10 Hz in der Prüfmaschine auf die Haltearme übertragen, zu vermeiden. Durch die Schwingung des Haltearmes konnte daher eine genaue Messaufzeichnung nicht durchgeführt werden.

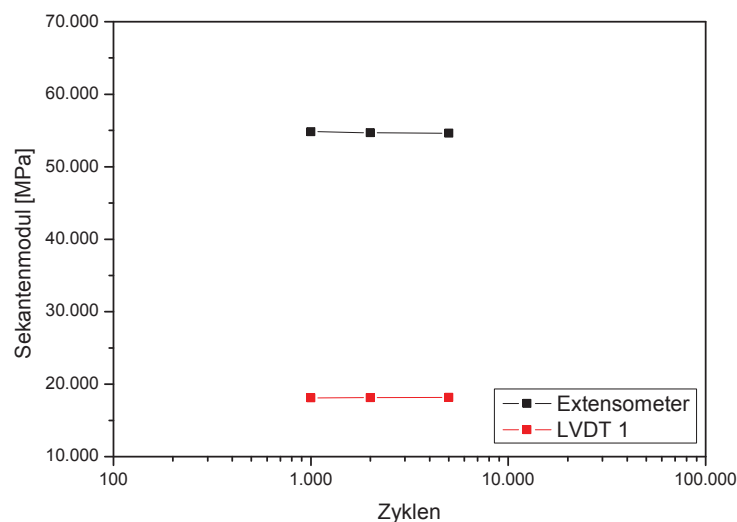
Ein weiterer Nachteil dieses Aufbaus hat sich durch die Kopplung des LVDT zur Maschine erwiesen. Durch die zu geringe Maschinensteifigkeit werden Verformungen der Maschine mitaufgezeichnet, was sich in der Auswertung in Form niedrigerer Moduli bemerkbar macht (Abb. 3.6 und Abb. 3.7).



**Abb. 3.5:** Erster Prüfaufbau mit offenem Einspannelement und Probekörper mit Aufleimer.



**Abb. 3.6:** Verlauf des dynamischen Moduls gemessen mit Extensometer und LVDT (erster Messaufbau).



**Abb. 3.7:** Verlauf des Sekantenmoduls gemessen mit Extensometer und LVDT (erster Messaufbau).

Eine weitere Versteifung des Haltearmes hätte den Aufbau nur unnötig erschwert und die dadurch erzielbare Genauigkeit wäre nicht hoch genug gewesen. Bei dem zweiten Messaufbau (s. Abb. 3.8) wurden daher die Halterungen des Kerns und der Spule direkt an den Einspannelementen befestigt. Für einen Vergleich zwischen dem zweiten Messaufbau und dem Extensometer wurde wie im ersten Messaufbau ein Prüfkörper mit verlängerter Einspannlänge bei 10 Hz Prüffrequenz getestet. Mit diesem Messaufbau wurde eine Verbesserung in der Genauigkeit der Messaufnahme erzielt (s. Abb. 3.9 und 3.10), jedoch ist die Genauigkeit einer direkten Messung am Prüfkörper nicht erreicht worden. Eine exakte Dehnungsmessung ist demnach nur möglich, wenn die Dehnungen direkt am Prüfkörper gemessen werden. Aufgrund der gleichlaufenden Verläufe von Extensometer- und Kolbenmessung ist es aber möglich mit Hilfe eines Kalibrierfaktors die Messergebnisse der Kolbenmessung so zu korrigieren, dass die Maschinennachgiebigkeit keinen Einfluss mehr auf die Modulwerte hat. Der Kalibrierfaktor wurde mit einem Extensometer der Type MTS Model 632.11-20 (Fa. MTS Systems GmbH, D) und einem Prüfkörper mit vergrößerter Einspannlänge ermittelt. Der Kalibrierfaktor wurde mit 2,2 festgelegt.

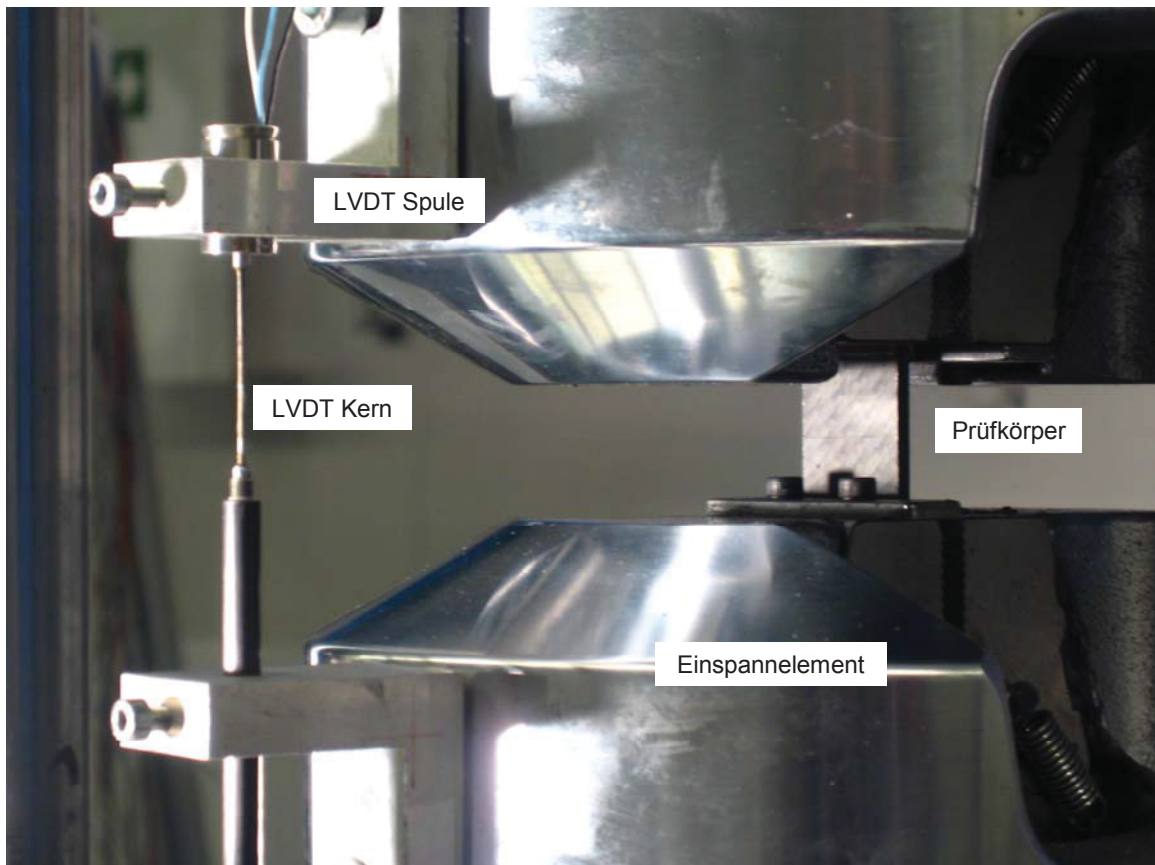


Abb. 3.8: Zweiten Messaufbau mit eingespanntem Prüfkörper.

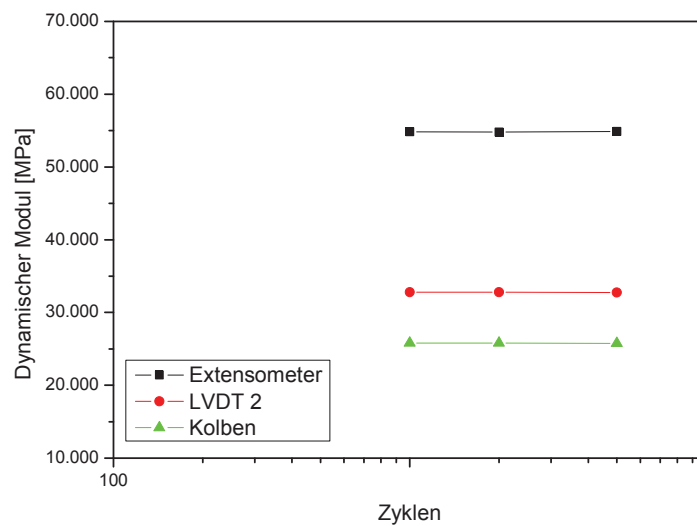
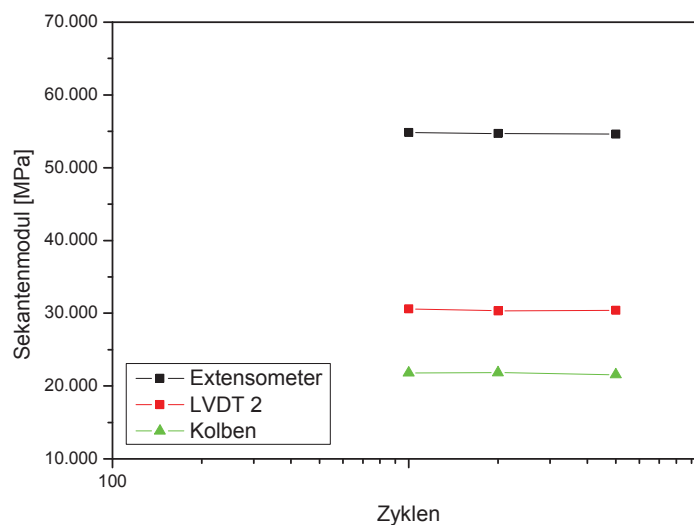


Abb. 3.9: Verlauf des dynamischen Moduls gemessen mit Extensometer und LVDT (zweiter Messaufbau).



**Abb. 3.10:** Verlauf des Sekantenmoduls gemessen mit Extensometer und LVDT (zweiter Messaufbau).

### 3.4 Normalisierung von Testergebnissen

Die bei den Versuchen erzielten Werte müssen auf den im Verbund enthaltenen Faservolumengehalt normiert werden. Dazu wird die Mischungsregel verwendet. Die Festigkeit und Steifigkeit eines Verbundes in Richtung der Verstärkungsfasern sind durch die faserdominierten Eigenschaften gegeben und variieren linear mit dem Faservolumengehalt. Damit ergibt sich die Möglichkeit einzelne Messergebnisse von Materialformulierungen mit unterschiedlichen Faservolumengehalt miteinander vergleichen zu können.

Allgemein kann der normalisierte Wert folgendermaßen ermittelt werden:

$$\text{normalisierter Wert} = \text{gemessener Wert} \cdot \frac{V_{F,\text{normalisiert}}}{V_{F,\text{Prüfkörper}}} \quad (3.3)$$

wobei  $V_{F,\text{normalisiert}}$  der normalisierte (selbst definierte) und  $V_{F,\text{Prüfkörper}}$  der gemessene Faservolumengehalt ist. Eine detaillierte Herleitung findet sich in Painold (Painold, 2003).



## 4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

### 4.1 Quasi-statische Druckeigenschaften

Die Bestimmung der Druckfestigkeit wurde entsprechend Abschnitt 3.4.1 durchgeführt. Für die vier Materialsysteme wurden jeweils 5 Probekörper geprüft (s. Abb. 3.1).

In Tabelle 4.1 sind die Festigkeiten der verschiedenen Materialien gegenübergestellt. Es hat sich gezeigt, dass die Formulierung INJW die höchste Festigkeit, aber gleichzeitig auch die größte Streuung aufwies. Bei INJW werden die Gewebelagen einfach aufeinander abgelegt und dadurch können leichte Unterschiede in den Ausrichtungen entstanden sein, was die größere Streuung zur Folge haben könnte. Das genähte Material INJST 4x2 wies die niedrigste Festigkeit auf. Es liegt nahe, dass durch das Vernähen der Verbund geschädigt wurde und die Festigkeiten deshalb erniedrigt sind. Das kompaktierte INJBC und das nicht kompaktierte PRIW erreichten dieselben Festigkeitswerte. Bei dem Materialsystem PRIW dürfte sich durch das Verschmelzen der Thermoplastfasern eine gewisse Stabilität in den verschiedenen Gewebelagen ausgebildet haben und weist möglicherweise dadurch eine geringere Streuung auf.

**Tabelle 4.1:** Druckfestigkeiten der vier gewählten Materialsysteme.

Material-system	$\sigma_{DB}$ [MPa]
INJW	-659 ± 124
INJST 4x2	-429 ± 91
INJBC	-518 ± 93
PRIW	-518 ± 54

### 4.2 Druck-Ermüdungsverhalten

#### 4.2.1 Wöhlerversuche

Wöhlerversuche werden für die Beschreibung des Ermüdungsverhalten von Faserverbundwerkstoffen am häufigsten eingesetzt. Kriterium für das Ermüdungsverhalten stellt das totale Versagen des Prüfkörpers, also der Bruch

dar (Ehrenstein, 2006). In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 4.1 bis Abb. 4.4) sind die Wöhlerdiagramme der getesteten Material zu sehen. Für die Bestimmung des Ermüdungsverhaltens wurden vier Laststufen entsprechend 30%, 50%, 55% und 60% für die Materialsysteme INJW, INJBC und INJST 4x2 gewählt. Bei Vorversuchen wurde für PRIW ein verbessertes Ermüdungsverhalten beobachtet, weshalb auch die Laststufen entsprechend 30%, 50%, 60% und 70% gewählt wurden. Für diese Versuche wurde ein Abbruchkriterium von  $10^6$  Lastwechsel festgelegt. Bei jenen Prüfkörpern welche die geforderten Lastwechsel ohne Bruch überstanden, wurde anschließend ein quasi-statischer Druckversuch zur Bestimmung der Restdruckfestigkeit durchgeführt. Die Messung der Restdruckfestigkeit (s. Tabelle. 4.3) wurde auf der Prüfmaschine Type MTS 810 durchgeführt. Jene Prüfkörper, welche die maximale Lastwechselzahl ( $10^6$ ) absolvierten, sind mit einem Pfeil und der Anzahl der Prüfkörper gekennzeichnet. Bei allen Materialsystemen wurden pro Laststufe zwei Prüfkörper getestet. Die Wahl der Lastebenen war nicht auf die Auswertemethodik von Wöhlerkurven sondern auf die Generierung der später dargestellten isozyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven optimiert. Daher sind die Wöhlerkurven durch Durchläufer geprägt und es fehlen Datenpunkte mit kurzen Laufzeiten für eine genaue Analyse und Interpretation der Daten. Entsprechend des Abfalls der quasi-statischen Druckfestigkeit des vernähten Systems dürfte auch dessen absolute Druck-Ermüdungsfestigkeit reduziert sein.

In Tabelle 4.3 sind von den getesteten vier Materialsystemen die Durchläufer mit dazugehöriger mittlerer Restdruckfestigkeit bzw. bei vorzeitigem Versagen die maximale Lastwechselzahl bis zum Versagen angegeben. Die Restdruckfestigkeit der Durchläufer lag für alle Formulierungen im Bereich der Standardabweichungen der quasi-statischen Tests und es lagen keine Hinweise auf Materialschädigung in diesen Lastniveaus vor.

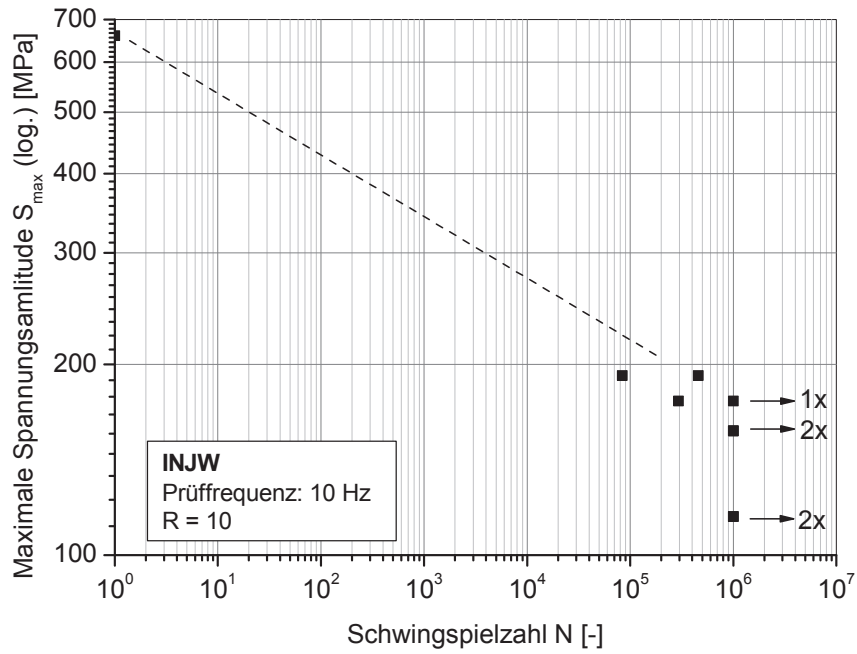


Abb. 4.1: Ermüdungsdaten für das Materialsystem INJW.

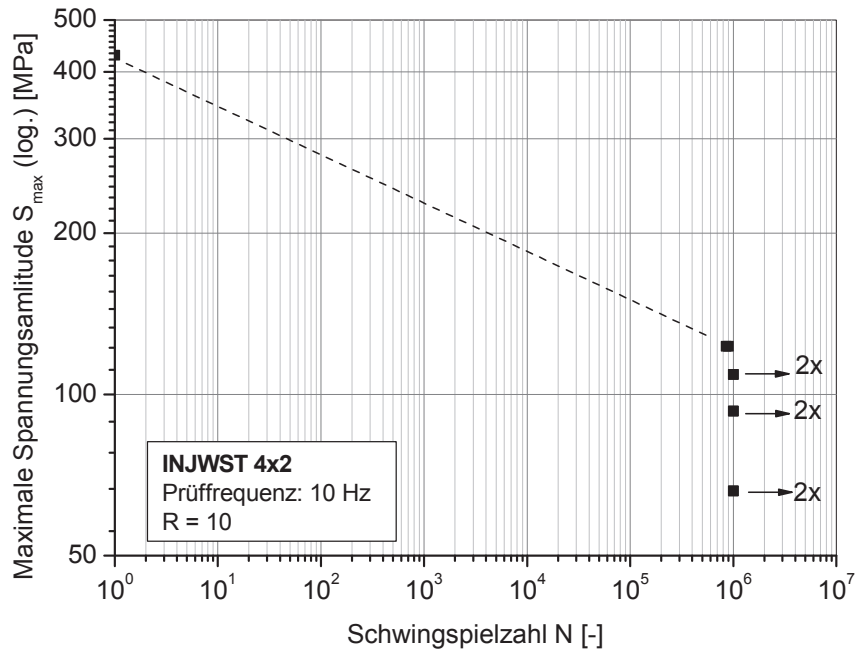


Abb. 4.2: Ermüdungsdaten für das Materialsystem INJWST 4x2.

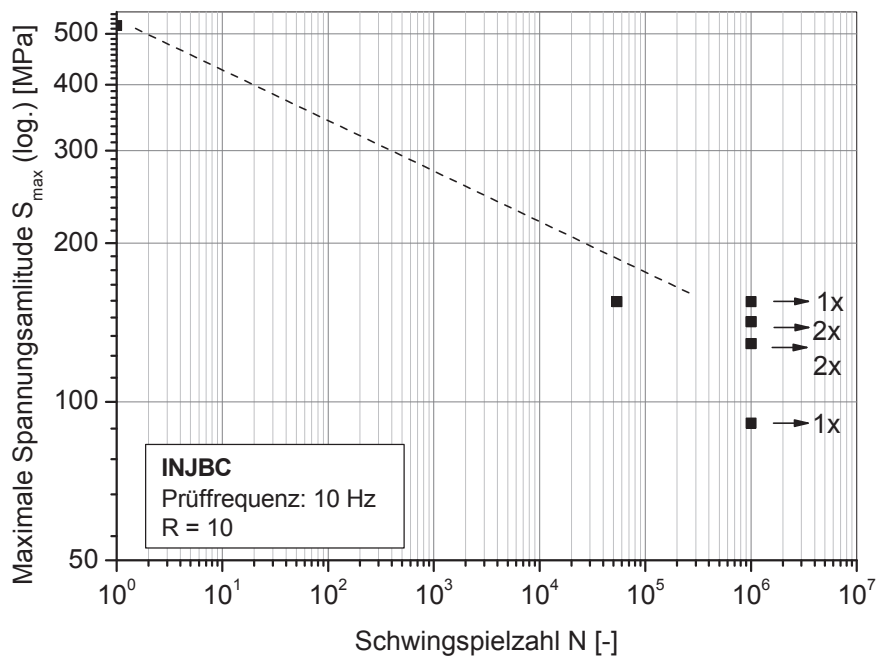


Abb. 4.3: Ermüdungsdaten für das Materialsystem INJBC.

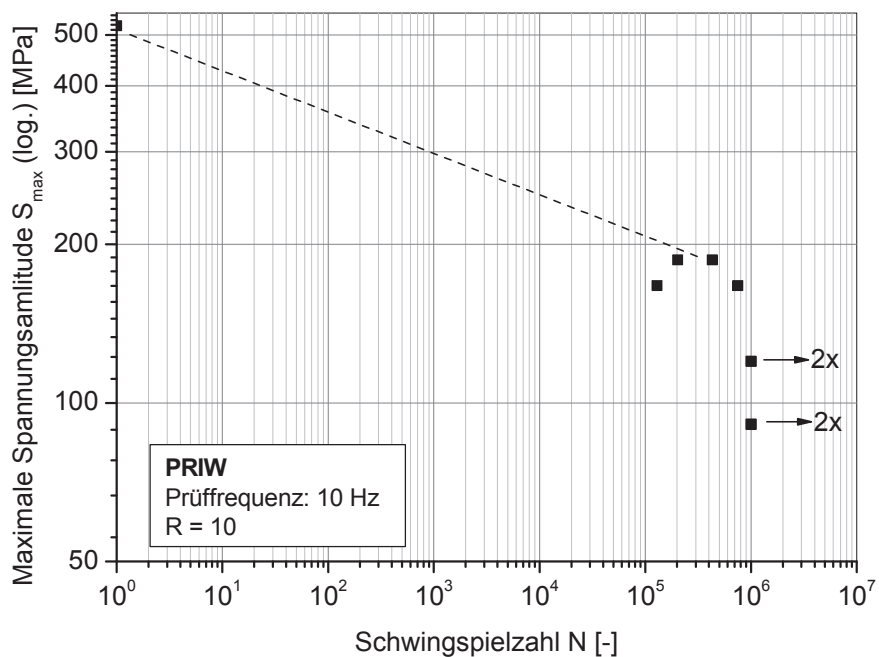


Abb. 4.4: Ermüdungsdaten für das Materialsystem PRIW.

**Tabelle 4.3:** Restdruckfestigkeiten nach vollendeter Zykluszahl von  $10^6$  bzw. Zykluszahl bis zum Bruch.

Laststufen	INJW	INJBC	INJST 4x2	Laststufen	PRIW
<b>35% von <math>\sigma_D</math></b> <b>[MPa]</b>	$> 10^6$ -545	$> 10^6$ -510	$> 10^6$ -442	<b>35% von <math>\sigma_D</math></b> <b>[MPa]</b>	$> 10^6$ -560
<b>50% von <math>\sigma_D</math></b> <b>[MPa]</b>	$> 10^6$ -522	$> 10^6$ -501	$> 10^6$ -410	<b>50% von <math>\sigma_D</math></b> <b>[MPa]</b>	$> 10^6$ -534
<b>55% von <math>\sigma_D</math></b> <b>[MPa]</b>	$> 10^6$ -568	$> 10^6$ -572	$> 10^6$ -462	<b>70% von <math>\sigma_D</math></b> <b>[MPa]</b>	761.056 -
<b>60% von <math>\sigma_D</math></b> <b>[MPa]</b>	459.296 -	$> 10^6$ -596	976.800 -	<b>80% von <math>\sigma_D</math></b> <b>[MPa]</b>	430.496 -

#### 4.2.2 Modulauswertung

Die Modulauswertung wurde wie in Abschnitt 2.4.2 beschrieben durchgeführt. Es wurden vier Laststufen der quasi-statischen Druckfestigkeit für die Ermüdungsversuche gewählt. Um die Modulauswertung durchführen zu können, wurden die kalibrierten Werte der Kolbenmessung benutzt.

In den Abb. 4.5 bis 4.15 sind die Verläufe des dynamischen und des Sekantenmoduls zu sehen, wobei die relativen Werte aufgetragen wurden. Generell ist bei allen Materialsystemen derselbe Verlauf zu sehen. Dabei lässt sich durch den relativ starken Abfall des Sekantenmoduls bei konstantem dynamischen Modul erkennen, dass viskoelastisches Kriechen vorherrscht.

In Abb. 4.5, der Darstellung des dynamischen Moduls, zeigt sich für INJW ein konstanter Verlauf bei den drei Lastniveau 30%, 50% und 55% der quasi-statischen Druckfestigkeit. Erst bei 60% zeigt sich eine Materialschädigung in Form eines Abfalls im Verlauf, was auf das frühzeitige Versagen des Prüfkörpers hinweist. Auch im Materialsystem PRIW zeichnete sich ein Versagen des Prüfkörpers bei höheren Lastniveaus durch einen Abfall des dynamischen E-Moduls ab. Die beiden anderen Systeme weisen im untersuchten Lastniveau keine Anzeichen von Materialschädigung auf.

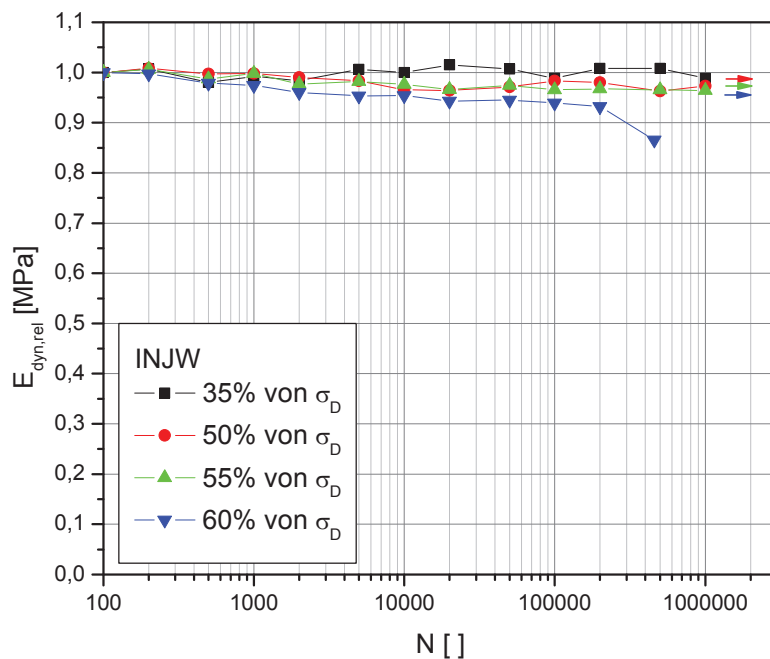


Abb. 4.5: Graphische Darstellung des relativen dynamischen Moduls für das Materialsystem INJW.

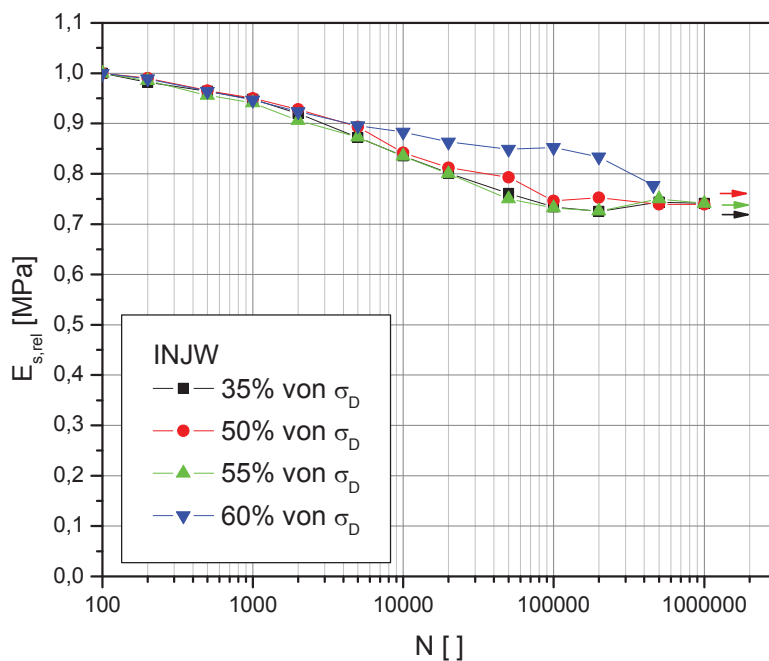


Abb. 4.6: Graphische Darstellung des relativen Sekanten-Moduls für das Materialsystem INJW.

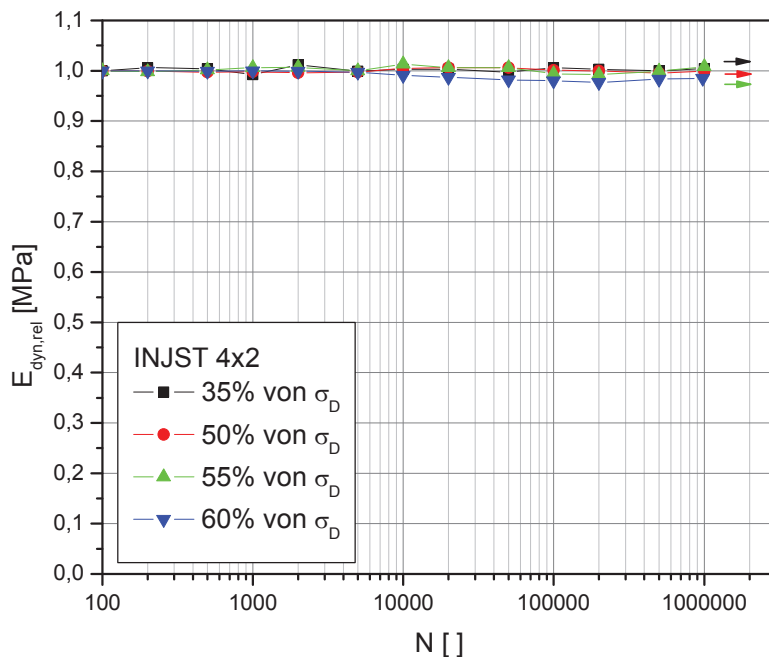


Abb. 4.7: Graphische Darstellung des relativen dynamischen Moduls für das Materialsystem INJST 4x2.

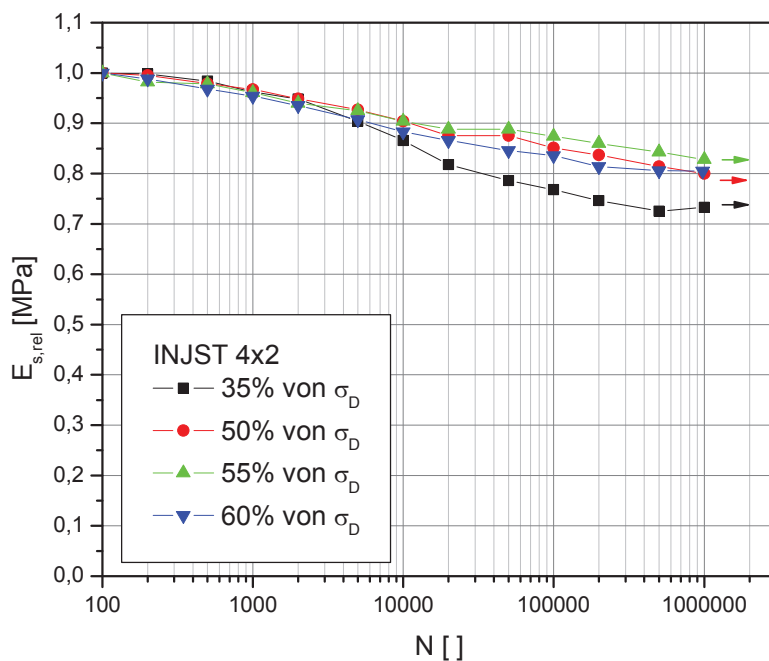
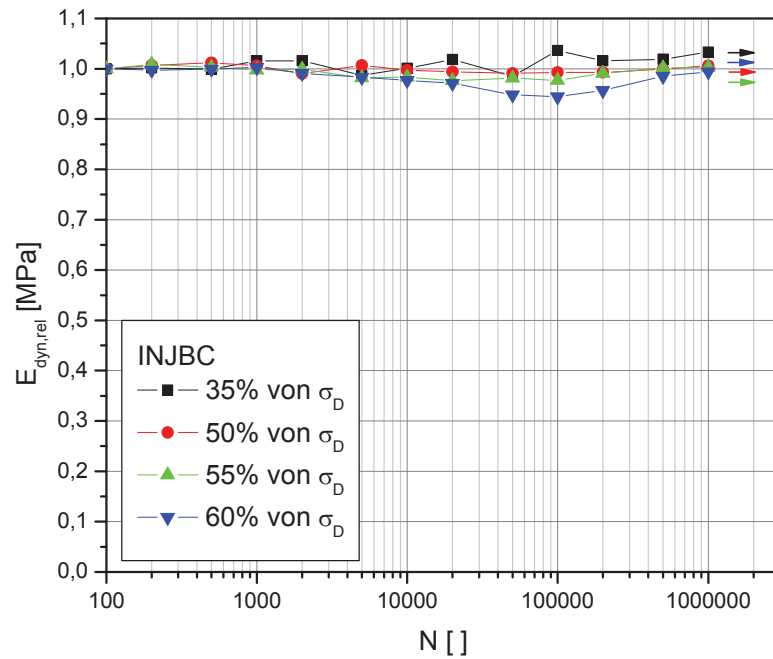
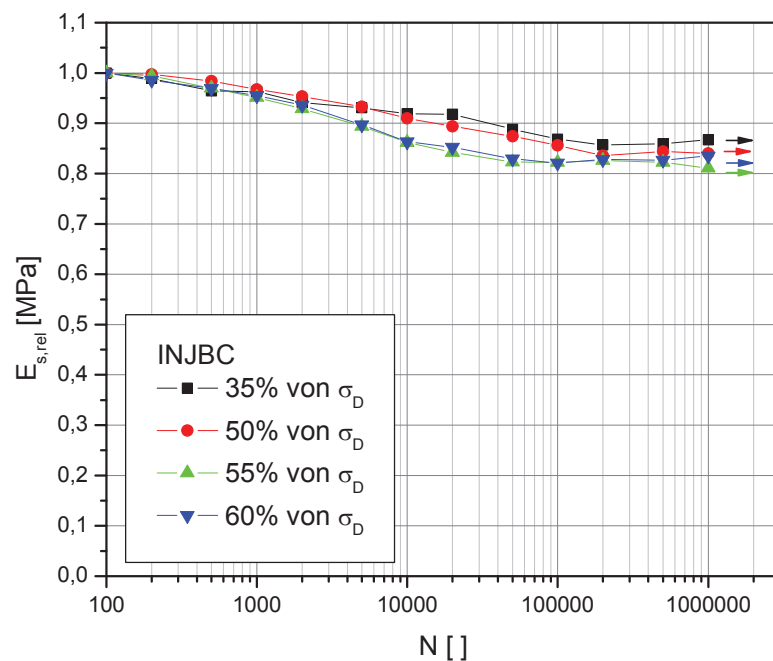


Abb. 4.8: Graphische Darstellung des relativen Sekanten-E-Moduls für das Materialsystem INJST 4x2.



**Abb. 4.9:** Graphische Darstellung des relativen dynamischen Moduls für das Materialsystem INJBC.



**Abb. 4.10:** Graphische Darstellung des relativen Sekanten-Moduls für das Materialsystem INJBC.



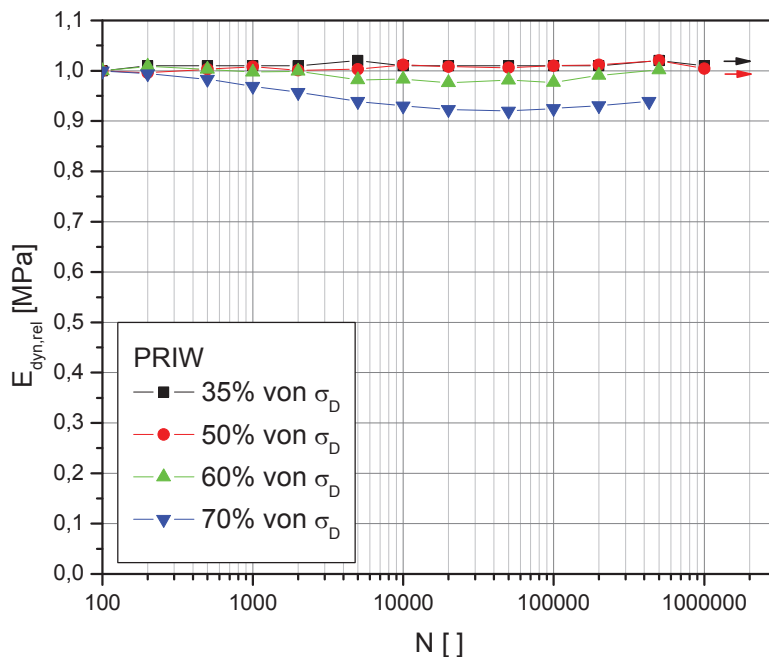


Abb. 4.11: Graphische Darstellung des relativen dynamischen Moduls für das Materialsystem PRIW.

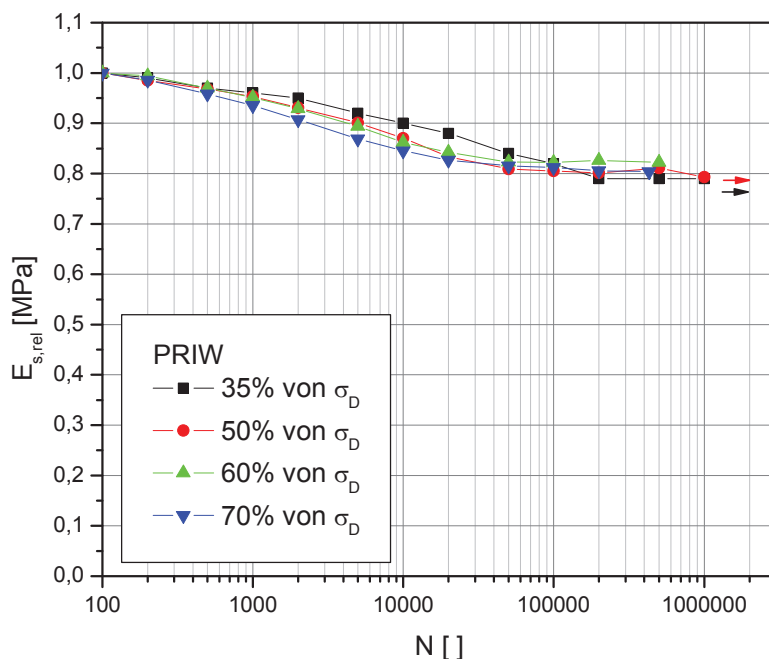
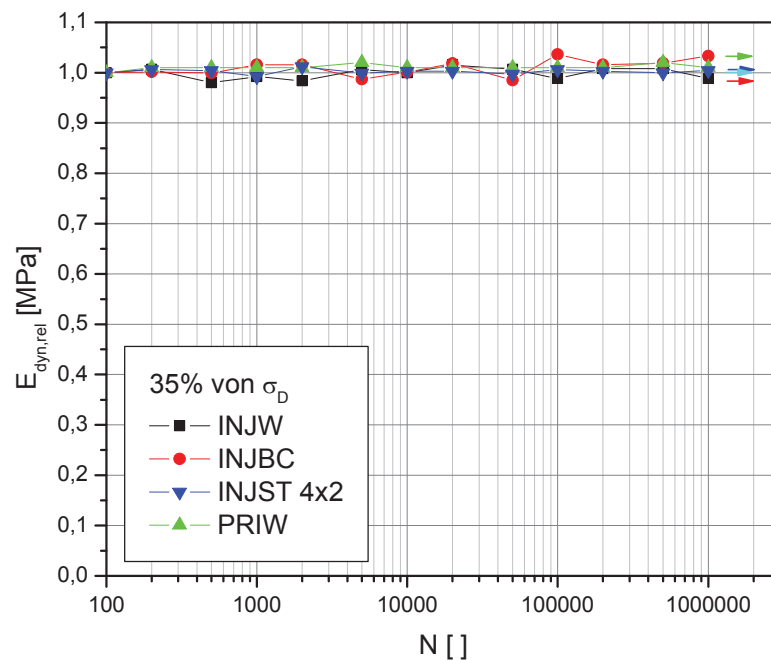
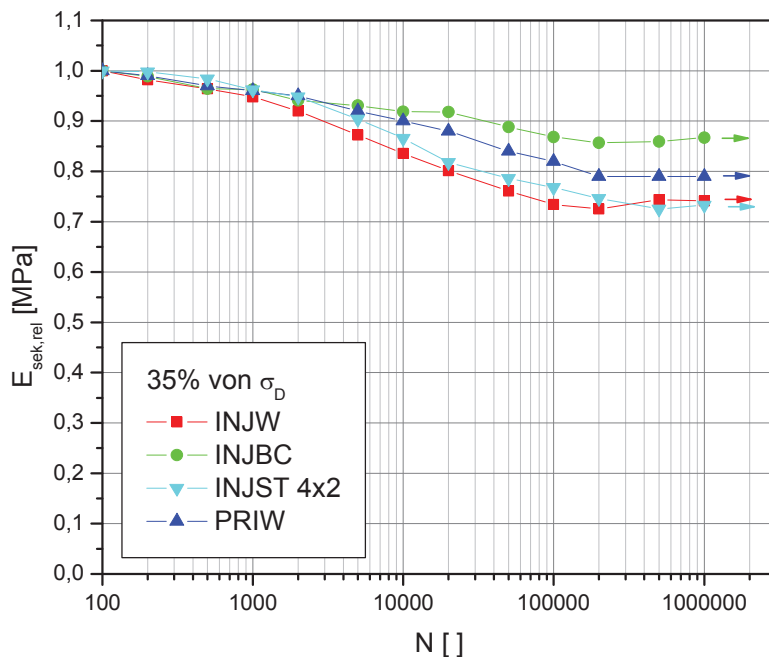


Abb. 4.12: Graphische Darstellung des relativen Sekanten-Moduls für das Materialsystem PRIW.

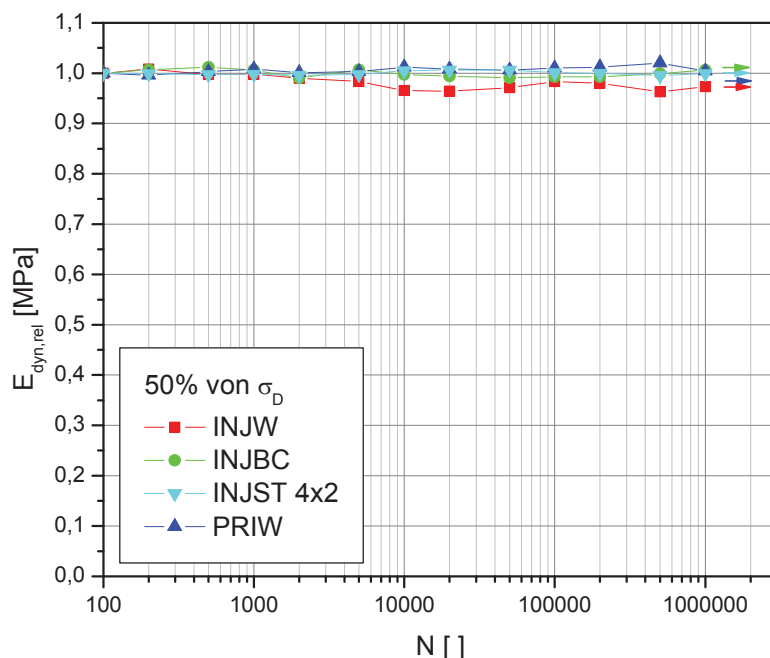
Für den Materialvergleich aller vier Systeme (Abb. 4.13 bis Abb. 4.16) wurden die Laststufen von 35% und 50% gewählt. Ersichtlich ist für alle vier Systeme das alle Prüfkörper die Lastwechsel von  $10^6$  absolvierten. Bei der Betrachtung des relativen dynamischen Moduls (Abb. 4.13 und Abb. 4.15) sind keine Tendenzen zu sinkenden Werten bemerkbar, was bei diesen Belastungsniveaus auch nicht zu erwarten war. In Abb. 4.14 und Abb. 4.16 sind die Verläufe des relativen Sekanten Moduls dargestellt. Hierbei ist offensichtlich, dass bei allen vier Materialsystemen ein Abfall der Werte auf ein viskoelastisches Kriechen hinweist, wobei das kompaktierte System INJW eine etwas höhere Kriechneigung aufzuweisen scheint.



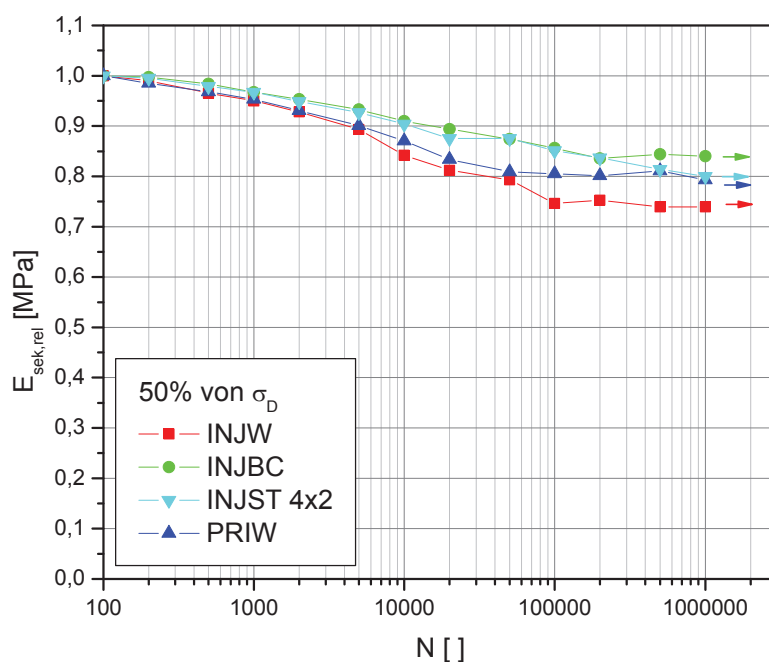
**Abb. 4.13:** Graphische Darstellung des relativen dynamischen Moduls für alle Materialsysteme bei einer Maximalspannung von 35% der Druckfestigkeit.



**Abb. 4.14:** Graphische Darstellung des relativen Sekanten-Moduls für alle Materialsysteme bei einer Maximalspannung von 35% der Druckfestigkeit.



**Abb. 4.15:** Graphische Darstellung des relativen dynamischen Moduls für alle Materialsysteme bei einer Maximalspannung von 50% der Druckfestigkeit.



**Abb. 4.16:** Graphische Darstellung des relativen Sekanten-Moduls für alle Materialsysteme bei einer Maximalspannung von 50% der Druckfestigkeit.

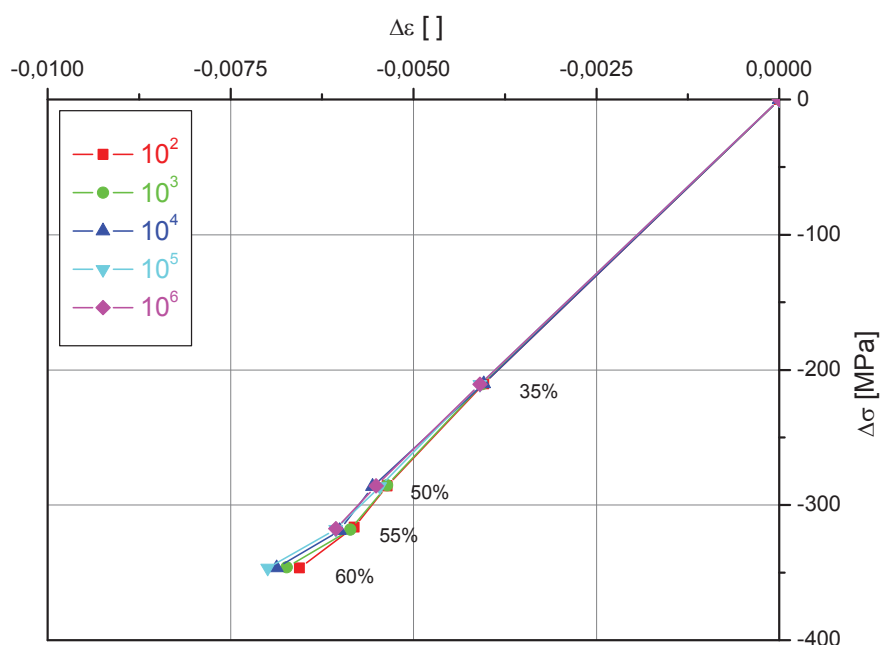
### 4.2.3 Isozyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramme

Durch die Auswertung von Hysteresismessungen in Form von Steifigkeitsabfall bzw. Dämpfungsänderungen über der Zykluszahl  $N$ , können strukturelle Werkstoffveränderungen erkannt und Belastungsgrenzen festgelegt werden. Im Regelfall werden trotz Deformationsmessungen aber keine Deformationsanalysen durchgeführt, sondern nur Beanspruchungsgrenzen definiert. Daher wurde in der Arbeit von Zahnt (Zahnt, 2003) vorgeschlagen, derartige Veränderungen durch sogenannte isozyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramme (isozyklische  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramme) zu charakterisieren. Darin sind die Zusammenhänge zwischen Spannung  $\sigma$ , Dehnung  $\varepsilon$  und Zykluszahl  $N$  enthalten und stellen somit ein Werkstoffgesetz dar. Anhand dieser Kurven ist es für den Konstrukteur möglich, Berechnungswerte für den Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Lastzyklen und der Belastungshöhe, als auch Abschätzungen für ertragbare Spannungen zu erhalten.

Durch isozyklische  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramme ist es möglich das Werkstoffverhalten in instantane Werkstoffschädigung und Werkstoffkriechen zu trennen. Im isozyklischen  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagramme bildet sich ausschließlich die instantane Werkstoffschädigung ab. Die beiden Werkstoffreaktionen Werkstoffschädigung und Kriechen haben jeweils Einfluss auf das isozyklische  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm.

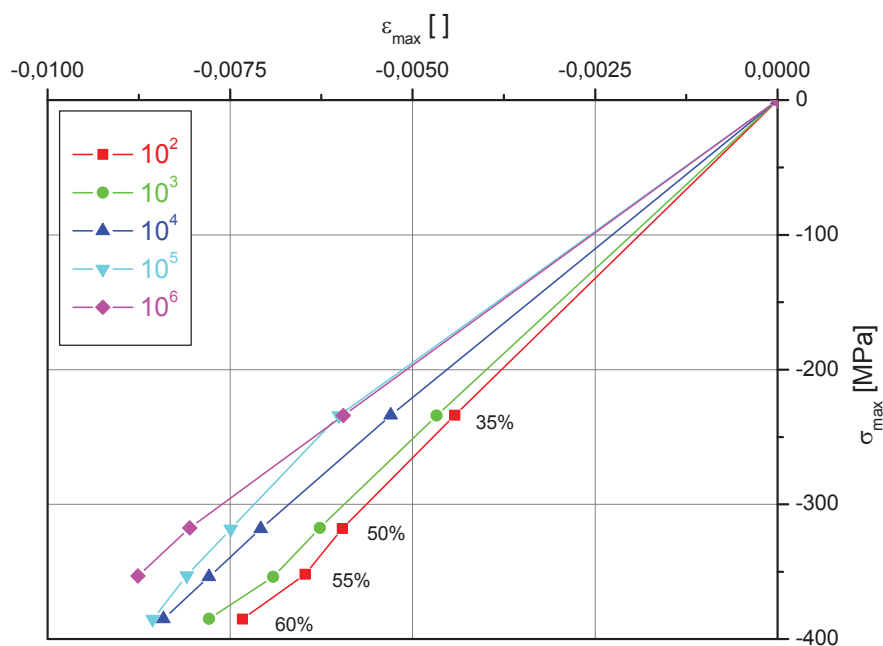
In den isozyklischen  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagrammen bzw. isozyklische  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagrammen (s. Abb. 4.17 bis 4.26) sind die jeweiligen Werkstoffreaktionen bei den entsprechenden Zykluszahlen und Laststufen klar ersichtlich.

Im nachfolgenden ist das Materialsystem INJW (s. Abb. 4.17 und Abb. 4.18) erläutert. Im isozyklischem  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagramm (s. Abb. 4.17) sind die vier Belastungsstufen 35%, 50%, 55% und 60% in Abhängigkeit der Zykluszahlen dargestellt. In der Belastungsstufe von 35% sind für alle ausgegebenen Zykluszahlen die Dehnungsschwingweiten deckungsgleich. Ab dem Lastniveau von 50% ist ein leichtes Auffächern der Dehnungsschwingweite bis zum höchsten Lastniveau von 60% ersichtlich. Dieses Werkstoffverhalten weist auf eine minimale instantane Werkstoffschädigung im Material hin.



**Abb. 4.17:**  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagramm für INJW.

Bei Betrachtung im isozyklischem  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm (s. Abb. 4.18) wird eine Tendenz für alle Belastungsstufen zu größeren Dehnungen sichtbar. Ein breit gefächertes Dehnungsverhalten ist der Hinweis auf ein ausgeprägtes Werkstoffkriechen; da sich bei diesem Werkstoff kein Durchläufer bei 60% von  $\sigma_D$  ergab, sind die Werte für  $10^6$  Zyklen nur bis 55% dargestellt.



**Abb. 4.18:**  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm für INJW.

Das Materialsystem INJST 4x2 ist in Abb. 4.19 und 4.20 dargestellt. Im isozyklischen  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagramm (s. Abb. 4.19) zeigt sich ein deckungsgleicher Verlauf für alle Zyklenzahlen. Das isozyklische  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm (s. Abb. 4.20) weist einen aufgefächerten Verlauf auf, was auf Werkstoffkriechen hinweist. Das Materialsystem INJST 4x2 ist durch vernähen kompaktiert worden um die Gewebelagen in seiner geometrischen Anordnung zu stabilisieren. Möglicherweise ist das der Grund, das in diesem System die Kriechrate etwas reduziert ist, was sich in einer verminderten Auffächerung der zyklenzahlabhängigen Kurven und generell etwas geringeren Dehnungswerten im Vergleich zu INJW äußert.

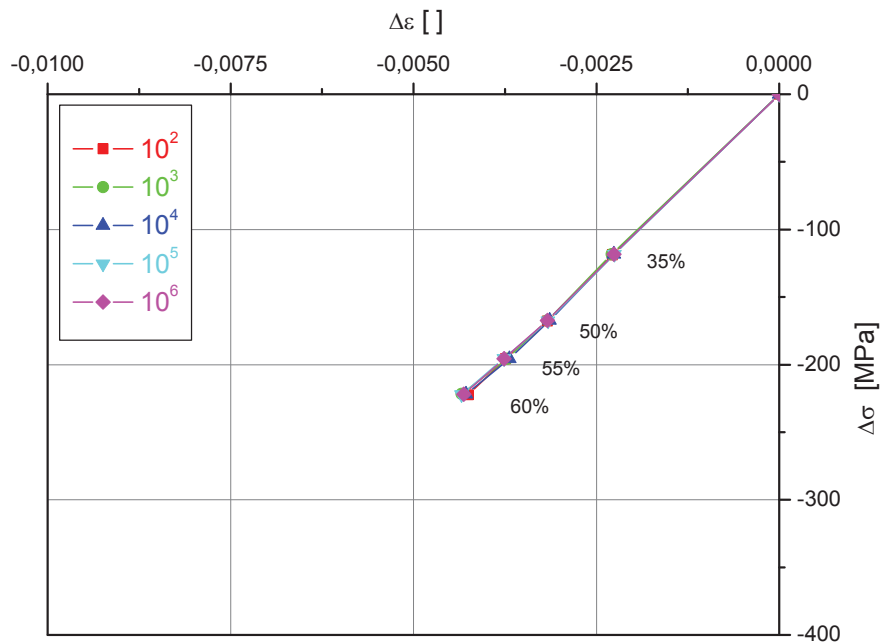


Abb. 4.19:  $\Delta\sigma$ - $\Delta\epsilon$ -Diagramm für INJST 4x2.

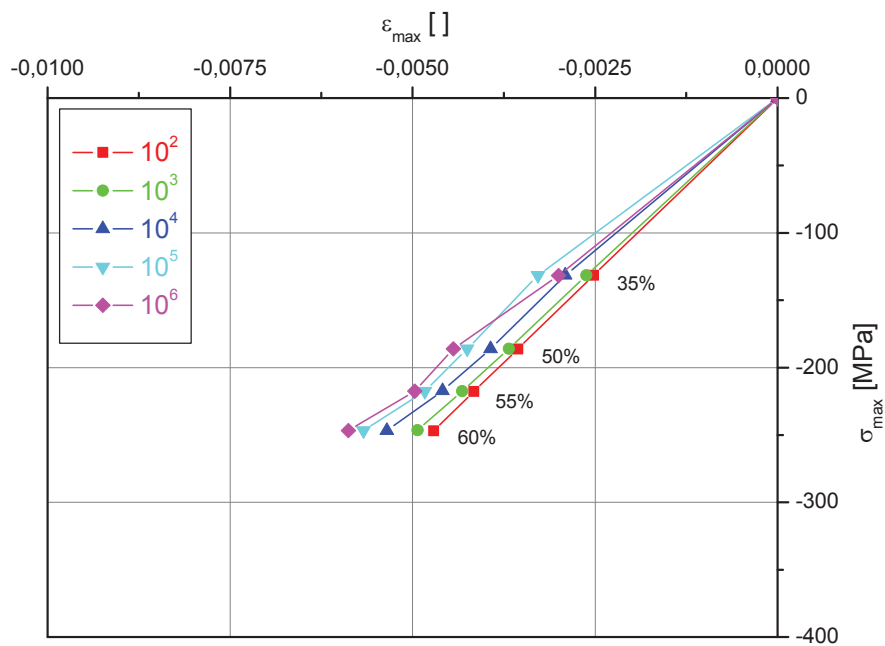


Abb. 4.20:  $\sigma_{max}$ - $\epsilon_{max}$ -Diagramm für INJST 4x2.

Im nachfolgendem isozyklischen  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagramm (s. Abb. 4.21) von INJBC zeigt sich ein Verlauf, der bis zur Belastungsstufe von 50% nahezu keine Aufweitung in der Dehnungsschwingweite aufweist. Ab 55% der Belastungsstufe zeigt sich eine ansteigende Aufweitung der Dehnungsschwingweite, das auf eine mögliche Schädigung hinweist. Im isozyklische  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm (s Abb. 4.22) kommt die Dominanz der Kriechprozesse wieder klar zum Ausdruck. Im Vergleich zu INJW ist die Kriechrate aber wieder etwas reduziert.

In der Darstellung des isozyklischen  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagramms (s. Abb. 4.23) des Materialsystems PRIW zeigt sich bis 50% der Belastungsstufe keinerlei Änderung im von der Zykluszahl abhängigen Spannungs-Dehnungs-Verlauf. Ab 60% zeigt sich eine Werkstoffschädigung durch ein Auffächern in der Dehnungsschwingweite, dass sein Maximum bei 70% annimmt. Im isozyklischem  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm (s. Abb. 4.24) ist die Auswirkung der Kriechprozesse durch die Verschiebung der Kurven zu höheren Dehnungswerten wieder offensichtlich.

Eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Materialsysteme bei  $10^3$  und  $10^5$  Zyklen ist in den Abb. 4.25 bis 4.28 dargestellt. Die Verläufe sind im wesentlichen sehr einheitlich. Aufgrund der geringen Relevanz von Materialschädigung in den untersuchten Lastniveaus sind die isozyklischen  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Kurven bei  $10^3$  und  $10^5$  Zyklen beinahe deckungsgleich. Vor allem im isozyklischen  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm nach  $10^5$  Zyklen äußert sich die geringere Kriechneigung der kompaktierten Lamine durch die etwas höheren Dehnungswerten der Kurve für INJW. Die Kurve des Materials PRIW liegt im Bereich der kompaktierten Lamine des RTM6 Harzsystems (INJST 4x2, INJBC).



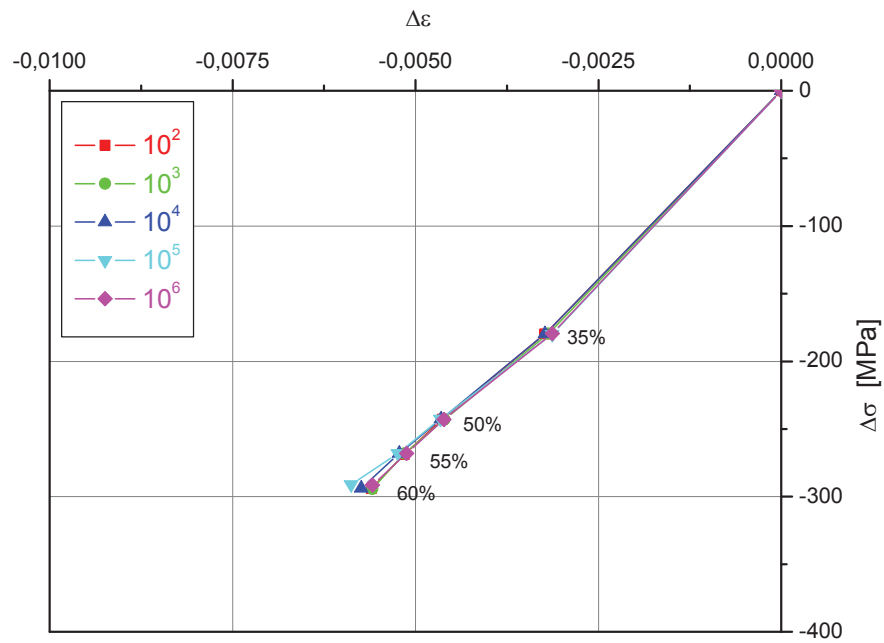


Abb. 4.21:  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagramm für INJBC.

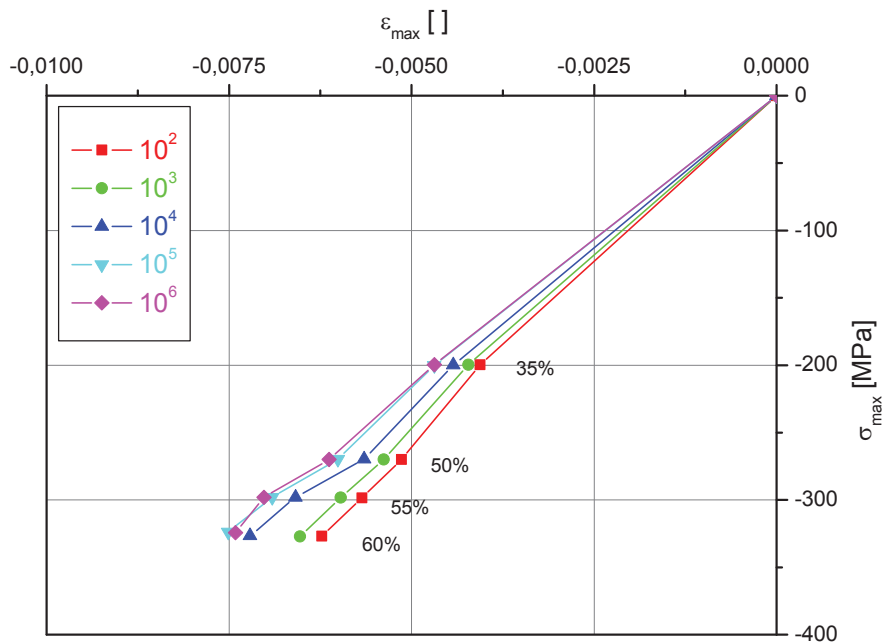


Abb. 4.22:  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm für INJBC.

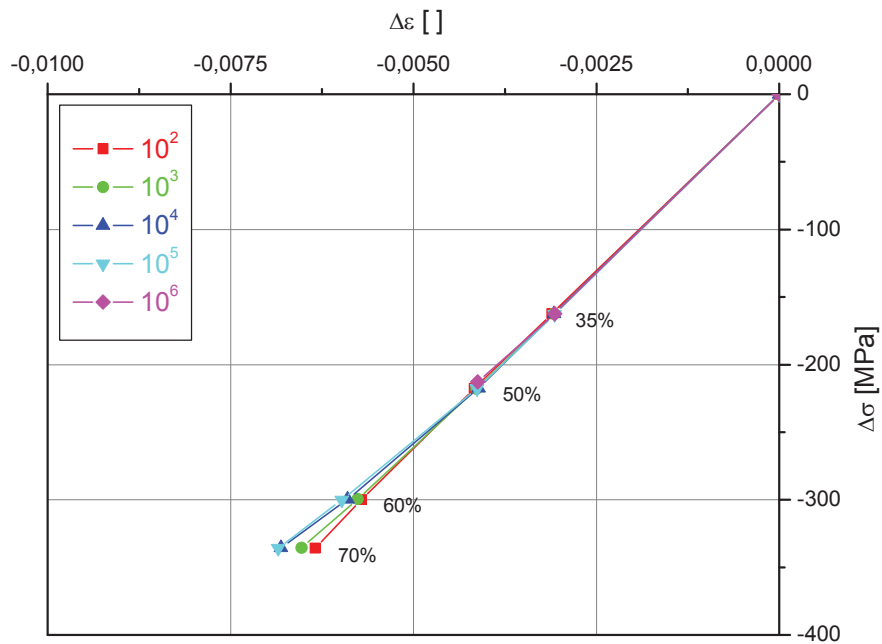


Abb. 4.23:  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagramm für PRIW.

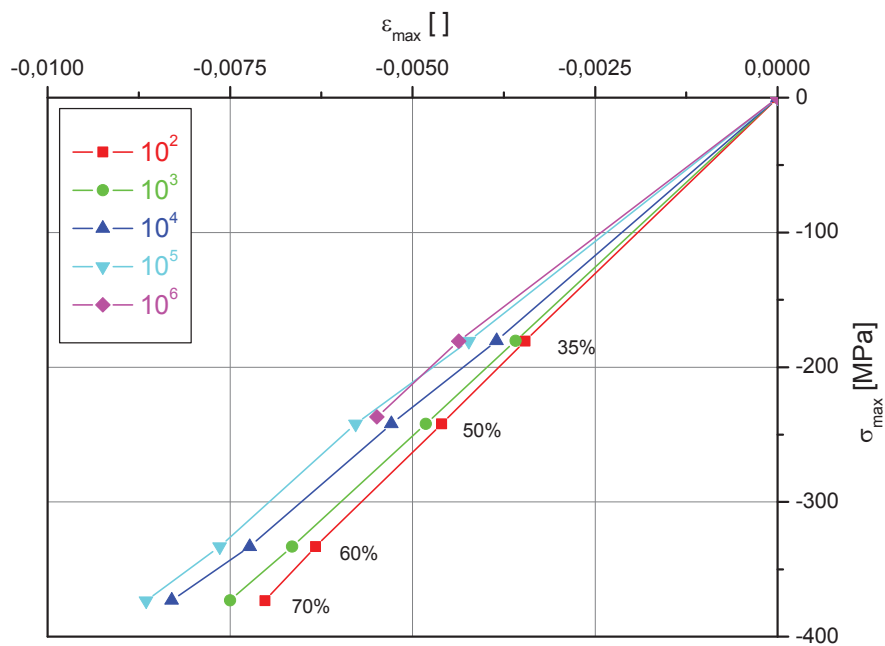
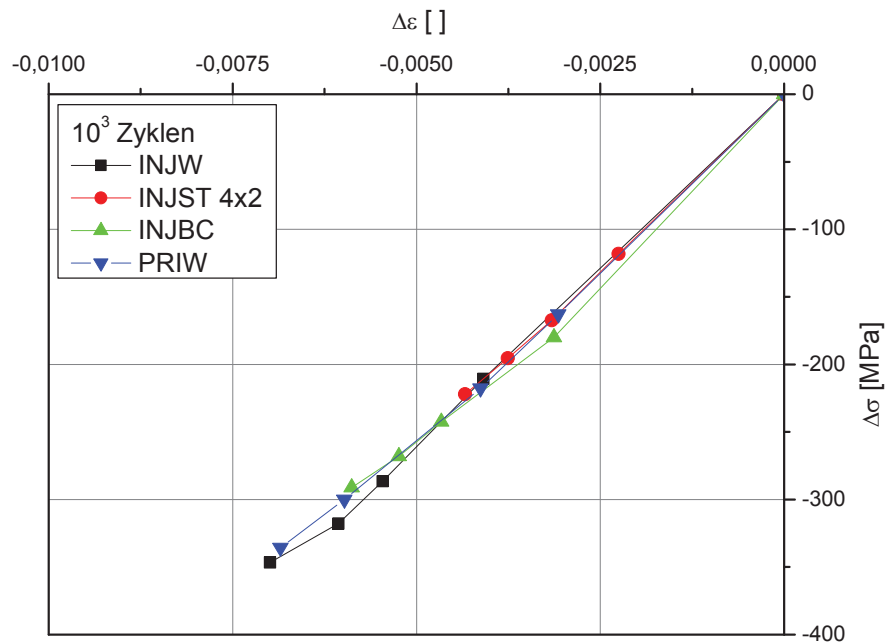
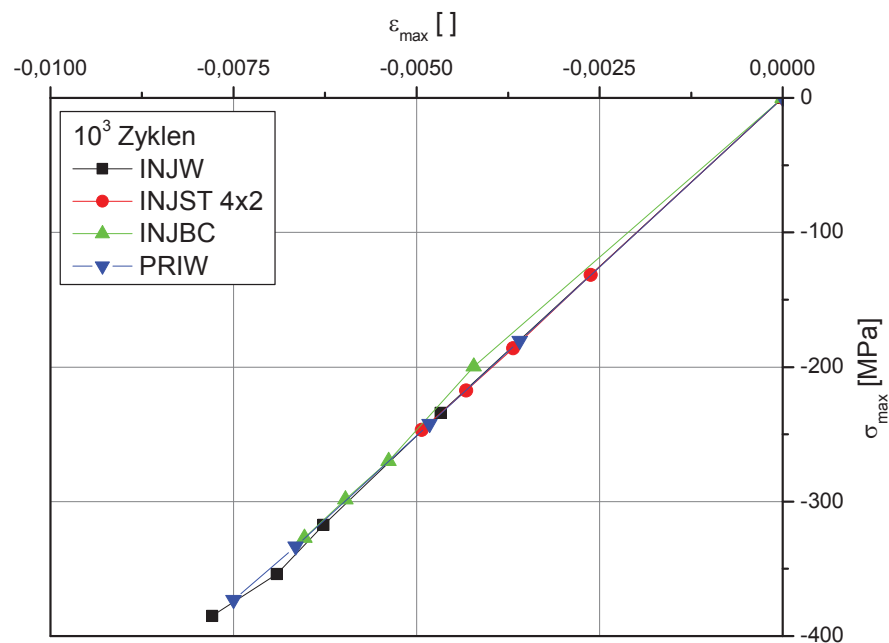


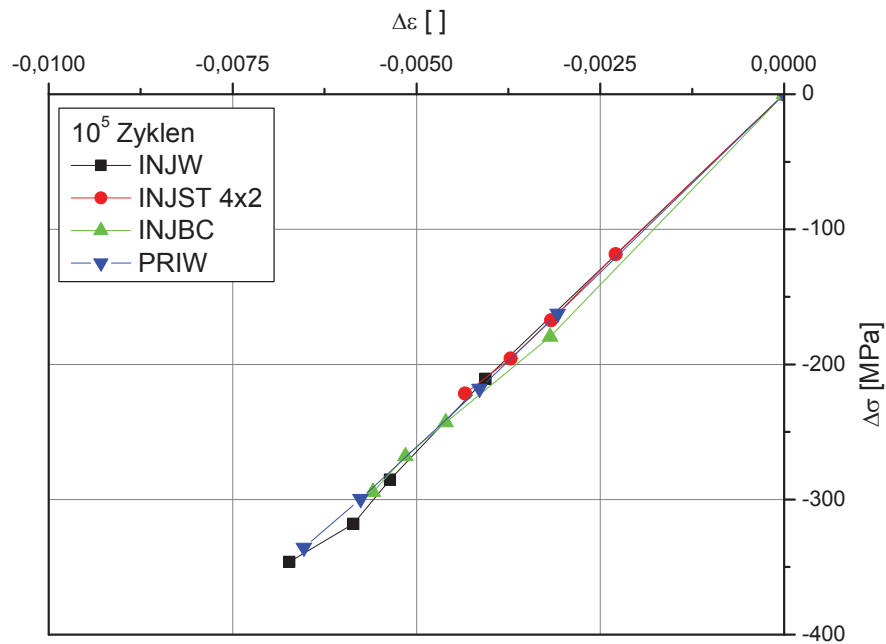
Abb. 4.24:  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm für PRIW.



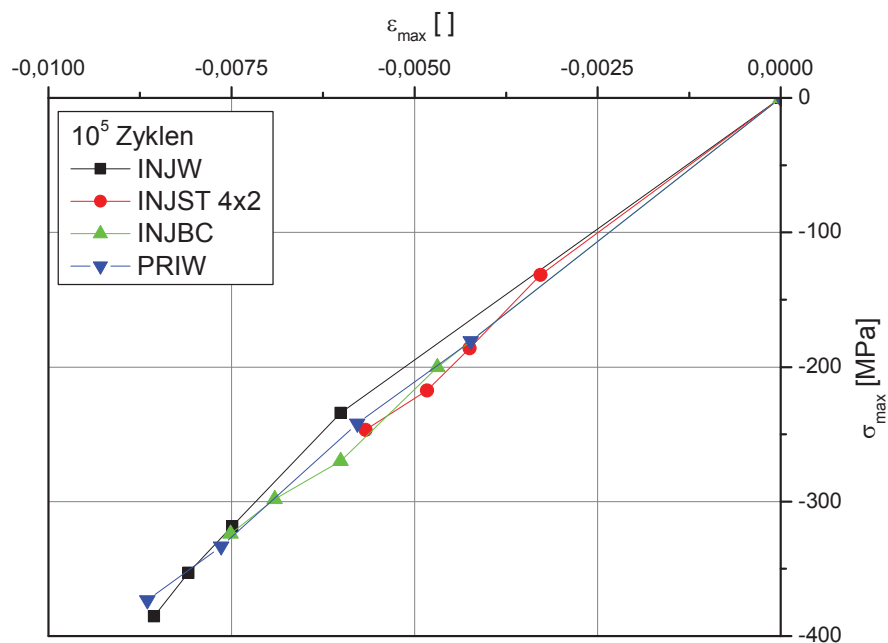
**Abb. 4.25:**  $\Delta \sigma$ - $\Delta \epsilon$ -Diagramm für Materialvergleich zwischen den vier getesteten Materialsystemen bei  $10^3$  Zyklen.



**Abb. 4.26:**  $\sigma_{\max}$ - $\epsilon_{\max}$ -Diagramm für Materialvergleich zwischen den vier getesteten Materialsystemen bei  $10^3$  Zyklen.



**Abb. 4.27:**  $\Delta \sigma$ - $\Delta \epsilon$ -Diagramm für Materialvergleich zwischen den vier getesteten Materialsystemen bei  $10^5$  Zyklen.



**Abb. 4.28:**  $\sigma_{\max}$ - $\epsilon_{\max}$ -Diagramm für Materialvergleich zwischen den vier getesteten Materialsystemen bei  $10^5$  Zyklen.

## 5 AUSBLICK UND SCHLUSSFOLGERUNG

Ziel dieser Arbeit war, die mechanischen Druckeigenschaften von 4 Gewebelaminaten zu charakterisieren, die im „Resin Transfer Moulding“ (RTM) Verfahren hergestellt wurden. Es wurden zwei Epoxidharzsysteme verwendet, wobei mit dem ersten Harz nicht kompaktierte, mit einem Binder kompaktierte und durch Vernähen kompaktierte Laminat hergestellt wurden. Zusammen mit dem zweiten Epoxidharz wurde ein Gewebe verwendet, das einen Thermoplastfaseranteil enthält um die mechanische Zähigkeit des fertigen Laminates zu erhöhen.

Als wesentlicher Bestandteil der Arbeit sollte auch ein für Druckversuche an hochsteifen Composites geeignetes Messverfahren für die Dehnungsmessung evaluiert bzw. entwickelt werden. Dabei hat sich gezeigt, dass nicht direkt am Prüfkörper ermittelte Dehnungen zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen führten. Da aufgrund der reduzierten Einspannlängen bei den Druckversuchen die Anbringung von konventionellen Kontakt-Extensometer nicht möglich ist und Dehnungsmessstreifen vor allem bei den zyklischen Versuchen dazu neigen, sich von der Prüfkörperoberfläche abzulösen, wurde in dieser Arbeit mit den internen über den Kolbenweg der Maschine ermittelten Dehnungen gerechnet, wobei diese Daten aber mit direkt am Prüfkörper gemessenen Dehnungen (Extensometer) kalibriert wurden.

Die mechanische Charakterisierung fand durch quasi-statische Druckversuche und Ermüdungsversuche unter druckschwellender Belastung statt ( $R=10$ ,  $f=10$  Hz, bis max.  $10^6$  Lastzyklen) statt. Durch die Aufnahme der Hysteresen konnte die Ermüdungsanalyse nicht nur anhand von konventionellen Wöhlerlinien erfolgen, sondern es wurde auch der Steifigkeitsverlauf als Funktion der Zykluszahl (Sekantenmodul, dynamischer Modul) und isozyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven betrachtet.

Die Ergebnisse der quasi-statischen Druckversuche bestätigten den Einfluss der Kompaktierung auf die Druckfestigkeit. Insbesondere wies das vernähte Materialsystem doch deutlich niedrigere Druckfestigkeiten auf, was auf Schädigungen des Gewebes durch den Nähprozess zurückgeführt wurde.

Die Ermüdungsversuche, bestätigten dass ein Versagen unter Druck schlagartig einsetzt und Delaminationen nur in Einzelfällen vorzeitig sichtbar waren.

Insgesamt war die Anzahl der Lastniveaus zu gering für eine detaillierte Analyse der Lamine hinsichtlich ihrer Wöhlerlinien. Wichtig ist aber, dass die Restfestigkeit der Durchläufer ( $>10^6$  Zyklen) für alle Formulierungen im Bereich der Standardabweichung der quasi-statischen Tests lag und somit keine Hinweise auf signifikante Materialschädigung in diesen Lastniveaus vorlagen.

Durch den Vergleich des Verlaufs des Sekantenmoduls und dynamischen Moduls konnte die Dominanz von Kriechprozessen in den zyklischen Druckversuchen bei allen Formulierungen nachgewiesen werden. Die Kompaktierung der Gewebe konnte die Kriechneigung etwas reduzieren. Materialschädigung in den höheren Lastniveaus äußerte sich in einem Abfall des dynamischen Moduls, wobei der relative Abfall vor Versagen bei allen Formulierungen nicht mehr als 15% betrug.

Durch die sogenannten isozyklischen Spannungs-Dehnungs-Diagramme wird es möglich Deformationsanalysen als Funktion der Lastzahl durchzuführen. Außerdem erlaubt der Vergleich von isozyklischen  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagrammen mit isozyklischen  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagrammen eine Aussage über das Ausmaß von Werkstoffschädigung und viskoelastischen Kriechprozessen in den untersuchten Laminen. Im wesentlichen konnten durch diese Art der Ermüdungsanalyse die Ergebnisse aus den zyklenabhängigen Steifigkeitsmessungen bestätigt werden.

## 6 LITERATUR

- Altstädt V. (1993). In Proc. „Hysteresis Messverfahren“, 2.2.1-2.2.14, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Erlangen, D.
- Budiansky B.(1983). Micromechanics. Comput & Struct 16, 3.
- Effendi R.R., Barrau J.J. und Guedra-Degeorges D. (1995). Composite Structures 31, 87-98.
- Ehrenstein G. W. (2006), Faserverbund-Kunststoffe, 110.
- Garland B.D., Beyerlein I.J., Schadler L.S. (2001). Composite Science and Technology 61, 2461-2480.
- Herrmann A. S., Pabsch A., Kleineberg M. (2000). „Kostengünstige Faserverbundstrukturen – eine Frage neuer Produktionsansätze“, 3. AVK Tagung, Baden Baden, D.
- Hertzberg R.W., Manson J.A. (1980). Fatigue of Engineering Plastics, 81-96.
- Heutling F., Franz H. E., Friedrich K. (1998). Materialwiss. und Werkstofftechnik 29, 239-253.
- Hull D., Clyne T.W. (1996). “An Introduction to Composite Materials-Second Edition”, Cambridge University Press, GBR.
- Kitzmüller W. (2007). “Hysteretische Erwärmung faserverstärkter Laminate unter Ermüdungsbelastung“, Studienarbeit, Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, A.
- Kruckenber T., Paton R. (1998 ). “Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures”, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL.
- Lang R.W., Stutz H., Heym M. und Nissen D. (1986). Die Angewandte Makromolekulare Chemie 145, 267.
- Lang R.W., Manson J.A. (1987). Journal of Material Science 22, 3576-3580.
- Lazan B. J. (1968). “Damping of Materials and Members in Structural Mechanics”, Pergamon Press, Oxford, UK.

- Loendersloot R., Akkerman R., (2001). Resin Transfer Moulding of high performance Composites.
- Mao H., Mahadevan S. (2002). Composite Structures 58, 405-410.
- Painold M. (2003). "Mechanische Eigenschaften kohlenfaserverstärkter RTM-Laminat bei monotoner und zyklischer Belastung", Diplomarbeit, Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, A.
- Ruud C. D., Long A. C., Kendall K. N., Mangin C. G. E., (1997). Liquid moulding technologies, Woodhead Publishing Ltd., Abington, GB.
- Sauer J.A., Richardson G.C. (1980). International Journal of Fracture 16; 499-532.
- Schürmann H. (2004). Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden.
- Sickinger C., Herrmann A. (2001). "Structural stitching as a method to design high performance composites in future", Tech Textil Symposium, Frankfurt / Main, D.
- Sickinger C., Wilmes H., Herbeck L., Herrmann A., Köhnke B., Wockatz R. (2000). „Strukturelles Nähen – eine Maßnahme zur Realisierung von Hochleistungswerkstoffen“, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Leipzig, D.
- Soutis C, Smith F.C., Matthews F.L. (2000). Composites: Part A 31, 531-536.
- Steger H. G., Sieghart J., Glauning E. (1993). Technische Mechanik 2, 159.
- Talreja R. (2001), Polymer Matrix Composites (Talreja R., Manson J. A. E., Kelly A. und Zweben, Hrsg). Elsevier Science Ltd., Oxford, UK.
- Tanoglu M., Robert S., Heider D., Knight S. H., Brachos V., Gillespie J. W. (2001). International Journal of Adhesion and Adhesives 21, 187.
- Trappe V., Harbich K. W., Kossira H. (2002). MP-Materialprüfung 1-2, 6.
- Trappe V., Harbich K. W., Kossira H. (2001). „Zerstörungsfreie Charakterisierung des Schädigungszustandes von CFK infolge intralaminarer Ermüdungsbeanspruchung“, DGZfP-Jahrestagung, Berlin, D.
- Weimer C. (2002). „Zur nähtechnischen Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde“, Dissertation, Institut für Maschinebau und Verfahrenstechnik, Universität Kaiserslautern, D.
- Whitworth H.A. (1998). Composite Structures 40, 95.

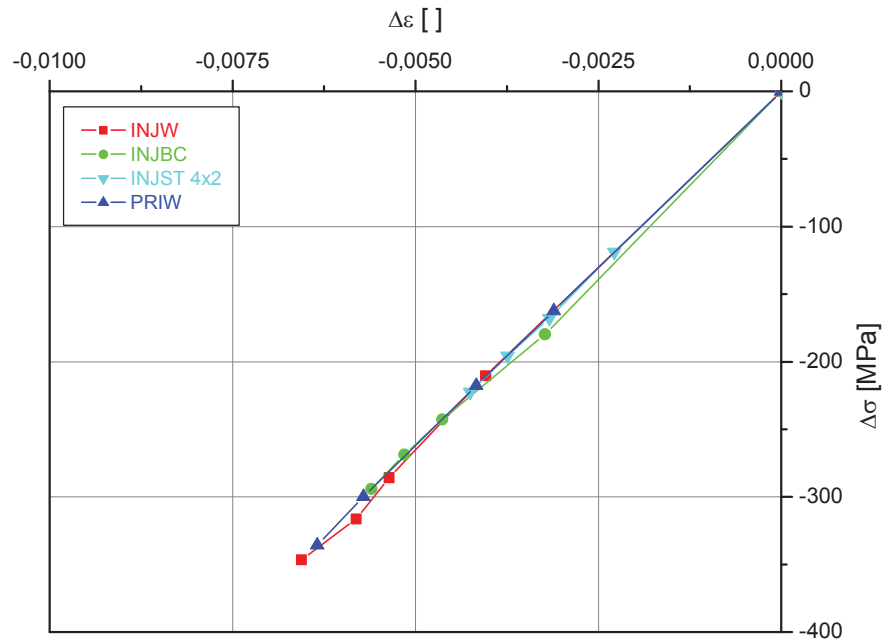


Woerndle und Mitarbeiter des Instituts für Konstruieren in Kunst- und Verbundwerkstoffe (2002). „Skriptum Verbundwerkstoffe“, Auflage WS 02/03, Instituts für Konstruieren in Kunst- und Verbundwerkstoffe, Montanuniversität Leoben, A.

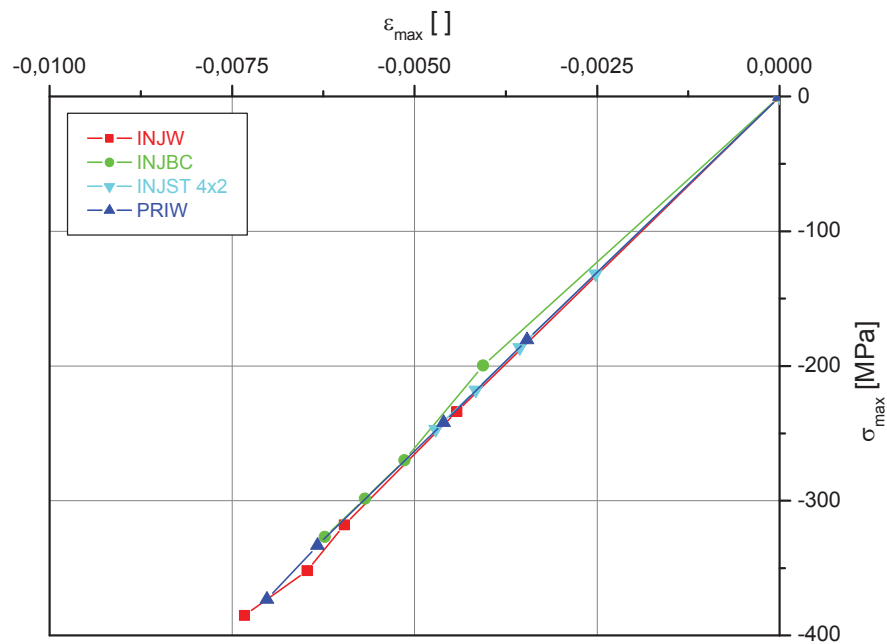
Zahnt B.A. (2003).“ Ermüdungsverhalten von glasfaserverstärkten Kunststoffen – Charakterisierungsmethoden, Werkstoffgesetze und Struktur-Eigenschafts-Beziehungen“, Dissertation, Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, A.

## 7 Anhang

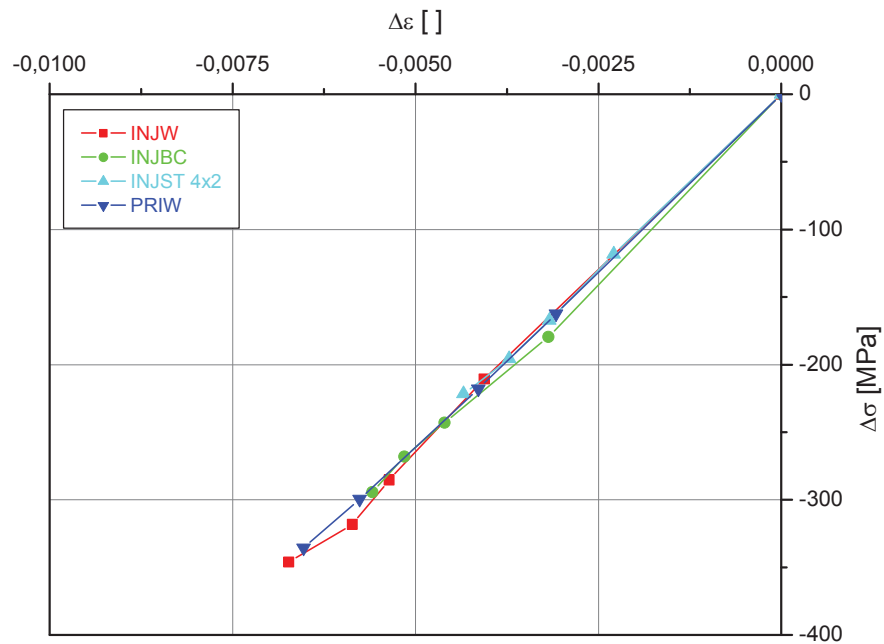
### A. Isozyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramme



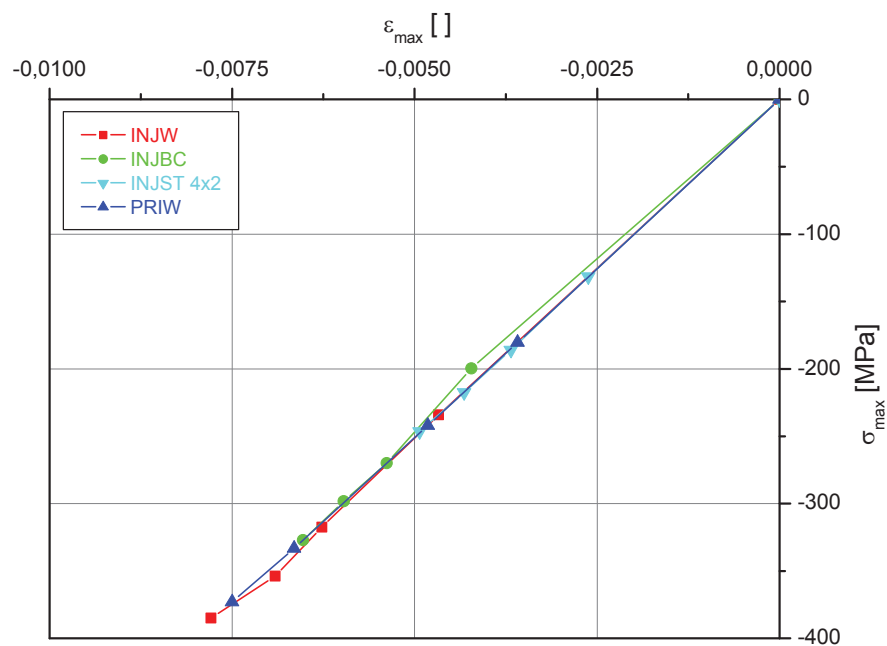
**Abb. A 1**  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ -Diagramm nach  $10^2$  Lastwechsel, wobei  $\Delta\sigma$  die Spannungsschwingweite und  $\Delta\varepsilon$  die Dehnungsschwingweite ist.



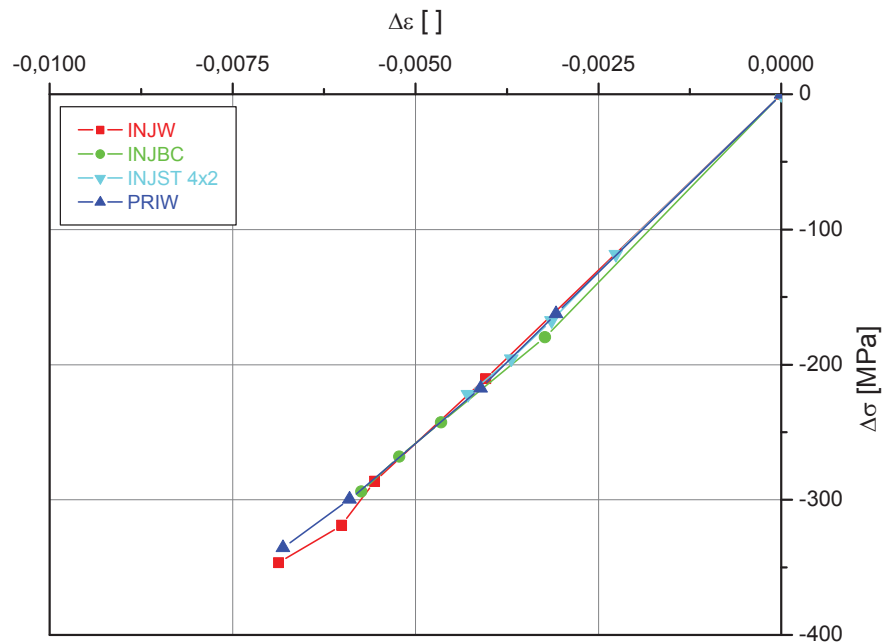
**Abb. A 2:**  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm nach  $10^2$  Lastwechsel, wobei  $\sigma_{\max}$  die Maximalspannung und  $\varepsilon_{\max}$  die Maximaldehnung ist.



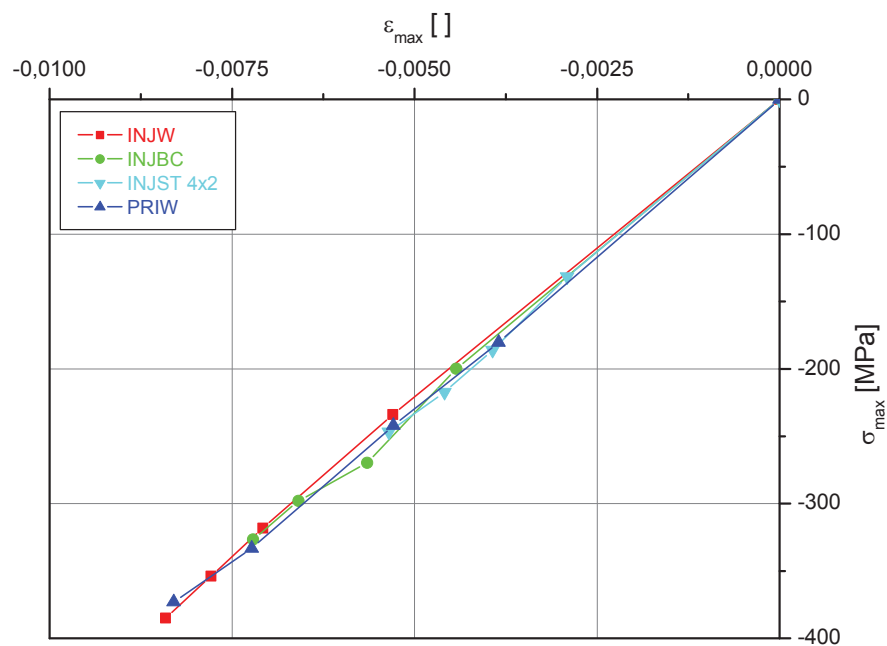
**Abb. A 3:**  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$  Diagramm nach  $10^3$  Lastwechsel, wobei  $\Delta\sigma$  die Spannungsschwingweite und  $\Delta\varepsilon$  die Dehnungsschwingweite ist.



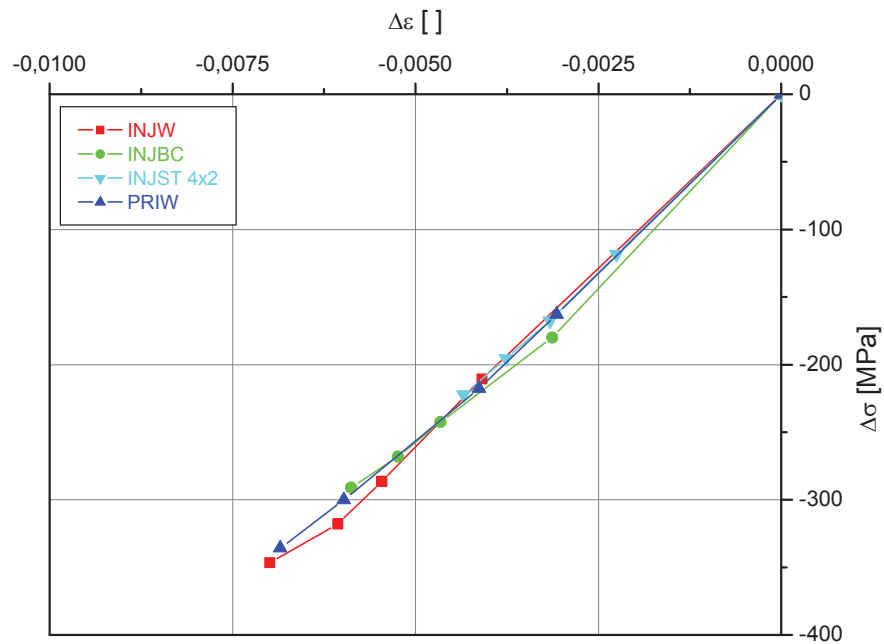
**Abb. A 4:**  $\sigma_{\max}$  $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm nach  $10^3$  Lastwechsel, wobei  $\sigma_{\max}$  die Maximalspannung und  $\varepsilon_{\max}$  die Maximaldehnung ist.



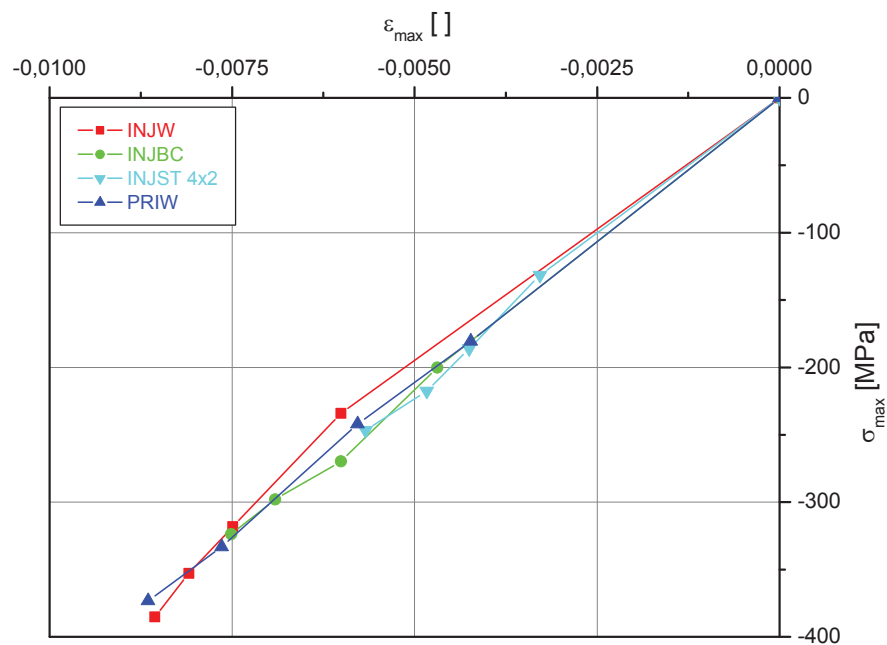
**Abb. A 5:**  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$  Diagramm nach  $10^4$  Lastwechsel, wobei  $\Delta\sigma$  die Spannungsschwingweite und  $\Delta\varepsilon$  die Dehnungsschwingweite ist.



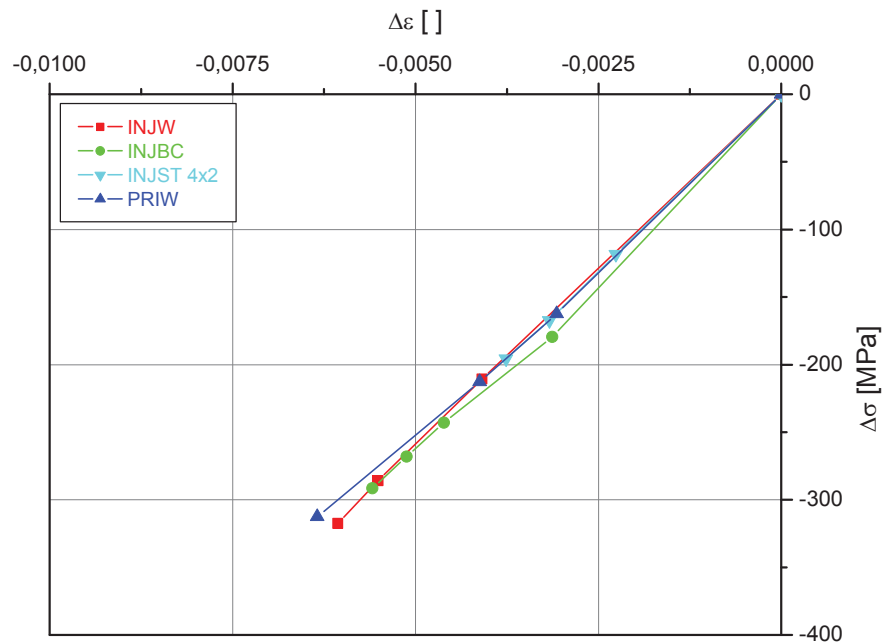
**Abb. A 6:**  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm nach  $10^4$  Lastwechsel, wobei  $\sigma_{\max}$  die Maximalspannung und  $\varepsilon_{\max}$  die Maximaldehnung ist.



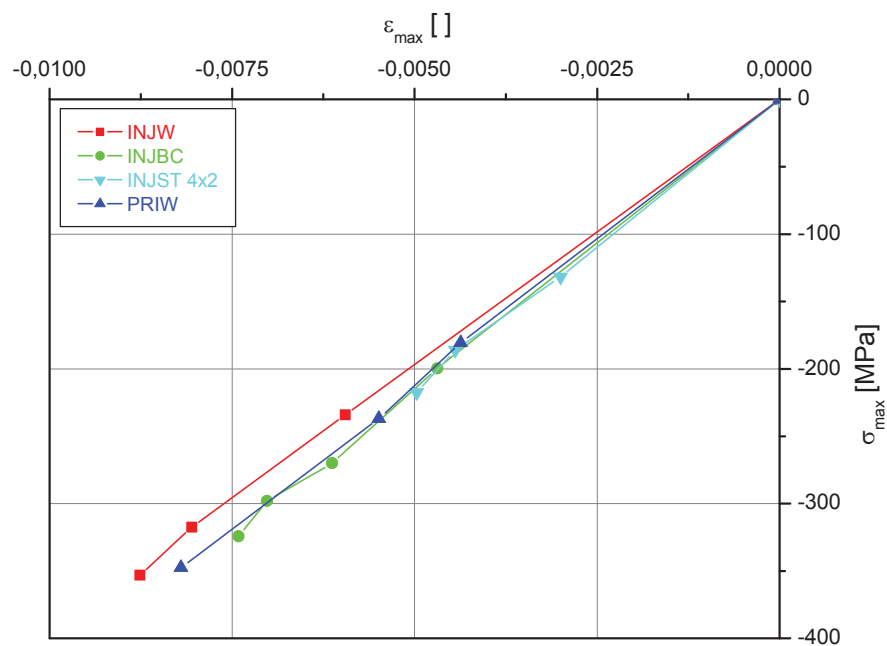
**Abb. A 7:**  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$  Diagramm nach  $10^5$  Lastwechsel, wobei  $\Delta\sigma$  die Spannungsschwingweite und  $\Delta\varepsilon$  die Dehnungsschwingweite ist.



**Abb. A 8:**  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm nach  $10^5$  Lastwechsel, wobei  $\sigma_{\max}$  die Maximalspannung und  $\varepsilon_{\max}$  die Maximaldehnung ist.

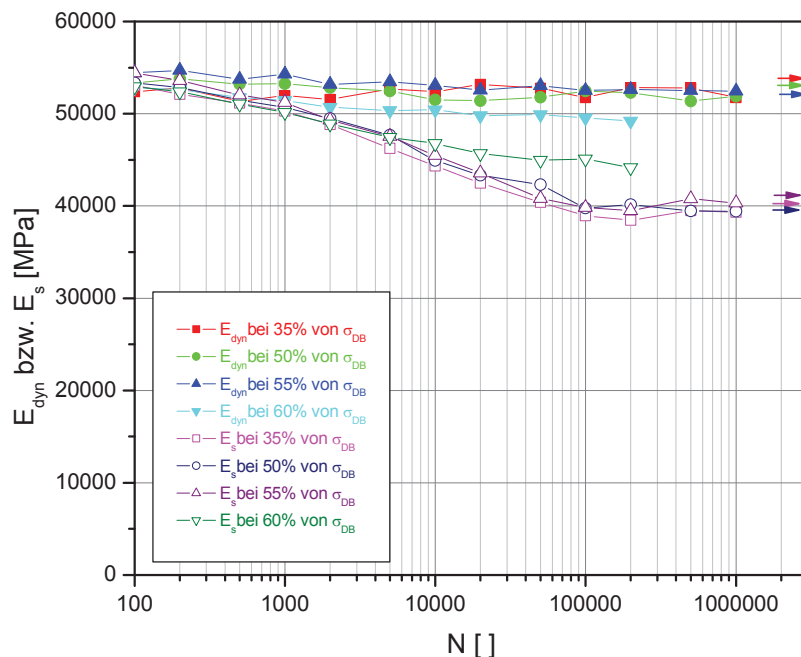


**Abb. A 9:**  $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$  Diagramm nach  $10^6$  Lastwechsel, wobei  $\Delta\sigma$  die Spannungsschwingweite und  $\Delta\varepsilon$  die Dehnungsschwingweite ist.

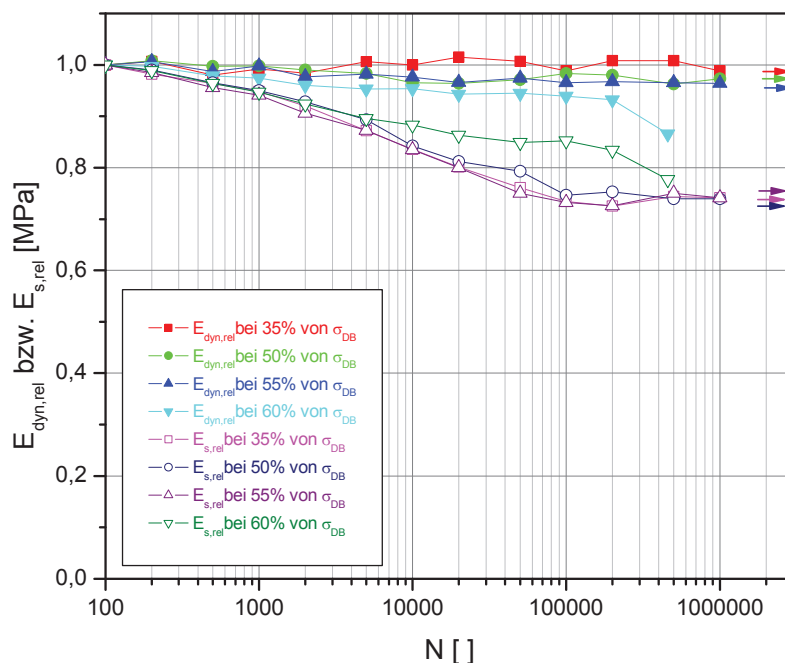


**Abb. A 10:**  $\sigma_{\max}$ - $\varepsilon_{\max}$ -Diagramm nach  $10^6$  Lastwechsel, wobei  $\sigma_{\max}$  die Maximalspannung und  $\varepsilon_{\max}$  die Minimaldehnung ist.

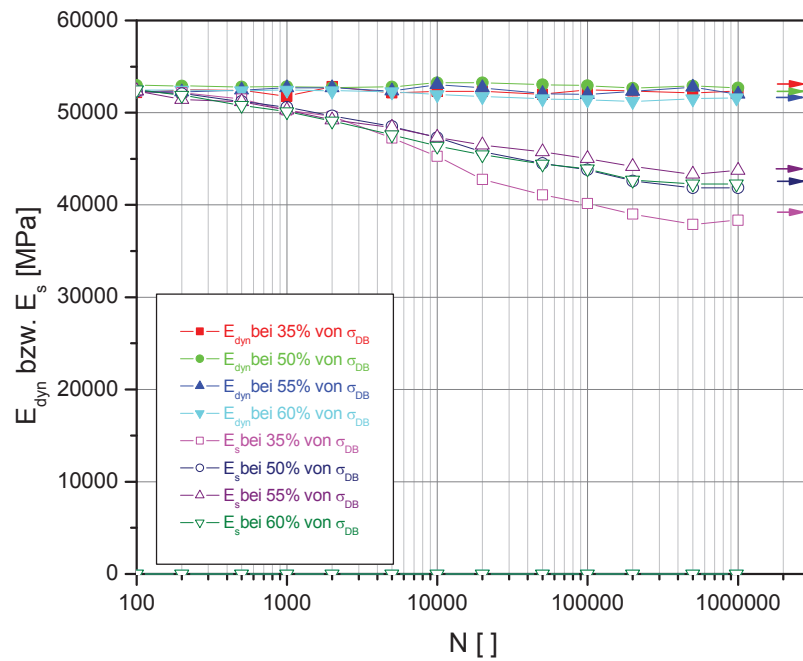
### B Zykluszahlabhängige Modulverläufe



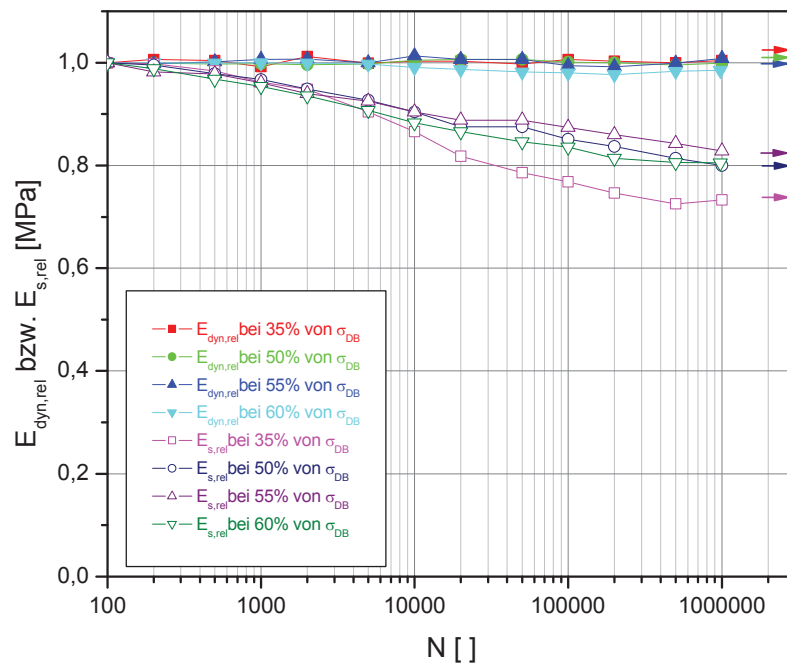
**Abb. B 1:** Absolute Moduli in Abhängigkeit der Zykluszahl von INJW, wobei  $E_{dyn}$  der dynamische Modul,  $E_s$  der Sekantenmodul und N die Zykluszahl ist. Kolbenwegmessung.



**Abb. B 2:** Relative Moduli in Abhängigkeit der Zykluszahl von INJW, wobei  $E_{dyn,rel}$  der relative dynamische Modul,  $E_{s,rel}$  der relative Sekantenmodul und N die Zykluszahl ist. Kolbenwegmessung.

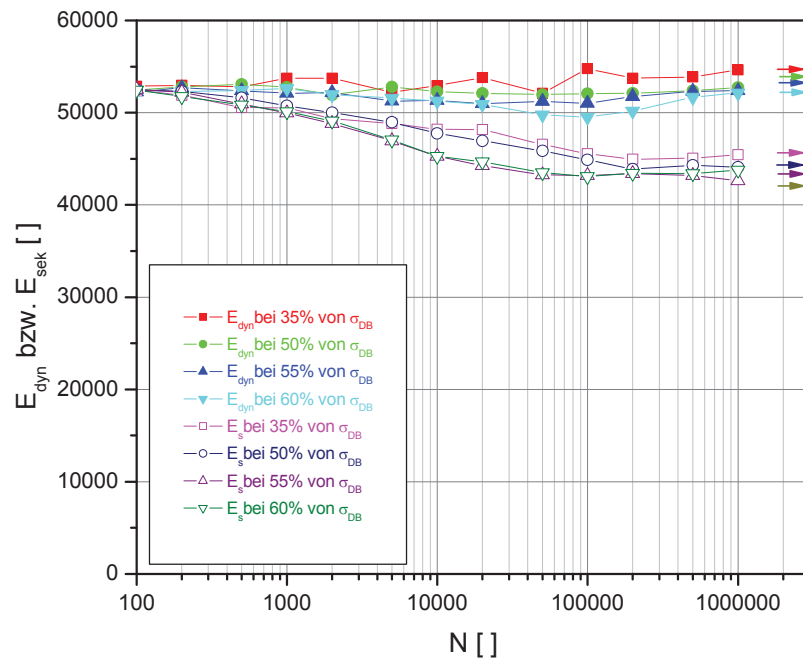


**Abb. B 3:** Absolute Moduli in Abhängigkeit der Zykluszahl von INJST 4x2, wobei E<sub>dyn</sub> der dynamische Modul, E<sub>s</sub> der Sekantenmodul und N die Zykluszahl ist. Kolbenwegmessung.

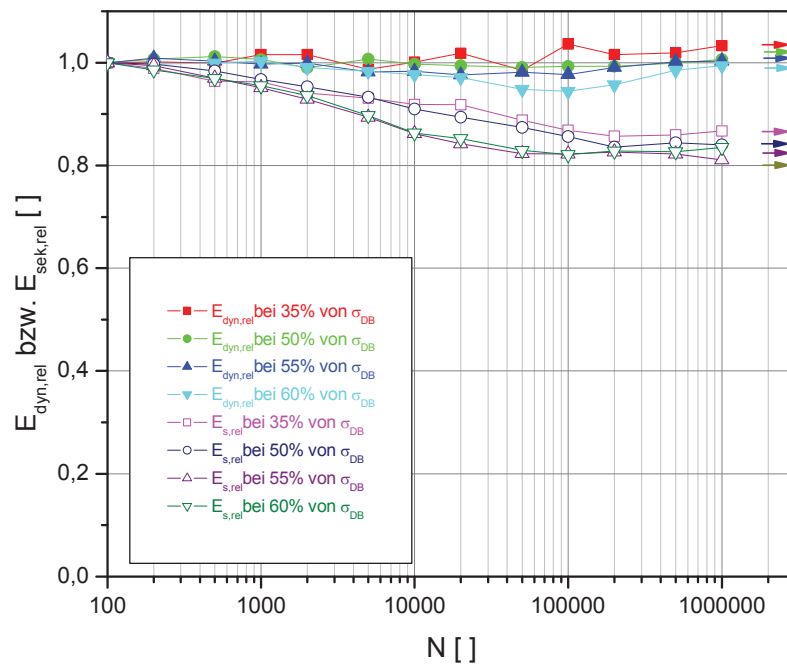


**Abb. B 4:** Relative Moduli in Abhängigkeit der Zykluszahl von INJST 4x2, wobei E<sub>dyn,rel</sub> der relative dynamische Modul, E<sub>s,rel</sub> der relative Sekantenmodul und N die Zykluszahl ist. Kolbenwegmessung.

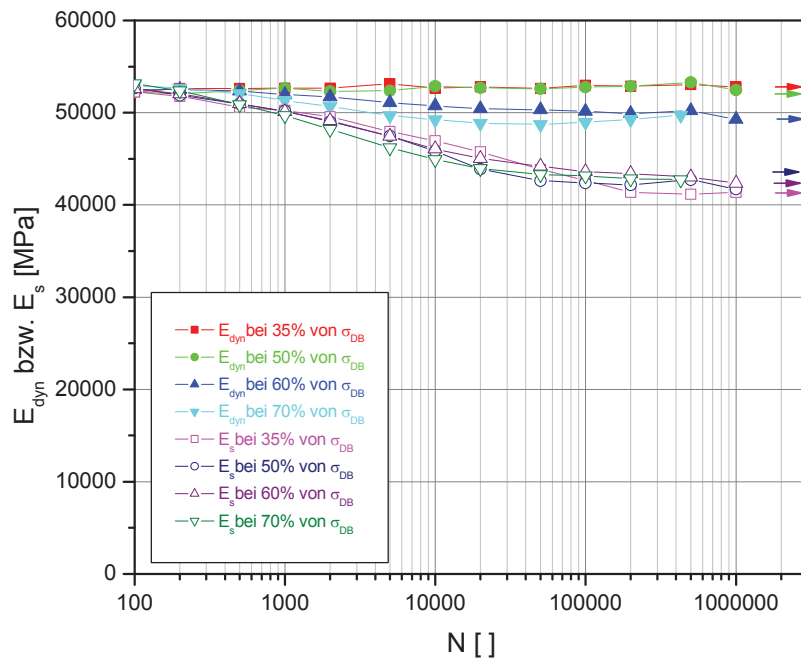




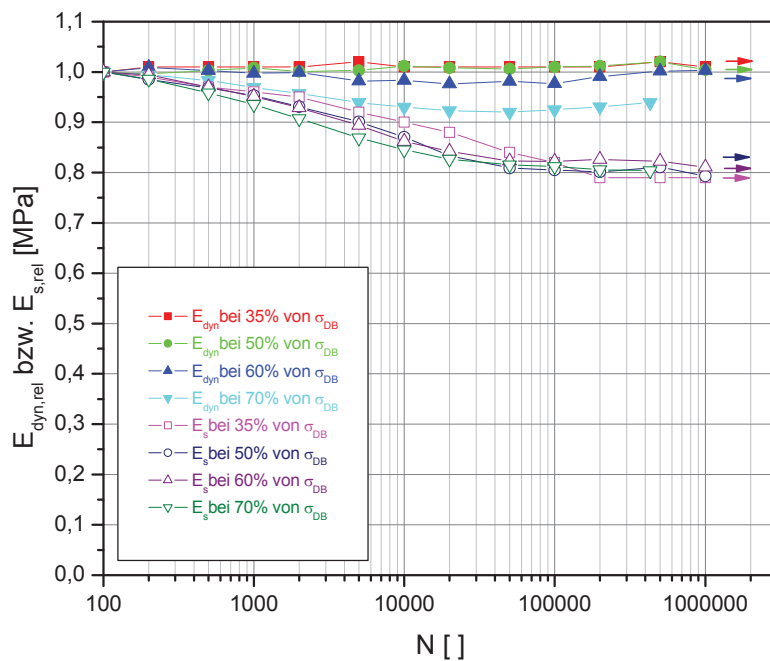
**Abb. B 5:** Absolute Moduli in Abhängigkeit der Zykluszahl von INJBC, wobei  $E_{dyn}$  der dynamische Modul,  $E_s$  der Sekantenmodul und  $N$  die Zykluszahl ist. Kolbenwegmessung.



**Abb. B 6:** Relative Moduli in Abhängigkeit der Zykluszahl von INJBC, wobei  $E_{dyn,rel}$  der relative dynamische Modul,  $E_{s,rel}$  der relative Sekantenmodul und  $N$  die Zykluszahl ist. Kolbenwegmessung.



**Abb. B 7:** Absolute Moduli in Abhängigkeit der Zykluszahl von PRIW, wobei  $E_{dyn}$  der dynamische Modul,  $E_s$  der Sekantenmodul und N die Zykluszahl ist. Kolbenwegmessung.



**Abb. B 8:** Relative Moduli in Abhängigkeit der Zykluszahl von PRIW, wobei  $E_{dyn,rel}$  der relative dynamische Modul,  $E_{s,rel}$  der relative Sekantenmodul und N die Zykluszahl ist. Kolbenwegmessung.