

# **Quasistatische und dynamische Eigenschaften von wirr- und gewebeverstärktem Polypropylen**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik  
der Technischen Universität Kaiserslautern  
zur Erlangung des akademisches Grades  
**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**  
eingereichte Dissertation

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Rafal Szymikowski**  
aus Danzig/Gdansk (Polen)

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Juli 2007

Promotionskommission:

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. R. Renz
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. M. Maier
- Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. P. L. Geiß

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit habe ich während meiner Zeit als Teilnehmer des DFG-Graduiertenkollegs „Ingenieurmaterialien auf verschiedenen Skalen: Experiment, Modellierung und Simulation“ angefertigt und führte meine Untersuchungen am Lehrstuhl für Ressourcengerechte Produktentwicklung an der Technischen Universität Kaiserslautern durch.

Ich danke besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Renz für die Ermöglichung, die Arbeit an seinem Lehrstuhl durchführen zu können, für fachliche und persönliche Unterstützung, Betreuung und Motivation zur Erstellung dieser Dissertation.

Mein Dank gilt auch Dipl.-Ing. Rita Paiva für ihre Unterstützung. Im Rahmen ihres Forschungsprojektes konnte die Messgenauigkeit der Hysteresismessung deutlich erhöht werden, was für die vorliegende Arbeit eine wesentliche Voraussetzung war.

Ich danke der Fa. Quadrant und dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie in Pfinztal für die Bereitstellung des Probenmaterials und beiden Einrichtungen für ihr Interesse an der Arbeit.

Ich bedanke mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung.

Ich bedanke mich außerdem bei den ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern des Lehrstuhls für die hilfreiche Unterstützung, die Bereitschaft zu konstruktiven und fruchtbaren Diskussionen und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Ich bedanke mich bei meiner Frau, meinen Söhnen und meinen Eltern für ihr Verständnis, ihre Unterstützung und Geduld.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen – Stand der Kenntnisse</b> .....	<b>2</b>
2.1	Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT).....	2
2.1.1	Herstellungsverfahren.....	2
2.1.1.1	Verarbeitungstechniken ausgewählter thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe.....	2
2.1.1.1.1	Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT).....	3
2.1.1.1.2	D-LFT Verfahren.....	4
2.1.1.1.3	Gewebeverstärkte Thermoplaste.....	5
2.1.2	Quasistatische und physikalische Eigenschaften von .....	7
	langfaserverstärkten Thermoplasten.....	7
2.1.2.1	D-LFT.....	8
2.1.2.2	Gewebeverstärkter Thermoplaste (GMTex).....	10
2.1.3	Ermüdungsverhalten von faserverstärktem Polypropylen.....	10
2.2	Schädigungsmechanismen an Faserverbundwerkstoffen.....	11
<b>3</b>	<b>Untersuchte Werkstoffe, Gefügeuntersuchungen</b> .....	<b>12</b>
3.1	Untersuchte Werkstoffe .....	12
3.1.1	Direkt-LFT.....	12
3.1.2	Gewebeverstärkter Thermoplast (GMTex) .....	18
3.2	Gefügeorientierte Untersuchungen .....	21
3.2.1	Direkt-LFT.....	21
3.2.2	Gewebeverstärkter Thermoplast (GMTex) .....	24
3.3	Messungen mit US- und Röntgenverfahren .....	25
3.3.1	US-Messverfahren.....	25
3.3.2	Vergleich von US- und Röntgenuntersuchungen.....	26
<b>4</b>	<b>Versuchseinrichtungen – Durchführung und Auswertung</b> .....	<b>29</b>
4.1	Einrichtungen .....	29
4.1.1	Servohydraulische Prüfmaschine .....	29
4.1.2	Druckvorrichtung.....	29
4.2	Probengeometrie.....	30
4.3	Durchführung quasistatischer Versuche .....	30
4.4	Dauerschwingversuche (Laststeigerungs-, und Ermüdungsversuche) .....	31

4.4.1	Begriffe zum Beanspruchungsbereich.....	31
4.5	Bemerkungen zur Versuchsdurchführung.....	32
<b>5</b>	<b>Berührungslos optische Messverfahren zur Deformations- und Dehnungsmessung .....</b>	<b>33</b>
5.1	Laser-Extensometer und Ortsaufgelöste Hysteresismessung.....	33
5.1.1	Messprinzip des Laser-Extensometers.....	33
5.1.2	Ortsaufgelöste Dehnungsmessung im Zugversuch mit Hilfe eines Laserextensometers .....	36
5.1.3	Das Hysteresis-Messverfahren.....	36
5.1.4	Ortsaufgelöste Hysteresismessung mit Hilfe eines Laser-Extensometers .....	38
5.1.4.1	Messapparatur .....	39
5.1.4.2	Optimierung der Hysteresismesstechnik und Messgenauigkeit .....	40
5.2	Objektrasterverfahren .....	43
5.2.1	Messsystem.....	45
5.3	Thermoelastische Spannungsanalyse (TSA) .....	46
5.3.1	Funktionsweise .....	46
5.3.2	Messsystem , Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung .....	47
<b>6</b>	<b>Versuchsergebnisse.....</b>	<b>49</b>
6.1	Direkt-LFT .....	49
6.1.1	Zugversuch .....	49
6.1.1.1	Lokales Deformationsverhalten von Probestäben aus einer Platte..	49
6.1.1.2	Zugversuch an Probestäben aus Platten unterschiedlichen Raumgewichts.....	54
6.1.1.3	Gesamtbetrachtung zum lokalen Deformationsverhalten beim Zugversuch .....	60
6.1.2	Dynamisches Werkstoffverhalten (Zugschwellbelastung) .....	61
6.1.2.1	Versuchsstrategie .....	61
6.1.2.2	Zugschwellbelastung, beispielhafte Ermüdungsversuche.....	64
6.1.2.3	Verhalten der späteren Bruchzonen (Proben aus Platten längs und quer entnommen) .....	70
6.2	Gewebeverstärkter Thermoplast (GMTex) .....	73
6.2.1	Zügige Belastung .....	73
6.2.1.1	Lokale Deformationsanalyse und Gefüge .....	73

6.2.1.2	Beispielhafte Zugversuche.....	78
6.2.1.3	Beispielhafte Druckversuche.....	81
6.2.1.4	Vergleich von Zug- und Druckversuch (an Charge 1 und 2) .....	84
6.2.2	Dynamische Belastung.....	85
6.2.2.1	Zugschwellbelastung .....	85
6.2.2.1.1	Versuchsstrategie.....	85
6.2.2.1.2	Beispielhafte Darstellung von Ermüdungsversuchen bei Zugschwellbelastung .....	88
	Mechanisch-dynamische Kennwerte der späteren Bruchzonen.....	94
6.2.2.2	Druckschwellbelastung .....	99
6.2.2.2.1	Versuchsstrategie.....	99
6.2.2.2.2	Beispielhafte Darstellung von Druckschwell- Ermüdungsversuchen .....	99
	Mechanisch-dynamische Kennwerte der späteren Bruchzonen.....	104
<b>7</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>107</b>
7.1	Direkt-LFT .....	107
7.1.1	Lokales Deformationsverhalten im Zugversuch.....	107
7.1.2	Gefügebasierte Simulation der inhomogenen lokalen mechanischen Eigenschaften.....	111
7.1.3	Ermüdungsverhalten bei Zugschwellbelastung .....	111
7.1.3.1	Dehnungsorientierte Analyse des Kriechens und der Steifigkeitsabnahme .....	112
7.1.3.1.1	Spannungs- und Totaldehnungswöhlerkurven .....	118
7.2	Gewebeverstärkter Thermoplast.....	120
7.2.1	Gefüge und lokale Deformationsanalyse.....	120
7.2.1.1	Gegenüberstellung von Gefüge und realem Deformationsverhalten .....	120
7.2.1.2	Faserorientierung: Experiment und Simulation .....	120
7.2.2	Quasistatische Zug- und Druckversuche.....	122
7.2.2.1	Lokales Deformationsverhalten.....	122
7.2.2.2	Zug- und Druckfestigkeit .....	123
7.2.3	Zugschwellbelastung .....	125
7.2.3.1	Dehnungsorientierte Analyse des Kriechens und der Steifigkeitsabnahme .....	125

7.3	Untersuchungen zum Kriechverhalten .....	131
7.3.1	Messverfahren.....	131
7.3.2	Kriechformel nach Nutting .....	133
7.3.2.1	Spannungs- und Totaldehnungswöhlerkurven.....	135
7.3.3	Druckschwellbelastung.....	138
7.3.3.1	Lokales Deformationsverhalten.....	138
7.3.3.2	Spannungs- und Totaldehnungswöhlerkurven.....	138
7.3.4	Vergleich des Ermüdungsverhaltens bei Zug- und Druckschwellbelastung .....	140
7.3.5	Vergleich statischer und dynamischer Festigkeitswerte .....	143
7.4	Vergleich von D-LFT und gewebeverstärktem Thermoplast .....	143
7.4.1	Ermüdungsverhalten .....	143
7.4.1.1	Wöhlerdiagramme bei Zugschwellbelastung.....	143
7.4.1.2	Anstieg von Mittel- und Ausschlagsdehnung .....	144
7.4.2	Vergleich statischer und dynamischer Festigkeitswerte .....	146
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>147</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>149</b>

## Formel- und Abkürzungsverzeichnis

$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{kJ/kgK}$
$c_v$	spezifische Wärmekapazität bei konstanter Temperatur	$\text{kJ/kgK}$
$E$	E-Modul	$\text{N/mm}^2$
$f$	Frequenz	$\text{Hz}$
$F$	Kraft	$\text{N}$
$G$	G-Modul	$\text{N/mm}^2$
$R$	Belastungsverhältnis	1
$t$	Zeit	$\text{s}$
$T$	absolute Temperatur	$\text{K}$
$\alpha$	Wärmeausdehnungskoeffizient	1
$\Delta(\sigma_1 + \sigma_2)$	Änderung der Hauptspannungssumme	$\text{N/mm}^2$
$\Delta(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$	Änderung der Hauptdehnungssumme	1
$\varepsilon_o$	obere Dehnung	%
$\varepsilon_u$	untere Dehnung	%
$\varepsilon_a$	Ausschlagsdehnung	%
$\varepsilon_m$	Mitteldehnung	%
$\Lambda$	Dämpfung	%
$\rho$	Dichte	$\text{g/cm}^3$
$\nu$	Querkontraktionszahl	1
$\sigma_a$	Spannungsamplitude	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_m$	Mittelspannung	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_o$	obere Spannung $\text{N/mm}^2$	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_u$	untere Spannung $\text{N/mm}^2$	$\text{N/mm}^2$

## Summary

In present work two types of materials were investigated by means of static and fatigue tests: discontinuous reinforcement of long glass fibres (D-LFT) and woven fabric reinforced polypropylene with additional glass mat. The two types of material result in excellent qualities according to their stiffness, reinforcement and toughness. Long fibre reinforced thermoplastics, especially those produced by the Direct-LFT technology, are increasingly used in the automotive industries.

An exact characterization of the mechanical material behavior was investigated using locally resolved techniques. Main focus was put on tension tests performed with the laser-extensometer and fatigue tests with an advanced technique, the locally resolved hysteresis measurement and additional thermoelastic stress analysis (TSA). An exact characterization of damage process was significantly improved by enhanced precision of hysteresis measurement.

For a microstructure analysis were carried out X-Rays, ultrasound and scanning microscope tests.

Static investigations of D-LFT material show a significant scatter of local mechanical properties within a test specimen. The failure appears in the area with the lowest Young-Modulus. Surprisingly the maximum strain at failure in the tension test of different test specimens this value shows a low scatter. It decreases slightly with fibre concentration, is slightly lower parallel to the main fibre orientation than perpendicular to it and the local strain at failure is between 2,2 and 2,8%. This outcome of the low spread of local strains at failure is remarkable, although the significant spread in other structural parameters as fibre orientation, wetting of fibres and inhomogeneties. This interesting characteristic of the material makes the robust behavior of material under mechanic load comprehensible.

Severe variations of strength also effect fatigue tests. Mechanical dynamic properties during fatigue test show a high percentage change of damping, low investigation associated with a decrease of stiffness and a heavy incline of creep. For the analysis the two last effects of strain oriented observation are very helpful. The decrease of stiffness will be replaced by strain deflection ( $\epsilon_a = \epsilon_o - \epsilon_m$ ) and can be compared directly with creep (middle strain). During static tests as well as fatigue tests can carry out a strain oriented analysis of fatigue tests. It leads to max. strain Wöhler-diagram in which the Wöhler-lines for parallel and perpendicular fibre orientation almost collapse.

The characterization of woven fabric reinforced thermoplast with additional glass mat was carried out for two charges in static and dynamic tension-tension and compression-compression tests. Static tension tests perpendicular to main fibre orientation show a lower quasistatic stiffness and strength than parallel to main fibre orientation. Still, the local strain at failure is approximately 2,5% perpendicular and 2,6% parallel to main fibre direction. The supplementary structure analysis does not yield any correlation between local mechanical properties and structure status. The failure appears mostly in the area of the lowest Young-Modulus. Mechanical properties are governed by anisotropic. During dynamic tension-tension tests a decrease of stiffness and creep was observed, whereas in perpendicular load creep direction is dominant with a lower decrease of stiffness.

The increase of damping by fatigue is partially intensive. In particular for Charge 1 due to weak matrix-fibre adhesion an intensive increase of damping by load cycles

was observed. At dynamic compression-compression tests decrease of stiffness and creep lower are.

As a damage phenomenon frequently spontaneous shearing of specimen was observed. As for D-LFT, max strain oriented observations lead to comparable characteristic max. strain Wöhler-diagram for parallel and perpendicular load, whereas diagrams are located apart in stress oriented observations.

The behavior of strain deflection  $\varepsilon_a$  and middle strain  $\varepsilon_m$  quantify fatigue events concerning decrease of stiffness and creep, alternative now, D-LFT and woven fabric reinforced thermoplast additionally depending on load direction can be observed. For woven fabric reinforced thermoplast in particular for the load in fibre direction a significant decrease of stiffness is remarkable, which can be assigned to break of fibre. The creep of woven fabric reinforced thermoplast is distinct, despite of discontinuous fibre reinforcement. For D-LFT material as a result it is shown that the creep dominates the degradation process and the increase of strain amplitude is less pronounced.

The investigation of materials proves as interesting technology and concerning of implementation. Due to the complex microstructure an exact analysis of influence microstructure on mechanical properties was not possible.

## 1 Einleitung

Kunststoffwerkstoffe, besonders faserverstärkte Thermoplaste wie langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) und gewebeverstärkte Thermoplaste, werden in vielen Anwendungen, beispielsweise in der Automobilindustrie, als Konstruktionswerkstoffe eingesetzt. Die Vorteile der beiden Werkstoffgruppen sind kostengünstiges Halbzeug und dessen kostengünstige Verarbeitung im Pressverfahren. Diese Werkstoffe haben außerdem günstige Eigenschaften hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Zähigkeit. Allerdings treten bei beiden Werkstoffgruppen durch den Verarbeitungsprozess (Pressen) im Bauteil deutliche Faserorientierungen und Inhomogenitäten auf. Deswegen sind orts aufgelöste Verfahren zur Deformationsanalyse bei statischer und dynamischer Belastung von besonderer Bedeutung und werden in diesem Vorhaben eingesetzt.

Die quasistatischen Zugversuche liefern wichtige Werkstoffkennwerte wie E-Moduli, Bruchdehnung, Festigkeit, aber keinerlei Informationen über das dynamische Verhalten. Die Analyse des Schwingfestigkeitsverhaltens von faserverstärkten Kunststoffen, die den Verlauf der dynamischen Eigenschaften zeigt, ist unter dem Aspekt der grundlegenden Schädigungsphänomene, der Werkstoffmodellierung und -optimierung und der Auslegung von dynamisch belasteten Bauteilen von großer Bedeutung.

## 2 Grundlagen – Stand der Kenntnisse

### 2.1 Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT)

#### 2.1.1 Herstellungsverfahren

Der erste großserienmäßige Einsatz von langfaserverstärkten Thermoplasten fand in den Jahren 1980-1985 statt, wobei insbesondere die Geräuschkapsel bzw. die Unterbodenschale des Mercedes190 zu nennen sind \GWA85\.

Der intensive Einsatz des Werkstoffs begann im Zeitraum 1995 bis 2000. Die Möglichkeit der Integration im Formgebungsprozess, das realisierbare Leichtbaupotential gegenüber metallischen Werkstoffen und das Einsparpotential können als die treibenden Kräfte für die Verbreitung des Werkstoffs angesehen werden. Die anfänglichen Entwicklungen betrafen die Verarbeitung von glasmattenverstärktem Thermoplast (GMT) im Form- oder Fließpressprozess, wobei Bauteile wie Unterboden Verkleidungen, Instrumententafelträger und auch Frontmodulträger gefertigt wurden \BRK98\.

Eine weitere Variante stellt die Verarbeitung von Stäbchengranulat (LFT-G) dar. Das Granulat wird in einem Einwellenextruder schonend plastifiziert und in die Werkzeugform extrudiert. Die Pressmasse wird im Fließprozess zum Bauteil geformt. LFT-G kann ebenfalls im Spritzgussprozess eingesetzt werden. Es wird jedoch vielfach aufgrund der geringen Faserlänge eine reduzierte Schlagzähigkeit beobachtet.

Insbesondere aus Kostengründen haben sich in den letzten Jahren die sog. Direktverfahren (LFT-D) durchgesetzt \BGK03\. Hier werden die Halbzeugherstellung umgangen und die Bauteile direkt aus den Komponenten Glasfaser und Polymer gefertigt. Hierbei ergeben sich deutliche Einsparmöglichkeiten aufgrund der reduzierten Materialkosten \KRA01\.

Hochbeanspruchte Bauteile werden mit lokaler Bauteilverstärkung mittels Gewebe ausgestattet.

Bei den sog. Direktverfahren entsteht der Werkstoff während des Fertigungsprozesses, der daher auch deutlichen Einfluss auf die Bauteileigenschaften hat.

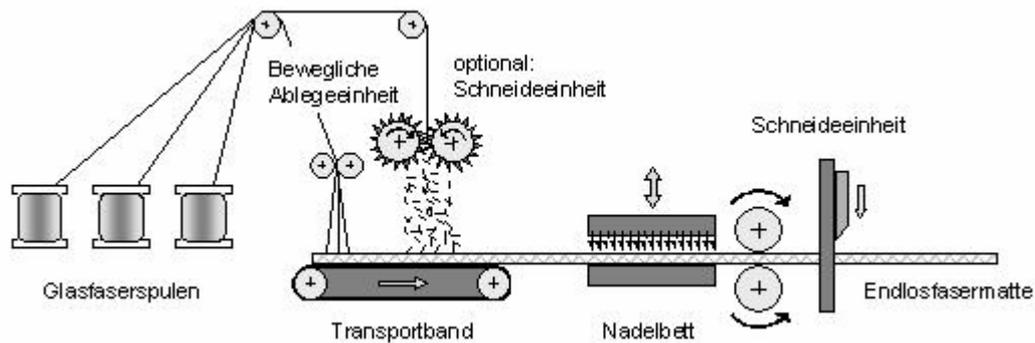
Gewebeverstärkte Thermoplaste weisen gegenüber langfaserverstärkten Thermoplasten mit Wirrfaserstruktur (GMT bzw. D-LFT) deutlich erhöhte mechanische Eigenschaften auf und besitzen ein hohes Potential für Struktur- und Semistrukturbauteile \AVK04, DIT03, DIT05, SCM04\. Aus anwendungstechnischer Sicht ist eine Kombination von Gewebelagen und Matten von besonderem Interesse, da sich durch die Wirrfasermatten eine deutliche Anhebung des Energieverzehrs bei Crashbelastung im Bauteil ergibt.

#### 2.1.1.1 Verarbeitungstechniken ausgewählter thermoplastischer Faserverbundwerkstoffe

Eine umfassende Darstellung der Fertigungstechnologien enthält die Dissertation Tröster \TRO03\.

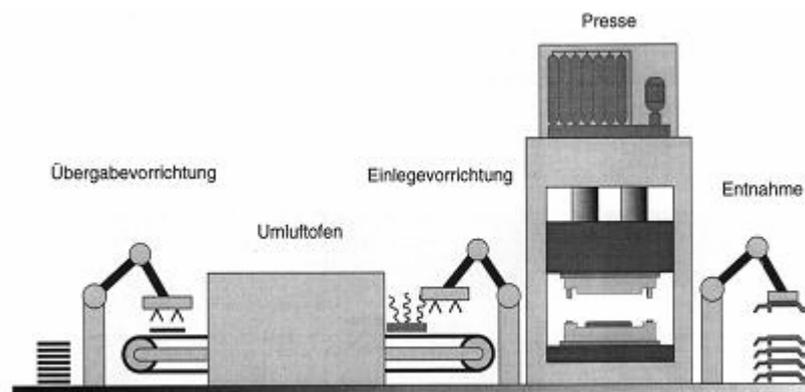
### 2.1.1.1.1 Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT)

Bei der Herstellung von Bauteilen aus glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT) kommen Zuschnitte aus vorimprägnierten Platten zum Einsatz, vorzugsweise Matten-GMT. Matten-GMT wird durch Vernadelung von Glasfaserrovings hergestellt. Die Imprägnierung mit PP zu dem GMT-Halbzeug erfolgt auf einer Doppelbandpresse (**Abb. 2-1**).



**Abb. 2-1:** Herstellung von GMT-Halbzeug \TRO03\

Die konfektionierten Halbzeuge werden im Umluftofen auf Verarbeitungstemperatur von ca. 230 °C erhitzt und dann mittels einer Übergabevorrichtung in das Presswerkzeug eingelegt. Durch den heute dominierend eingesetzten Fließpressprozess wird das Halbzeug zum Bauteil geformt. Stanzabfälle können bei der Halbzeugherstellung direkt wieder eingearbeitet werden. Den Verarbeitungsprozess von GMT-Halbzeugen zu Fertigteilen zeigt **Abb. 2-2**.

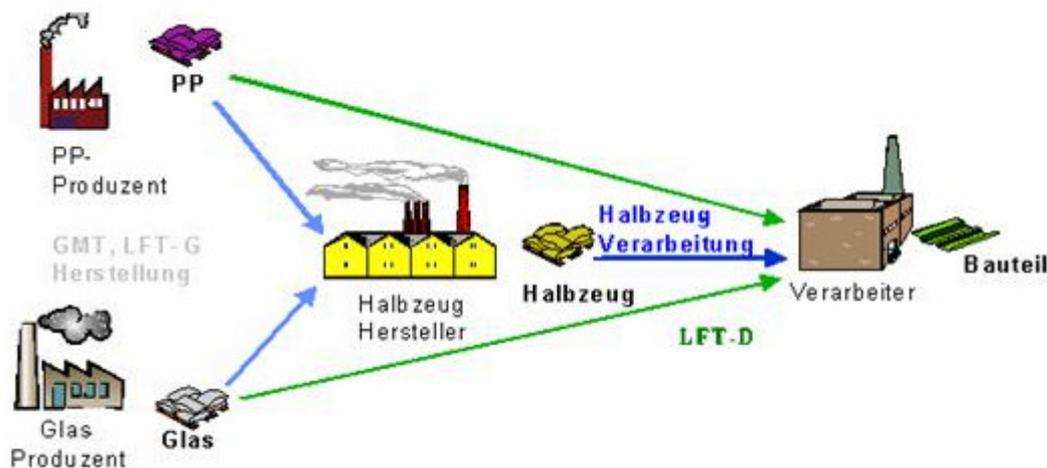


**Abb. 2-2:** Verarbeitung von GMT \TRO03\

### 2.1.1.1.2 D-LFT Verfahren

Von Brüssel wurde das D-LFT-Verfahren entwickelt und im Großserieneinsatz für die Herstellung von Frontmodulträgern verwendet \BRK98\.

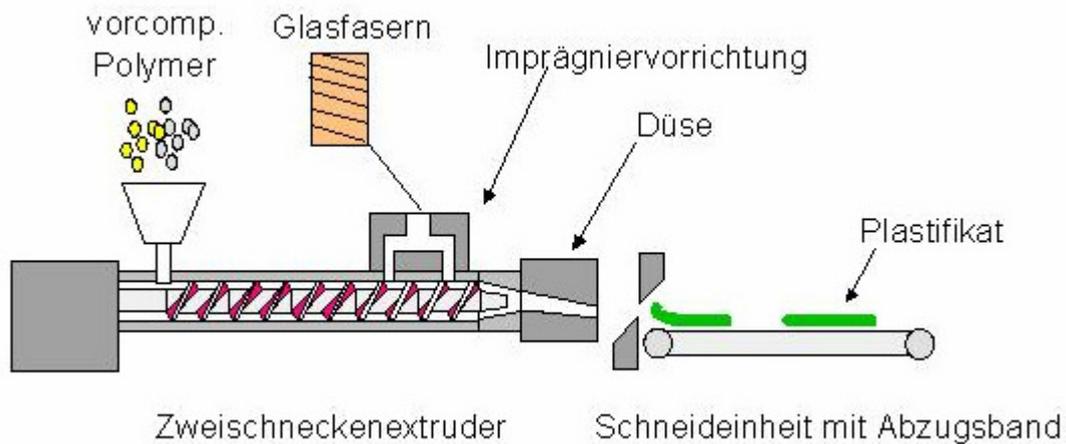
Beim Direkt-LFT-Prozess werden die Glasfasern bei dem Extrusionsprozess zugeführt, von der endlosen Form gekürzt und in die Schmelze eingearbeitet. Durch diese direkte Verarbeitung tritt im Großserieneinsatz eine deutliche Kosteneinsparung auf. Als Werkstoffkomponenten werden dominierend Polypropylen und E-Glas-Rovings der Feinheit 2400 tex mit einer PP-kompatiblen Schlichte verwendet (**Abb. 2-3**).



**Abb. 2-3:** Zusammenfassung des Halbzeug- und Verarbeitungsschritts bei dem Direkt-Verfahren \TRO03\

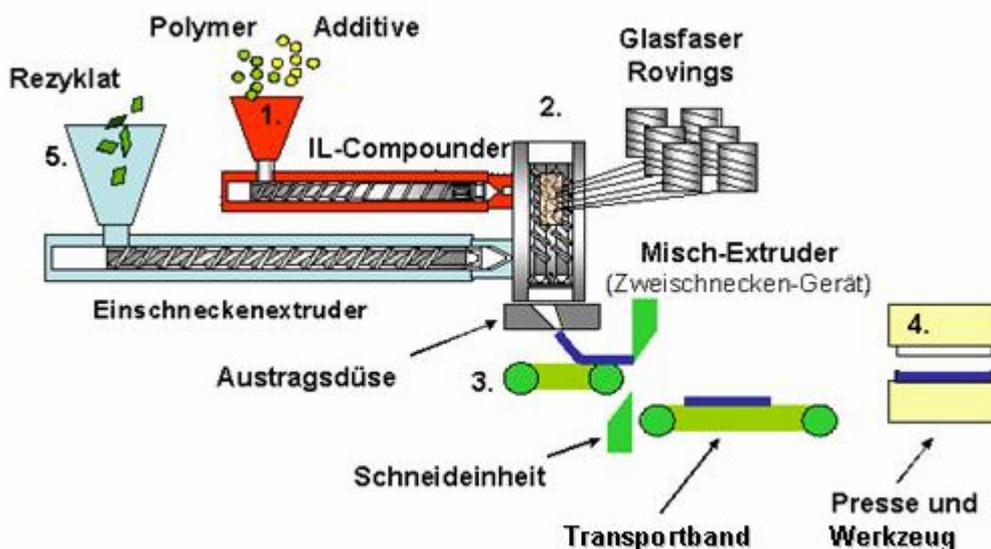
### Einmaschinen- und Zweimaschinentechnologie

Bei der Einmaschinentechnologie finden die Materialaufschmelzung und die Verarbeitung zum Verbundwerkstoff in einem Zweischnellenextruder statt. Das Polymergranulat wird aufgeschmolzen. Die Fasern, die durch den Extruder zerteilt und mehr oder weniger homogenisiert werden, werden an düsennäherer Stelle zugeführt. Der Plastifikatstrang wird auf einem Abzugsband abgelegt und von dort mit einem Nadelgreifer in das Presswerkzeug eingelegt. Durch den anschließenden Fließprozess wird das Bauteil geformt. Randabschnitte und Stanzteile können ohne wesentliche Qualitätseinbuße dem Verarbeitungsprozess zugeführt werden (**Abb. 2-4**).



**Abb. 2-4:** LFT-D-Anlagenschema \TRO03\

Die Einmaschinentechologie weist eine Reihe von Nachteilen auf, wobei insbesondere die mangelnde Homogenisierung, die nicht gleichmäßige Faserverkürzung und die zumeist geringere Durchsatzleistung zu nennen sind. Eine Weiterentwicklung stellt die Zweimaschinentechologie dar, die o. g. Nachteile des D-LFT-Verfahrens überwindet. Es waren ergänzende Untersuchungen an Probestplatten aus diesem Werkstoff vorgesehen, die jedoch nicht mehr in dem vorgegebenen Zeitrahmen durchgeführt werden konnten. Der Laboraufbau ist in **Abb. 2-5** schematisch dargestellt.



**Abb. 2-5:** LFT-D-ILC-Anlagenschema \TRO03\

### 2.1.1.1.3 Gewebeverstärkte Thermoplaste

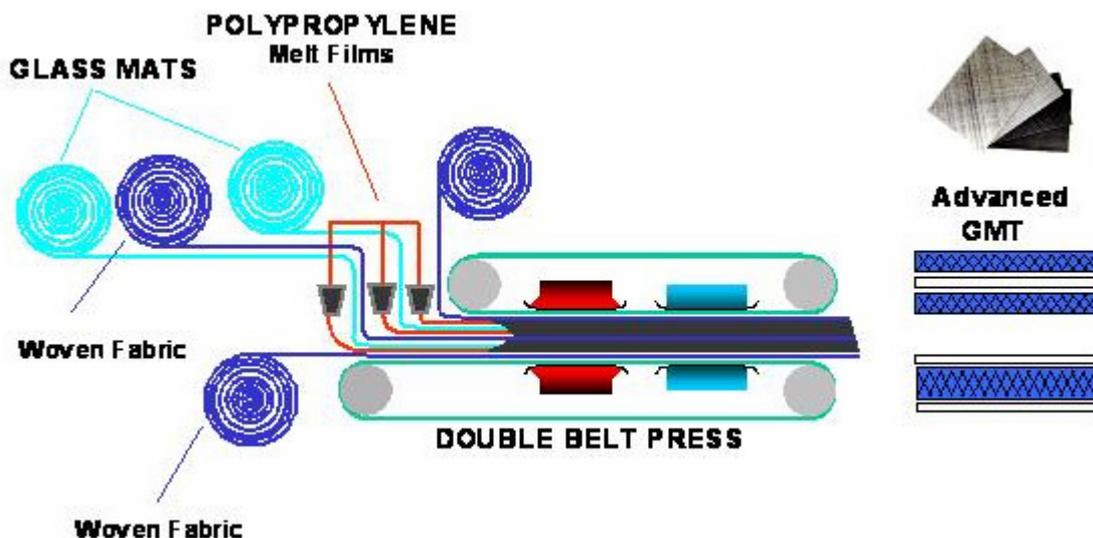
Gewebeverstärkte Thermoplaste weisen gegenüber langfaserverstärkten Thermoplasten mit Wirrfaserstruktur (GMT bzw. D-LFT) deutlich erhöhte mechanische Eigenschaften auf und besitzen ein hohes Potential für Struktur- und Semistrukturbauteile \AVK04, DIT03, DIT05, SCM04\.

Aus anwendungstechnischer Sicht ist eine Kombination von Gewebelagen und Matten von besonderem Interesse, da sich durch die Wirrfasermatten eine deutliche Anhebung des Energieverzehrs bei Crashbelastung im Bauteil ergibt.

Es werden vertiefte Untersuchungen zum Werkstoffverhalten von gewebeverstärktem Thermoplast (GMTex der Fa. Quadrant Plastic Composites AG) bei quasistatischer und dynamischer Belastung mit orts aufgelösten Verfahren durchgeführt, um ein prinzipielles Verständnis des Werkstoffverhaltens zu gewinnen. An einem U-förmigen Bauteildemonstrator werden anschließend Bauteiluntersuchungen durchgeführt, wobei der Dehnungs- und Deformationszustand des Bauteils bei der dynamischen Belastung erfasst werden kann. Das Verhalten in den Schädigungszonen wird verglichen mit dem am Probekörper erhaltenen lokalen Deformationsverhalten. Ergänzend werden FE-Berechnungen zur lokalen Spannungs- und Dehnungsanalyse des aufgrund der Gewebeverstärkung anisotropen U-Profiles durchgeführt. Diese zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem quasistatischen Deformationsverhalten. Die Entwicklung von Modellvorstellungen zum Ermüdungsverhalten ist Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.

### Untersuchungsmaterial

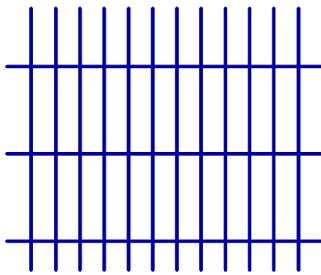
Die Untersuchungen werden an einem gewebeverstärkten Thermoplastmaterial mit Polypropylen-Matrix durchgeführt: Die Herstellung erfolgt mittels einer Doppelbandpresse (**Abb. 2-6**). Das Material besteht aus zwei Geweberandschichten (Faseranteil längs, senkrecht: 4:1) und einer Mittellage aus Glasmatte (**Abb. 2-7**); es liegt insgesamt ein Glasfasergehalt von 40 Gew.-% vor. Aufgrund der unterschiedlichen Faseranteile längs und senkrecht weist der Werkstoff eine deutliche Anisotropie der Eigenschaften auf.



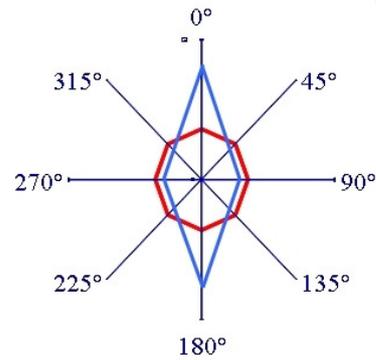
**Abb. 2-6:** Verfahrensschema der Herstellung von gewebeverstärktem Thermoplast (TGMTex, Fa. Quadrant) \QUA06\



Schematische Darstellung des Materialaufbaus



Schematische Darstellung Faseranteil parallel, quer



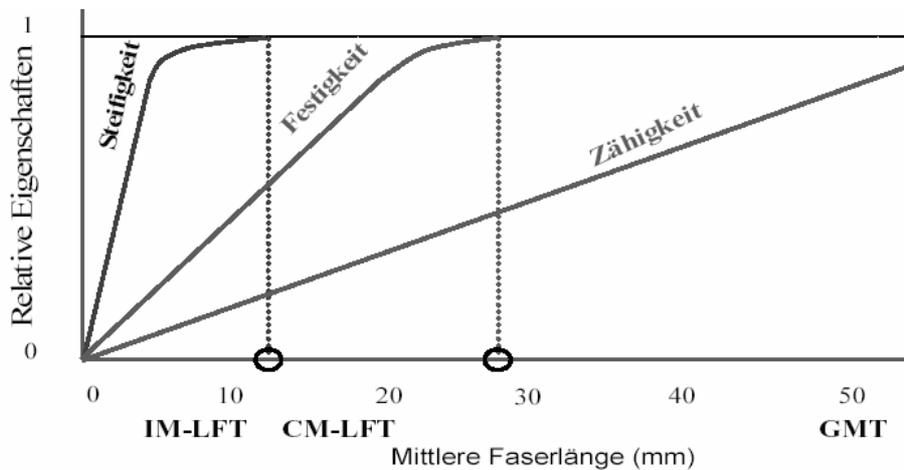
Schematische Darstellung der anisotropen Steifigkeit

**Abb. 2-7:** Schematische Angabe zur Gefügestruktur und der richtungsabhängigen Steifigkeitseigenschaften von gewebeverstärktem Thermoplast (GMTex, Fa. Quadrant, Werkstoffbezeichnung X112 F40-4\1-0°90, (EP 533), äußere Lagen Gewebeverstärkung, Mittellage Glasmatte, Faseranteil parallel zu quer: 4:1, Fasergehalt 40 Gew.-%, Matrix: PP) \ DIT05\

### 2.1.2 Quasistatische und physikalische Eigenschaften von langfaserverstärkten Thermoplasten

Eine umfassende Darstellung der mechanischen Eigenschaften enthält das AVK-TV-Handbuch: Faserverstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen \AVK04\ auf die im Wesentlichen im Kapitel 2.1.2 zurückgegriffen wird.

Wie bei allen Faserverbundwerkstoffen werden die mechanischen Eigenschaften auch bei Langfaserverstärkten Thermoplasten vor allem durch die Verstärkungsfasern bestimmt: Neben Art und Anteil der Fasern ist hier vor allem die Faserlänge zu nennen (**Abb. 2-8**). Wie aus unterschiedlichen Untersuchungen hervorgeht, kann bereits mit relativ kurzen Fasern die maximal erreichbare Steifigkeit eines bestimmten Faser-Matrix-Systems erzielt werden. Sind Bauteile auf Festigkeit zu dimensionieren, so werden bereits deutlich höhere Faserlängen erforderlich.



**Abb. 2-8:** Eigenschaften von Langfaserverstärkten Thermoplaste \AVK04\

Neben der Faserlänge ist auch die Anordnung der Fasern (Faserorientierung) im fließgepressten Bauteil von entscheidender Bedeutung: Auch längere Fasern können infolge von scherinduzierten Fließorientierungen extrem niedrige Festigkeiten senkrecht zur Hauptfließrichtung aufweisen.

Messungen am Bauteil können sich deutlich von den Probestabwerten unterscheiden. Die dreidimensionale Faserstruktur erzeugt einen hohen Risswiderstand im Werkstoff, der die hohe Schlagzähigkeit und das sehr robuste Schädigungsverhalten begründet.

Endlosfasern werden dann eingesetzt, wenn Bauteile Dauerlasten (Kriechen) oder schwingenden Belastungen (Ermüdung) ausgesetzt sind, wie beispielsweise ein Trägerteil für ein hinteres Differential bei Allradfahrzeugen, bei dem permanente Lastwechsel zu wechselnden Torsionsmomenten im Bauteil führen. Hier kann die Lebensdauer von Aluminium unter Ermüdung bei gleichzeitiger Gewichtersparnis um ein Vielfaches übertroffen werden. Die Endlosfaseranteile werden entweder bei der Herstellung der Matten eingearbeitet oder sie werden erst bei der Halbzeugherstellung zusammen mit den Matten in die Doppelbandpresse eingeführt. Die thermischen und chemischen Eigenschaften der Halbzeuge werden vor allem durch die Eigenschaften von PP bestimmt. Höhere Faseranteile und endlose Fasern verbessern das Erweichungsverhalten der Verbundwerkstoffe gegenüber reinem PP oder kurzfaserverstärktem PP erheblich (**Tab. 2-1**).

Physikalische Eigenschaften	GMT/20%	GMT/30%	GMT/40%	GMTex/ UD <sup>1</sup>
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	1.05	1.13	1.22	1.2-1.37
Schwindung (%)	0.3 - 0.5	0.2 - 0.35	0.15 - 0.3	0.1 - 0.25
Maximale Einsatz-temperatur (°C)	100 - 105	100 - 105	100 - 105	100 - 105
Mechanische Eigenschaften	GMT/20%	GMT/30%	GMT/40%	GMTex/ UD <sup>1</sup>
Zugfestigkeit (MPa)	43 - 60	65 - 80	82 - 100	84 - 330
Reißdehnung (%)	2.1 - 2.5	2 - 2.5	1.9 - 2.5	1.7 - 2.8
Zug-E-Modul (MPa)	3000 - 3500	4000 - 4500	5000 - 5800	4600 - 22000
Schlag-zähigkeit/Char-py (kJ/m <sup>2</sup> )	45 - 50	60 - 75	66 - 90	67 - 280

<sup>1)</sup> faseranteile bei DU- und Gewebetypen 38- 52 Gew.%

**Tab. 2-1:** Physikalische und mechanische Eigenschaften von Langfaserverstärkten Thermoplasten \AVK04\

### 2.1.2.1 D-LFT

Die Werkstoffeigenschaften beim D-LFT werden maßgeblich durch die hohen Faserlängen beeinflusst. Die Faserlängenverteilung ist beispielhaft in **Abb. 2-9** dargestellt. Die kürzeren Fasern (bis ca. 25 mm Faserlänge) orientieren sich senkrecht zur Fließfront, die langen Fasern können aufgrund ihrer Länge nur parallel mit der Fließfront transportiert werden (in Abhängigkeit der Komplexität der Geometrie).

Die mechanischen Eigenschaften typischer Werkstoffformulierungen von D-LFT, GMT und SMC (Sheet Moulding Compounds) sind in **Tab. 2-2** tabellarisch dargestellt. Sehr deutliche Unterschiede der einzelnen Werkstoffe findet man beim Elastizitäts- sowie beim Biegemodul und der Biegefestigkeit. Eine qualitative Darstellung verschiedener Werkstoffeigenschaften zeigt **Abb. 2-10**.

Je nach Wertung der einzelnen Kriterien kann hier ein optimaler Werkstoff ausgewählt werden. Die in der Darstellung abgebildeten Eigenschaften entsprechen Standard-Produkten. Durch spezielle Werkstoffkombinationen können erhebliche Eigenschaftsänderungen erreicht werden.

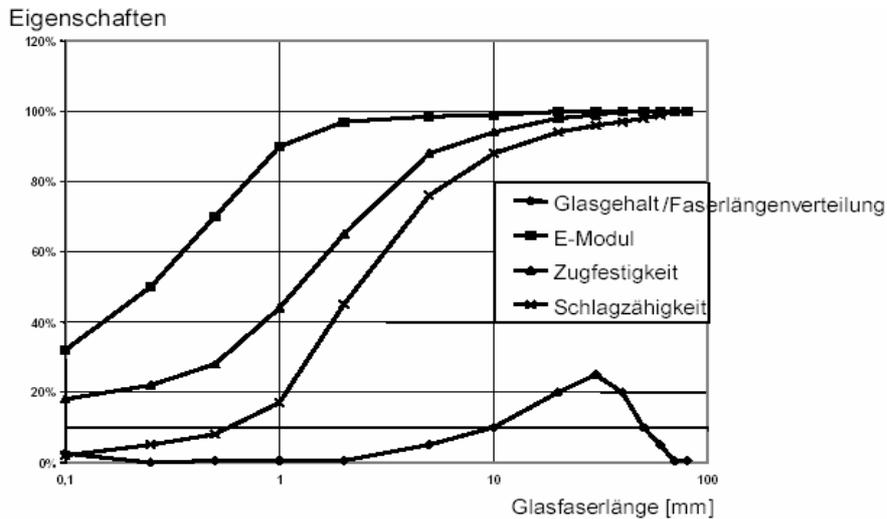


Abb. 2-9: Eigenschaften in Abhängigkeit der Faserlänge (AVK04)

Eigenschaften	Einheit	LFT	GMT	SMC
Glasfaseranteil	[%]	40	40	30
Recyclatanteil	[Masse-%]	30	-	5
Zugfestigkeit	[MPa]	60	65	60
E-Modul	[MPa]	7,200	6,100	9,500
Biegefestigkeit	[MPa]	110	110	160
Biegemodul	[MPa]	5,400	4,100	8,900
Schlagzähigkeit	[kJ/m <sup>2</sup> ]	60	75	70
Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]	1-21	1.21	1.80

Tab. 2-2: D-LFT Eigenschaften im Vergleich \AVK04\

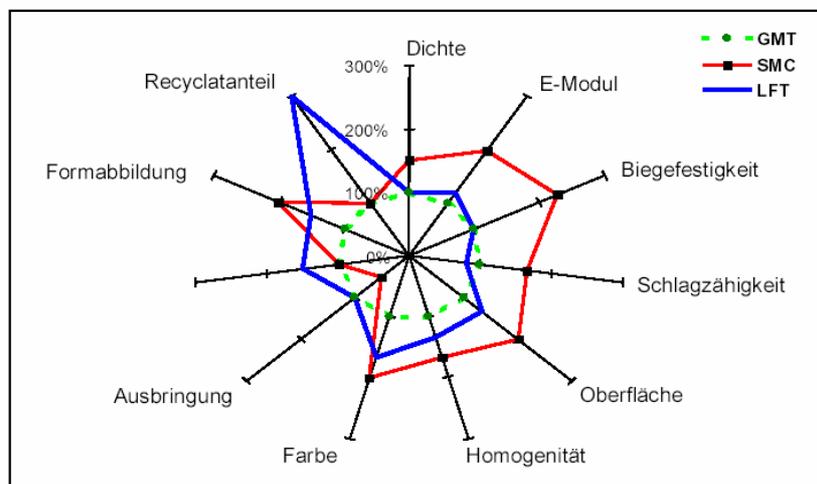


Abb. 2-10: LFT, GMT und SMC im Vergleich \AVK04\

### 2.1.2.2 Gewebeverstärkter Thermoplaste (GMTex)

Bei dem untersuchten gewebeverstärkten Thermoplast liegt ein Faseranteil längs: quer wie 4:1 vor, was zu einer deutlichen Anisotropie der mechanischen Eigenschaften führt. Die Mittellage dient zur Erhöhung der Schlagzähigkeit des Werkstoffs. Ein Vergleich unterschiedlicher GMT- und LFT-Typen mit dem gewebeverstärkten Thermoplast zeigt, dass hier richtungsabhängig wesentlich höhere Steifigkeiten und Festigkeiten vorliegen können, was diesen Werkstoff für mechanische Extrembelastungen besonders geeignet macht (**Abb. 2-7, Tab. 2-1**).

### 2.1.3 Ermüdungsverhalten von faserverstärktem Polypropylen

Ein wichtiges Kriterium bei der Bauteilauslegung ist das Ermüdungsverhalten, über das allerdings nur begrenzte Kenntnisse vorliegen.

Da die Werkstoffe eine mehr oder weniger starke Fasereininhomogenität aufweisen und damit lokal unterschiedliche Eigenschaften vorliegen, sind insbesondere ortsauflösende Verfahren relevant, die dann besonders leistungsfähig sind, wenn sie die lokalen Ereignisse auch noch versuchsbegleitend erfassen. Hierzu sind berührungslose optische Messverfahren besonders geeignet, wobei folgende u. a. am Lehrstuhl vorliegende Verfahren von besonderer Bedeutung sind: Ortsaufgelöste Hysteresismesstechnik mittels Laser-Extensometer \RER97, REE00, REP01, RSS04a, FIE04\, Objektrasterverfahren \GOM06\, Thermoelastische Spannungsanalyse \HAC91, RSS04b\.

Zur Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens faserverstärkter Kunststoffe werden vielfach bruchmechanische Untersuchungen und\ oder Hysteresis-Messungen herangezogen. Im Fall des glasfaserverstärkten Polypropylens wurden folgende Verfahren eingesetzt (Literaturrecherche):

#### Spritzguss

Kurzfasern	\PER00, PER02\	Bruchmechanik
Kurz-, Langfasern	\WAE97\	Hysteresismessung
Kurz-, Langfasern	\KFB91, KAR95\	Bruchmechanik

#### GMT, LFT

Glasmatten	\SAB93\	Bruchmechanik
Glasmatten	\KAR99\	Bruchmechanik
Direkt LFT	\RSS04a\	ortsaufgelöste Hysteresismessung

#### Laminate

\NSS02, DEP01\	Steifigkeitsabfall
----------------	--------------------

Wird das Ermüdungsverhalten durch Schädigungsprozesse und nicht durch Risswachstum geprägt, ist davon auszugehen, dass Hysteresisuntersuchungen gegenüber bruchmechanischen Untersuchungen von Vorteil sind (siehe auch \KAR99\). Untersuchungen lassen erwarten, dass dieses Verhalten auch bei kurzfaserverstärktem PP vorliegt \WAE97\, in jedem Fall jedoch bei z. B. Direkt-LFT \RSS04a\.

Gegenüber der bislang durchgeführten integralen Hysteresismessung ergeben sich mit der ortsaufgelösten Hysteresismessung weitergehende Erkenntnisse, da der

Schadensort lokal beobachtet wird, was die Aussagefähigkeit dieses Verfahrens wesentlich erhöht. Dies ist u. a. auch dann von Bedeutung, wenn, wie im Fall der zu untersuchenden Werkstoffe, lokale Inhomogenitäten vorliegen.

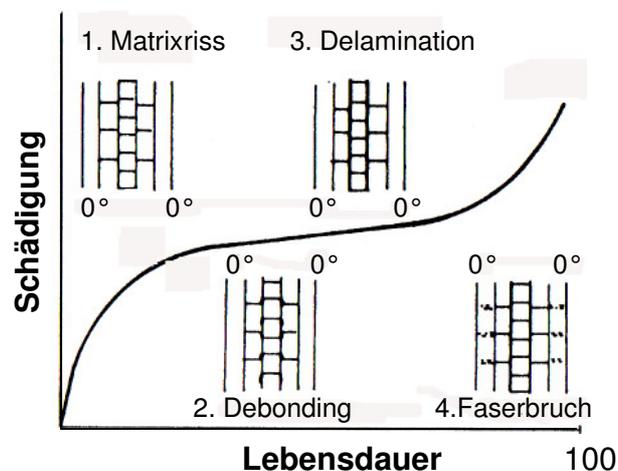
Ein prinzipieller Vorteil der Hysteresismessung bei der Werkstoffgruppe der glasfaserverstärkten Thermoplaste ist, dass ein einziges Messverfahren durchgehend eingesetzt werden kann. Dies bringt hinsichtlich der Ergebnisinterpretation und des Werkstoffvergleichs wesentliche Vorteile mit sich. Darüber hinaus werden im Falle der Hysteresismessung auch ingenieurmäßige Erkenntnisse hinsichtlich der Bauteilauslegung gewonnen.

## 2.2 Schädigungsmechanismen an Faserverbundwerkstoffen

Bei grundsätzlicher Betrachtung der Schädigungsmechanismen, die bei der Beanspruchung faserverstärkter Kunststoffe auftreten, kann zwischen Mikroschäden und Makroschäden unterschieden werden. Als Mikroschäden werden Schäden mit einer Ausdehnung in der Größenordnung eines oder mehrerer Faserdurchmesser bezeichnet. Makroschäden nehmen eine Ausdehnung mit der Dicke mindestens einer Einzel-Schicht an /Hof97/.

Der Schädigungsmechanismus wird zumeist nach folgendem Schema klassifiziert:

- Matrixriss
- Debonding – Lösen der (Einzel)- Faser von der Matrix
- Delamination zwischen benachbarten Schichten
- Faserbruch



**Abb. 2-11:** Schema des Schädigungswachstums im Laminat /TOP01/

In der ersten Phase der Schädigung treten die Matrixrisse senkrecht zur Belastungsrichtung auf. Das entspricht den Schichten, in denen die Fasern nicht in der Belastungsrichtung liegen. Unter Schwingungsbeanspruchung nimmt der Anzahl der Mikrorissen mit steigender Lastspielzahl zu. Im sekundären Anstiegsbereich entsteht ein weiteres dreidimensionales Wachstum der Schädigung. Die einzelnen Fasern werden von der Matrix gelöst. Dies führt zur Delamination, die sich zu Makroschäden ausbreitet. Folglich wird die Belastung nur durch die Fasern übertragen, was zum Faserbruch (**Abb. 2-11**) führt.

### 3 Untersuchte Werkstoffe, Gefügeuntersuchungen

#### 3.1 Untersuchte Werkstoffe

##### 3.1.1 Direkt-LFT

Für die Untersuchungen werden Platten (400 mmx 400 mm, Dicke ca. 2 mm, Glasfasergehalt 20, 30 und 40 Gew.-%, Fertigungsstand 1. Halbjahr 2003) mit dem Direkt LFT-Verfahren hergestellt. Die Herstellung erfolgt durch das Fraunhoferinstitut ICT in Pfinztal/Berghausen. Bei allen Probestabplatten erfolgt die gleiche Einlegetechnik (Vorformling mittig eingelegt) (**Abb. 3-1**). Die Röntgenaufnahmen der Platten sind in (**Abb. 3-2** und **Abb. 3-3**) dargestellt und zeigen eine inhomogene Faserverteilung (siehe auch **Abb. 3-17**).

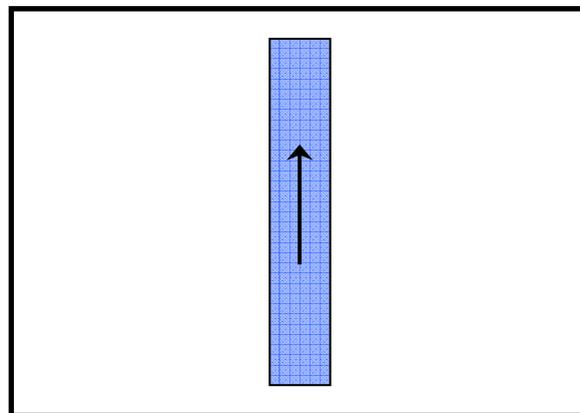
Die Proben werden senkrecht und quer zur Einlegerichtung entnommen. Als Probekörper werden Parallelstäbe (20 x 140 mm<sup>2</sup>) verwendet. Die Messlänge für den Laserextensometer beträgt 50 mm.

Der Schnittplan der Proben ist in **Abb. 3-3** dargestellt und ist ebenfalls über die Röntgenaufnahme projiziert.

Die Platten wurden zwar gewogen, jedoch nicht der Fasergewichtsanteil ermittelt.

An einem einzelnen Probestab wird beispielhaft die inhomogene Glasfaserverteilung, die lokal zwischen 27 und 38 % schwankt, dargestellt (**Abb. 3-6**).

Ein vergleichende Gegenüberstellung von Röntgenbild, Ultraschallbild und TSA-Aufnahme eines einzelnen Probestabs zeigt die Inhomogenität des Probenmaterials (siehe auch **Abb. 3-6**).

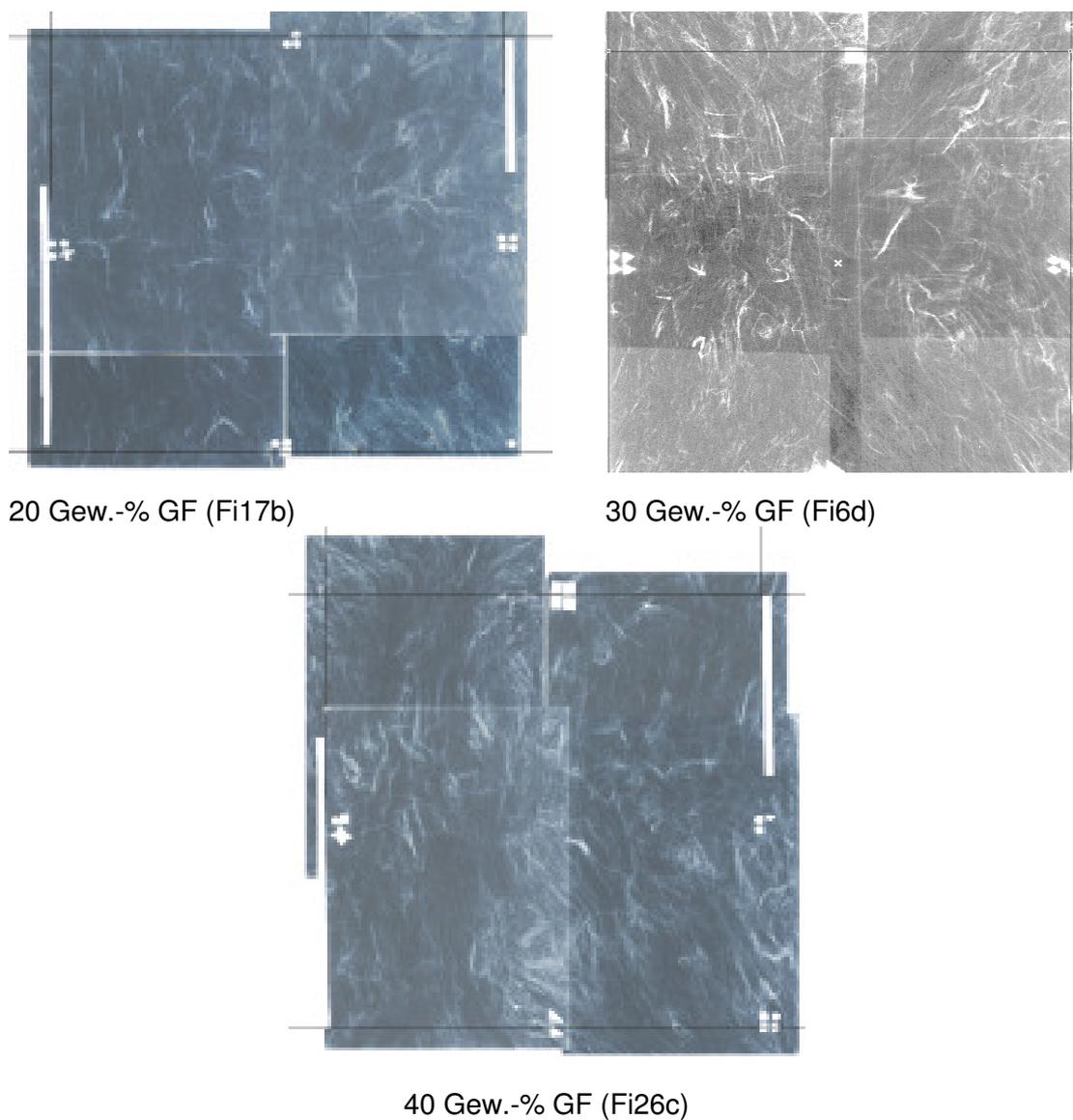


**Abb. 3-1:** Einlegeplan, D-LFT (20, 30, 40 Gew-% GF, längs, Herstellung durch ICT, Fertigungsstand, 1. Halbjahr 2003)

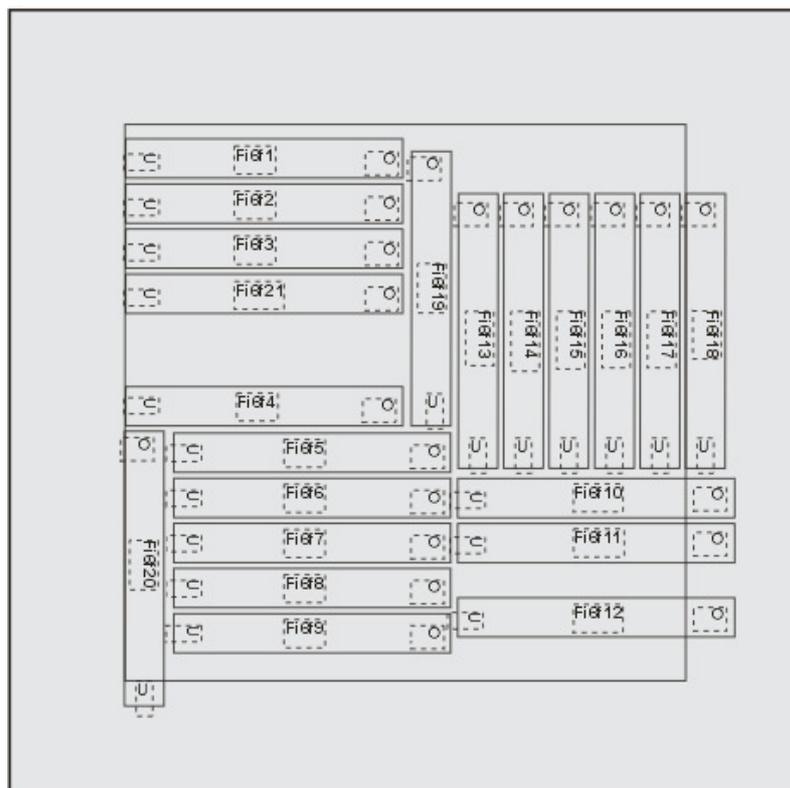
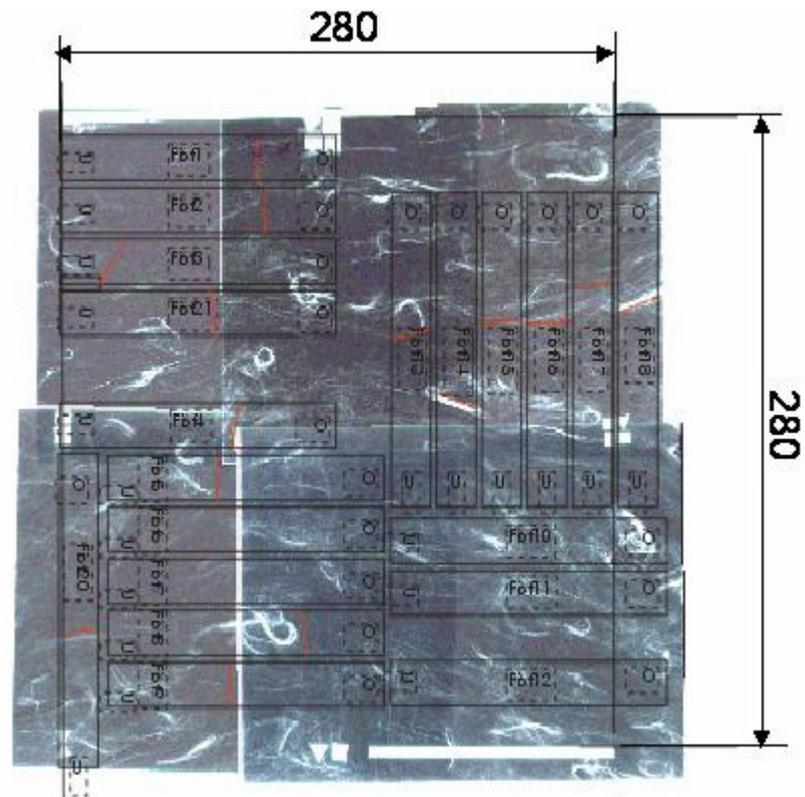
Glasfasergehalt (Gewichts-%)	[g]
<b>Gewicht der Platten</b>	
20	~340
30	~375
40	~405

Glasfasergehalt (Gewichts-%)	Plattenbezeichnung
<b>Platten für Zugversuch</b>	
20	Fi17b, Fi17c
30	Fi6d, Fi6e
40	Fi26c, Fi26d
<b>Platte für Ermüdungsversuch</b>	
30	Fi6f

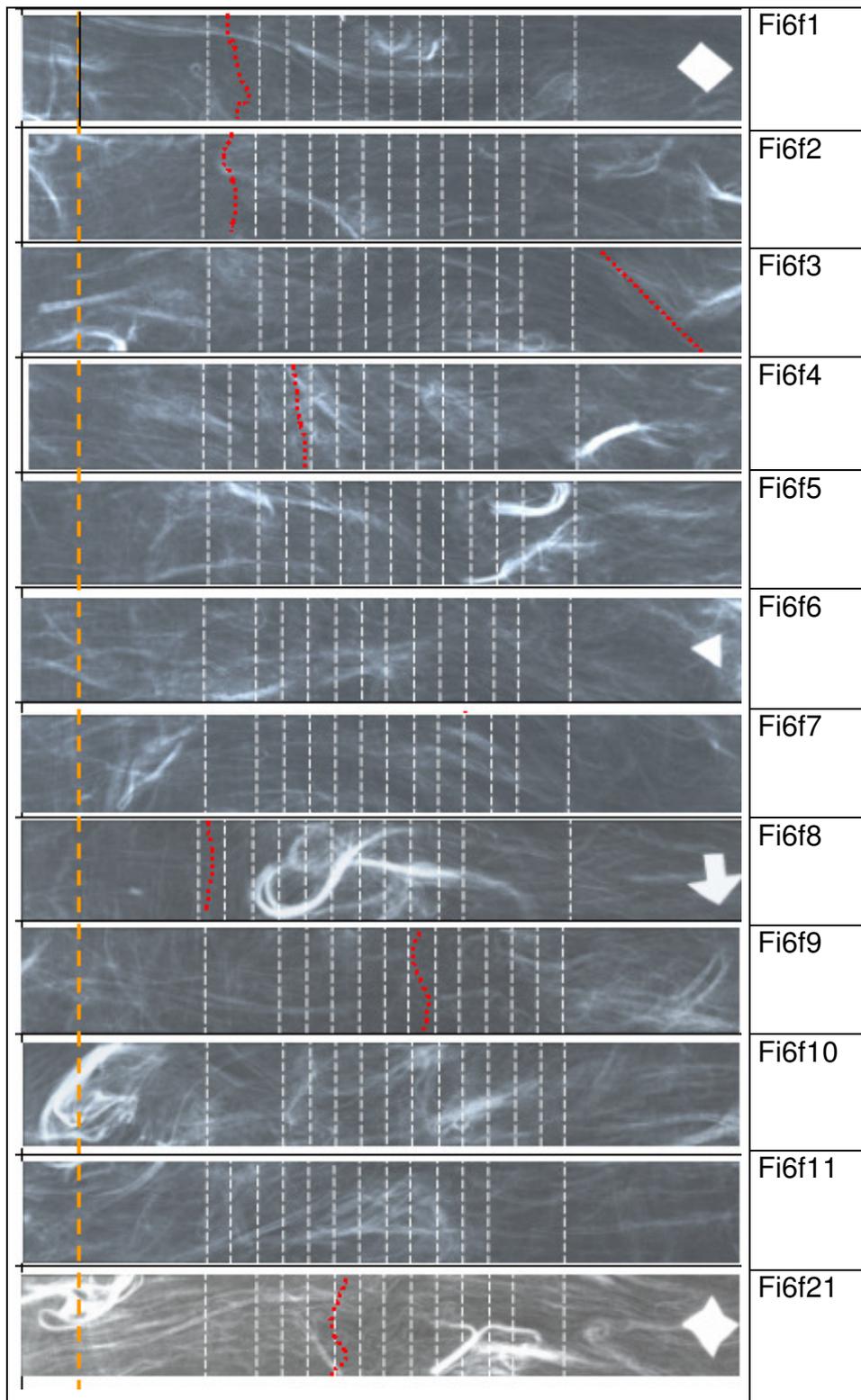
**Tab. 3-1:** Plattengewicht, nominaler Glasfasergehalt und Plattenbezeichnungen



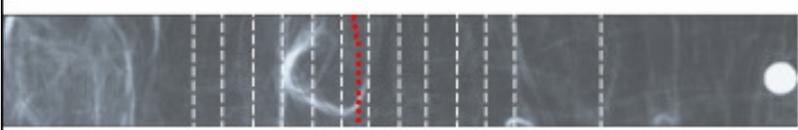
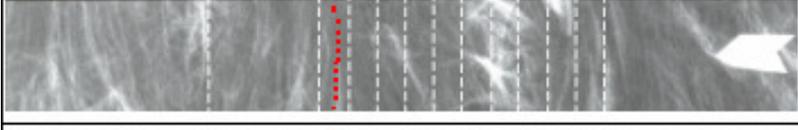
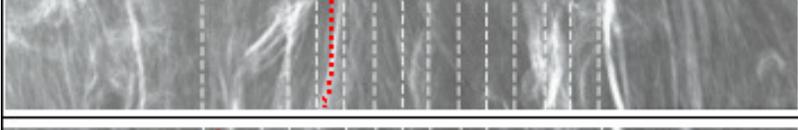
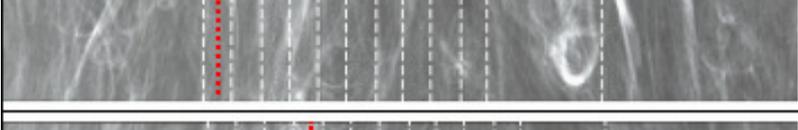
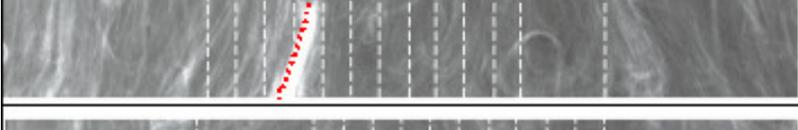
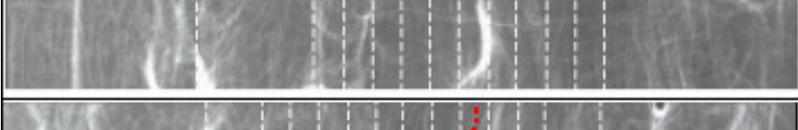
**Abb. 3-2:** D-LFT: Röntgenaufnahmen (Platten für Zugversuch)



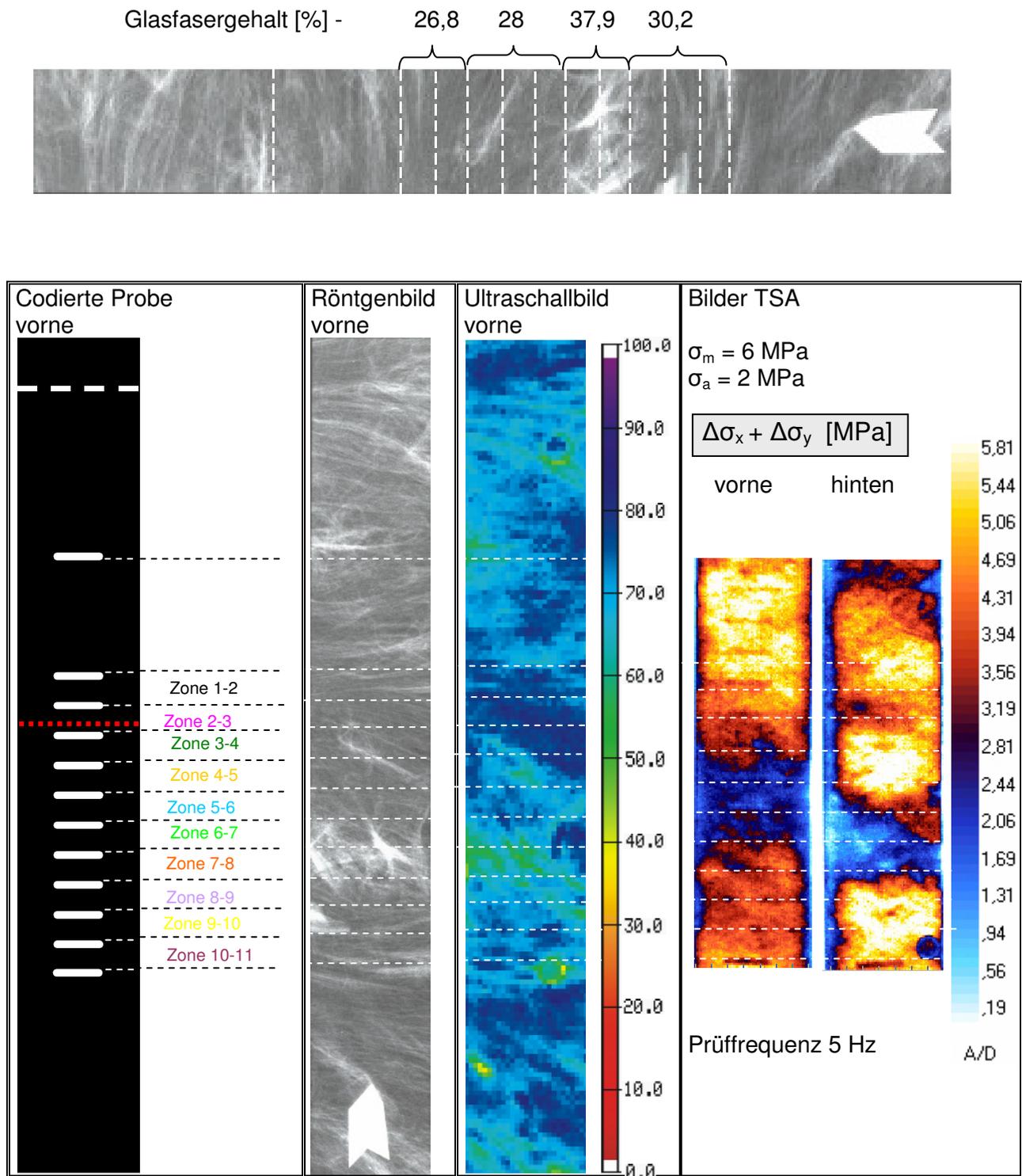
**Abb. 3-3:** D-LFT, Röntgenaufnahmen und Schnittplan (30 Gew.-% GF, Platte Fi6, Ermüdungsversuche)



**Abb. 3-4:** Röntgenaufnahmen der Probestäbe mit Angabe der Codierstreifen und Bruchzone (D-LFT, 30-Gew.% GF, längs)

	Fi6f13
	Fi6f14
	Fi6f15
	Fi6f16
	Fi6f17
	Fi6f18
	Fi6f19
	Fi6f20

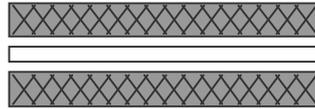
**Abb. 3-5:** Röntgenaufnahmen der Probestäbe (D-LFT, 30-Gew.% GF, quer)



**Abb. 3-6:** D-LFT: Lokaler Glasfasergehalt und Röntgen-, US- und TSA-Untersuchung eines Probestabs (30 Gew.-% GF Probe Fi6f15, Ermüdungsversuch, quer)

### 3.1.2 Gewebeverstärkter Thermoplast (GMTex)

Bei dem gewebeverstärkten Thermoplast liegen aufgrund des Aufbaus (**Abb. 3-7**) (Geweberandschichten mit Faseranteil längs: senkrecht wie 4:1 und einer Mittellage aus Glasmatte; gesamter Glasfasergehalt 40 Gew.-%) anisotrope Eigenschaften vor (**Abb. 3-8**). (Hersteller: Fa. Quadrant in Lenzburg (CH); Werkstoffbezeichnung: Gewebeverstärktes PP-Material; X112 F40-4/1-0°/90°, (EP 533))



**Abb. 3-7:** Aufbau des gewebeverstärkten Thermoplast-Werkstoffs (Aufbau: oben und unten je eine Gewebelagen, in Mittellage Glasmatte)

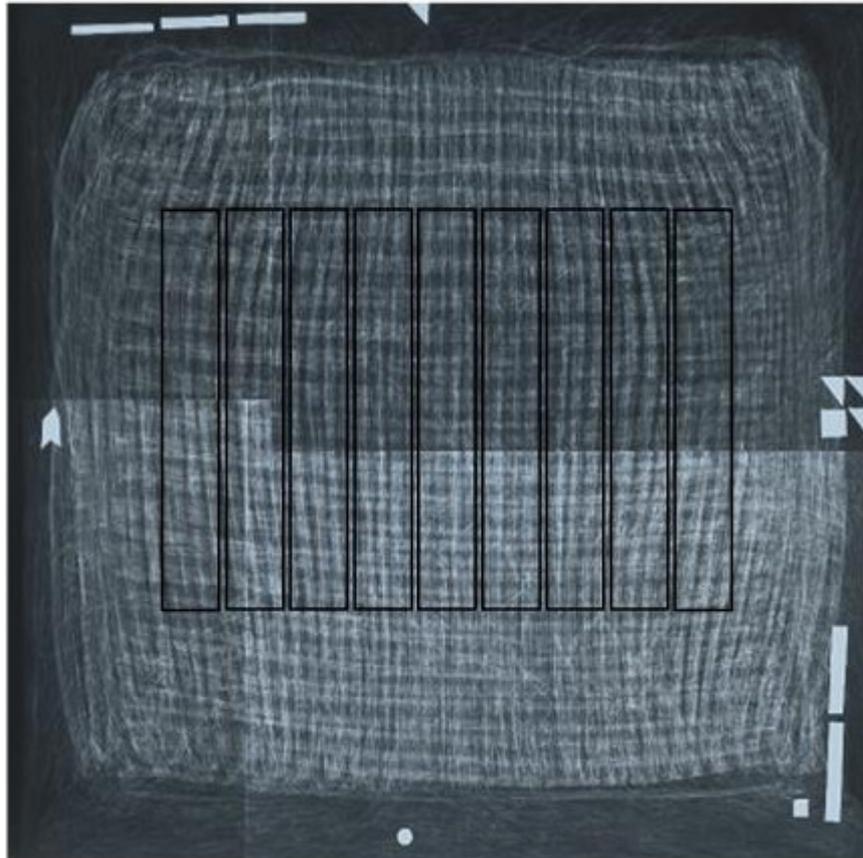
Preliminary Datasheet		Materialname	Kennwerte in Hauptfaserrichtung		Kennwerte in Querfaserrichtung	
X 112 F 40 4/1 90° (Lenzburg)						
Development number: EP 533						
Unidirectional glass mat reinforced PP in the form of square blanks with a maximum width of 1000 mm.						
<b>General properties</b>	Standard	Value	Value	Value	Unit	
Laminate thickness		5.0	212	213	MPa	
Fiber content		40	2.42	2.13	%	
Density (laminate)		1.21	9985	5530	MPa	
Density (molded)		1.22	260	155	MPa	
<b>Mechanical properties</b>	Standard	Value	9300	5530	MPa	
Tensile strength	ISO 527/4	1)	174	74	kJ/m²	
Tensile elongation at break	ISO 527/4	1)				
Tensile modulus	ISO 527/4	1)				
Flexural strength	ISO 178	1)				
Flexural modulus	ISO 178	1)				
Impact strength - Charpy	ISO 179/2 fn	1)				
Multiaxial Impact @ 4.0 mm						
Peak Force	ISO 6603-2		12245		N	
Energy @ peak force	ISO 6603-2		54.8		J	
Energy @ break	ISO 6603-2		96.1		J	

**Abb. 3-8:** Mechanische Eigenschaften von gewebeverstärktem Thermoplast (GMTex, Fa. Quadrant, Werkstoffbezeichnung X112 F40-4/1-0°/90°, (EP 533), äußere Lagen Gewebeverstärkung, Mittellage Glasmatte, Faseranteil parallel zu quer: 4:1, Fasergehalt 40 Gew.-%, Matrix: PP) \QUA06\

Es werden zwei Chargen untersucht, da bei der ersten Charge Bereiche mit einer teilweise geringen Fasermatrixhaftung und Bereiche einer durch Fließen bedingten Faserkrümmung vorliegen (1. Charge: Herstellung September 2004, 2. Charge: Herstellung April 2005 (**Tab. 3-2**, **Abb. 3-9**, **Abb. 3-10**)).

Charge 1	
Probe Nr.	Gew.-% Glasfasern
EP1a9	31,3
EP2a2	28,7
EP2a6	29,5
EP4a10	31,9
EP7a2	31,3
EP7a10	30,3
Charge 2	
Probe Nr.	Gew.-% Glasfasern
QC1a5	31,3
QC1a8	28,7
QC6a5	29,5
QC6a8	31,9
QC9a3	31,3
QC9a7	30,3

**Tab. 3-2:** Gewicht und Glasfasergehalt einzelner Proben (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probegröße 20x140 mm<sup>2</sup>)



EP3a1 EP3a2 EP3a3 EP3a4 EP3a5 EP3a6 EP3a7 EP3a8 EP3a9



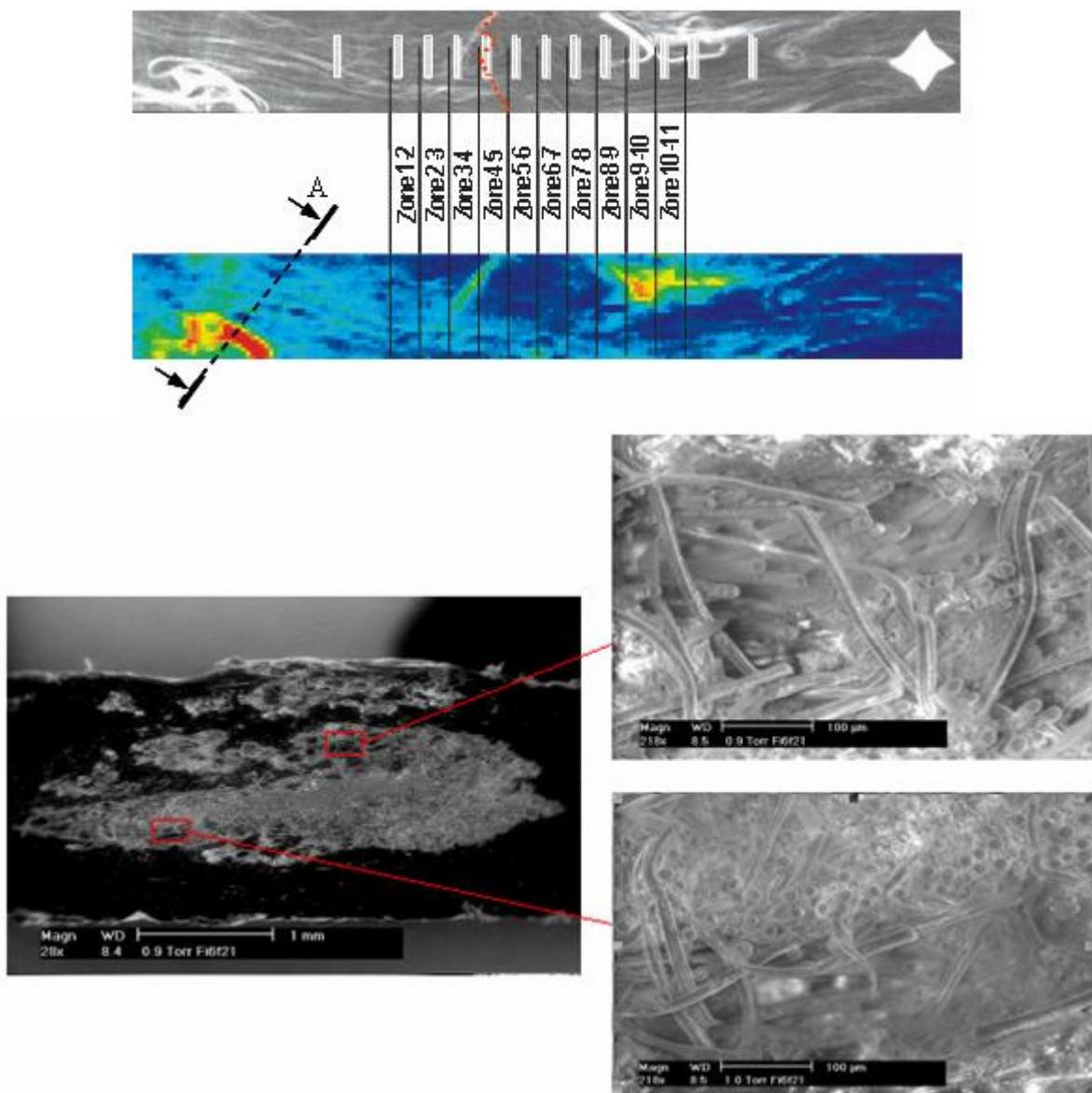
**Abb. 3-9:** Röntgenaufnahme der gepressten Platte und der daraus hergestellten Probekörper (Platte 300x300 mm, Gewebeverstärkter Thermoplast; Glasfasergehalt 40 Gew.-%, EP3a, 1. Charge)



## 3.2 Gefügeorientierte Untersuchungen

### 3.2.1 Direkt-LFT

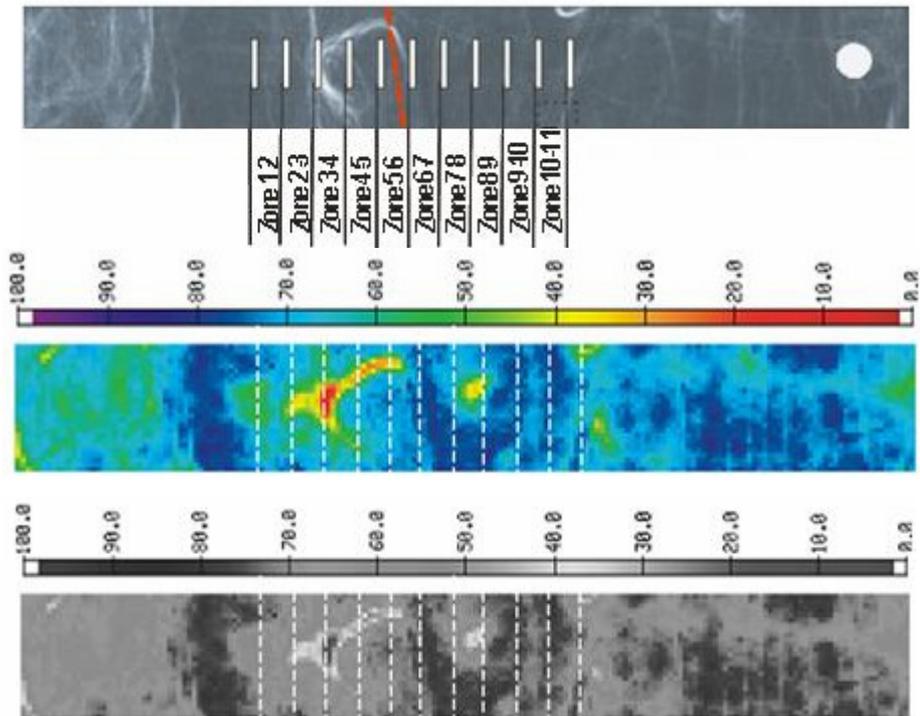
An Werkstoffproben aus D-LFT (30 Gew.-% GF) werden Röntgenaufnahmen, US-Untersuchungen, Schlibfbilder und REM-Aufnahmen angefertigt bzw. durchgeführt. Die Untersuchungen zeigen die inhomogene Faserverteilung, Bereiche mit guter und schlechter Fasermatrixhaftung und ebenfalls Zonen mit Lunkern. Die Röntgenaufnahmen und Ultraschallbilder zeigen einen qualitativ ähnlichen Verlauf, und es kann daher nicht zwischen Faseranhäufung und Lunkern bzw. Haftungsfehlern differenziert werden. Beispielhafte Gefügeuntersuchungen werden anhand von drei Werkstoffproben dargestellt (**Abb. 3-11**, **Abb. 3-12**, **Abb. 3-13**).



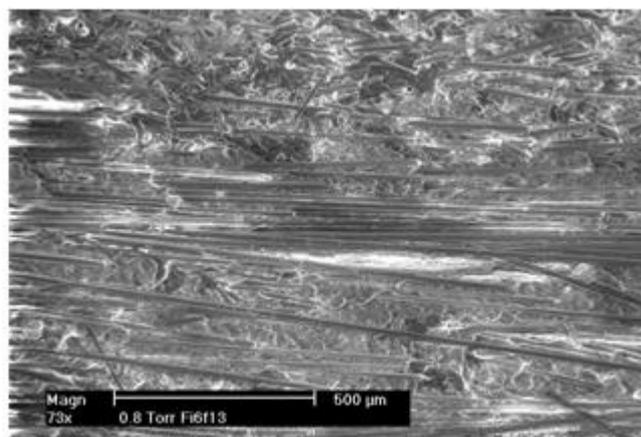
Schlibfbild durch die Faserbündel

REM-Aufnahme: Lunker und nicht benetzte Fasern

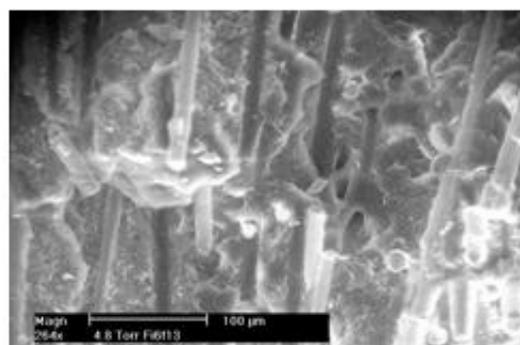
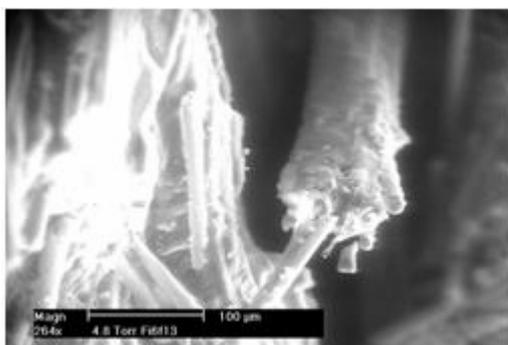
**Abb. 3-11:** Röntgen- und Ultraschallbild einer D-LFT-Probe, REM-Aufnahmen des Schlibfbilds (Bereich A-A) (Probe Fi6f21, 30 Gew. -% GF, längs, Zugschwellbelastung)



Röntgen- und US-Aufnahmen

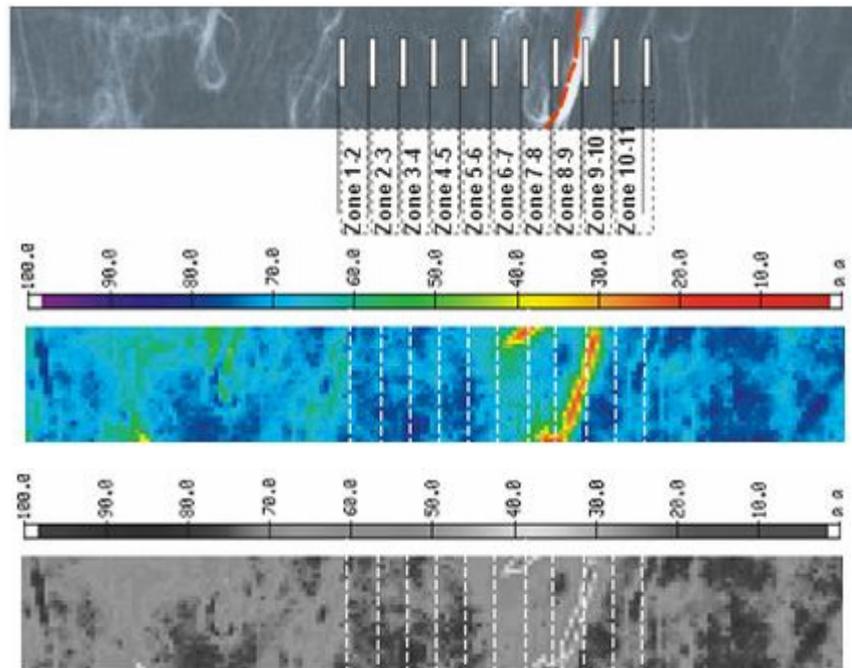


Bruchfläche

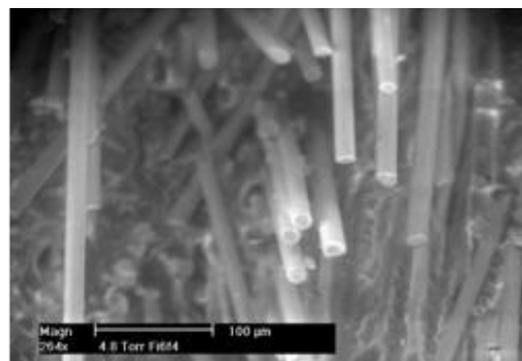
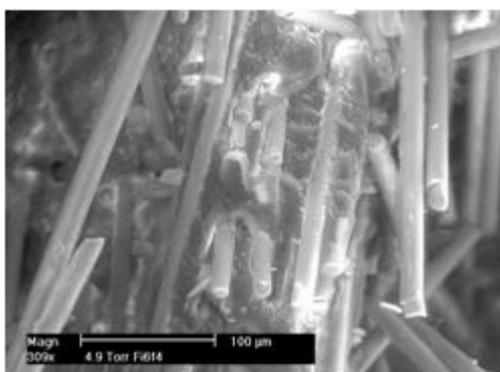
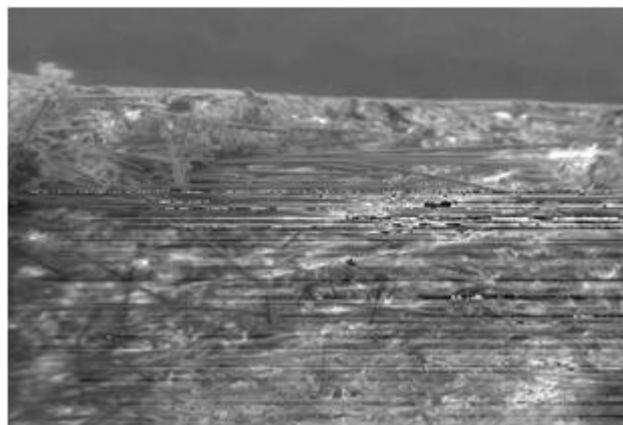


REM-Aufnahme: gute Fasermatrixhaftung

**Abb. 3-12:** Röntgen- und Ultraschallbild einer D-LFT-Probe, REM-Aufnahmen (Probe Fi6f13, 30 Gew. -% GF, quer, Zugschwellbelastung)



Röntgen- und US-Aufnahmen

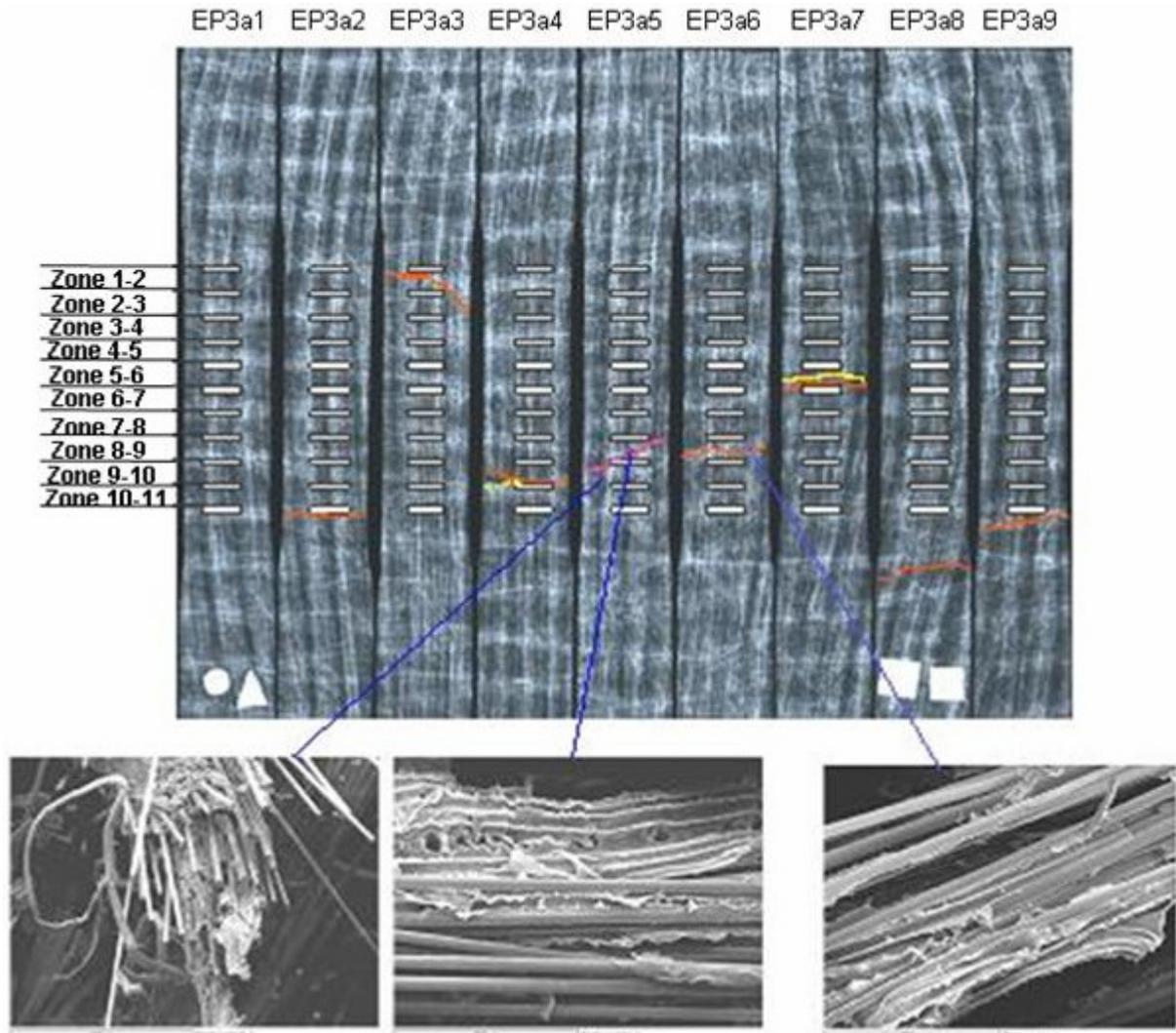


REM-Aufnahme: Bruchfläche mit guter und schlechter Fasermatrixhaftung

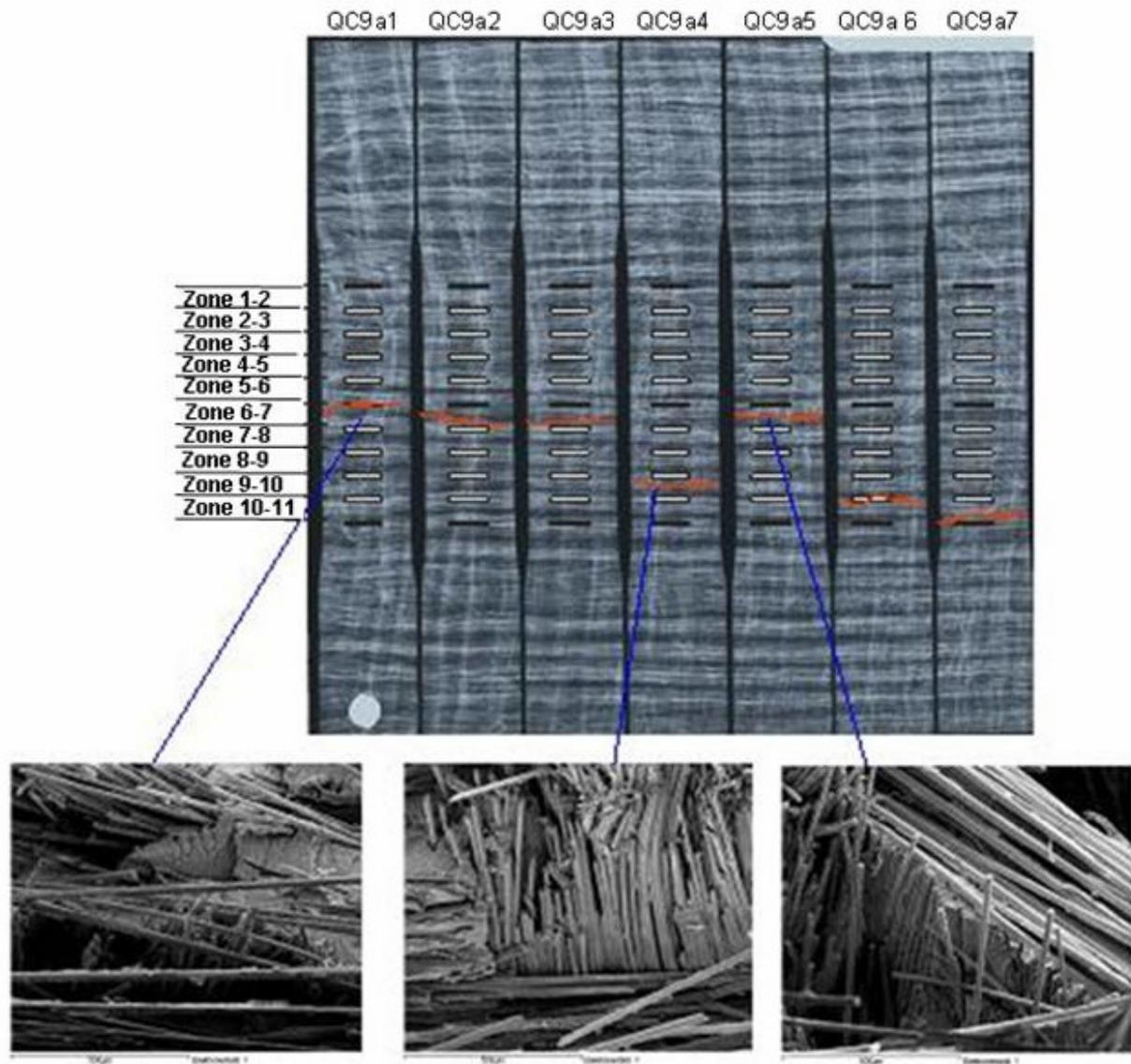
**Abb. 3-13:** Röntgen- und Ultraschallbild einer D-LFT-Probe, REM-Aufnahmen (Probe Fi6f14, 30 Gew. -% GF, quer, Zugschwellbelastung)

### 3.2.2 Gewebeverstärkter Thermoplast (GMTex)

An gebrochenen Probekörpern aus Zugversuch und Zugschwellversuch werden REM-Untersuchungen zur Ermittlung der Fasermatrixhaftung durchgeführt. Es werden sowohl Zonen mit guter wie schlechter Fasermatrixhaftung gefunden. Tendenziell ist der Haftungszustand bei Charge 2 besser (**Abb. 3-14**, **Abb. 3-15**).



**Abb. 3-14:** Röntgenbild und REM-Aufnahmen von Proben aus gewebeverstärktem Thermoplast (Charge 1, Platte EP3a, längs, Ermüdungsversuch)



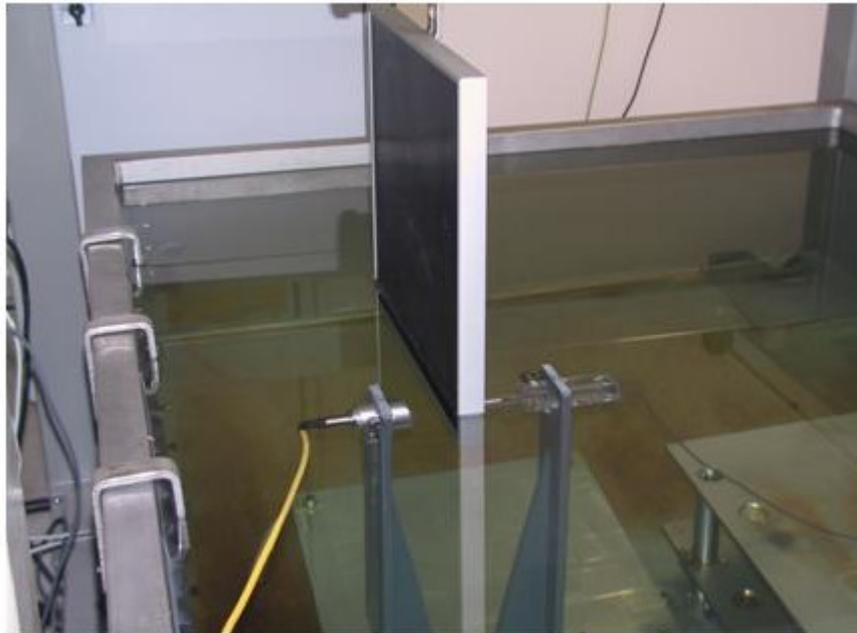
**Abb. 3-15:** Röntgenbild und REM-Aufnahmen von Proben aus gewebeverstärktem Thermoplast (Charge 2, Platte QC9a, quer, Ermüdungsversuch)

### 3.3 Messungen mit US- und Röntgenverfahren

#### 3.3.1 US-Messverfahren

Eines der wichtigsten Verfahren innerhalb der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung ist die Ultraschallprüfung. Bei der Ultraschallprüfung werden Schallwellen mittels Sender in ein Bauteil eingeleitet. Beim Durchqueren des Bauteils kann der Schall an Inhomogenitäten, wie z.B. Poren und Lunkern, aber auch an Gefügeveränderungen sowie der Bauteilrückwand, reflektiert werden. Die reflektierten Schallwellen werden von einem Empfänger aufgenommen und auf einem Ultraschallgerät dargestellt. Die für die Bewertung der reflektierten Ultraschallsignale wichtigen Parameter sind die Laufzeiten der Ultraschallsignale und der vom Empfänger aufgezeichnete reflektierte Schalldruck. Über die Messung der Laufzeit kann die Wanddicke des Bauteils oder die Tiefenlage einer Inhomogenität bestimmt werden. Der Schalldruck des

reflektierten Signals kann Aufschluss über die Größe der Inhomogenität geben. Es wurde das Prinzip der Durchschallung bei Tauchtechnik (Wasser) angewendet (**Abb. 3-16**)



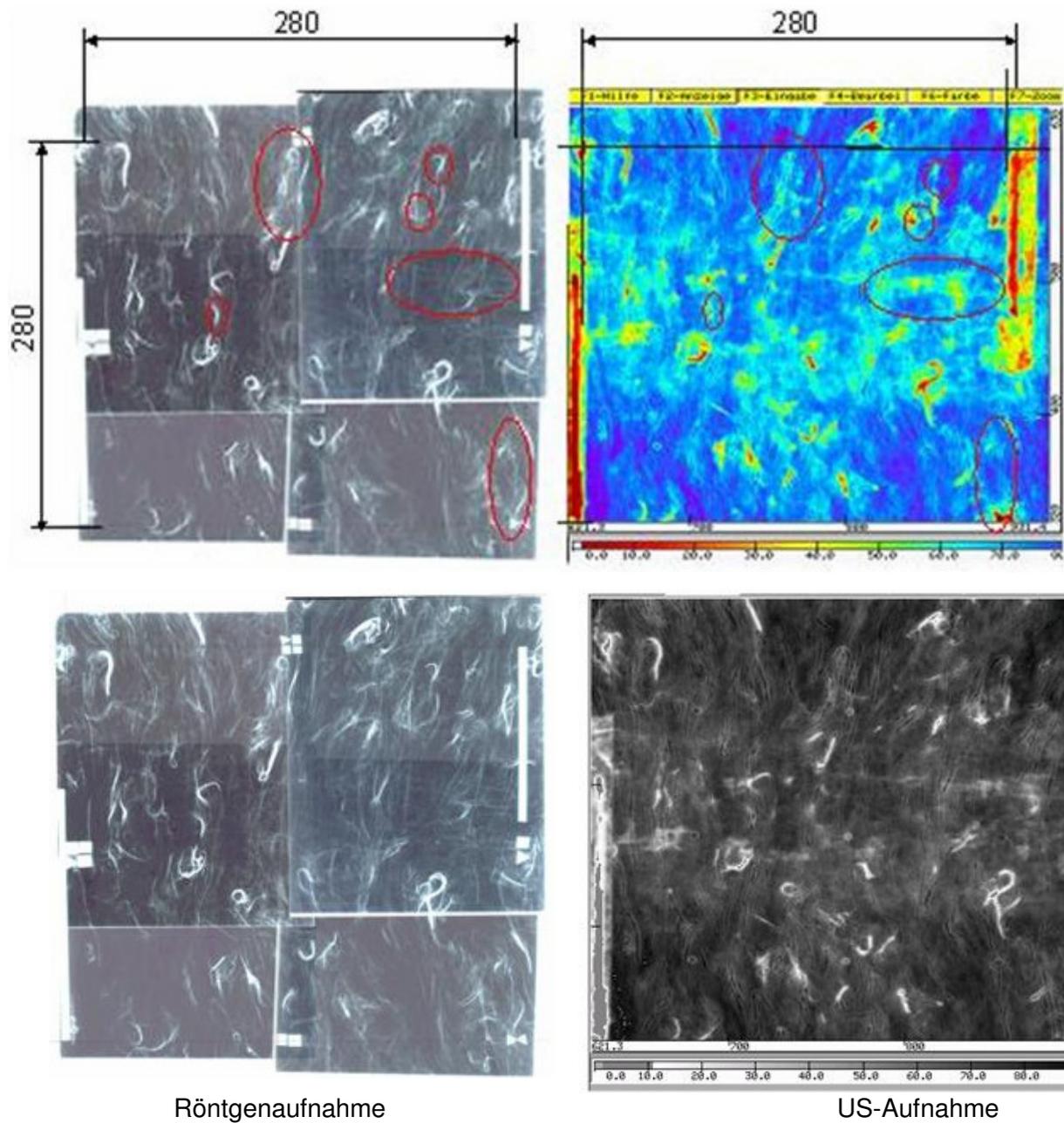
**Abb. 3-16:** US-Prüfstand für Tauchtechnik mit zeilenweiser Durchschallungsmessung, Bewegung der US-Köpfe erfolgt mittels Manipulator (DaimlerChrysler)

### 3.3.2 Vergleich von US- und Röntgenuntersuchungen

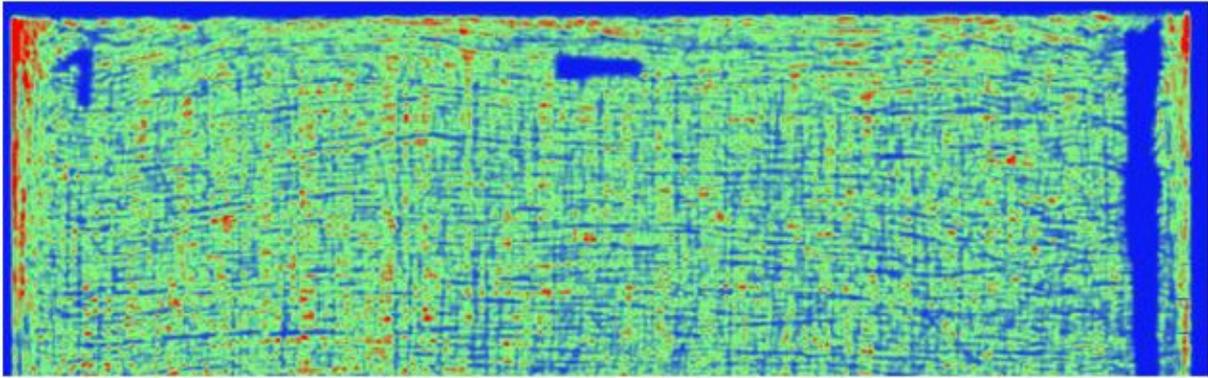
Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit sind langfaserverstärkte Thermoplaste mit Wirrfaserstruktur (D-LFT), bzw. gewebeverstärktem Material (Quadrant). In beiden Fällen findet eine Imprägnierung der Fasern während des Fertigungsprozesses statt. Aufgrund der relativ hohen Viskosität der Thermoplastschmelze ist mit Benetzungs- und Lüftungsproblemen zu rechnen. Gefügeuntersuchungen (Schliffbilder bzw. REM-Untersuchungen) zeigen bei beiden Werkstoffen Bereiche mit o. g. Struktureigenschaft. Es wurde geprüft, ob mittels Röntgen- und US-Untersuchungen Haftungsfehler, Poren und Lunker mit den im Rahmen der Arbeit eingesetzten Versuchseinrichtungen (Fa. DaimlerChrysler) aufgefunden werden können. Die Röntgenaufnahmen zeigen deutlich die lokale Faserstruktur. Das Matrixmaterial ist Röntgentransparent, weshalb die o. g. Störungen auch nicht erkannt werden können.

Die US-Aufnahmen werden in einer Schwarzweißdarstellung den Röntgenbildern gegenübergestellt. Der visuelle Vergleich der Aufnahmen lässt für das D-LFT und gewebeverstärkte Material eine weitgehende Ähnlichkeit von Röntgenbild und US-Aufnahme (**Abb. 3-17, Abb. 3-18**).

Gefügeuntersuchungen an einzelnen Proben zeigen, dass lokale Haftungsfehler und Lunker vorliegen, die mit der US-Methode nicht erkannt werden können. Der Nachweis von o. g. Störstellen ist daher mit den uns zur Verfügung stehenden Untersuchungsmethoden zerstörungsfrei nicht möglich.

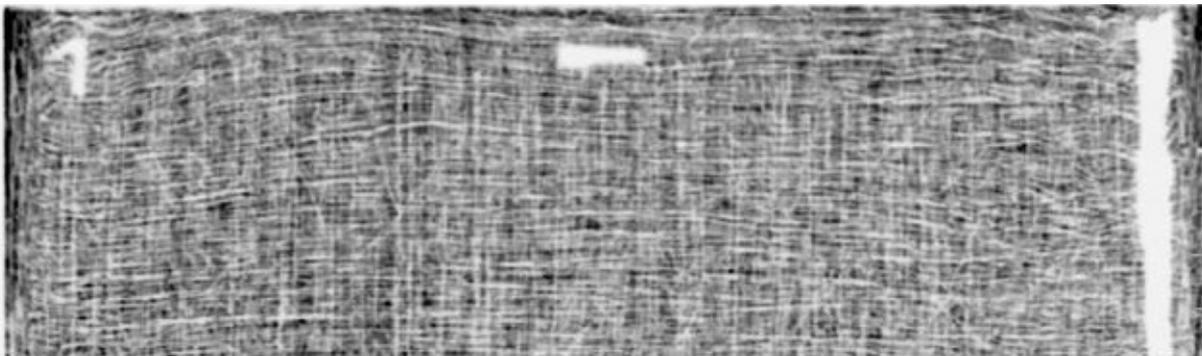


**Abb. 3-17:** Vergleich US- und Röntgenaufnahme (D-LFT, Platten Nr. Fi6f, 30 Gew.-% GF, Größe 400x400 mm<sup>2</sup>)  
(In den oberen Bildern sind markante Strukturen gekennzeichnet. In der unteren Schwarzweißdarstellung zeigt sich ein nahezu ähnliches Erscheinungsbild bei Röntgen und US).



Proben-Nr.: **QC 1** / Material-Bezeichnung: X112 F40-1/4-0°/90°, EP 533

US-Untersuchung (Farbdarstellung)



Proben-Nr.: **QC 1** / Material-Bezeichnung: X112 F40-1/4-0°/90°, EP 533

US-Untersuchung (Schwarzweißdarstellung)



Röntgenaufnahme

**Abb. 3-18:** Vergleich US- und Röntgenaufnahme (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge2, Platten Nr. QC1, 40 Gew. -% GF, Plattengröße 200x300 mm<sup>2</sup>)

## 4 Versuchseinrichtungen – Durchführung und Auswertung

### 4.1 Einrichtungen

#### 4.1.1 Servohydraulische Prüfmaschine

Die statischen und dynamischen Untersuchungen wurden an einem servohydraulischen 15 kN-Prüfsystem der Fa. MTS durchgeführt. Die Steuerung der Prüfmaschine erfolgte über eine MTS-TestStar-Elektronik in Verbindung mit einem handelsüblichen PC mit integrierter D/A, A/D-Wandlereinheit der Fa. Data Translation.

Servohydraulische Prüfmaschine: MTS Minibionics

Zug-Druck/Torsion, hydraulisches Spannzangen

Prüffrequenz < 20 Hz

Schwingweg < 100 mm

Kraftbereich < 15 kN

Temp.-Kammer: -60 °C bis +250 °C (Stickstoffkühlung)

Laserextensometer zur Hysteresismessung

#### 4.1.2 Druckvorrichtung

Für die Durchführung von statischen und dynamischen Druckversuchen wurde eine Druckvorrichtung mit präziser Parallelführung gebaut (**Abb. 4-1**). Bei den kurzen Druckproben erfolgt die Krafteinleitung an beiden Probenenden. Im Einspannbereich werden die Proben zur Parallelführung nur schwach geklemmt. Auf dem nicht geklemmten, sichtbaren Bereich der Probenoberfläche werden für den Laserextensometer fünf Streifen im Abstand von 3 mm aufgebracht. Damit können vier Zonen orts aufgelöst vermessen werden.



**Abb. 4-1:** Vorrichtung für statische und dynamische Druckversuche

## 4.2 Probengeometrie

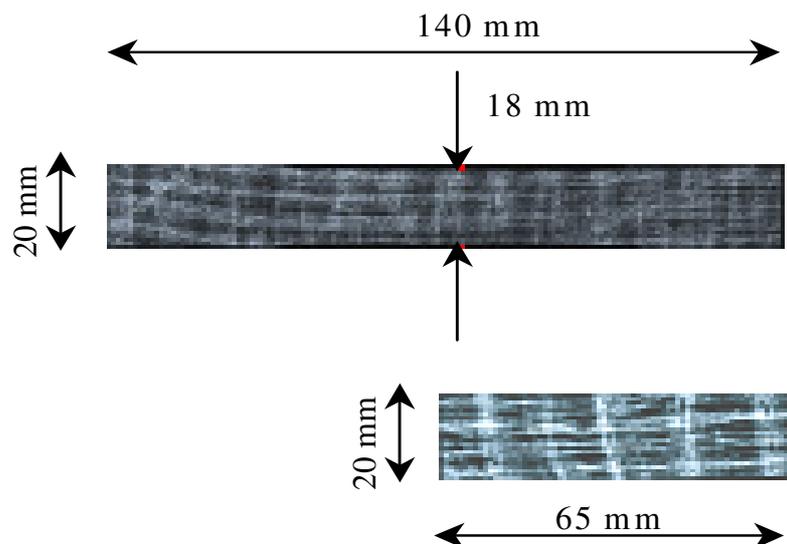
Als Probenform für D-LFT und dem gewebeverstärktem Thermoplast wurde die DIN EN ISO 527-2 zugrunde gelegt.

### D-LFT

Die Probenform des D-LFT-Werkstoffes beträgt 140 mm x 20 mm, die Dicke beträgt ca. 2 mm.

### Gewebeverstärkter Thermoplast

Die Probenform des gewebeverstärkten Thermoplasts wurde aufgrund anisotroper Eigenschaften unterschiedlich für Zug-, und Druckschwellbelastung präpariert. Für Zugschwellbelastung wurde die Probenform geschultert, um den Bruch im Messbereich zu bekommen. Für Druckversuche hat die Probe die Abmessungen 65 mm x 20 mm und eine Dicke von ca. 3 mm (**Abb. 4-2**). (Erste Platte von Charge 1 wurde nicht geschultert und der Bruch war meistens außerhalb des Messbereichs. Nachfolgende Proben von Charge 1 und 2 längs und quer wurden geschultert.)



**Abb. 4-2:** Abmessungen der Probekörper für Zug- und Druckbelastung

## 4.3 Durchführung quasistatischer Versuche

Um die mechanisch- dynamischen Eigenschaften des Werkstoffs zu ermitteln, wurden zuerst die quasistatischen Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse der quasistatischen Untersuchungen führen zu Spannungs-Dehnung- Diagramme, mit deren Hilfe man die Materialkennwerte wie z.B. Festigkeit, Bruchdehnung und E-Modul berechnen kann.

Der E-Modul für die Werkstoffe mit Polypropylen-Matrix wurde nach DIN EN ISO 527-1 im Bereich von 0,05-0,25% Dehnung gewählt.

## 4.4 Dauerschwingversuche (Laststeigerungs-, und Ermüdungsversuche)

Zur Charakterisierung der mechanisch-dynamischen Kennwerte werden die Laststeigerungs-, und Ermüdungsversuche durchgeführt.

Der Laststeigerungsversuch, der meist mit dem Hysteresis-Messverfahren kombiniert angewendet wird, ist insbesondere hinsichtlich des Zeitaufwands eine attraktive Alternative zur Ermittlung von Belastungsgrenzwerten und zur orientierenden Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffen und Bauteilen /RER77, ALTR78, HIM04/. Zwischen steigenden Laststufen werden sog. Kontrollstufen (Entlastungsstufen) mit reduziertem Lastspielzahl eingefügt, um zu kontrollieren, ob in der vorausgegangenen Laststufe Schädigungen eingetreten sind.

Ermüdung bezieht sich auf Veränderungen der Eigenschaften, die in einem Werkstoff durch wiederholte Belastung mit Spannung oder Dehnung stattfinden, wobei sich üblicherweise dieser Begriff auf die Veränderungen bezieht, die zum Reißen und Versagen führen /EIF06/. Schädigungen in Faser-Kunststoff-Verbunden aufgrund von Schwingermüdung sind Matrixrisse, Faser-Matrix-Ablösungen, lokale Delaminationen und Faserbrüche. Im Verlauf der dynamischen Versuche für maximale Dehnung und zyklisches Kriechen werden primäre, sekundäre und tertiäre Anstiegsbereiche beobachtet. Das Wöhlerdiagramm berücksichtigt nur Bruchlastspielzahl und Spannungshorizont und charakterisiert in einfacher Weise das Ermüdungsverhalten. Wesentlich differenziertere Betrachtungen ergeben sich z.B. mittels der Hysteresismesstechnik.

### 4.4.1 Begriffe zum Beanspruchungsbereich

Das Verhalten von Werkstoffen bei schwingender Beanspruchung wird in Dauerschwingversuchen (vgl. DIN 50 100) ermittelt. Ziel ist es, das dynamische Verhalten von Werkstoffen oder Bauteilen durch Ermittlung mechanisch-dynamischer Kennwerte zu beurteilen.

Bei Dauerschwingversuchen wird unterschieden in Versuche mit zeitlich konstanter Kraft (kraftgeregelt) und solche mit zeitlich konstanter Dehnung (dehnungsgeregelt). Wenn nicht besonders erwähnt, wurden grundsätzlich kraftgeregelt Versuche bei Zugschwellenbeanspruchung, d.h. mit Mittelspannung bei einer sinusförmigen Spannungsamplitude und einer Prüffrequenz von  $f = 5$  Hz bei Raumtemperatur im Laborklima durchgeführt. In **Abb. 4-3** werden die Bereiche der Schwingbeanspruchung dargestellt. Der Maximal- bzw. Minimalwert der Belastung wird als Ober- bzw. Unterlast  $\sigma_o$  und  $\sigma_u$  bezeichnet /HIM04/. Die Größe  $R = \sigma_u / \sigma_o$  wird Belastungsverhältnis genannt.

Man unterscheidet die drei Bereiche:

- Zugschwellbelastung  $0 < R < 1$
- Zug-, Druck-Wechselbelastung  $-1 < R < 0$
- Druckschwellbelastung  $1 < R < \infty$

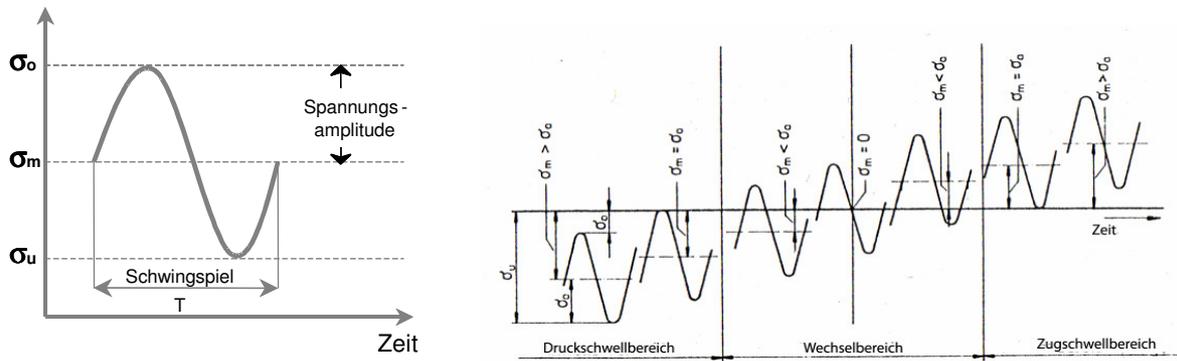


Abb. 4-3: Bereiche der Schwingbeanspruchung /HOF99/

#### 4.5 Bemerkungen zur Versuchsdurchführung

Um bei Einstufenversuchen sowohl von einer prognostizierbaren Lastspielzahl ausgehen zu können als auch sicherzustellen, dass die Probe im Messbereich bricht, wurden (zumeist) vorbereitende Untersuchungen an jeder Probe durchgeführt.

Abb. 4-4 zeigt die methodische Vorgehensweise der Probekörperuntersuchungen anhand eines Flussplanes. Neben der quasistatischen Belastung werden zur grundsätzlichen Charakterisierung des dynamischen Verhaltens Laststeigerungs- (mit Zwischenentlastung) und Einstufenmessungen durchgeführt. Hiermit ist eine Differenzierung hinsichtlich der Grenzen linear-viskoelastischer Beanspruchung, der Ausprägung irreversibler Schädigung und der belastungsniveauabhängigen Schädigungsgeschwindigkeit möglich. Besonders relevante Kenngrößen sind dabei die (dynamische) Steifigkeit und die Werkstoffdämpfung. Während Röntgen- und Ultraschalluntersuchungen eindeutige Informationen zur Gefügestruktur liefern, kann sehr schnell und dabei schädigungsfrei mit der Thermoelastischen Spannungsanalyse bei dynamischer Anregung eine Lokalisierung schwacher Bereiche der Werkstoffprobe durchgeführt werden. In Verbindung mit der lokalen Steifigkeitsmessung des Hysteresisverfahrens und unter Kenntnis der Gefügestruktur, lassen sich so Bruchvorhersagen mit hoher Zuverlässigkeit anstellen.

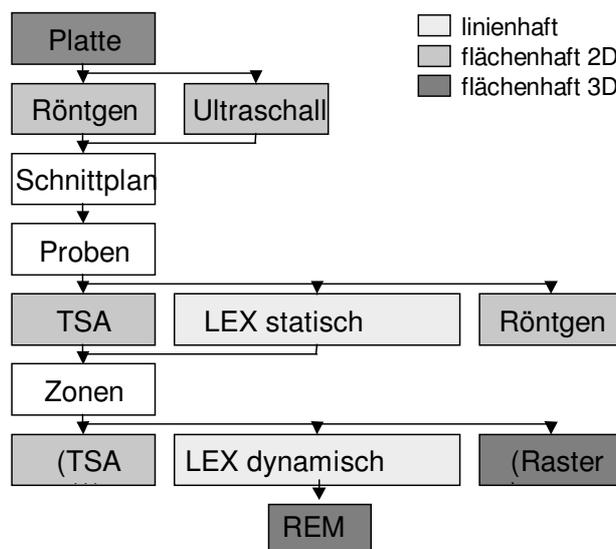


Abb. 4-4: Methodische Vorgehensweise der Probekörperuntersuchung für Ermüdungsversuchen.

## 5 Berührungslos optische Messverfahren zur Deformations- und Dehnungsmessung

### 5.1 Laser-Extensometer und Ortsaufgelöste Hysteresismessung

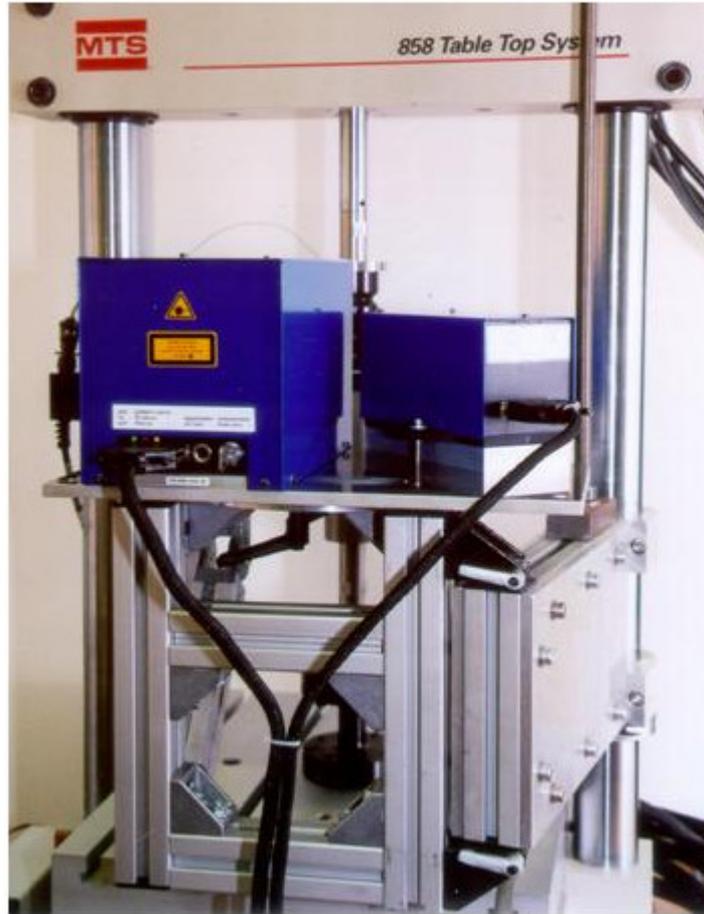
Der Vielpunkt-Laser-Extensometer ist für berührungslose ortsaufgelöste Dehnungsmessungen an Werkstoffproben und Bauteilen bei quasistatischer und zügiger Belastung vorgesehen /KDS98, FIE06/.

Unter Verwendung des Prinzip des Laserextensometers wurde in Zusammenarbeit mit einem mittelständischen Unternehmen eine Vorrichtung entwickelt, die eine berührungslose und ortsaufgelöste Untersuchung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften von Werkstoffproben und Bauteilen ermöglicht /REE00, RRH00, RRE97, RRK00/. Es kann eine berührungslose und örtliche Erfassung von bis zu 25 Hysteresisschleifen in eng benachbarten Teilabschnitten auf der Oberfläche von Werkstoffproben und Bauteilen durchgeführt werden. Das Verfahren ist geeignet zur dynamischen Prüfung von Werkstoffproben und Bauteilen, die sich aufgrund ihrer geometrischen Form und/oder Materialeigenschaften inhomogen deformieren und/oder bei der Ermüdungsbeanspruchung eine lokale Schadensentwicklung erfahren. Es gestattet eine schnellere und genauere Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung, was für Kunststoffe, Elastomere und Metalle relevant ist.

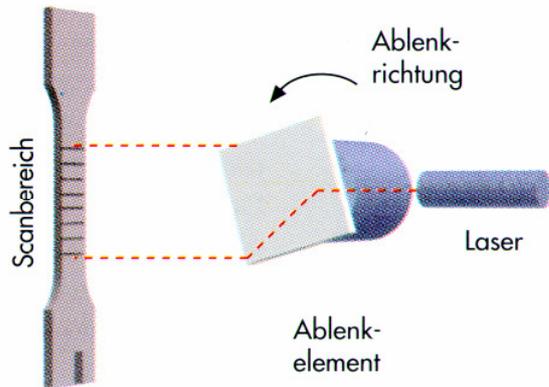
#### 5.1.1 Messprinzip des Laser-Extensometers

Ein Satz von Codierstreifen wird auf ausgewählte Bereiche des Prüfkörpers aufgebracht. Ein durch ein rotierendes Ablenkelement geführter Laserstrahl scannt kontinuierlich entlang der Längsachse des Prüfkörpers (**Abb. 5-1**, **Abb. 5-2**, /KDS98, FIE06/). An den Codiermarken wird das Laserlicht diffus reflektiert. Mit Hilfe der Empfängereinheit wird das auf der Photodiode fokussierte Laserlicht erfasst. Die Digitalisierung erfolgt über die zweite Ableitung der elektrischen Impulsfolge. Eine elektronische Zähleinheit (Multistopcounter) im PC berechnet mit einer Auflösung von 10 ns die Zeitintervalle zwischen den Digitalimpulsen. Bei definierter Geschwindigkeit des Laserspots können auf Basis dieser Zeitintervalle die Abstände und damit lokale Längenänderungen zwischen den Codierstreifen bestimmt werden. Da die Abstände der Codierstreifen auf einer unbelasteten Probe bekannt sind, können anhand dieser Referenzlängen die lokalen Längsdehnungen berechnet werden.

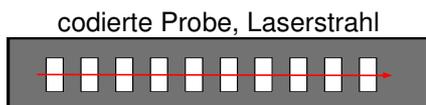
Im Gegensatz zu mechanischen Wegaufnehmern kann die Probenverlängerung nicht nur zwischen zwei ausgewählten Punkten, sondern entlang der gesamten Probenlänge an bis zu 63 frei positionierbaren Codierungen erfasst werden.



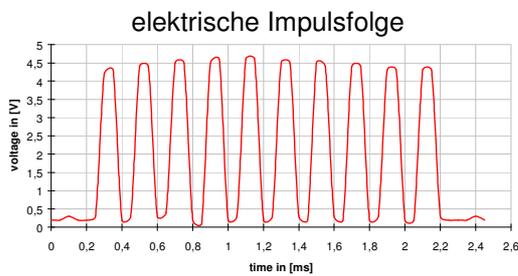
**Abb. 5-1:** Laserextensometer (Sende- und Empfangseinheit, montiert an servohydraulischer Prüfmaschine)



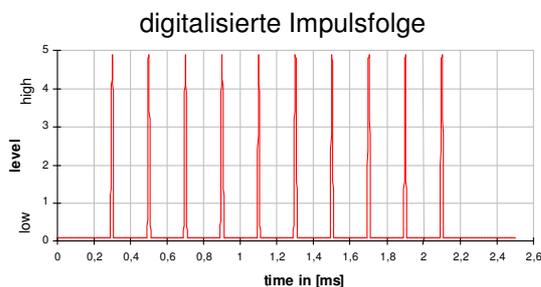
Sendeeinheit mit Laserdiode und Ablenkeinheit



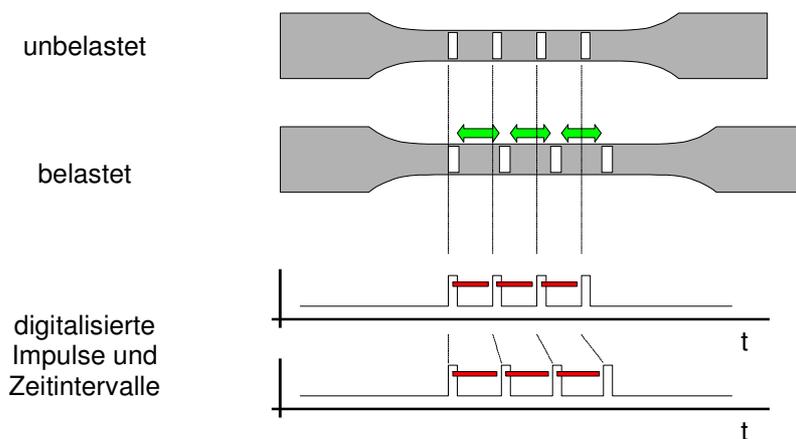
Codierte Probe, Laserstrahl



Empfängereinheit: Photodiode erfasst elektrische Impulsfolge



Multistopcounter digitalisiert hochgenau die 2. Ableitung der elektrischen Impulsfolge zur Ermittlung der Zeitintervalle zwischen den Codierstreifen

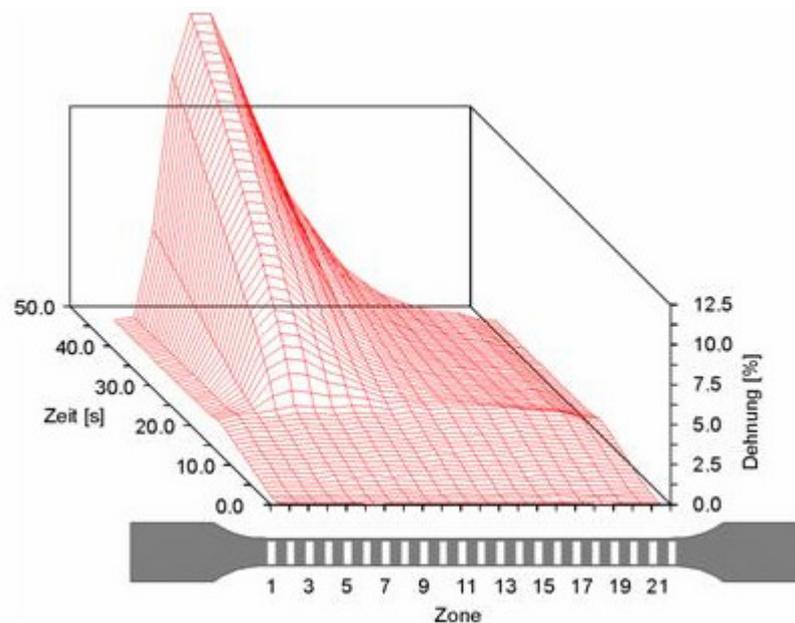


Berechnung lokaler Längsdehnungen auf Basis von Zeitintervalländerungen

Abb. 5-2: Funktionsweise des Laserextensometers

### 5.1.2 Ortsaufgelöste Dehnungsmessung im Zugversuch mit Hilfe eines Laserextensometers

Der Vielpunkt-Laser-Extensometer ist ursprünglich für berührungslose ortsaufgelöste Dehnungsmessungen im Zugversuch vorgesehen /KDS98, FIE06/. Das Beispiel eines Zugversuchs an einer unverstärkten Kunststoffprobe zeigt die inhomogene Dehnungsverteilung (**Abb. 5-3**).



**Abb. 5-3:** Lokale Längsdehnungsverteilung an einem ABS-Schulterstab bei zügiger Belastung mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit

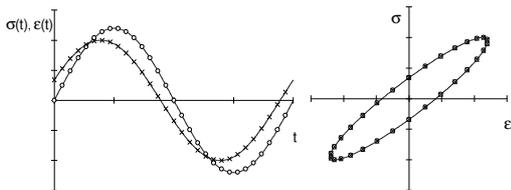
### 5.1.3 Das Hysteresis-Messverfahren

Hysteresis-Messungen dienen dazu, das mechanisch-dynamische Verhalten von Werkstoffen und Bauteilen bei zwangserregten Schwingungen zu erfassen /LAZ68/ und deren Veränderung während der Ermüdungsbeanspruchung zu verfolgen. Von Renz /RER77/ wurden erstmals Verfahren der modernen Mess- und Rechentechnik zur Erfassung und digitalen Hysteresisauswertung bei Polymerwerkstoffen entwickelt und eingesetzt. Dadurch wurden die Voraussetzungen für eine genaue Hysteresisauswertung im Bereich linear-viskoelastischer und nicht-linear-viskoelastischer Beanspruchung geschaffen. Renz setzte das Verfahren zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von Hartschaumstoffen ein, Altstädt untersuchte das Ermüdungsverhalten von SMC-Werkstoffen /ALT87/.

Die Hysteresisauswertung beruht darauf, dass durch geeignete geometrische Auswertung der Ellipse, die das linear-viskoelastische Materialverhalten charakterisierenden Kenngrößen (z.B. Speichermodul  $E'$ , Phasenverschiebung  $\varphi$ ) erhalten werden. Darüber hinaus können weitere wichtige Kenngrößen wie die Verlustarbeit, die Speicherarbeit oder die Amplituden von Spannung und Dehnung ermittelt werden. Die zur Auswertung notwendige Mittenkurve wird durch Halbierung der Spannungswerte für jeden Dehnungswert erhalten.

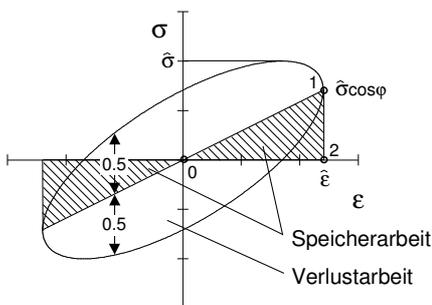
Hysteresis-Messungen ergeben bei Polymerwerkstoffen Aussagen hinsichtlich energie- und verformungsbezogener Kenngrößen: Verlustarbeit und Dämpfung, zyklisches Deformationsverhalten und Kriechen. Im Bereich höherer dynamischer Beanspruchung liegt i.d.R. nichtlinear-viskoelastisches Werkstoffverhalten vor. Die

Kenngößen der Hysteresisbewertung im linear-viskoelastischen und bei höheren Belastungen im nichtlinear-viskoelastischen Bereich zeigt **Abb. 5-4**. Im nichtlinear-viskoelastischen Bereich besteht die Definition des Speichermoduls  $E'$  und des Phasenwinkels  $\varphi$  nicht mehr. Die Dämpfungsgröße  $\Lambda = W_v / W_s$  hat jedoch noch die Bedeutung einer dimensionslosen Kenngröße zur Beschreibung energieverzehrender Vorgänge. Sie ist ein Maß für die Werkstoffanstrengung und -zerrüttung. Durch die Tangentensteigungen  $\tan\alpha_1$  und  $\tan\alpha_2$  der Mittenkurve im Bereich der Umkehrpunkte der Hysteresisschleife kann das nichtlineare Verformungsverhalten genauer beschrieben werden. Die Mitteldehnung ergibt sich als Schnittpunkt der Mittenkurve mit dem Wert der Mittelspannung. Sie charakterisiert das Kriechverhalten.



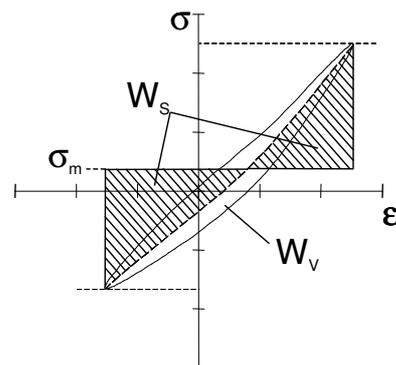
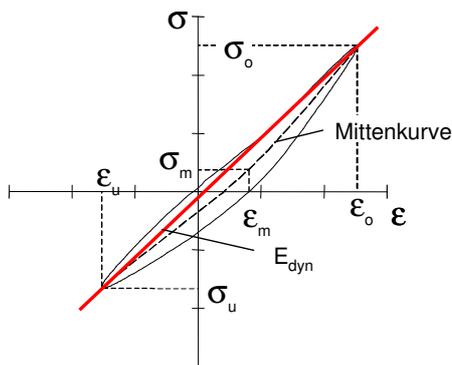
$$\epsilon(t) = \hat{\epsilon} \sin \omega t$$

$$\sigma(t) = \hat{\sigma} \sin(\omega t + \varphi)$$



- Komplexer Modul:  $E^* = (\Delta\hat{\sigma} / \Delta\hat{\epsilon})$   
 Speichermodul:  $E' = (\hat{\sigma} / \hat{\epsilon}) / \cos \varphi$   
 Verlustmodul:  $E'' = (\hat{\sigma} / \hat{\epsilon}) / \sin \varphi$   
 Verlustarbeit:  $W_v = \pi \hat{\sigma} \hat{\epsilon} \sin \varphi$   
 Speicherarbeit:  $W_s = 2 (0,5 \hat{\sigma} \hat{\epsilon} \cos \varphi)$   
 Dämpfung:  $\Lambda = \frac{W_v}{W_s} = \frac{\pi \hat{\sigma} \hat{\epsilon} \sin \varphi}{\hat{\sigma} \hat{\epsilon} \cos \varphi} = \pi \tan \varphi$

Hysteresisbewertung im linear-viskoelastischen Bereich



- $\sigma_m$  Mittelspannung
- $\sigma_o$  obere Spannung
- $\sigma_u$  untere Spannung
- $\epsilon_m$  Mitteldehnung
- $\epsilon_o$  obere Dehnung
- $\epsilon_u$  untere Dehnung
- $\epsilon_a$  Ausschlagsdehnung im Zugbereich ( $\epsilon_o - \epsilon_m$ )
- $E_{dyn}$  dynamischer Modul

- $W_v$  Verlustarbeit
- $W_s$  Speicherarbeit
- $\Lambda = W_v / W_s$  Dämpfung, IVE-Bereich:  $\Lambda = \pi \cdot \tan \varphi$

Hysteresisbewertung im nichtlinear-viskoelastischen Bereich

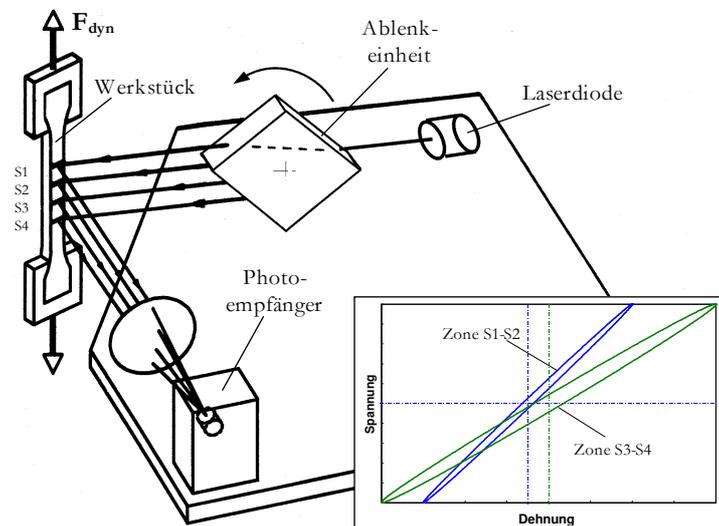
**Abb. 5-4:** Grundlagen der Hysteresismesstechnik im linear-viskoelastischen und nichtlinear-viskoelastischen Bereich /RER77/

### 5.1.4 Ortsaufgelöste Hysteresismessung mit Hilfe eines Laser-Extensometers

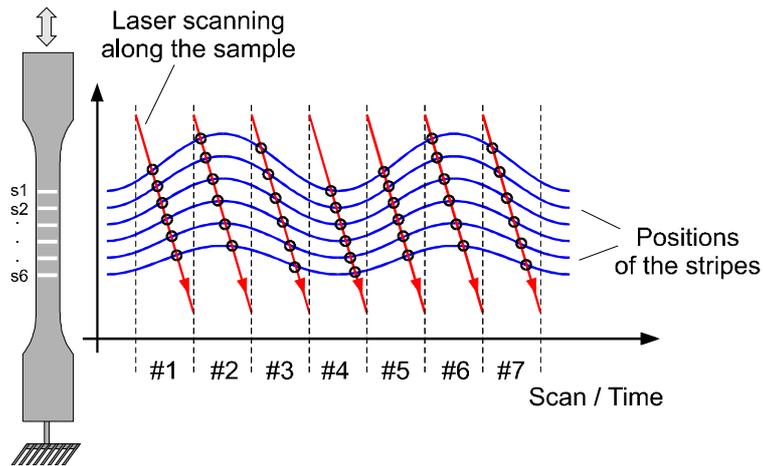
Bei zyklischer Belastung besteht die Aufgabe darin, die Dehnungen dem Kraftsignal zeitlich eindeutig zuzuordnen. Daraus werden die lokalen Hysteresisschleifen für die ausgewählten Teilabschnitte ermittelt (**Abb. 5-5**).

Für die Hysteresisauswertung müssen daher die Kraft- und Dehnungsinformationen synchron vorliegen. Aufgrund der hohen Dynamik der Messvorgänge müssen die Signale nicht nur zu jedem Scan (Überstreichen der Probe durch den Laser), sondern zu jedem Streifen synchronisiert werden. Dies geschieht durch eine intelligente Messkarte mit eigener CPU, die neben der Krafterfassung weitere Aufgaben übernimmt. Trifft der Laserstrahl auf einen Codierstreifen, wird sowohl die Position des Streifens als auch die Kraft zu genau diesem Zeitpunkt gemessen, d. h. dass durch das scannende Messverfahren jede Position zu einem anderen Zeitpunkt ermittelt wird (**Abb. 5-6**). Für die Berechnung der Dehnung müssen die Positionswerte mit Hilfe geeigneter mathematischer Verfahren auf einen gemeinsamen Zeitpunkt normiert werden. Die streifensynchrone Krafterfassung sowie die zeitliche Positionsnormierung sind wesentliche Voraussetzungen, um Phasenfehler bestmöglich zu vermeiden.

Es können gleichzeitig bis zu 25 Hysteresisschleifen in eng benachbarten Teilabschnitten (Abstand  $\geq 2$  mm) auf der Probenoberfläche erfasst werden. Für die Durchführung und Auswertung von Versuchen mussten geeignete Software-Tools entwickelt werden, die den spezifischen Anforderungen einer ortsaufgelösten Hysteresismessung genügen /RRE97, RRE00, RRH00, RRK00/.



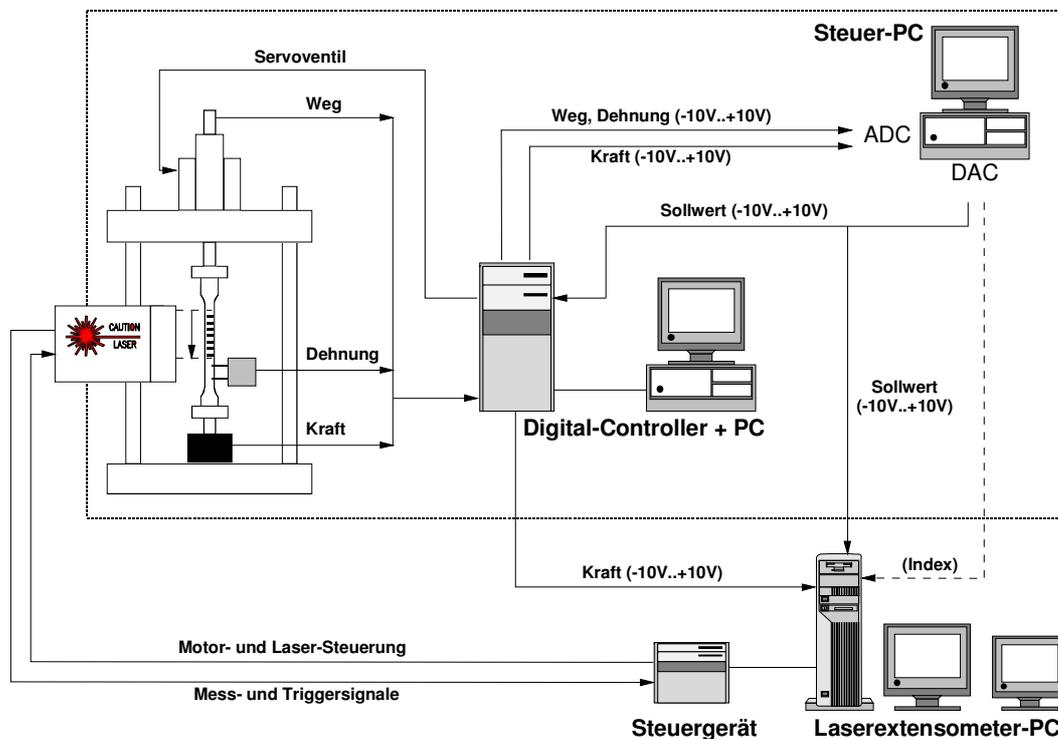
**Abb. 5-5:** Schematischer Aufbau des Laserextensometers (mit Angabe ortsaufgelöster Hysteresisschleifen)



**Abb. 5-6:** Durch das Scannen der sich dynamisch verformenden Probe wird jede Streifenposition zu einem anderen Zeitpunkt ermittelt, was eine nachfolgende Datenkorrektur bedingt.

### 5.1.4.1 Messapparatur

Es wird ein modifizierter Parallels scanner (Typ P-50) der Fa. Fiedler Optoelektronik GmbH eingesetzt. Für die Durchführung und Auswertung der Ortsaufgelösten Hysteresismessung wurden umfangreiche Software-Entwicklungen (Tools zur Messwerterfassung, Auswertung und Visualisierung) durchgeführt und ein Datenmanagementsystem erstellt. Die dynamischen Untersuchungen werden mit einer servohydraulischen Prüfmaschine (Minibionix der Fa. MTS) durchgeführt. Schematischer Aufbau einer Hydropulsanlage mit integriertem Laser-Extensometer siehe **Abb. 5-7**.



**Abb. 5-7:** Schematischer Aufbau einer Hydropulsanlage mit integriertem Laser-Extensometer

Folgende Systemprogramme kommen im Rahmen der Hysteresisauswertung zur Anwendung:

**Drumm, R.:** Programm DYNPRO zur Steuerung servohydraulischer Prüfeinrichtungen sowie zur Erfassung und Berechnung dynamischer Kenngrößen, Fa. BASF AG

**Drumm, R.:** Programm STAPRO zur Steuerung servohydraulischer Prüfeinrichtungen sowie zur Erfassung und Berechnung statischer Kenngrößen, Fa. BASF

**Drumm, R.:** LOKHYST, Auswertprogramm zur Kennwertberechnung bei dynamischen Messungen, Fa. BASF

**Ranft, J; Drumm, R.:** Programm MEASURE VISION zur Bearbeitung und Visualisierung allgemeiner und dynamischer Messdaten. Fa. Ranft Scientific Software Development

**N.N.:** LQM, Messwerterfassungsprogramm für statische und dynamische Messung, Fa. Fiedler

**N.N.:** LQAE-B, Auswertprogramm für statische Messung, Fa. Fiedler

**N.N.:** WFHYST, Auswertprogramm zur Konvertierung der Hysteresisschleifen bei dynamischen Messungen, Fa. Fiedler

#### 5.1.4.2 Optimierung der Hysteresismesstechnik und Messgenauigkeit

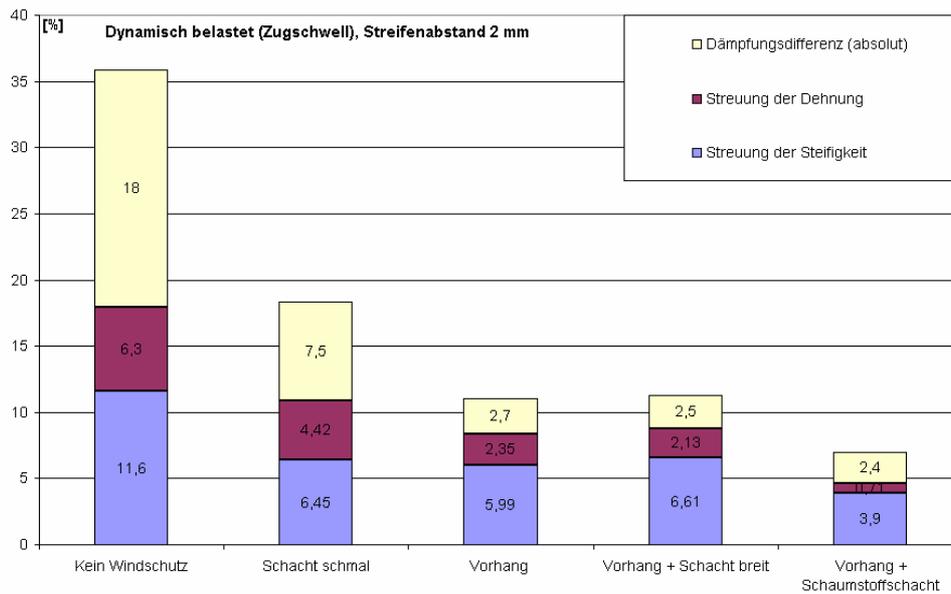
Im Rahmen eines Vorgängerprojekt /REP01/ wurde die Messgenauigkeit der orts aufgelösten Hysteresismessung erhöht:

Für diese Messstrategie ist eine hochgenaue Erfassung der Hysteresisschleifen notwendig (Steifigkeit, Dämpfung, Kriechen). Von der Firma Fiedler wurde eine Genauigkeitserhöhung durch modifizierte Datenerfassung und der Datenverarbeitung des Laserextensometers erzielt. Eine weitere Genauigkeitserhöhung wurde durch eine Verbesserung der Signalqualität durch Optimierung von Laborbedingungen und Kodierung am Lehrstuhl RPE erreicht. Wegen der hohen Anforderung an die Messgenauigkeit (Längenmessung deutlich kleiner als Lichtwellenlänge) kommen geringfügige Beeinflussungen des Laserstrahls durch die Luftbewegungen zum Tragen und führen zu einem Messwertauschen. Es wurde der Einfluss unterschiedlicher Abschirmmaßnahmen auf die Messwertstreuung ermittelt, und es erfolgte ein Schutz vor Luftbewegungen durch eine spezielle Vorhangkonstruktion. Die üblicherweise im Rahmen der Laserextensometrie eingesetzten aufgeklebten Kodierstreifen erwiesen sich als ungeeignet, da gezeigt werden konnte, dass die Markierungen auf der Probe schwimmen. Die Kodierung erfolgt daher ausschließlich über ein Sprayverfahren und Masken.

Die hier durchgeführten Optimierungen der Versuchseinrichtungen gestatten es, Hysteresisschleifen im Abstand von 4 mm ab einer Dehnung von ca. 0,2 % mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen, was für die Untersuchungen von langfaserverstärkten Thermoplasten eine zwingende Voraussetzung ist.

Mittels der rechnerischen Hysteresisauswertung wurden für die verschiedenen Prüfbedingungen die maximalen Streuungen bzw. Messwertdifferenzen bei einem Auswertintervall von ca. 1000 Lastspielzyklen ermittelt (**Abb. 5-8**):

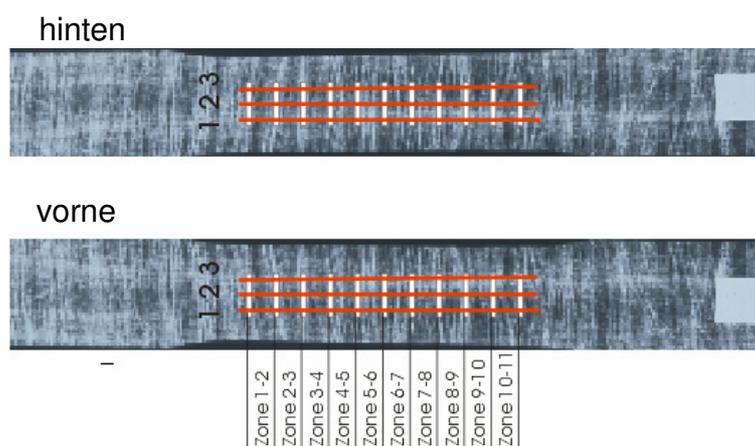
Streuung der Dehnung:	$(\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}) / \epsilon_{\text{mittel}}$
Streuung der Steifigkeit (Steigung der Hysteresisschleife):	$(E_{\max} - E_{\min}) / E_{\text{mittel}}$
Dämpfungsdifferenz (absolut):	$\Delta_{\text{Max}} - \Delta_{\text{Min}}$



**Abb. 5-8:** Einfluss Laborbedingungen auf die Messgenauigkeit (Probematerial: D-LFT (Fa. Aksys), Versuchsbedingungen: 5 Hz; Dehnungsamplitude  $\Delta\epsilon = 0,5\%$ ; Streifenabstand 4mm, Streifenanzahl: 8)

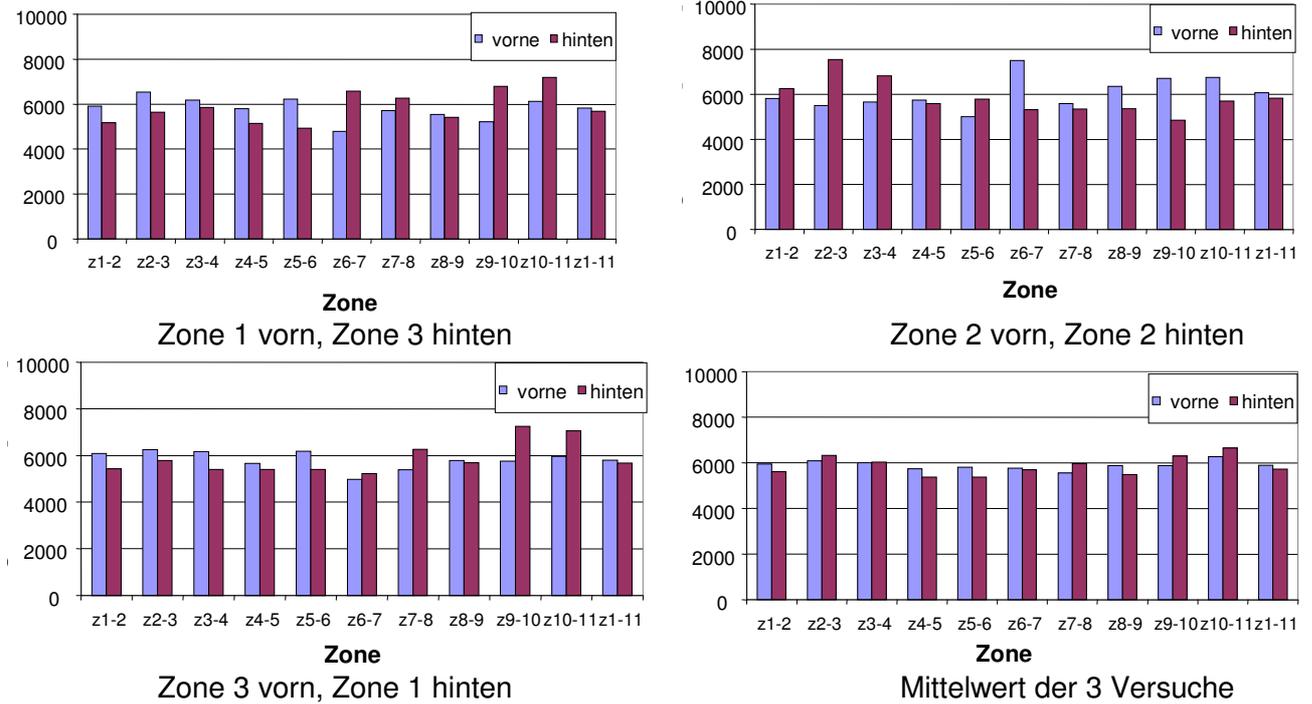
### Einfluss der Position des Laserscans und der Vorder- und Rückseite auf Messwerte bei orts aufgelöster Hysteresismessung

Es wurden quasistatische Zugversuche (bis 0,4% Dehnung) und dynamische Versuche auf zwei Seiten (vorne und hinten) der Probe (Quadrant, Charge 2, quer) durchgeführt. Auf jeweils einer Seite wurden nebeneinander drei Untersuchungen mit dem Laserextensometerstrahl durchgeführt (**Abb. 5-9, Abb. 5-10**). Teilweise wird ein unterschiedliches Verhalten auf der Vorder- und Rückseite beobachtet, das auf Werkstoffinhomogenitäten und Biegeeinflüsse beruhen kann.

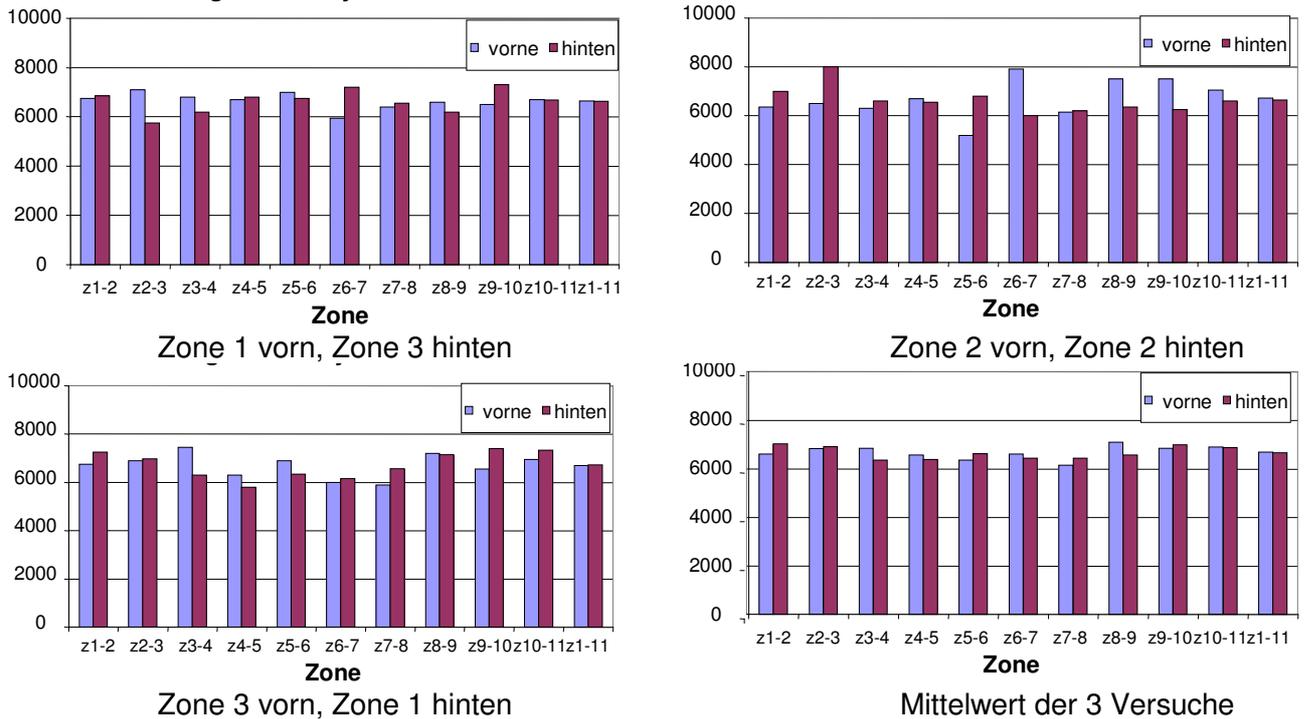


**Abb. 5-9:** Einfluss der Position des Laserscans auf Messwerte, Messung auf Vorder- und Rückseite (Quadrant, Charge 2, QC2a1, quer, 5 Hz, RT, 2 mm Abstand zwischen Laserstrahlen)

**quasistatische Versuche (E-Modul (N/mm<sup>2</sup>))**



**dynamische Versuche (Dyn. Modul (N/mm<sup>2</sup>))**

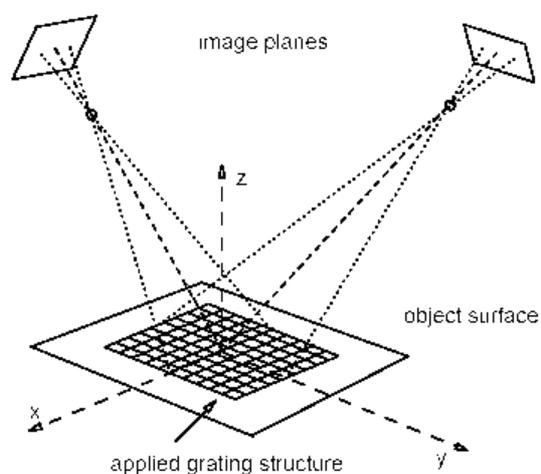


**Abb. 5-10:** Einfluss von Position des Laserscans und Messung auf Vorder- und Rückseite auf Messwerte (gleiche Probe, Wiederholversuche) 2 mm Abstand zwischen Laserstrahlen, (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 2, QC2a1, quer)

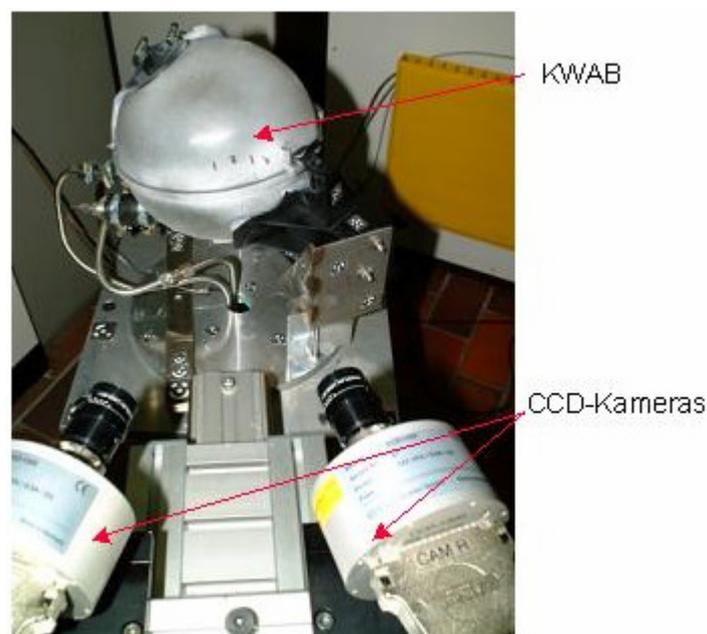
- quasistatischer Zugversuch (RT, gezogen bis 0,4% Dehnung, Streifenabstand 5mm)
- dynamische Zugschwellbelastung (5 HZ, RT,  $\sigma_a=10\text{N/mm}^2$ , Streifenabstand 5mm)

## 5.2 Objektrasterverfahren

Das Objektrasterverfahren gehört zu den optischen Feldmessverfahren und eignet sich zur orts aufgelösten Erfassung von Verschiebungs- und Dehnungsfeldern bei der Material- und Bauteilprüfung. Das Verfahren arbeitet berührungslos und ist sowohl zur Messung sehr kleiner als auch großer Objektoberflächen geeignet /FGE06, GOM06/. Die 3D-Analyse basiert auf zwei Kameras, mit denen die Oberfläche beobachtet wird (**Abb. 5-11**). Diese ist mit einem stochastischen Muster beschichtet (**Abb. 5-12**). Aufgrund dieser Oberflächenbeschichtung ist die Messung unabhängig von der Beleuchtung und den optischen Eigenschaften des Materials (Reflexion). Die Belastungssituation wird zeitgleich mit zwei Kameras gemessen. Damit kann das System auch dynamische Deformationen erfassen, was nur durch die maximale Aufnahme Frequenz der verwendeten Kameras begrenzt ist.

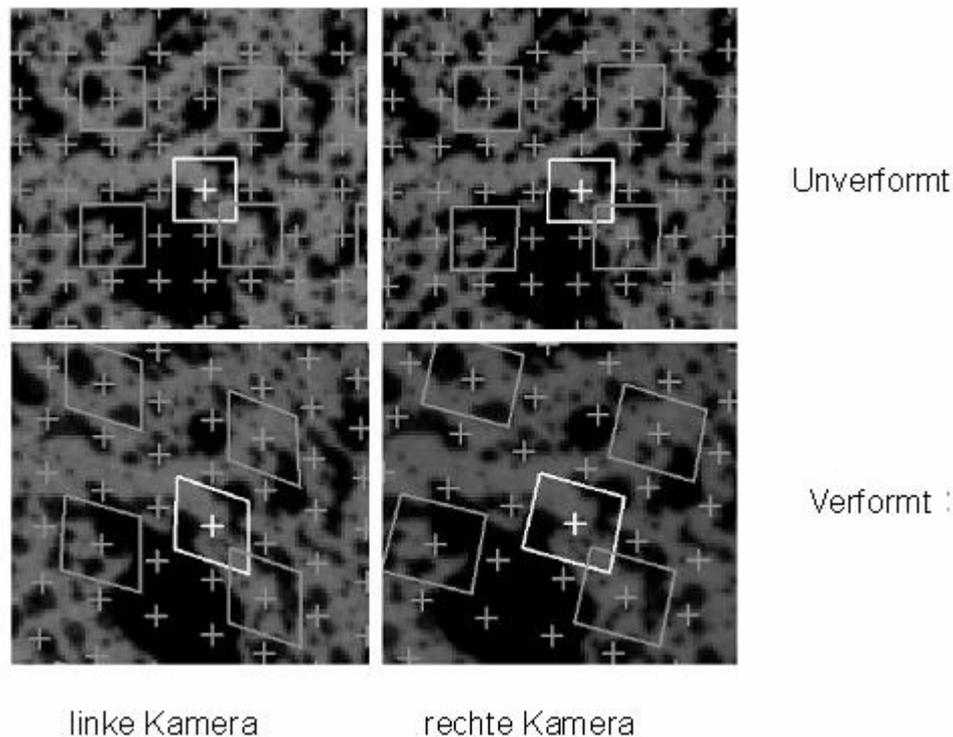


**Abb. 5-11:** Prinzipieller Aufbau für das Objektrasterverfahren



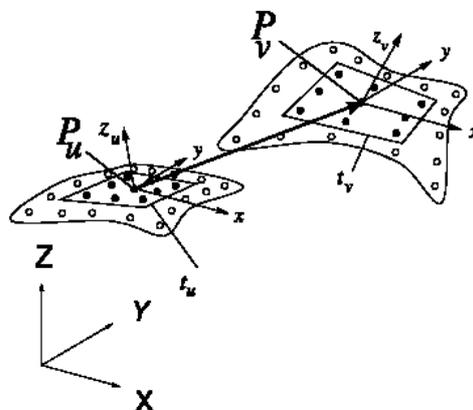
**Abb. 5-12:** Versuchsaufbau mit CCD-Kameras für Deformationsanalyse mit dem Objektrasterverfahren; codierter Kühlwasserausgleichsbehälter (KWAB)

Unter Verwendung der digitalen Bildverarbeitung wird ein Referenzbild in Facetten (kleine rechteckige Bereiche) unterteilt. Für jede Fläche (Facette) wird die korrespondierende Lage in allen anderen Bildern (von der zweiten Kamera und von allen verschiedenen Lastfällen) automatisch mit Subpixelgenauigkeit bestimmt. Dies ist exemplarisch in **Abb. 5-13** (s. weiße Facette) für einen kleinen Ausschnitt dargestellt.



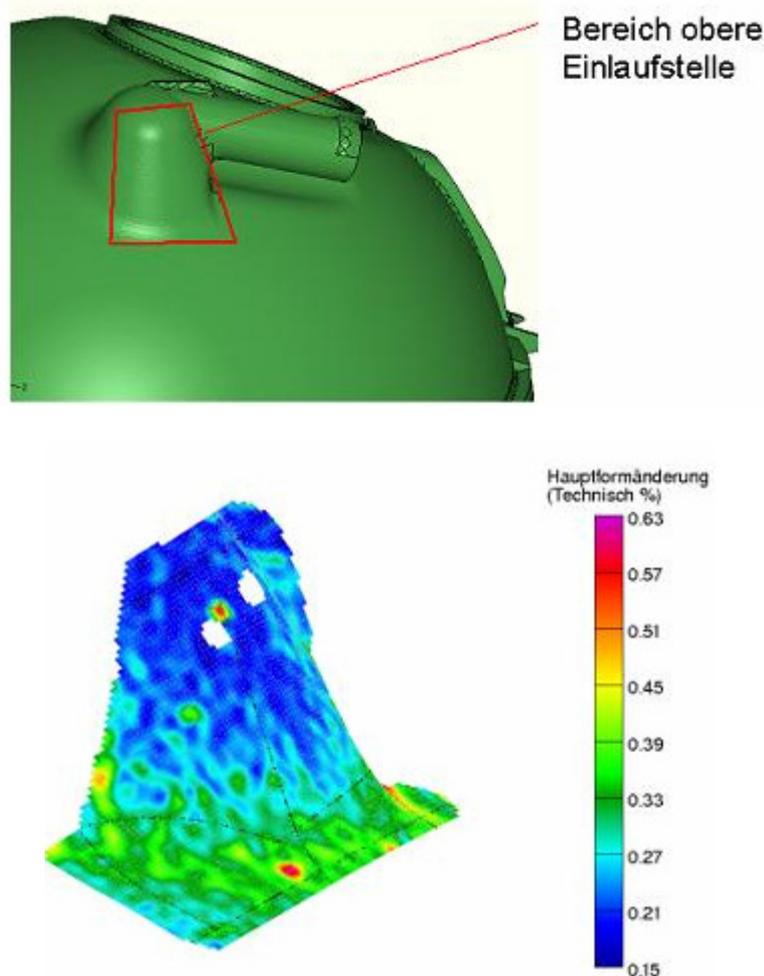
**Abb. 5-13:** Bildschirmdarstellung des Ausschnitts einer codierten Oberfläche mit Facetten (linkes und rechtes Kamerabild, unverformt und verformt)

Dieses Vorgehen führt zu einem flächenhaften Ergebnis mit hoher lokaler Auflösung z. B. der 3D-Koordinaten und der 3D-Deformationen. Basierend auf den 3D-Koordinaten eines Referenzzustandes wird der Dehnungstensor der Oberfläche für alle (deformierten) Lastfälle (**Abb. 5-14**) ermittelt.



**Abb. 5-14:** Berechnung der Oberflächendehformationen und -dehnungen

Bei hochauflösenden Kameras und einem geeigneten Objektausschnitt kann eine hohe Messgenauigkeit der Dehnung bis zu 0,1% technischer Dehnung erreicht werden (**Abb. 5-15**). Die zeitliche Auflösung ist nur bestimmt durch die maximale Geschwindigkeit der verwendeten Kameras. Derzeit werden Messungen durchgeführt mit mehr als 50.000 Bildern/sec, Belastungsgeschwindigkeiten höher als 20 m/sec und Dehnraten größer als 100.000 %/sec. Die Anzahl der 3D-Punkte hängt vom Auflösungsvermögen der Kamera und der Geometrie der Proben ab (typisch sind 10.000 bis 100.000 3D-Punkte). Die Größe des 3D-Messfeldes liegt typischerweise zwischen 5 x 4 und 2.000 mm x 1600 mm.



**Abb. 5-15:** Kühlwasserausgleichsbehälter, Detail oberer Einlauf, maximale Hauptdehnung bei Innendruckbelastung (RT/1 bar)

### 5.2.1 Messsystem

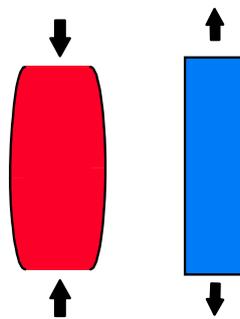
Es wurde das System ARAMIS der Firma GOM /GOM06/ eingesetzt. Es besteht aus folgenden Komponenten: Digitale CCD-Kameras, Objektive, Kalibrierplatten, Rechner inklusive Monitor und Drucker, Softwaresystem ARAMIS.

## 5.3 Thermoelastische Spannungsanalyse (TSA)

### 5.3.1 Funktionsweise

Die Thermoelastische Spannungsanalyse ist ein berührungsloses Feldmessverfahren, mit dem Oberflächenspannungen bzw. -dehnungen von Proben und Bauteilen ermittelt werden /HAC91/ können. Das Messprinzip beruht auf dem sog. Kelvin-Effekt. Dieser besagt, dass bei Festkörpern bei Änderung des Belastungszustandes eine Änderung der Temperatur eintritt, welche bei homogenen isotropen Materialien der Änderung der Summe der Hauptspannungen bzw. -dehnungen proportional ist (**Abb. 5-16**). Diese Beziehungen gelten exakt jedoch nur unter folgenden Bedingungen:

- linearelastisches Deformationsverhalten des Werkstoffs
- die Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften ist zu vernachlässigen
- die Temperaturveränderungen im Material treten unter adiabaten Verhältnissen auf



$$\Delta T = -\frac{\alpha T}{\rho C_p} \Delta(\sigma_1 + \sigma_2) = -\frac{\alpha T}{\rho C_p} \frac{E}{1-\nu} \Delta(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

$\Delta T$	Temperaturänderung im Messpunkt [K]
$T$	absolute Temperatur [K]
$\alpha$	Wärmeausdehnungskoeffizient
$\rho$	Dichte
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [kJ/kgK]
$c_v$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen [kJ/kgK]
$\Delta(\sigma_1 + \sigma_2)$	Änderung der Hauptspannungssumme
$\Delta(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$	Änderung der Hauptdehnungssumme
$E$	Elastizitätsmodul
$\nu$	Querkontraktionszahl
K	Kelvin

**Abb. 5-16:** Thermoelastischer Effekt bei isotropem Materialverhalten, spannungs- und dehnungsorientierte Darstellung

Um von der Temperaturänderung auf die auftretenden Dehnungsänderungen schließen zu können, muss die Belastung schnell genug erfolgen, damit kein Temperaturfluss im Körper auftritt (adiabate Zustandsänderung). Hierzu wird der Körper mit einer ausreichenden Frequenz zyklisch belastet. Die durch den

Kelvineffekt auftretende zyklische Temperaturveränderung kann nun bei der TSA mithilfe einer schnellen hochauflösenden Infrarotkamera erfasst werden.

Die TSA ist ein robustes Verfahren, da mit einer Infrarotkamera nur die zyklische Temperaturveränderung erfasst werden muss und das Objekt leicht aus verschiedenen Richtungen und Standorten (ohne Neukalibrierung der Messeinrichtung) betrachtet und analysiert werden kann. Die TSA kann zur schnellen Detektion des an der Oberfläche wirksamen Beanspruchungszustands von Werkstoffproben und Bauteilen eingesetzt werden.

### 5.3.2 Messsystem , Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

#### Messsystem

Bei den Untersuchungen wurde das Messsystem DELTATHERM mit Messkopf DT 1550 der Fa. Stress Photonics eingesetzt. Es besteht aus folgenden Komponenten (**Abb. 5-17**): IR-Kamera, Objektive, Kalibrierplatten, Rechner inklusive Monitor und Drucker, Softwaresystem. Weitere Eigenschaften siehe Systembeschreibung /STR26/.

Kamerakühlung	Stirling-Kühlung
Pixelzahl	320 x 256
Thermische Auflösung der Infrarot-Kamera	<18 mK
Maximale Bildwiederholungsrate bei 320* 256 Pixel	395 Hz
Thermische Auflösung des TSA-Messsystems	Durch die höhere thermische Auflösung und Bildwiederholrate liegt nach <30 sec eine Auflösung =< 1mK vor
Frequenzbereich der dynamischen Bauteilbelastung	0,1 Hz - 2 kHz



**Abb. 5-17:** Technische Daten des eingesetzten Messsystems DELTATHERM mit Messkopf DT 1550 der Fa. Stress Photonics

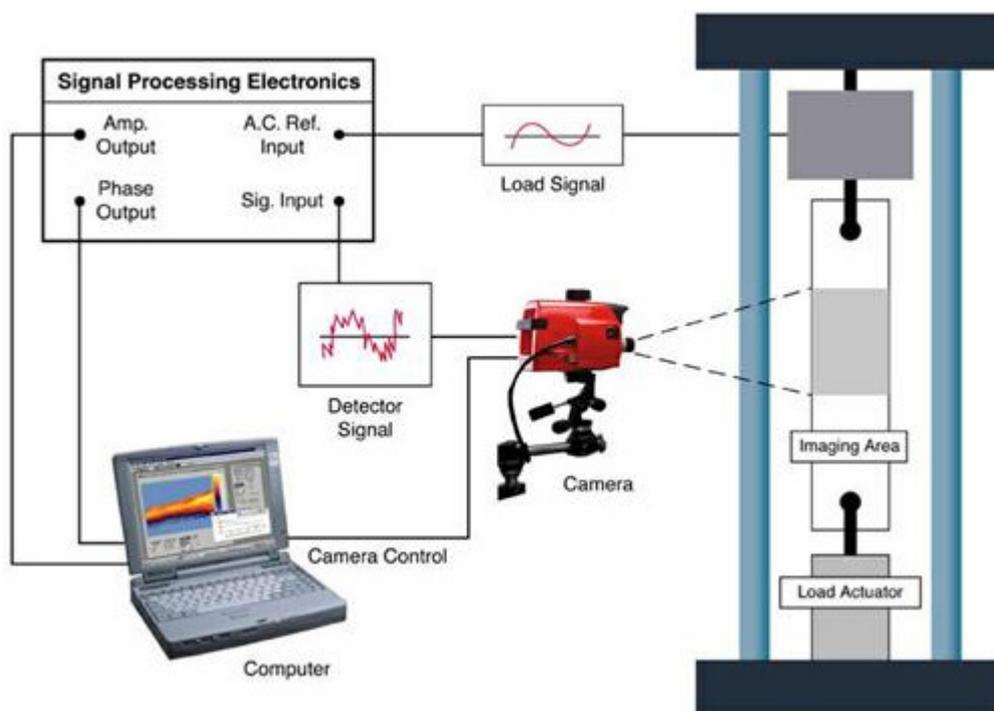
#### Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Messaufbau besteht aus einer Einrichtung zur dynamischen Erregung des Prüfobjektes (z. B. servohydraulische Prüfeinrichtung) und dem TSA-System (**Abb. 5-18**). Dazu gehört eine schnelle Infrarotkamera zur flächenhaften Messung der Oberflächentemperatur bei dynamischer Beanspruchung. Mittels Auswerterroutinen der TSA wird flächenhaft die Temperaturveränderung  $\Delta T$  bei zyklischer Belastung für jedes Kamerapixel ermittelt. Die hohe Messauflösung der Oberflächentemperaturmessung (angestrebt  $\Delta T = 10^{-3}$  K) wird durch eine spezielle Auswertung erreicht. Hierzu wird das vom Infrarotsensor gelieferte Temperatursignal korreliert mit einem Referenzsignal der dynamischen Erregung. Der Korrelator verarbeitet nur Signale, deren Frequenz mit dem Referenzsignal übereinstimmt.

Damit lässt sich der störende Umgebungseinfluss bei der Temperaturmessung ausschalten. Auf Pixelebene werden die Maxima und Minima der Temperatur ermittelt. Nach einer kurzen Messzeit, der sog. Integrationszeit (z. B. 1 - 2 Minuten bei 5 Hz Erregung), stehen die ausgewerteten Versuchsergebnisse zur Verfügung. Um eine einheitliche Emissivität des Bauteils sicherzustellen, wird zumeist eine dünne, gleichmäßige Schicht eines Mattlacks aufgesprüht. Die Kalibrierung der Spannungsmessung erfolgt vorzugsweise experimentell (z.B. Dehnmessstreifen). Die Lastfrequenz liegt gewöhnlich zwischen 0,5 Hz und 20 Hz und ergibt sich aus den Bedingungen zur adiabaten Betrachtung und den experimentellen Grenzen beim Aufbringen zyklischer Belastungen.

Die unter adiabatischer zyklischer Belastung mit der Messeinrichtung erzielbare Temperaturauflösung beträgt  $\Delta T = 10^{-3}$  K. Somit können bei Raumtemperatur folgende Hauptspannungssummenänderungen noch gemessen werden:

	$\Delta\sigma$ (T=293 K, $\Delta T=10^{-3}$ K) N/mm <sup>2</sup>
Stahl	1
Aluminium	0,4
Epoxidharz	0,055



**Abb. 5-18:** Messaufbau mit servohydraulischer Prüfeinrichtung (schematische Darstellung) und Hinweis auf Signalverarbeitung

## 6 Versuchsergebnisse

### 6.1 Direkt-LFT

#### 6.1.1 Zugversuch

##### Lokales Deformationsverhalten im Zugversuch

Zur Charakterisierung des lokalen Deformationsverhaltens wird ein orts aufgelöster Zugversuch mit dem Laserextensometer durchgeführt. Dieser zeigt das lokal unterschiedliche Deformationsverhalten innerhalb eines einzelnen Probestabs und die Bruchdehnung der versagenden Zone.

Es wird zuerst das Verhalten einzelner Probestäbe eines Raumgewichts bei unterschiedlicher Entnahmerichtung, dann das von Platten mit unterschiedlichem Raumgewicht aufgezeigt. Daran schließt sich eine Gesamtbetrachtung des mechanischen Verhaltens von Proben aller Raumgewichte bei Entnahme längs und quer an.

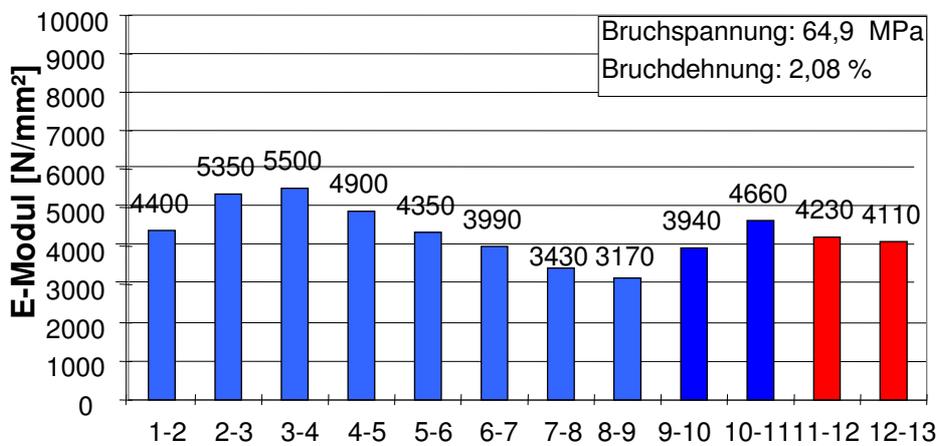
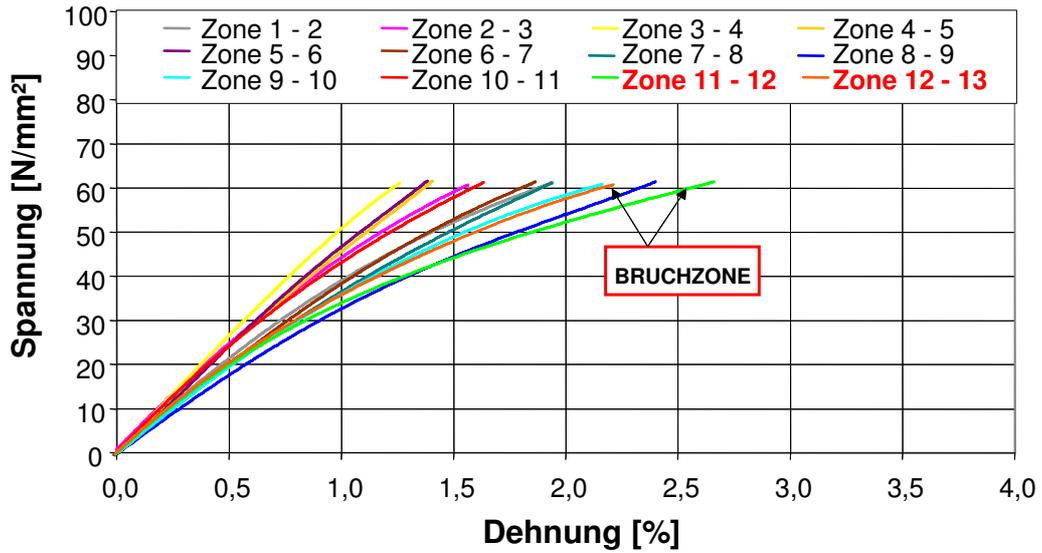
##### 6.1.1.1 Lokales Deformationsverhalten von Probestäben aus einer Platte

Es werden beispielhaft Versuche an D-LFT mit 30-Gew.-% GF, bei Entnahmerichtung längs und quer vorgestellt und hierbei der lokale Spannungs-Dehnungsverlauf, das Röntgenbild mit der Bruchzone und der Verlauf des lokalen E-Moduls präsentiert (**Abb. 6-1** bis **Abb. 6-4**).

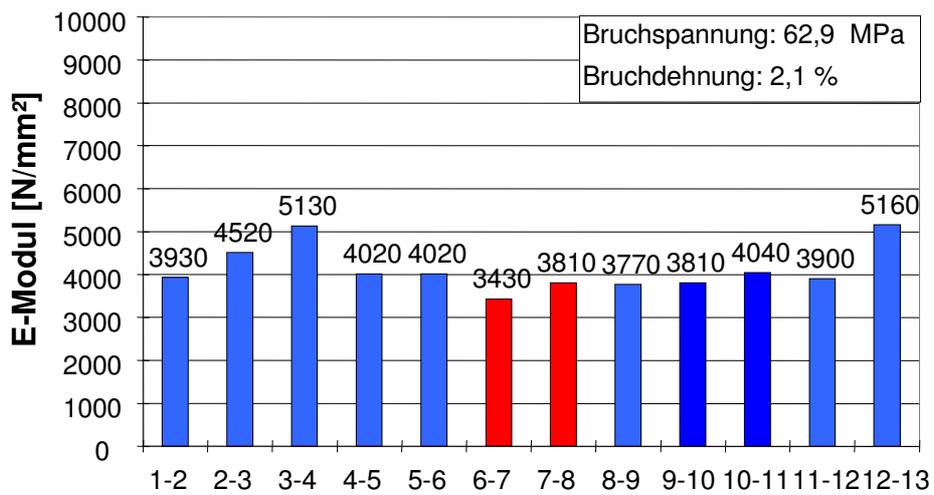
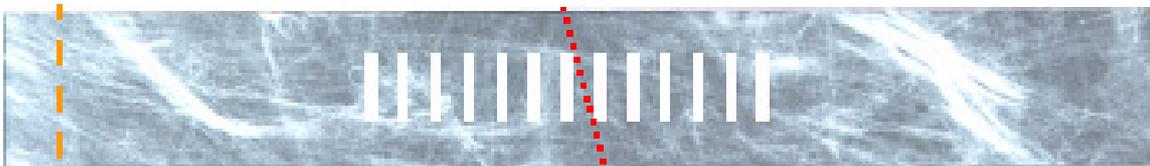
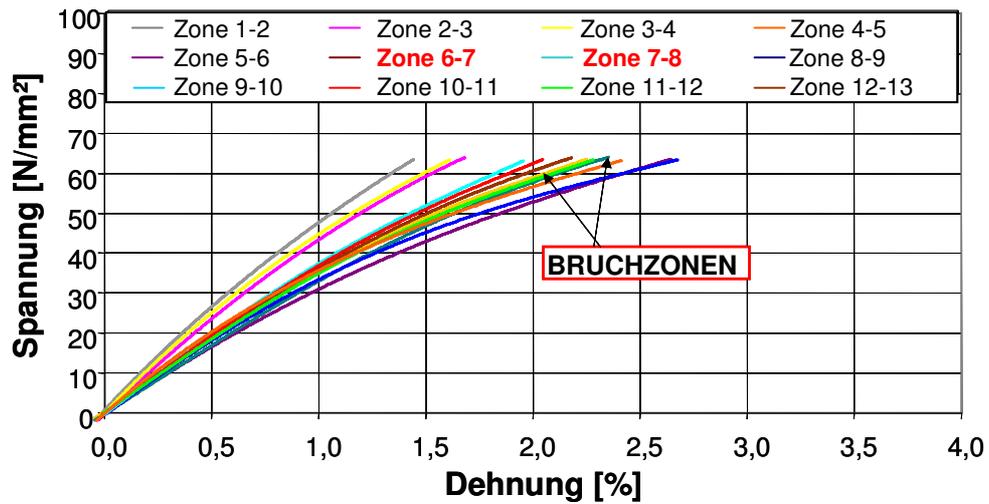
In einem einzelnen Probestab zeigen die Röntgenaufnahmen zumeist unterschiedliche Faserorientierungen. Diese sind die wesentliche Ursache für die in den verschiedenen lokalen Messzonen ermittelten unterschiedlichen Spannungs-Dehnungsverläufe und E-Moduli.

Es ist zu erkennen, dass der Bruch selten in einer, aber oftmals innerhalb von zwei Zonen der Codierung auftritt, wobei üblicherweise die Zone mit der geringsten lokalen Steifigkeit beteiligt ist.

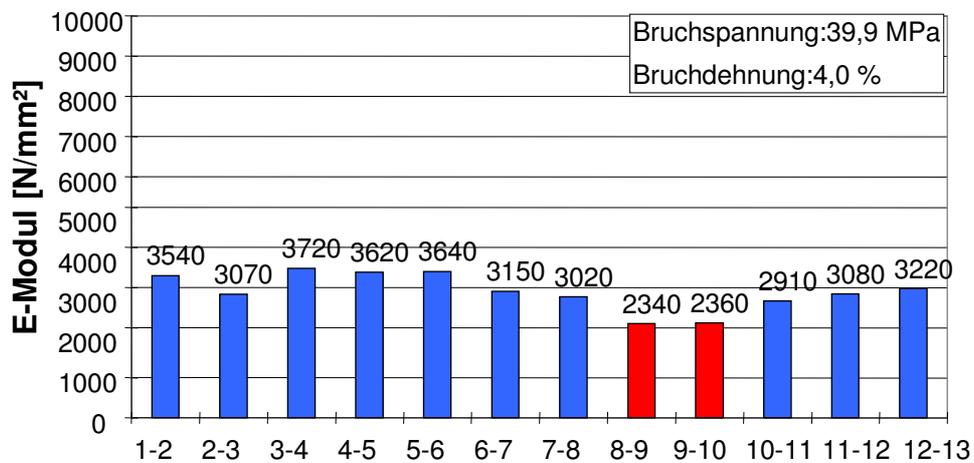
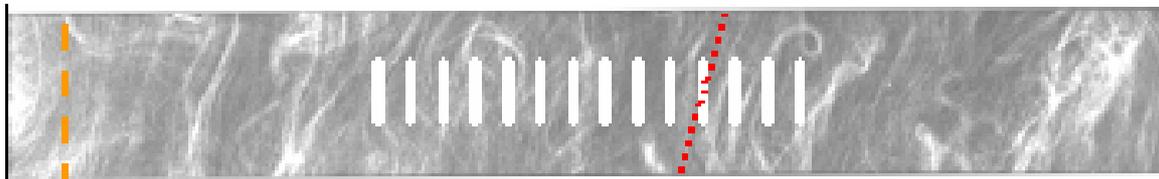
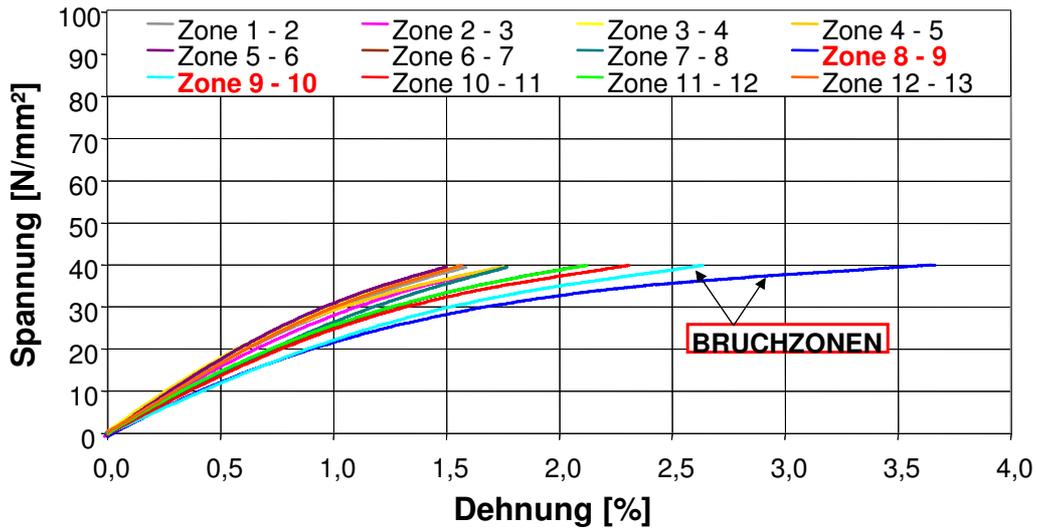
(Bemerkung: Vorschubgeschwindigkeit 1 mm/min, RT, Streifenabstand 4 mm, E-Modulbestimmung im Bereich 0,05 – 0,25% Dehnung)



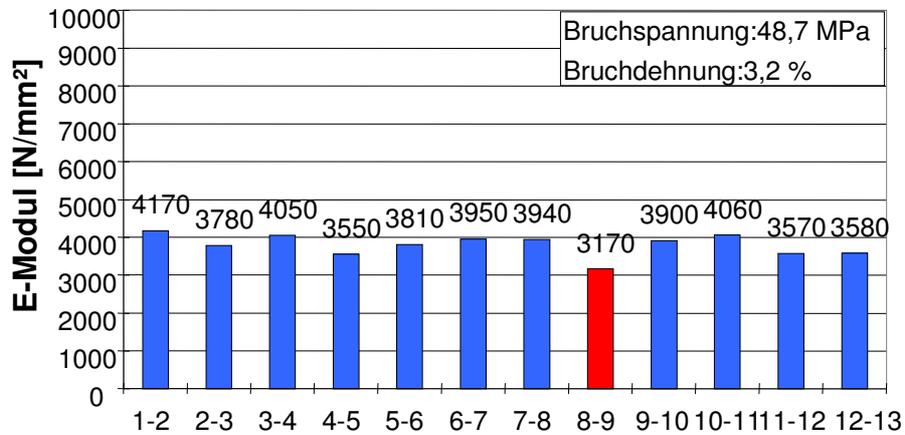
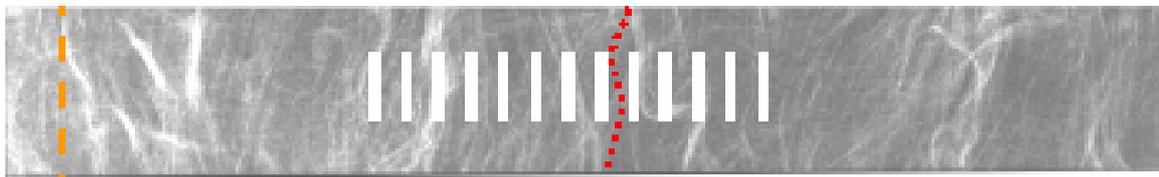
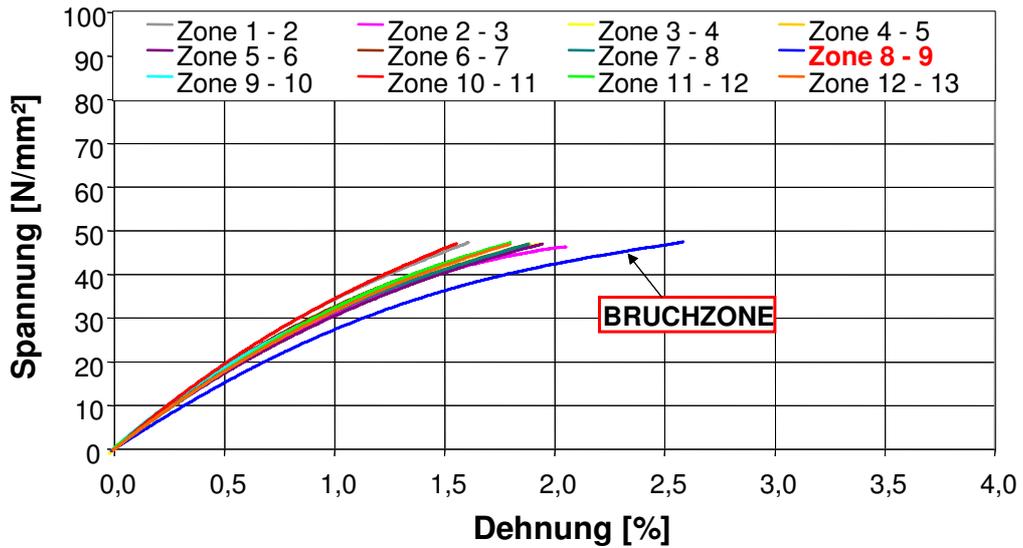
**Abb. 6-1:** Lokaler Spannungs-Dehnungsverlauf, Röntgenbild mit Angabe der Bruchzone und der Verlauf des lokalen E-Moduls (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs, Probestab Fi6d3, Streifenabstand 4mm, Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min)



**Abb. 6-2:** Lokaler Spannungs-Dehnungsverlauf, Röntgenbild mit Angabe der Bruchzone und der Verlauf des lokalen E-Moduls (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs, Probestab Fi6d6, Streifenabstand 4mm, Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min)



**Abb. 6-3:** Lokaler Spannungs-Dehnungsverlauf, Röntgenbild mit Angabe der Bruchzone und der Verlauf des lokalen E-Moduls (D-LFT, 30 Gew.-% GF, quer, Probestab Fi6e4, Streifenabstand 4mm, Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min)



**Abb. 6-4:** Lokaler Spannungs-Dehnungsverlauf, Röntgenbild mit Angabe der Bruchzone und der Verlauf des lokalen E-Moduls (D-LFT, 30 Gew.-% GF, quer, Probestab Fi6e5, Streifenabstand 4mm, Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min)

### 6.1.1.2 Zugversuch an Probestäben aus Platten unterschiedlichen Raumgewichts

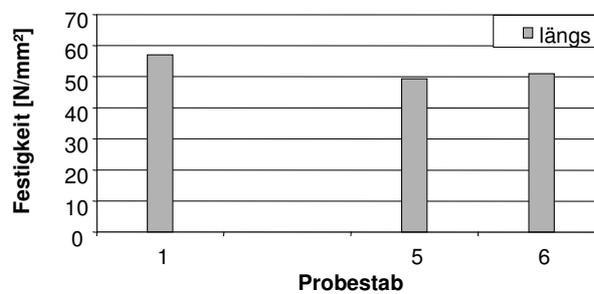
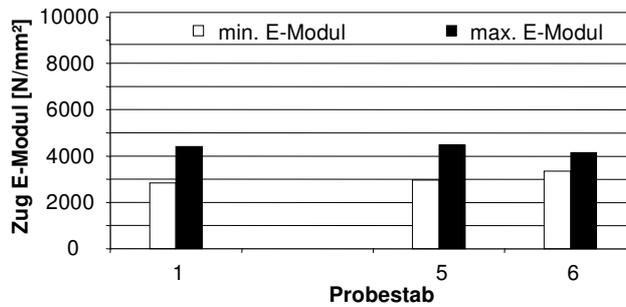
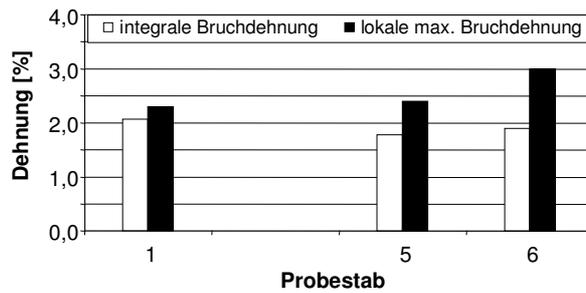
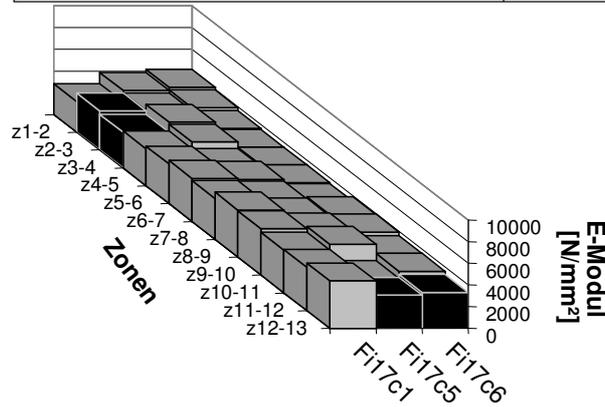
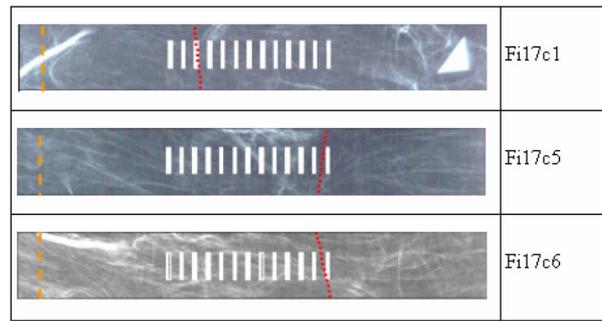
Die aus einer Probeplatte aus zumeist benachbarten Probestäben erhaltenen Werte des E-Moduls, der Bruchdehnung und Zugfestigkeit zeigen die Bilder (**Abb. 6-5** bis **Abb. 6-10**) für Platten unterschiedlichen Raumgewichts und bei der Entnahmerichtung längs und quer.

Zur Veranschaulichung des lokalen Steifigkeitsverlaufs innerhalb eines Probestabs und unter Hinzunahme der benachbarten Probestäbe wird der E-Modul als 3D-Plot dargestellt. Der lokale Steifigkeitsverlauf lässt zumeist keine ausgeprägte Nachbarschaftsbeziehung innerhalb des Probestabs und zu benachbarten Probestäben hin erkennen. Dieser Befund korreliert mit dem sehr inhomogenen Gefügebild, das die inhomogene Faserverteilung charakterisiert. Darüber hinaus ist von einem weiteren Einfluss der z. T. ungleichmäßigen Faserbenetzung auszugehen.

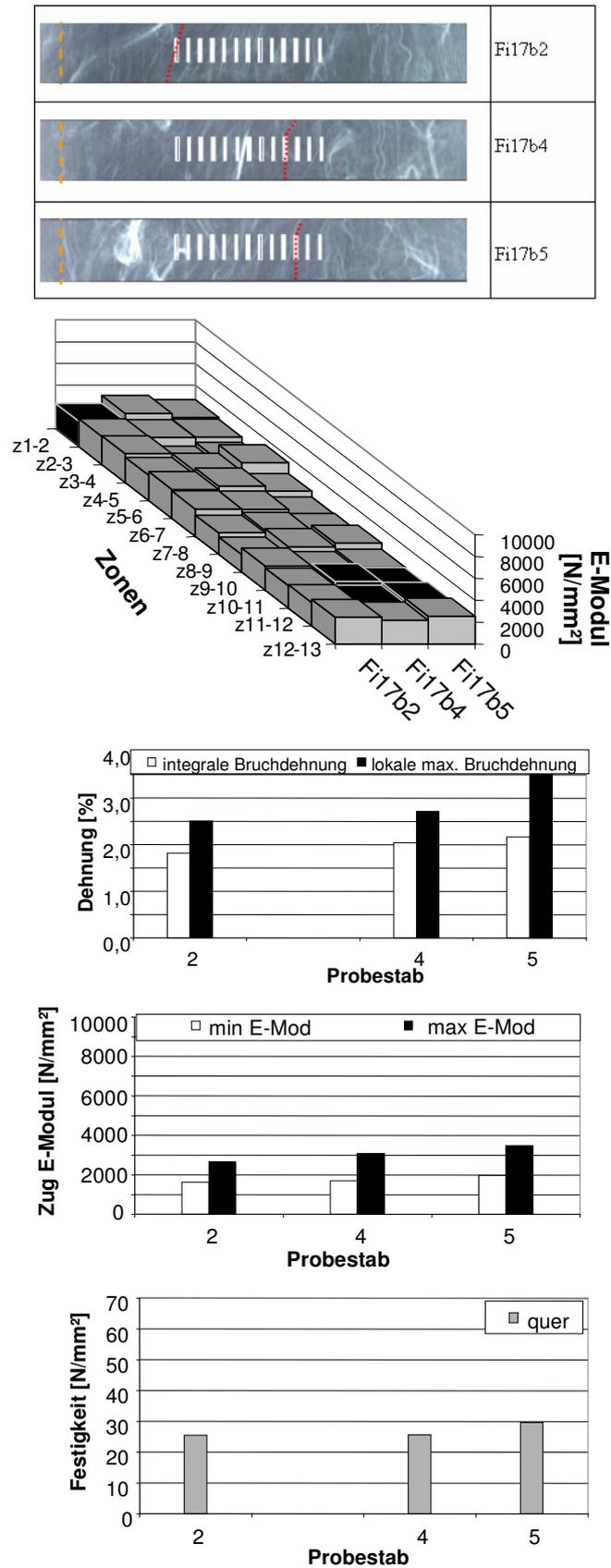
Wie schon zuvor angesprochen, tritt das Versagensverhalten erwartungsgemäß zumeist in Zonen mit einem geringen E-Modul auf.

Bei der Auswertung der Zugversuche werden sowohl die üblicherweise herangezogene integrale Bruchdehnung und auch die mit dem LEX ermittelbare lokale Bruchdehnung als wichtige Größe dargestellt. Außerdem werden die Festigkeit und der minimale und maximale E-Modul innerhalb eines Probestabs angegeben. Auffallend sind der relativ hohe Bruchdehnungswert der Versagenszone und deren relativ geringe Streuung.

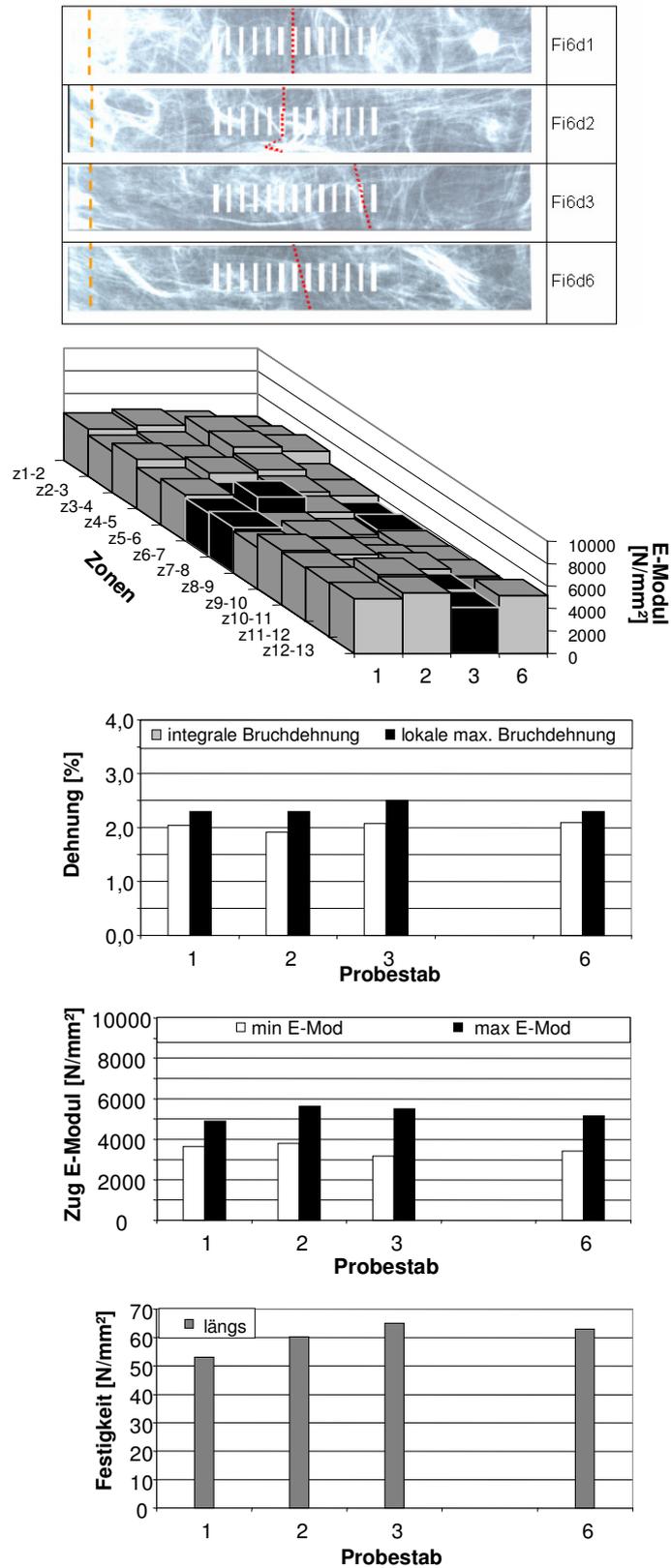
(Bemerkung: berechnete integrale Bruchdehnung bezogen auf 48 mm fiktive Messlänge)



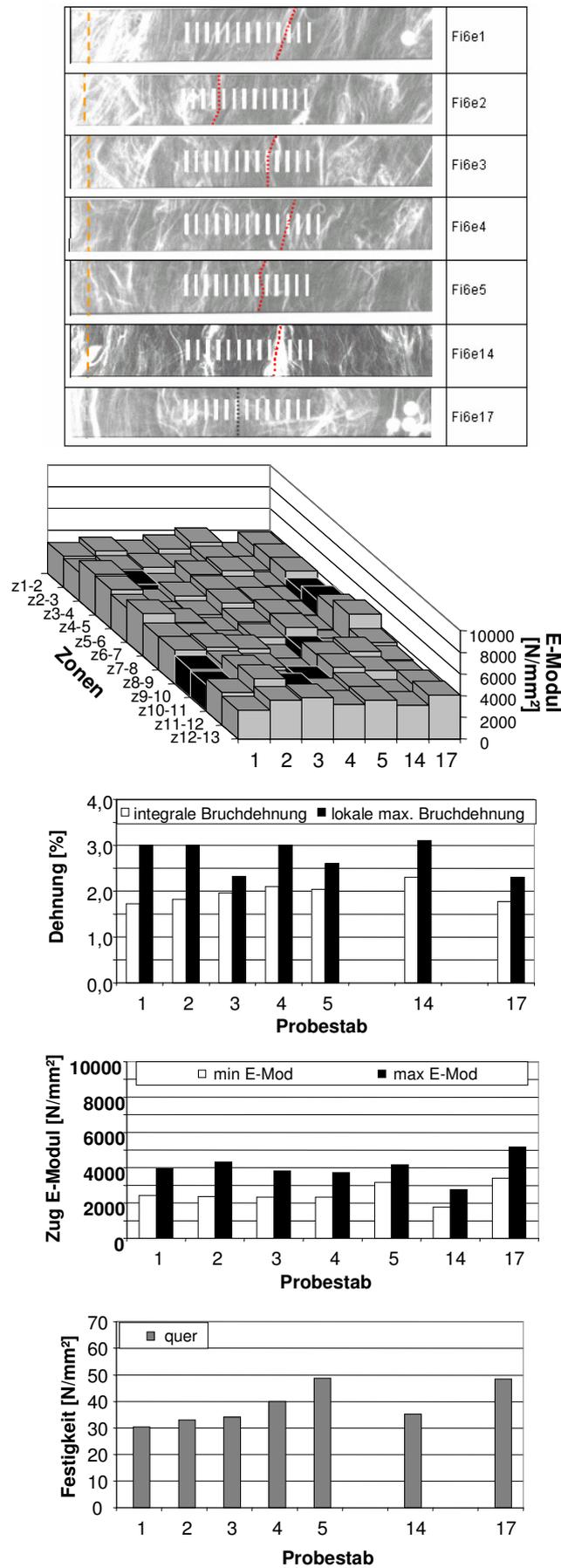
**Abb. 6-5:** Röntgenaufnahme, lokale Steifigkeit, Bruchdehnung, Festigkeit und E-Moduli von Probekörpern einer Platte (D-LFT, 20 Gew.-% GF, Entnahmerichtung längs)



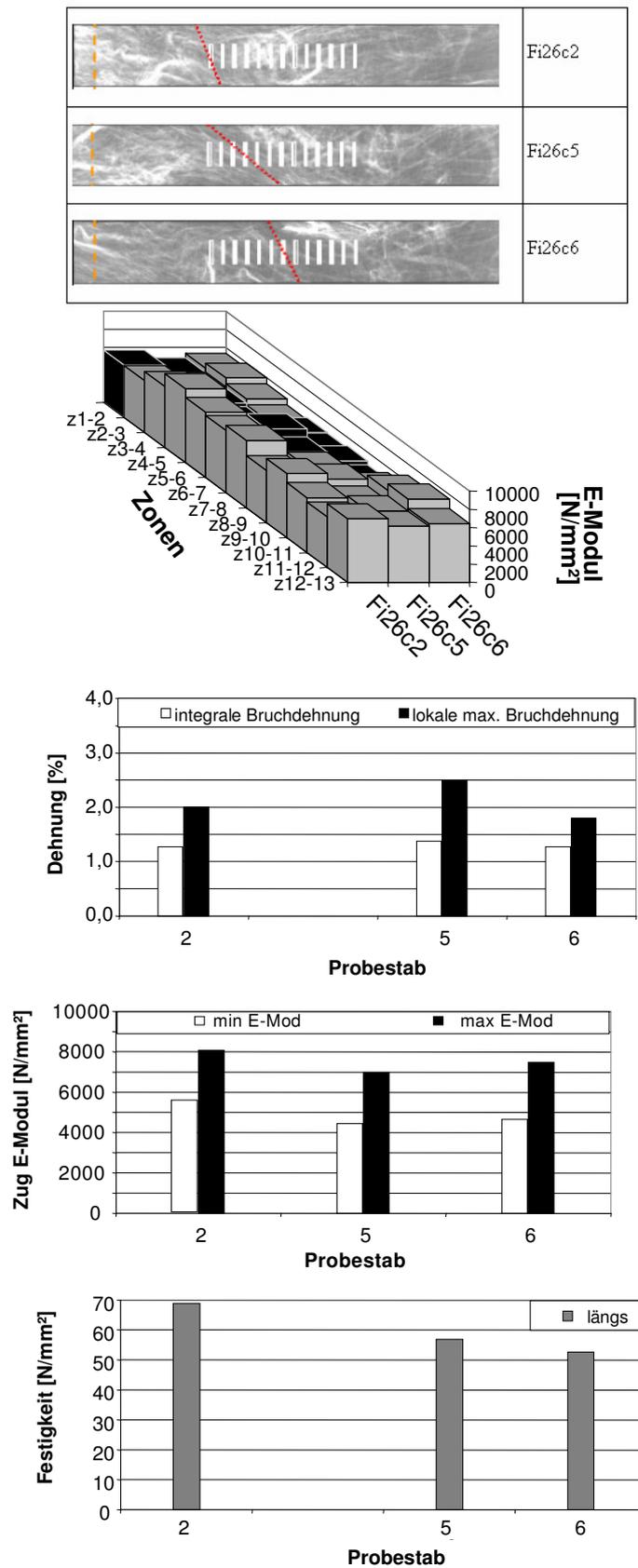
**Abb. 6-6:** Röntgenaufnahme, lokale Steifigkeit, Bruchdehnung, Festigkeit und E-Moduli von Probestäben einer Platte (D-LFT, 20 Gew.-% GF, Entnahmerichtung quer)



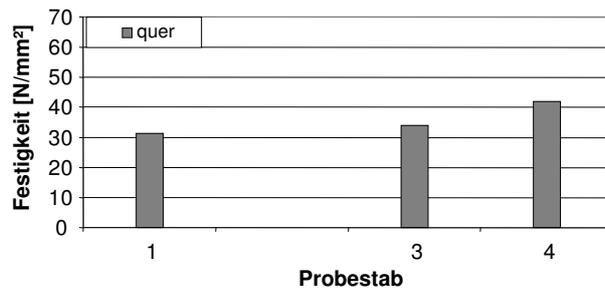
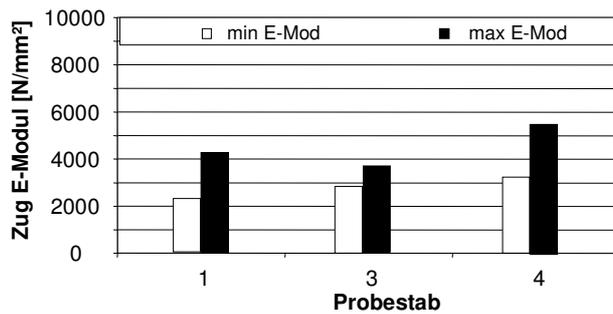
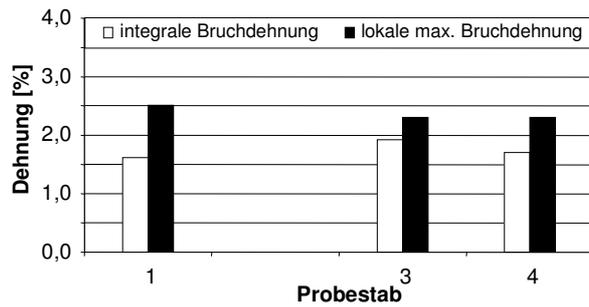
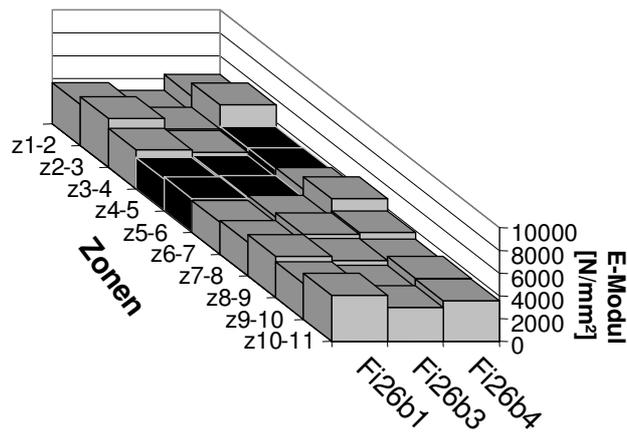
**Abb. 6-7:** Röntgenaufnahme, lokale Steifigkeit, Bruchdehnung, Festigkeit und E-Moduli von Probestäben einer Platte (D-LFT, 30 Gew.-% GF, Entnahmerichtung längs)



**Abb. 6-8:** Röntgenaufnahme, lokale Steifigkeit, Bruchdehnung, Festigkeit und E-Moduli von Probestäben einer Platte (D-LFT, 30 Gew.-% GF, Entnahmerichtung quer)



**Abb. 6-9:** Röntgenaufnahme, lokale Steifigkeit, Bruchdehnung, Festigkeit und E-Moduli von Probestäben einer Platte (D-LFT, 40 Gew.-% GF, Entnahmerichtung längs)



**Abb. 6-10:** Röntgenaufnahme, lokale Steifigkeit, Bruchdehnung, Festigkeit und E-Moduli von Probestäben einer Platte (D-LFT, 40 Gew.-% GF, Entnahmerichtung quer)

### 6.1.1.3 Gesamtbetrachtung zum lokalen Deformationsverhalten beim Zugversuch

siehe Diskussion

## 6.1.2 Dynamisches Werkstoffverhalten (Zugschwellbelastung)

### 6.1.2.1 Versuchsstrategie

Um bei Einstufenversuchen sowohl von einer prognostizierbaren Lastspielzahl ausgehen zu können als auch sicherzustellen, dass die Probe im Messbereich bricht, wurden (zumeist) vorbereitende Untersuchungen (Laserextensometer, Thermoelastische Spannungsanalyse) an jeder Probe durchgeführt (**Abb. 6-11**).

Die speziellen Eigenschaften von Direkt-LFT mit zum Teil nicht unerheblichen lokalen Kennwertunterschieden wurden bei der Vorbereitung und Durchführung der Ermüdungsversuche berücksichtigt.

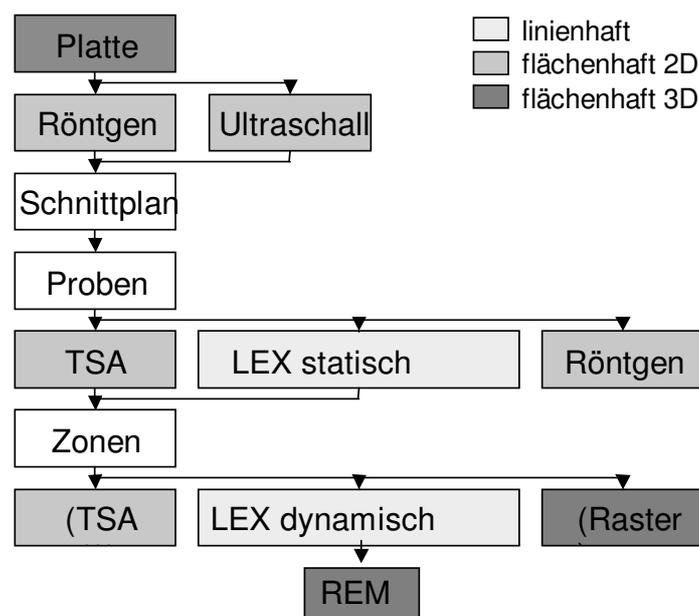
Der Zugversuch am Probestab mittels Laserextensometer bei geringer Belastung (bis 0,25%, also im nichtschädigenden Bereich) ergibt die lokale Steifigkeitsverteilung innerhalb des Probestabs (**Abb. 6-12**, **Abb. 6-13**). Basierend hierauf kann für jede Probe, unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten, eine geeignete Spannungsamplitude für die Ermüdungsversuche gewählt werden.

Es sei vermerkt, dass die auf dem Zugversuch beruhende Ermittlung der rechnerischen Maximaldehnung der schwächsten Zone weitgehend der im Ermüdungsversuch real auftretenden Maximaldehnung der schwächsten Zone (2000 LW) entspricht (**Abb. 6-14**). Die dynamischen Untersuchungen erfolgen im Zugschwellbereich.

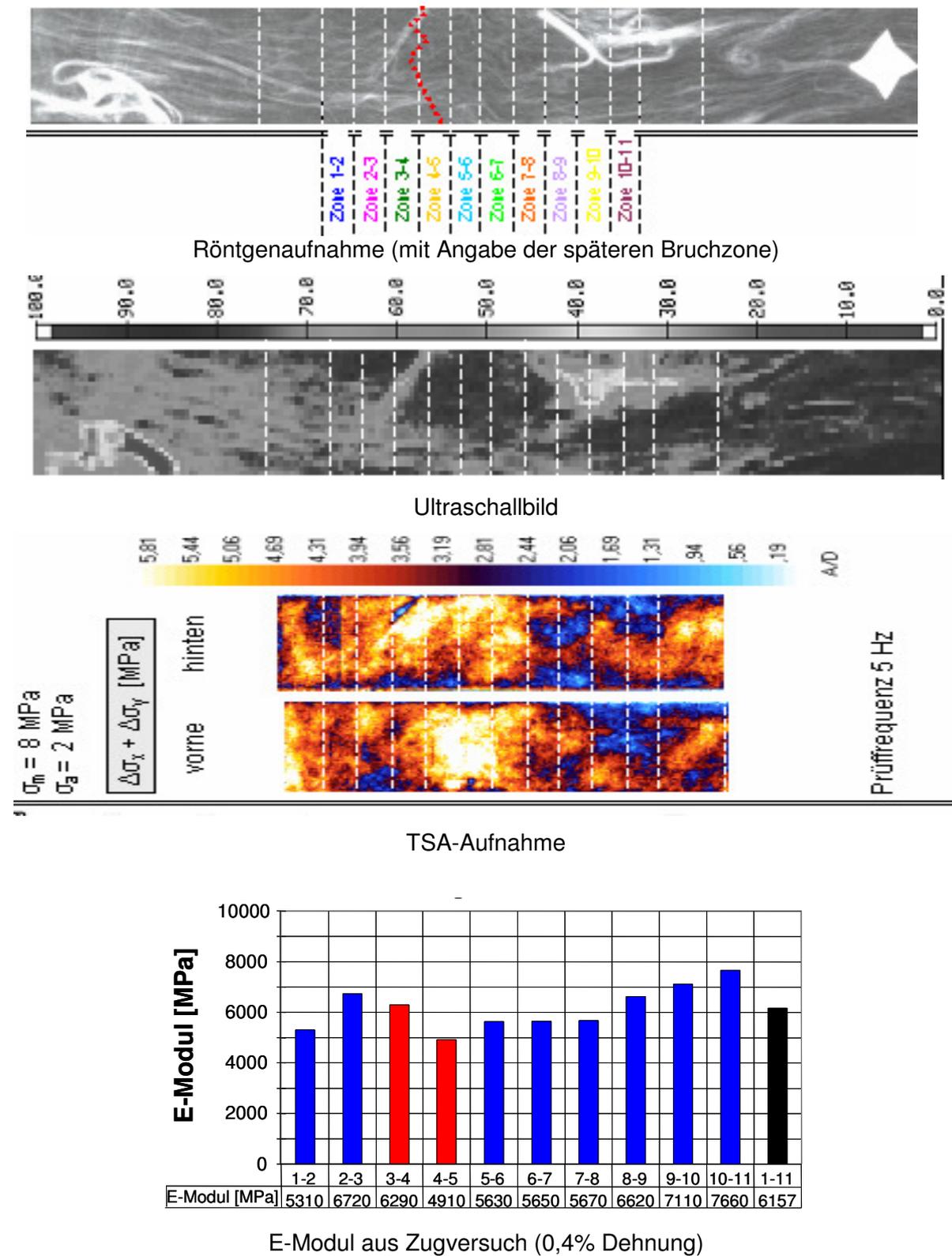
Mittels der TSA bei kleinen dynamischen Schwingweiten konnten darüber hinaus Proben selektiert werden, die mit großer Wahrscheinlichkeit im Messbereich versagen.

Ergänzend wurde in Voruntersuchungen jede einzelnen Probekörperplatte zur Ermittlung lokaler Gefügestände untersucht: Röntgen- und Ultraschalluntersuchungen dienen zur Ermittlung von Faserorientierung und Haftzuständen bzw. Lufteinschlüssen.

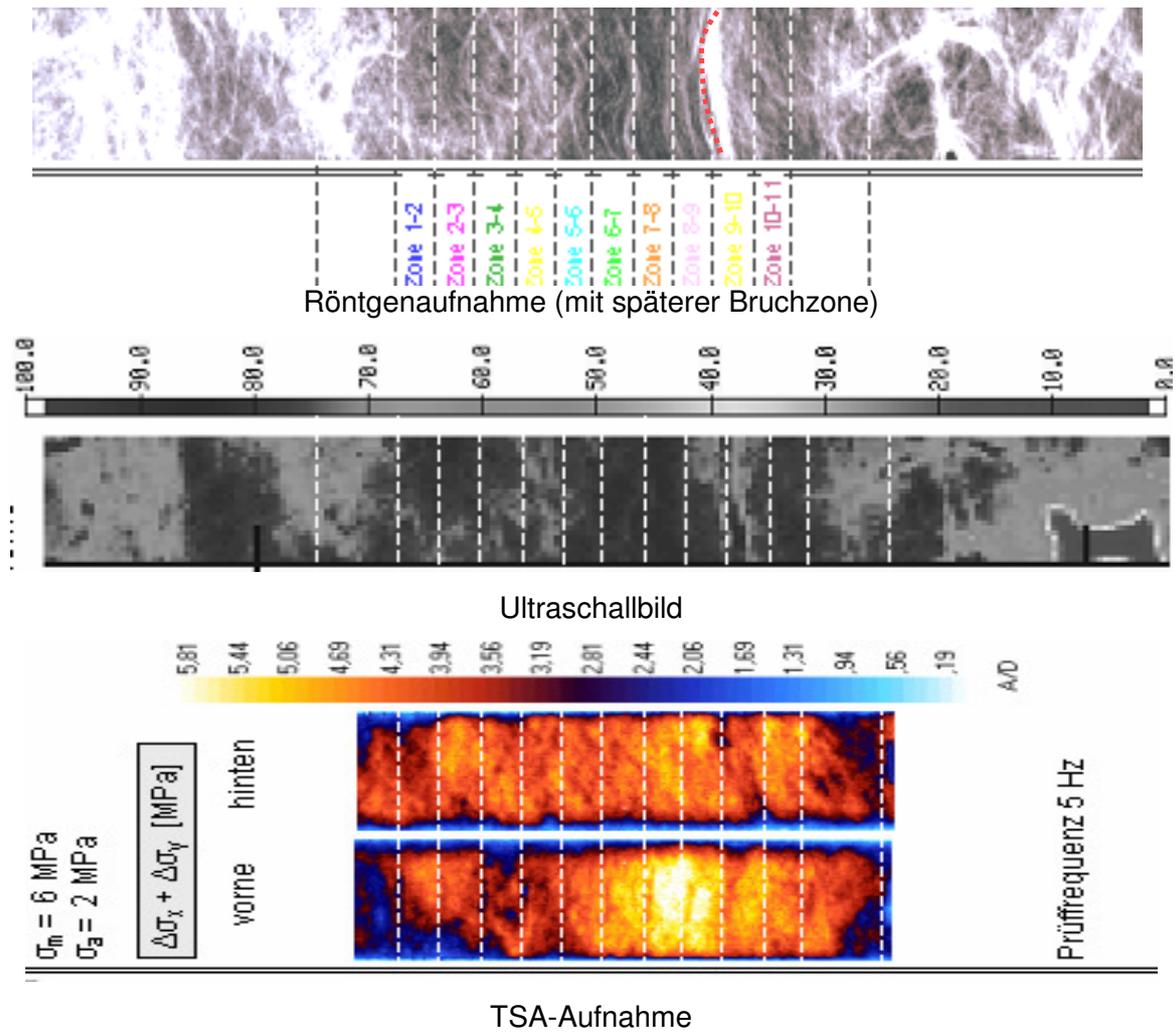
(Röntgenaufnahmen sämtlicher Probestäbe D-LFT 30%-GF: siehe Anlage)



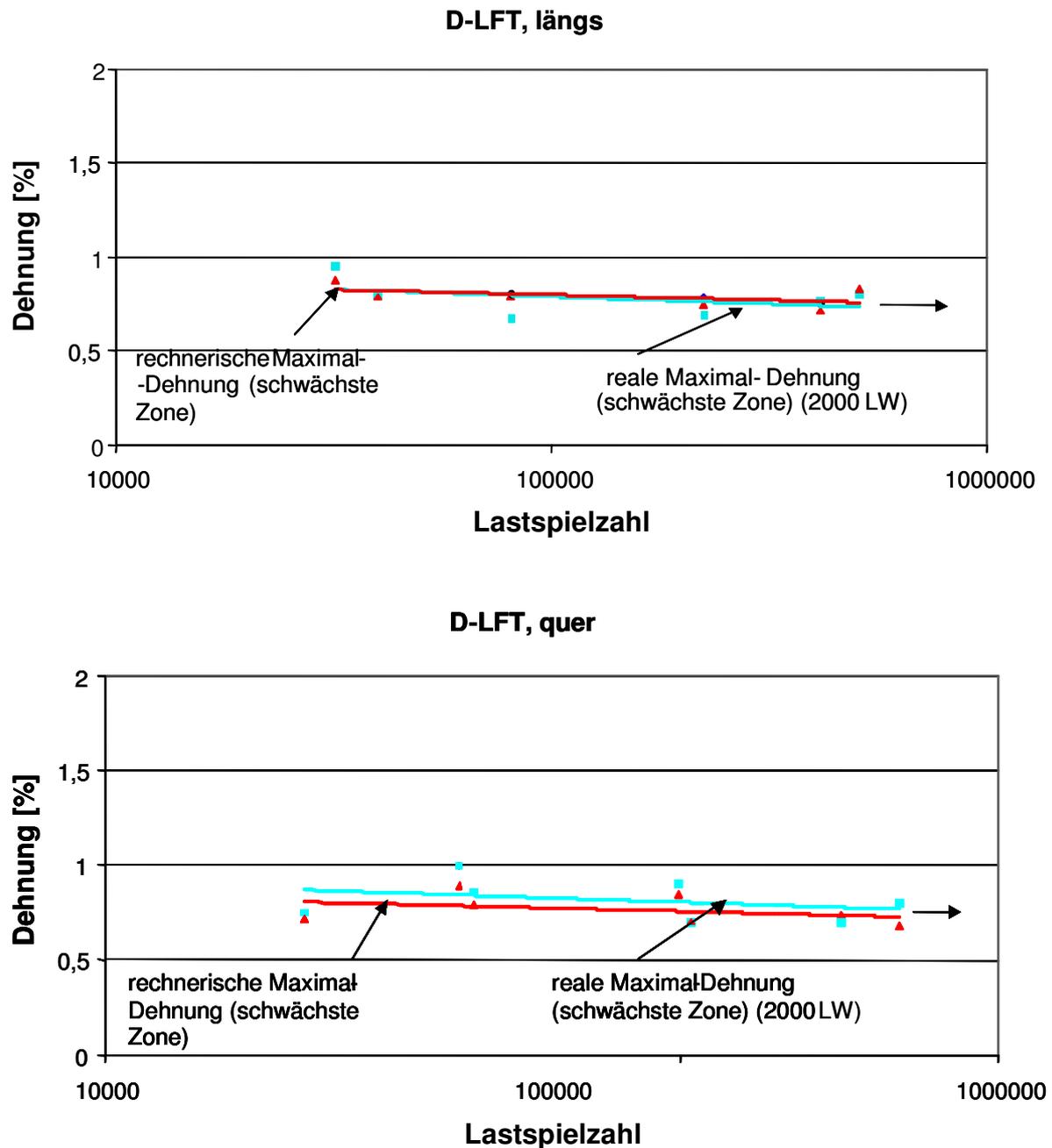
**Abb. 6-11:** Methodische Vorgehensweise der Probekörperuntersuchung



**Abb. 6-12:** Voruntersuchungen an einer Ermüdungsprobe: Röntgenaufnahme, Ultraschallbild, TSA-Aufnahme, E-Modul aus Zugversuch (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs, Probe Fi6f21)



**Abb. 6-13:** Voruntersuchungen an einer Ermüdungsprobe: Röntgenaufnahme, Ultraschallbild, TSA-Aufnahme, E-Modul aus Zugversuch (D-LFT, 30 Gew.-% GF, quer, Probe Fi6f20)



**Abb. 6-14:** Rechnerische Maximaldehnung (basierend auf E-Modulbestimmung im Zugversuch) und reale lokale Maximaldehnung im Ermüdungsversuch (nach 2000 LW). (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs, quer)

### 6.1.2.2 Zugschwellbelastung, beispielhafte Ermüdungsversuche

Mittels der orts aufgelösten Hysteresismessung können die Hysteresisschleifen der einzelnen Zonen während des Ermüdungsversuchs verfolgt und der Verlauf der daraus ermittelten mechanisch dynamischen Kennwerte, wie maximale/minimale Dehnung, dynamischer Modul, Mitteldehnung und Dämpfung orts aufgelöst ermittelt werden. Der Streifenabstand bei den dynamischen Untersuchungen beträgt 5 mm, und es werden insgesamt 10 Messbereiche erfasst. In den nachfolgenden

Abbildungen sind beispielhaft Versuchsauswertungen von zwei Versuchen (Faserorientierung längs und quer) dargestellt.

Wie schon beim Zugversuch beobachtet, liegt eine lokal unterschiedliche Steifigkeit über die Probenlängsachse vor, die sich in deutlich unterschiedlichen lokalen Hysteresisschleifen äußert. Betrachtet man die spätere Bruchzone über der Lastspielzahl, ist eine Abnahme der Steifigkeit, eine Verbreiterung der Hysteresisschleifen und ein deutliches Kriechen der Hysteresisschleifen zu beobachten. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Auswertung der verschiedenen Zonen nicht in jeweils einem Diagramm, sondern in zwei Blöcken von jeweils fünf Zonen dargestellt.

Es wird nun kurz der Verlauf der einzelnen mechanisch dynamischen Kennwerte über der Lastspielzahl angesprochen. Die Dehnungen max., min. stellen den Verlauf der maximalen und minimalen Dehnung dar. Signifikanter ist die Darstellung der Veränderung des dynamischen Moduls: er zeigt stets durch innere Zerrüttungsprozesse eine Abnahme auf. Die Mitteldehnung beschreibt den Kriechvorgang (s. auch Beschreibung der Hysteresisauswertung), und es ist ein deutlicher Kriechanteil zu beobachten.

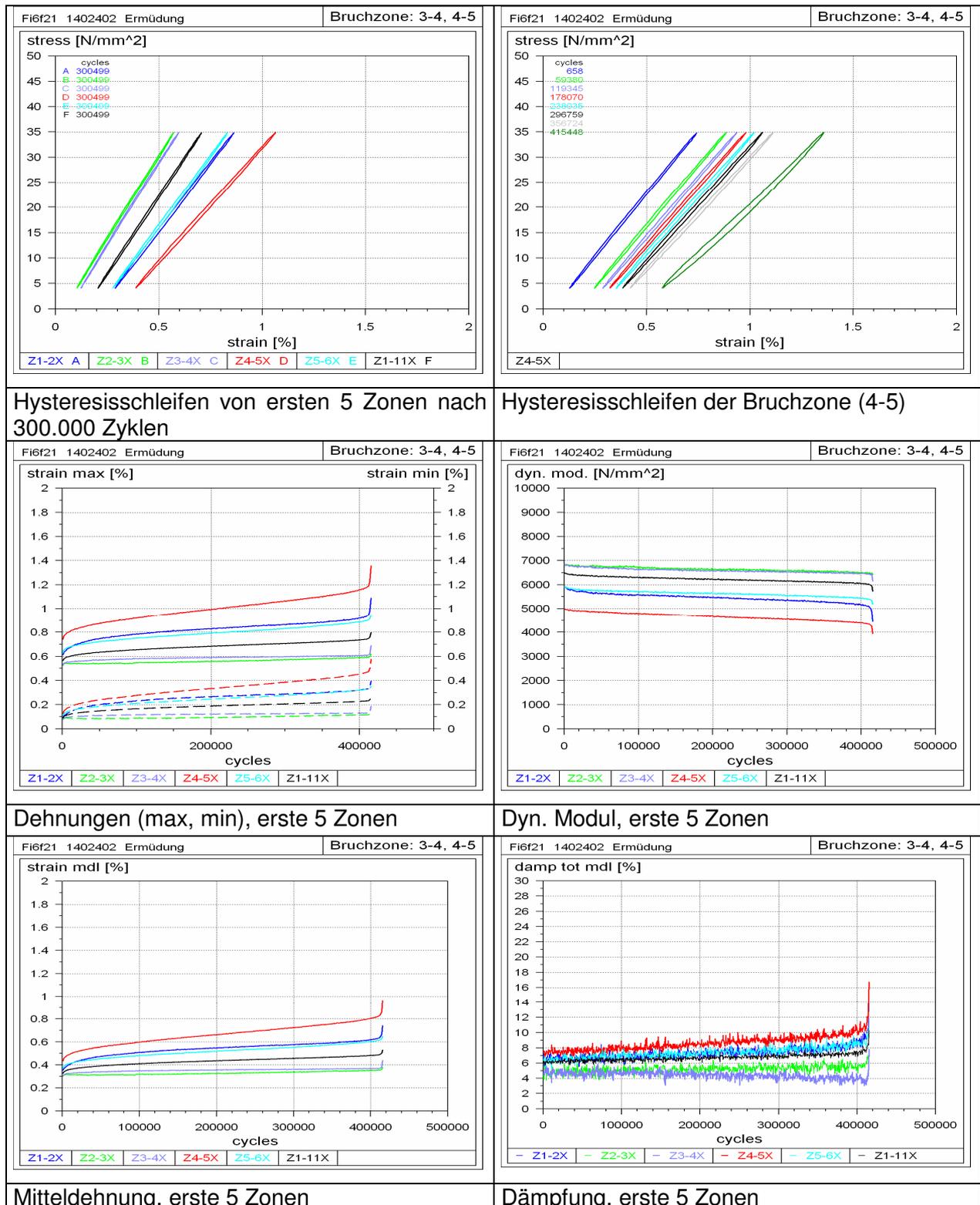
Die Dämpfung ist ein dimensionsloses Maß der inneren Beanspruchung und Zerrüttung und reagiert am sensibelsten von allen Messgrößen. Es werden Zonen mit minimalem und erhöhtem Anstieg der Dämpfung beobachtet.

Stellt man eine Beziehung zwischen den Kenngrößen her, fällt auf, dass die Zonen mit einer geringen Anfangssteifigkeit zumeist auch einen stärkeren Steifigkeitsabfall aufweisen, mit einem höheren Wert der Mitteldehnung beginnen und auch einen höheren Anstieg derselben aufweisen. Ein ähnliches Verhalten, jedoch in stärker ausgeprägter Form, wird bei der Dämpfung beobachtet (**Abb. 6-15, Abb. 6-16, Abb. 6-17, Abb. 6-18**).

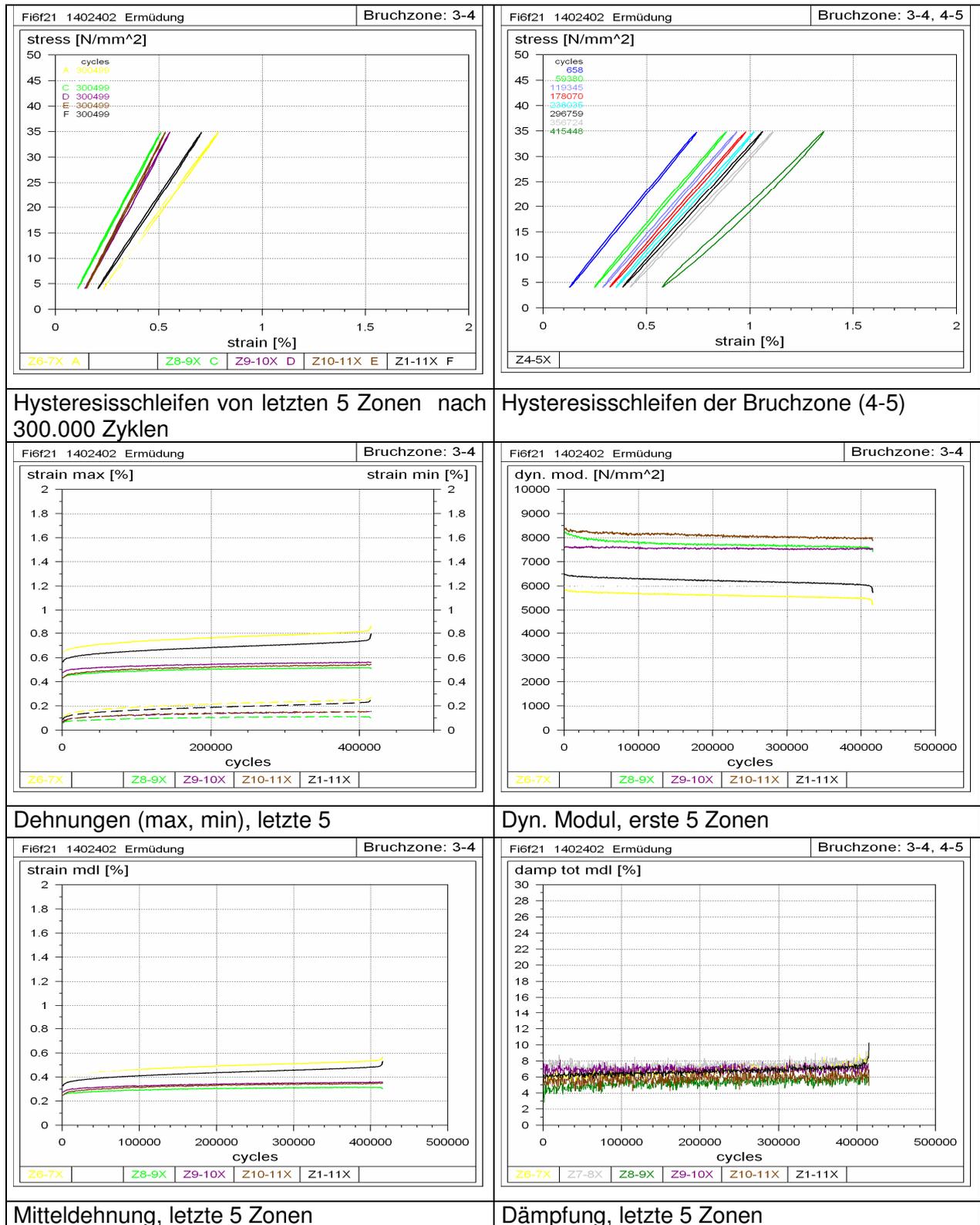
Es wird beispielhaft je ein Ermüdungsversuch bei Längs- und bei Querbelastung vorgestellt. Bei Querbelastung liegen flache Hysteresisschleifen und eine stärkere Verschiebung derselben während der Ermüdungsbeanspruchung vor. Der Steifigkeitsabfall ist weniger stark ausgeprägt. Dafür liegt z. T. ein sehr starkes Kriechverhalten vor (Mitteldehnung). Gegenüber der Längsbelastung zeigt die Dämpfung deutlich erhöhte Verläufe, was auf eine hohe nichtlinear viskoelastische Beanspruchung zurückzuführen ist.

Die Auswertung eines Versuchs bei unterschiedlichen Spannungsamplituden (Wöhlerversuch) zeigt deutliche Unterschiede bei Längs- und Querbelastung und ebenfalls auch auf Grund der Inhomogenität deutliche Streuungen im Zeitfestigkeitsbereich des Wöhlerdiagramms. Da ähnlich wie beim Zugversuch der Verlauf der Dehnung als signifikantes Merkmal herangezogen werden kann, wird das Diagramm der maximalen/minimalen Dehnung näher betrachtet. Die Diagramme zeigen einen primären Anstiegsbereich, einen linearen sekundären Bereich, der dann in einen tertiären Bereich der beschleunigten maximalen Dehnungszunahme übergeht. Dieser Übergang vom sekundären in den tertiären Bereich wird für die weitere Auswertung als signifikante Größe betrachtet und ist in den einzelnen Diagrammen für die Probenbelastung längs und quer markiert.

### D-LFT, 30 Gew.-% GF, Zugschwellbelastung, längs

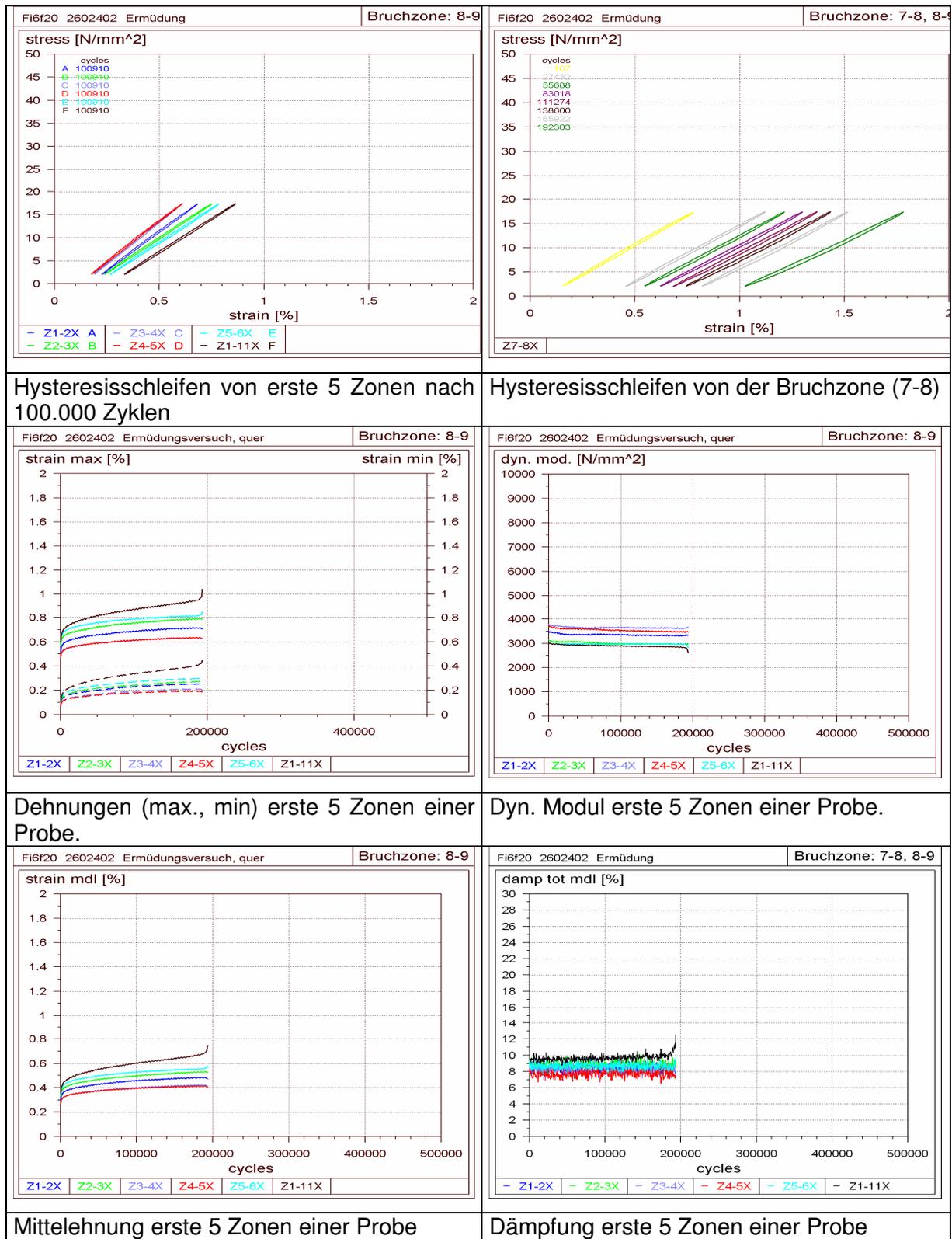


**Abb. 6-15:** Hysteresisschleifen von versch. Zonen nach definierter Lastspielzahl, und der späteren Bruchzone bei versch. Lastspielzahlen. Mechanisch-dynamische Kennwerte eines Ermüdungsversuchs; erste 5 Zonen. (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs, Probe Fi6f21, 5 Hz, RT,  $\sigma_a=15,5$  N/mm<sup>2</sup>, Streifenabstand 5 mm)

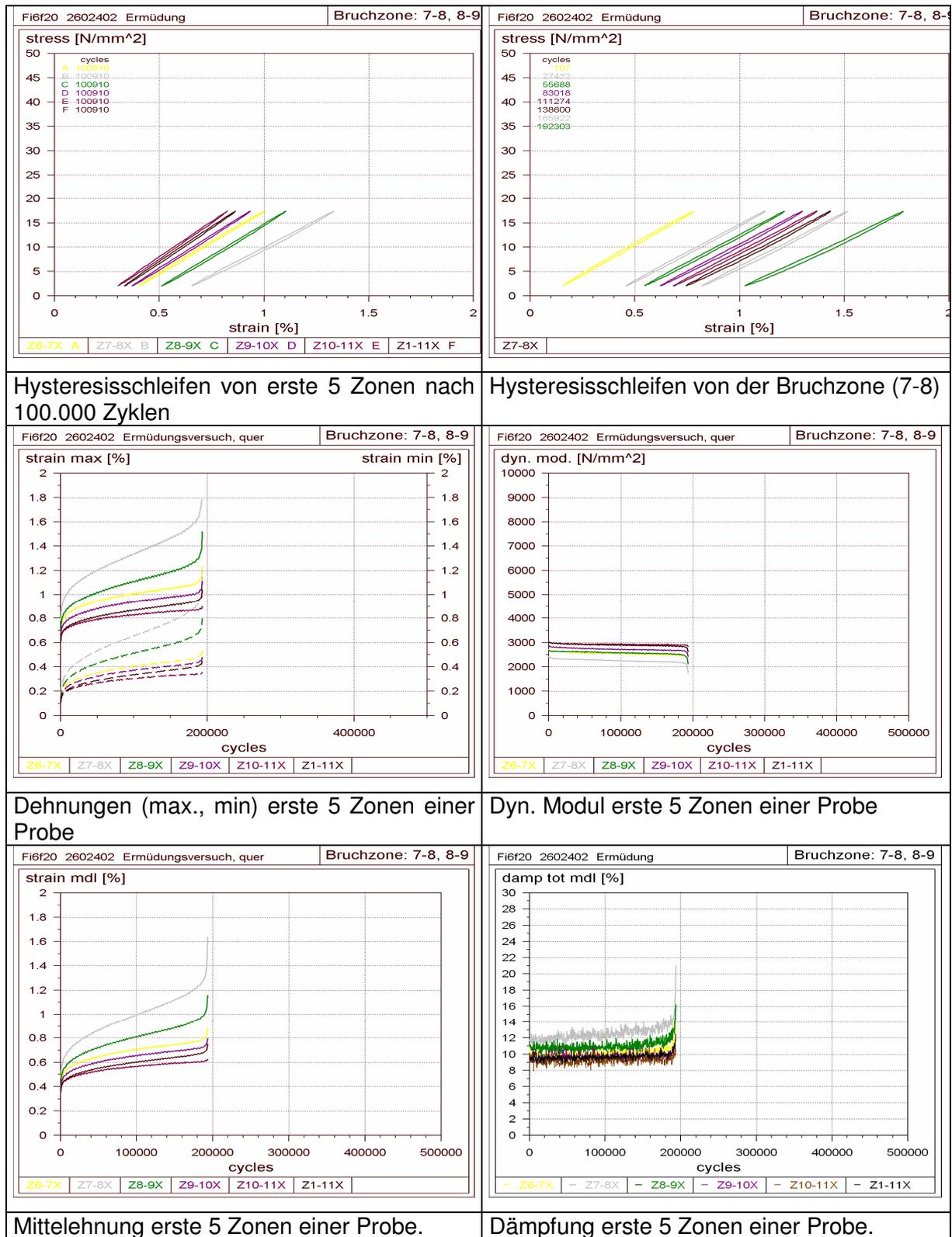


**Abb. 6-16:** Hysteresisschleifen von versch. Zonen nach definierter Lastspielzahl, und der späteren Bruchzone bei versch. Lastspielzahlen. Mechanisch-dynamische Kennwerte eines Ermüdungsversuchs; letzte 5 Zonen. (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs, Probe Fi6f21, 5 Hz, RT,  $\sigma_a=15,5 \text{ N/mm}^2$ , Streifenabstand 5 mm)

### D-LFT, 30 Gew.-% GF, Zugschwellbelastung, quer



**Abb. 6-17:** Hysteresisschleifen von versch. Zonen nach definierter Lastspielzahl, und der späteren Bruchzone bei versch. Lastspielzahlen. Mechanisch-dynamische Kennwerte eines Ermüdungsversuchs; erste 5 Zonen. (D-LFT, 30 Gew.-% GF, quer, Probe Fi6f20, 5 Hz, RT,  $\sigma_a=7,75$  N/mm<sup>2</sup>, Streifenabstand 5 mm)

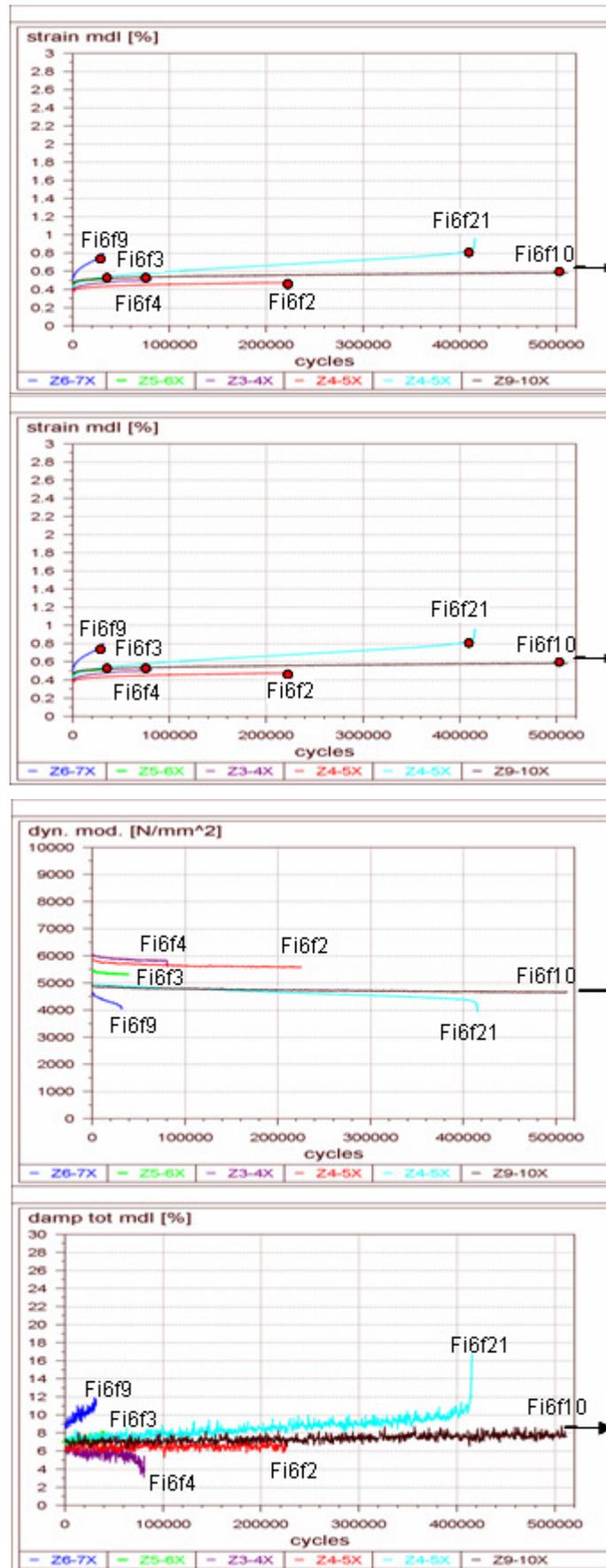


**Abb. 6-18:** Hysteresisschleifen von versch. Zonen nach definierter Lastspielzahl, und der späteren Bruchzone bei versch. Lastspielzahlen. Mechanisch-dynamische Kennwerte eines Ermüdungsversuchs; letzte 5 Zonen. (D-LFT, 30 Gew.-% GF, quer, Probe Fi6f20, 5 Hz, RT,  $\sigma_a=7,75 \text{ N/mm}^2$ , Streifenabstand 5 mm)

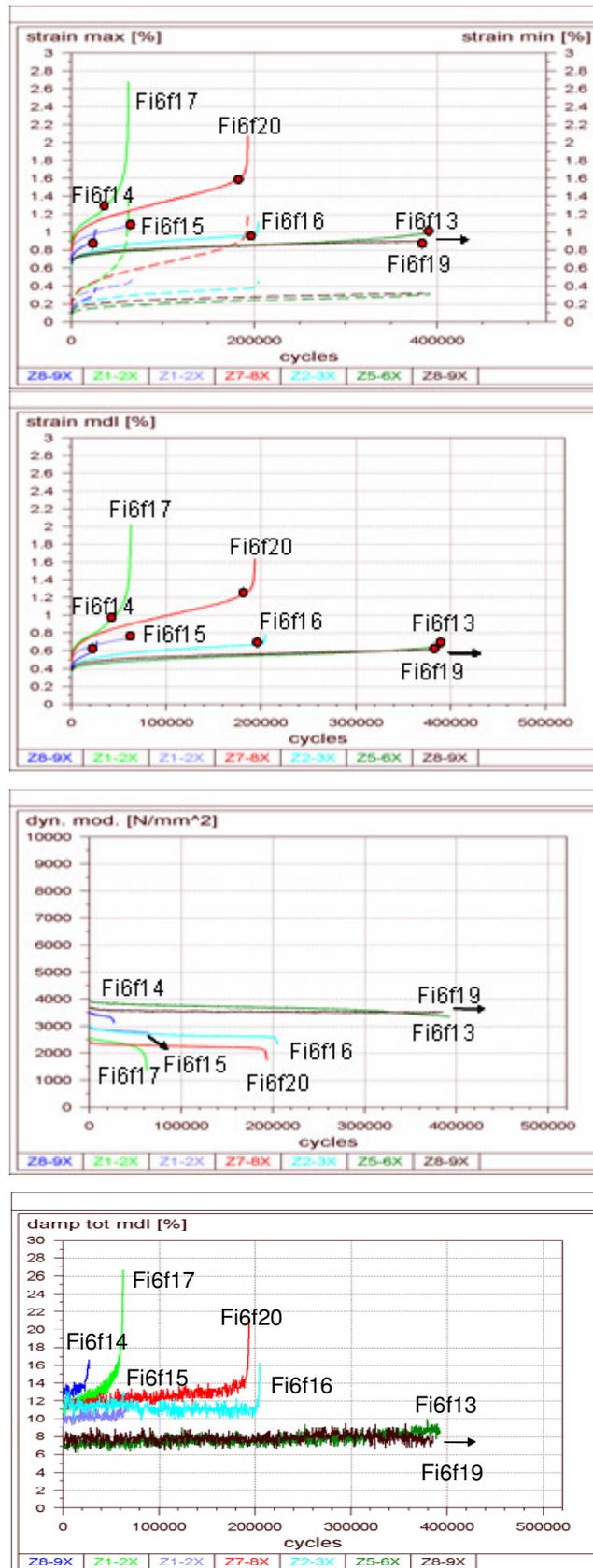
### 6.1.2.3 Verhalten der späteren Bruchzonen (Proben aus Platten längs und quer entnommen)

Der Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte der späteren Bruchzonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs werden in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung dargestellt (**Abb. 6-19, Abb. 6-20**).

Die Verläufe zeigen, für Probenentnahme längs und quer, schon am Anfang des Versuchs, dass die spätere Bruchzone lokalisiert werden kann. Die Erkennung der schwächsten Zone zeigt bei der dynamischen Belastung einen geringeren Probensteifigkeitsabfall, eine höhere maximale Dehnung und eine stärkere Kriechneigung.



**Abb. 6-19:** Mechanisch-dynamische Kennwerte eines Ermüdungsversuchs; Bruchzonen. (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)



**Abb. 6-20:** Mechanisch-dynamische Kennwerte eines Ermüdungsversuchs; Bruchzonen.  
(D-LFT, 30 Gew.-% GF, quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)

## 6.2 Gewebeverstärkter Thermoplast (GMTex)

Vom gewebeverstärkten Material werden zwei Chargen mit dem Ziel untersucht, bei der zweiten Charge eine verbesserte Fasermatrixhaftung zu realisieren.

### 6.2.1 Zügige Belastung

In einer Prinzipuntersuchung zur orts aufgelösten Deformationsanalyse des Werkstoffs werden das Objektrasterverfahren und der Laserextensometer eingesetzt und die Ergebnisse miteinander verglichen und geprüft, ob eine Zuordnung zu der lokalen Gefügestruktur vorliegt. In weiteren Versuchen wird das Zug- und Druckverhalten der Chargen 1 und 2 untersucht und in einer zusammenfassenden Darstellung gegenübergestellt.

#### 6.2.1.1 Lokale Deformationsanalyse und Gefüge

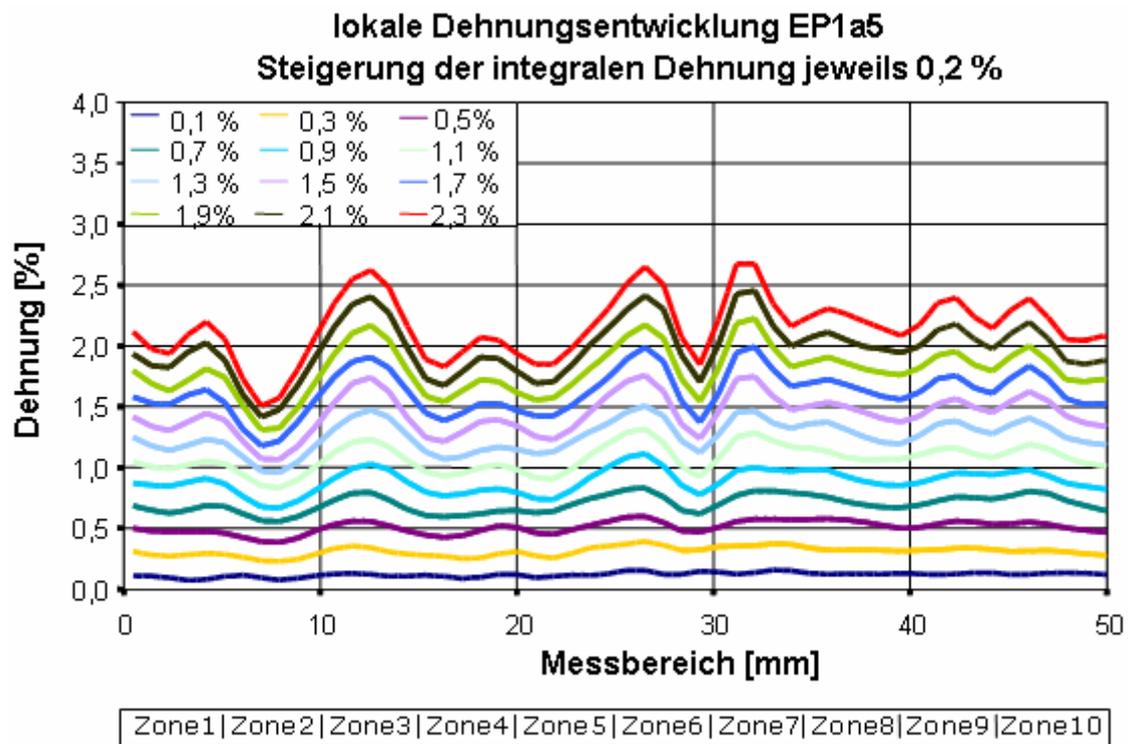
Der Werkstoff hat einen dreischichtigen Aufbau und besteht aus zwei Außenlagen aus gewebeverstärktem Material und einer Matte in der Mitte mit Wirrfaserstruktur. Das Matrixmaterial ist Polypropylen. Die Gewebelage hat eine Vorzugsorientierung, Anteile längs zu quer wie 4:1. Der Werkstoff weist aufgrund dieses Aufbaus eine anisotrope und in der Gewebestruktur eine lokal inhomogene Faserstruktur auf, für deren Charakterisierung orts aufgelöste Verfahren der Deformationsanalyse eingesetzt werden.

Zur Deformationsanalyse werden das Objektrasterverfahren und das Laserextensometer eingesetzt. Es werden Zugversuche mit beiden Verfahren durchgeführt. Bei den Zugversuchen mit dem Objektrasterverfahren wird in engen Belastungsabständen (Schrittweite der Aufzeichnungen 0,2 % integraler Dehnung) das Dehnungsverhalten erfasst und entlang der Probenmitte ausgewertet und dargestellt. Man erkennt eine mit zunehmender Belastung ansteigende lokale Ausprägung des Dehnungsprofils. Bei der Versagensspannung der Probe liegt an der Schadensstelle eine lokale Bruchdehnung von ca. 2,7 % vor, während die integrale Dehnung bei ca. 2,2 bis 2,3 % liegt (**Abb. 6-21**).

Aus den erfassten Werten der lokalen Quer- und Längsdehnung wird die Querkontraktion ermittelt. Der Betrag des Quotienten beider Messgrößen ergibt die Querkontraktionszahl, die in Abhängigkeit von Belastungsschritten aufgetragen wird. Man erkennt eine intensive Zu- und Abnahme der Querkontraktionszahl (**Abb. 6-22**).

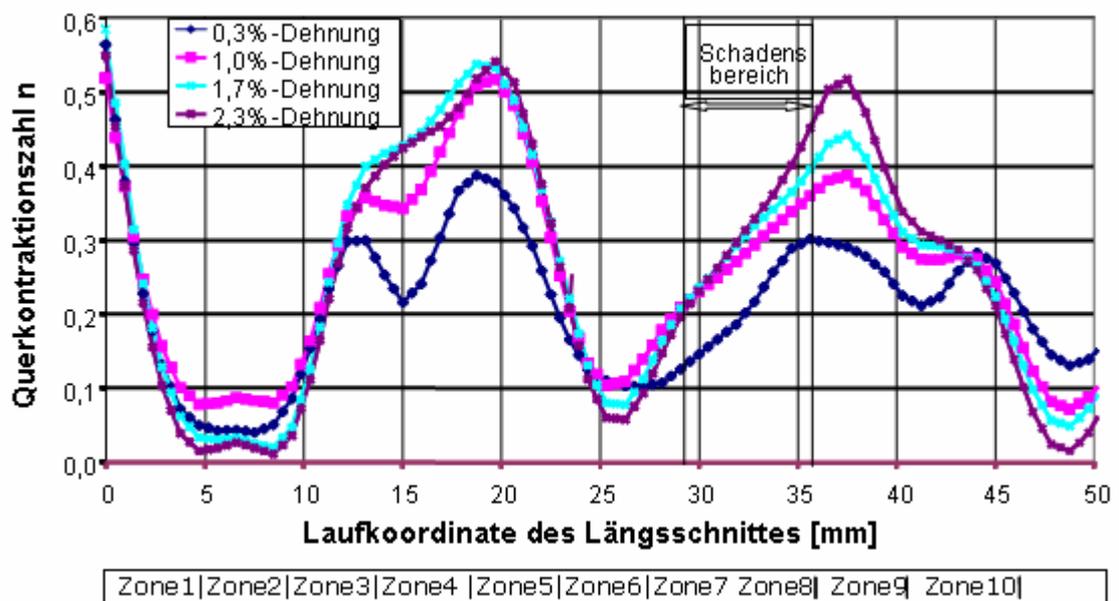
Parallel zu den Untersuchungen mit dem Objektrasterverfahren erfolgt die lokale Dehnungserfassung mit dem Laserextensometer (**Abb. 6-23**). Für 0,4% integrale Dehnung ist der lokale E-Modul dargestellt. Über die Messlänge liegen Werte von 10.500 bis 15.000 N/mm<sup>2</sup> vor. Die spätere Bruchzone liegt erwartungsgemäß im Bereich der geringsten Probensteifigkeit.

Eine Gegenüberstellung der lokalen Dehnungen, ermittelt mit dem Rasterverfahren und dem Laserextensometer, zeigt, dass ein nahezu identischer Verlauf in den einzelnen Zonen vorliegt (**Abb. 6-24**).

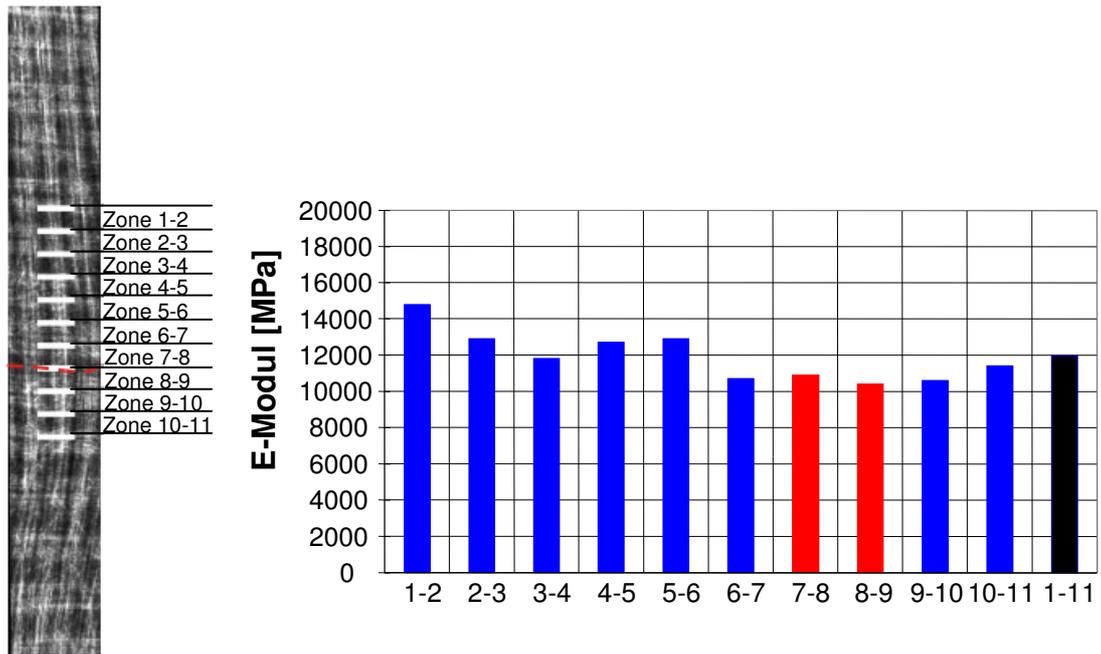


**Abb. 6-21:** Zugversuch zur ortsaufgelösten Deformationsanalyse mit dem Objektrasterverfahren, Darstellung der lokalen Längsdehnung bei Steigerung der integralen Dehnung um jeweils 0,2%, Messwerte bezogen auf Probenmitte, Schadensbereich (Gewebeverstärkter Thermoplast, II, 1mm/min, RT, Probe EP1a5, Schrittweite der Aufzeichnung 0,2%)

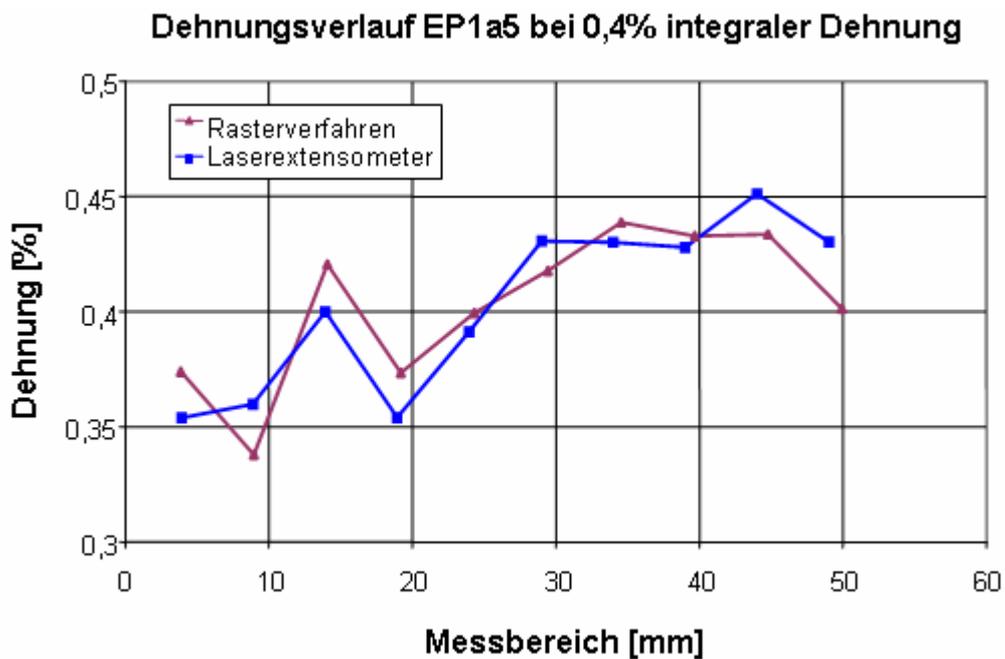
**Veränderung der Querkontraktionszahl über die Messlänge am Rand (EP1a5)**



**Abb. 6-22:** Zugversuch zur ortsaufgelösten Deformationsanalyse mit dem Objektrasterverfahren, Darstellung der lokalen Querkontraktion (berechnet aus Quer- und Längsdehnung) bei unterschiedlichen integralen Dehnungswerten, Messwerte bezogen auf Probenmitte) (Gewebeverstärkter Thermoplast, II, 1mm/min, RT, Probe EP1a5, Schrittweite der Aufzeichnung 0,2%)



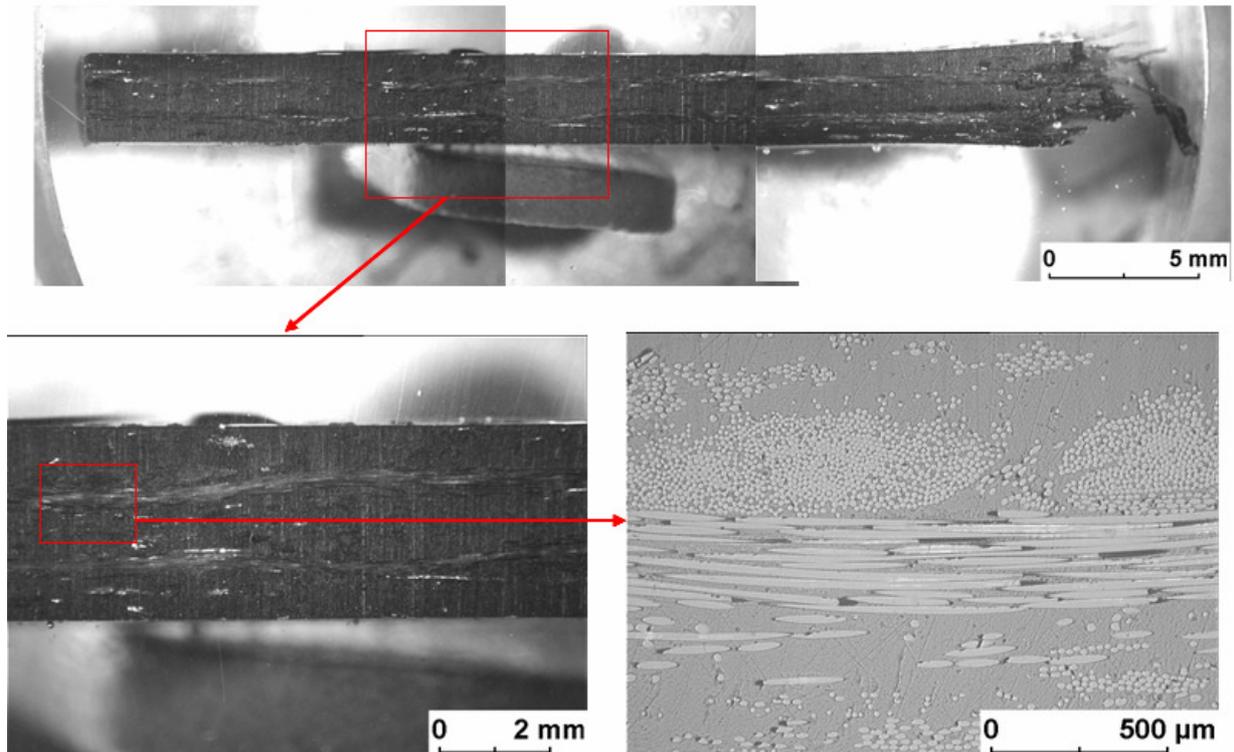
**Abb. 6-23:** E-Modul aus Zugversuch bei integraler Dehnung von 0,4% (Gewebeverstärkter Thermoplast, II, 1mm/min, RT, Probe EP1a5, Streifenabstand 5 mm)



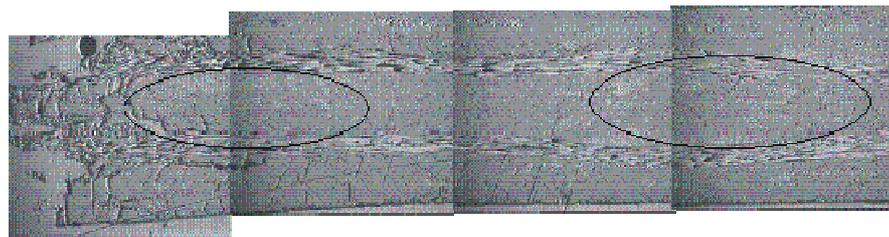
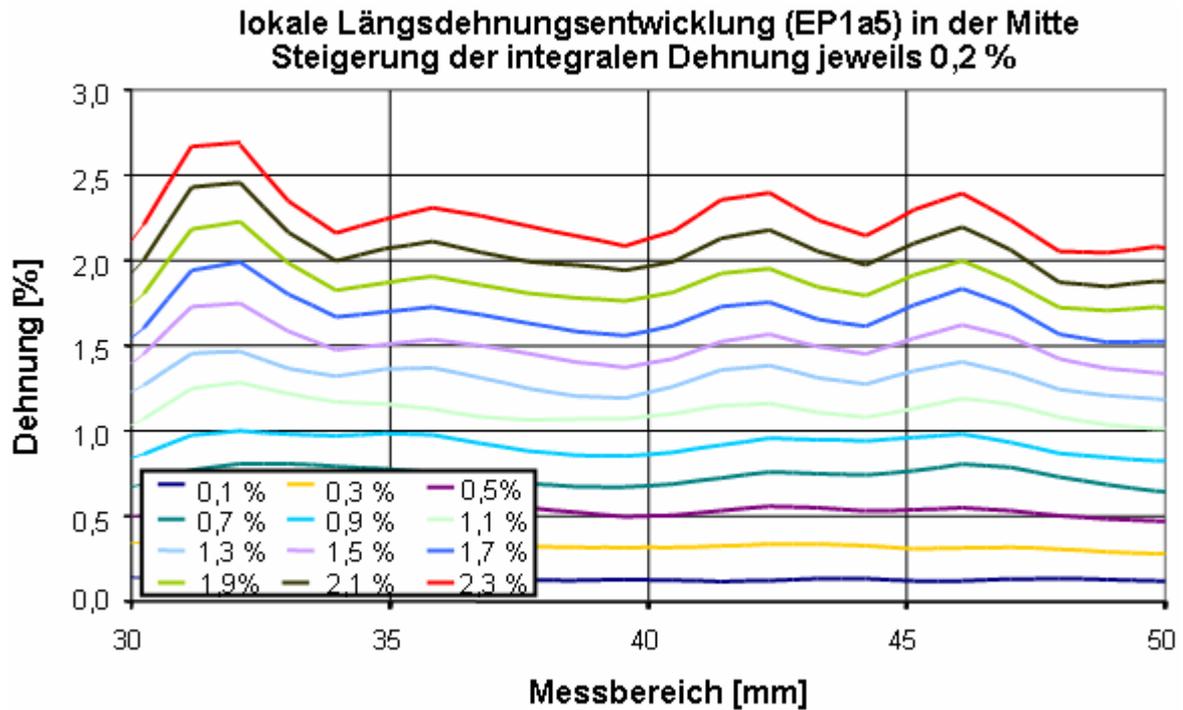
**Abb. 6-24:** Zugversuch: Vergleich von Messungen mit Laserextensometer und Objektrasterverfahren (Probenmitte, 0,4% integraler Dehnung) (Gewebeverstärkter Thermoplast, II, 1mm/min, RT, Probe EP1a5, Streifenabstand 5 mm )

Es erfolgt eine Gegenüberstellung der Gefügestruktur und des lokalen Dehnungsverhaltens der Probe:

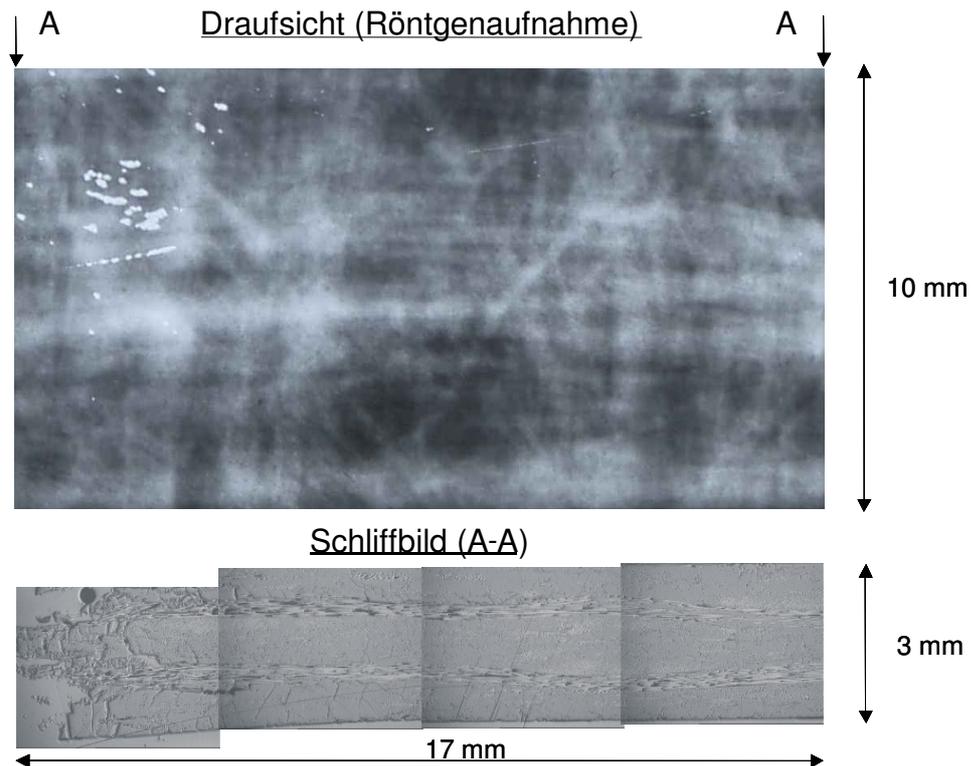
Die Gefügestruktur im Bereich der Bruchzone wird sowohl mittels Röntgenaufnahme als auch in Form eines Schliffbildes erfasst. Die lokale Dehnungsentwicklung kann aber nicht einem signifikanten Gefügemerkmal zugeordnet werden (**Abb. 6-25**, **Abb. 6-27**). Die Ellipsen (**Abb. 6-26**) stellen die Bereiche dar, wo die Faserbündel von Gewebe quer zur Belastungsrichtung sind.



**Abb. 6-25:** Schliffbild der gebrochenen Probe (Längsschnitt Probenmitte)  
(Gewebeverstärkter Thermoplast, II, RT, Probe EP1a5, Ausschnitt links von  
Bruchstelle, Zonen von 1-2 bis 7-8)



**Abb. 6-26:** Längsdehnung beim Zugversuch (Objektrasterverfahren, Schrittweite der Aufzeichnung 0,2%) Vergleich mit Schliiffbild der gebrochenen Probe (Gewebeverstärkter Thermoplast, II, 1mm/min, RT, Probe EP1a5, Ausschnitt rechts von Bruchstelle, Zonen von 7-8 bis 10-11)

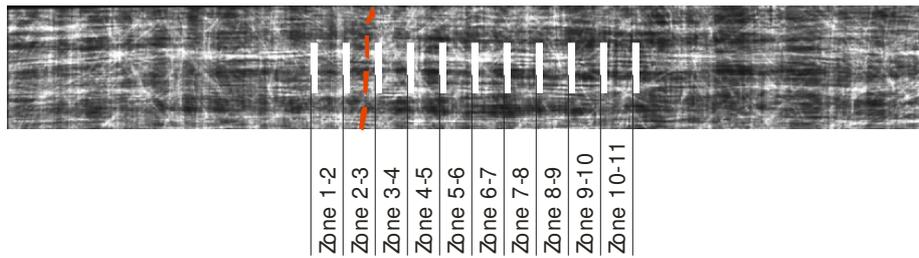


**Abb. 6-27:** Vergleich des Schliffbilds der gebrochenen Probe (Längsschnitt Probenmitte) mit Röntgenaufnahme (Gewebeverstärkter Thermoplast, II, RT, Probe EP1a5)

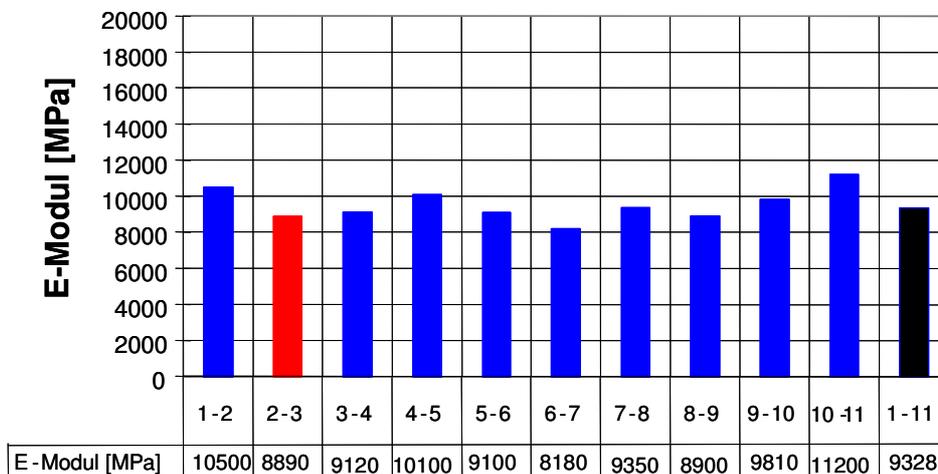
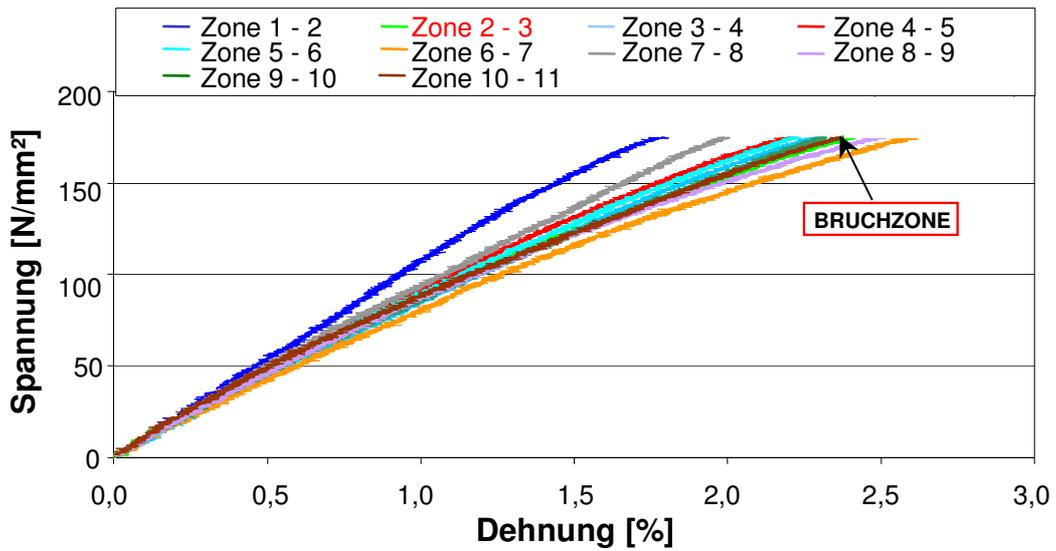
### 6.2.1.2 Beispielhafte Zugversuche

Mittels des Laserextensometers werden Zugversuche an den in Längs- und Querrichtung entnommenen Proben durchgeführt (**Abb. 6-28**, **Abb. 6-29**) und darüber hinaus die Proben der Charge 1 und 2 untersucht. Bei Belastung in Längsrichtung liegt ein nur schwach gekrümmtes Spannungs-Dehnungs-Diagramm vor. Die einzelnen Zonen zeigen unterschiedliche Steifigkeiten. Zumeist liegt die Bruchzone im Bereich des geringsten lokalen E-Moduls. Die lokale Bruchdehnung liegt zwischen 2,3 und 2,5 %. Die Bruchzonen erstrecken sich über eine bzw. zwei Zonen des Laserextensometers (Streifenabstand 5 mm).

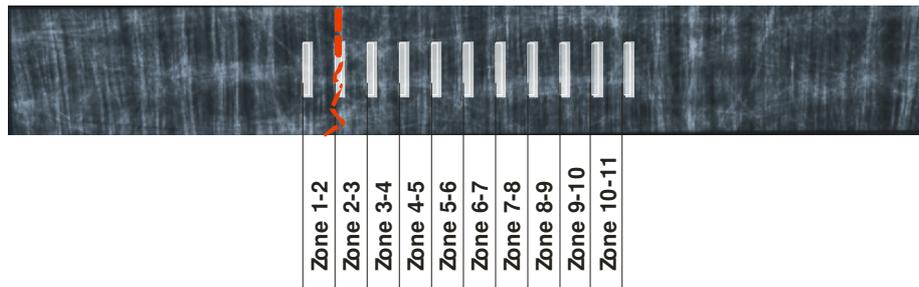
Bei Belastung quer zur Faserrichtung ist ein ausgeprägtes nichtlineares Verhalten im Spannungs-Dehnungs-Diagramm zu erkennen.



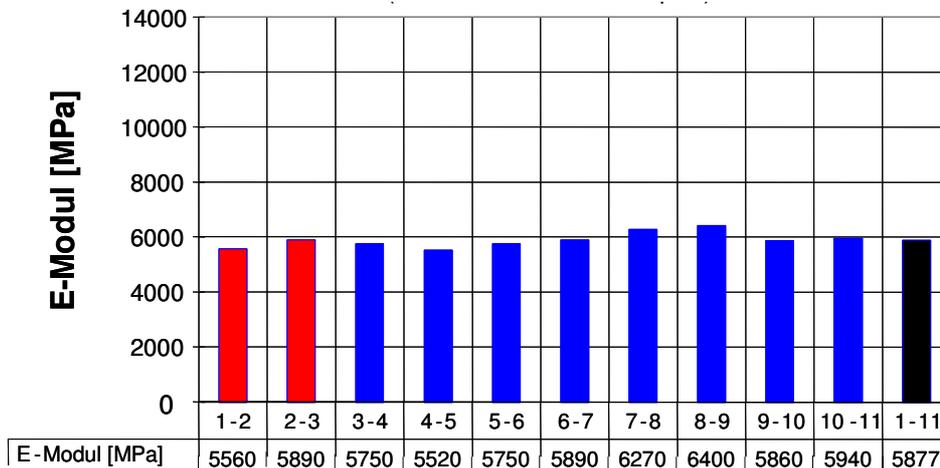
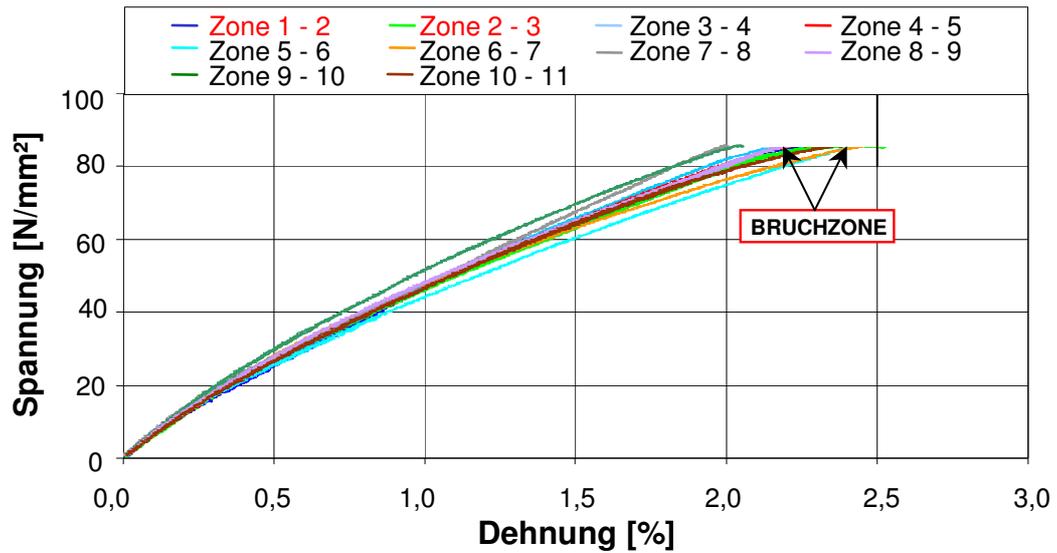
Bruchzone 2-3



**Abb. 6-28:** Röntgenaufnahme mit Bruchzone, Zugversuch bis zum Bruch, E-Modul (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme längs, Probe EP1a3, Charge 1, Streifenabstand 5 mm, Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min, RT)



Bruchzone 1-2, 2-3



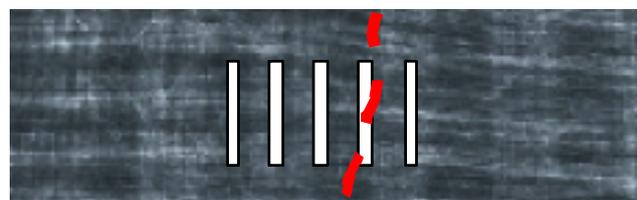
**Abb. 6-29:** Röntgenaufnahme mit Bruchzone, Zugversuch bis zum Bruch, E-Modul (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme quer, Probe EP2a3, Charge 1, Streifenabstand 5 mm, Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min, RT)

### 6.2.1.3 Beispielhafte Druckversuche

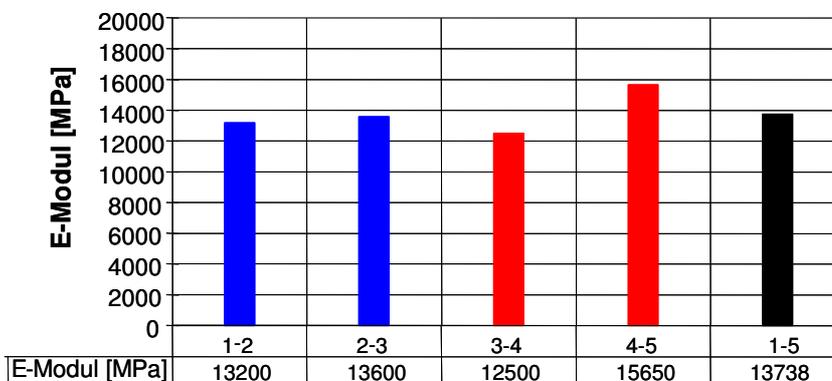
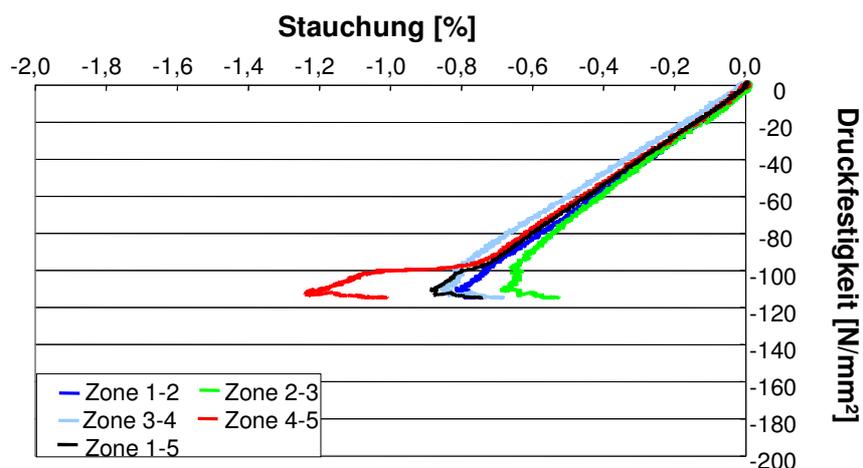
Für den Druckversuch wurde eigens eine Druckvorrichtung geschaffen (s. Kapitel 4). Durch die Erfassung der Dehnungen mit dem Laserextensometer entfällt das sonst übliche Anfahrverhalten, und es wird von Beginn des Versuchs an ein unverfälschtes Kraft-Deformations-Diagramm erhalten. Bei Belastung senkrecht zur Faserorientierung liegt erwartungsgemäß ein niedriger E-Modul vor (**Abb. 6-30** bis **Abb. 6-32**).

Dem Bruch geht z. T. eine Abscherung voraus, die zu einem signifikanten Verlauf des Spannungs-Stauchungs-Diagramms führt. Die Schadenszonen liegen bevorzugt im Bereich geringer E-Moduli.

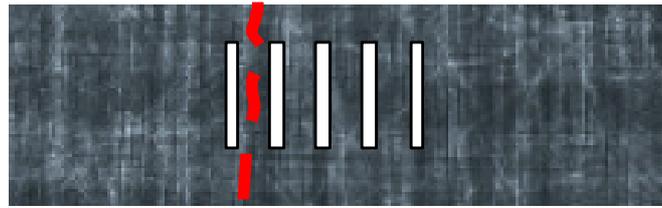
Eine Zuordnung der Bruchausbildung und -lage zu der Faserstruktur (Röntgenaufnahme) ist nicht möglich.



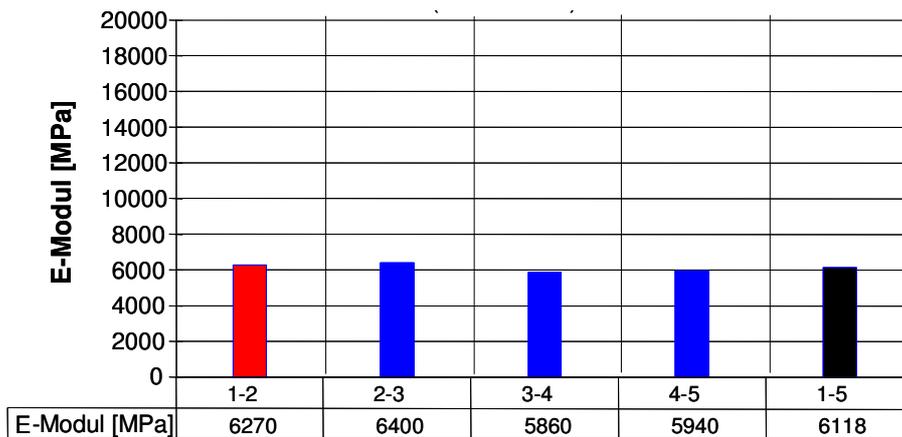
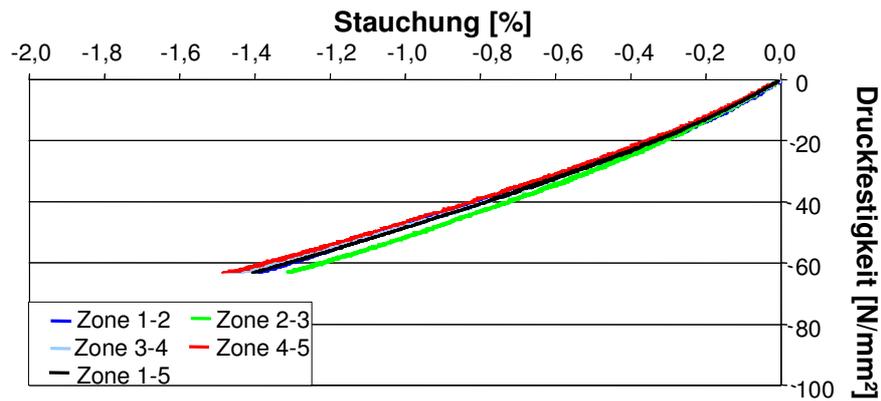
Bruchzone 3-4, 4-5



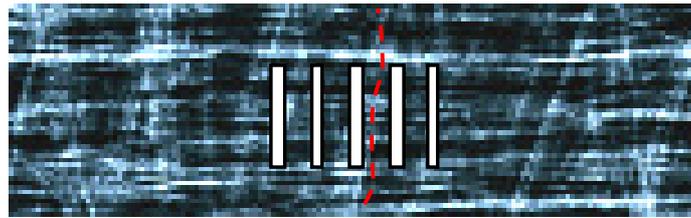
**Abb. 6-30:** Röntgenaufnahme mit Bruchzone, Druckversuch bis zum Bruch, E-Modul (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme längs, Probe Alt11, Charge 1, Streifenabstand 3 mm, Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min, RT)



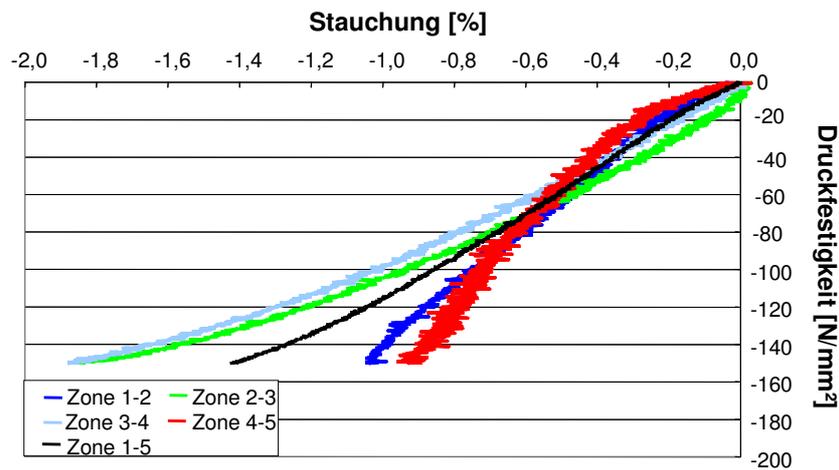
Bruchzone 1-2



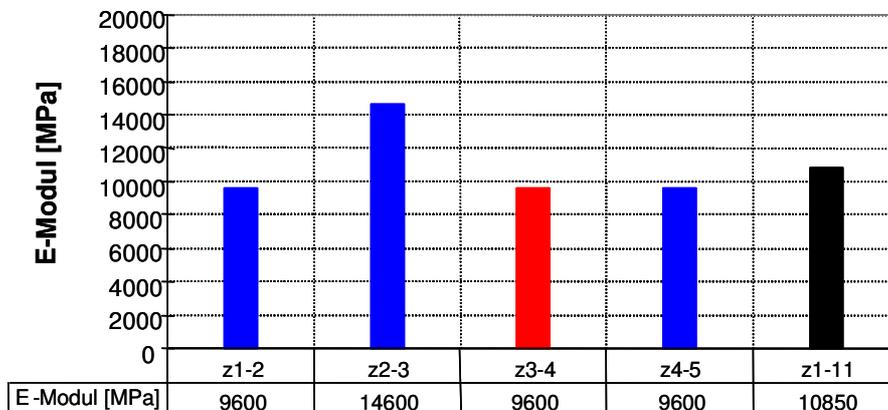
**Abb. 6-31:** Röntgenaufnahme mit Bruchzone, Druckversuch bis zum Bruch, E-Modul (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme quer, Probe Alt21, Charge 1, Streifenabstand 3 mm, Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min, RT)



Bruchzone 3-4



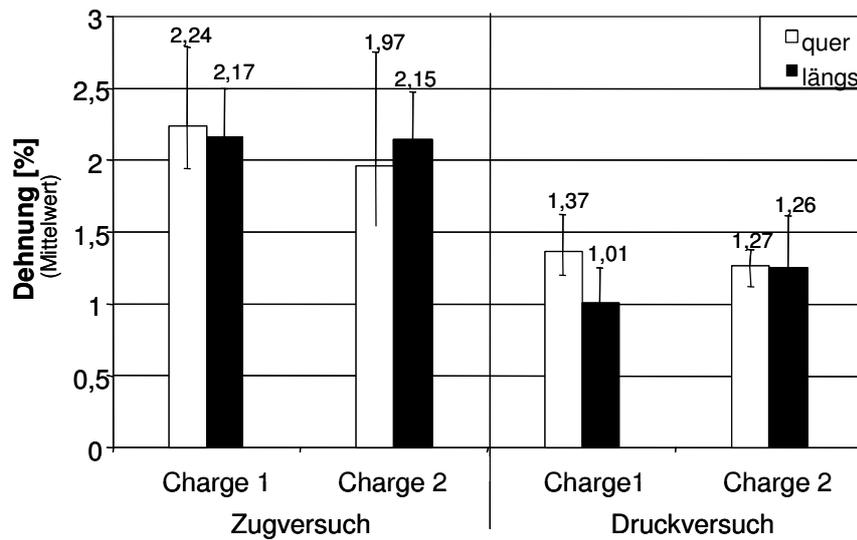
Druckversuch, Charge 2, QC8a3  
Bruchzone:34, längs)



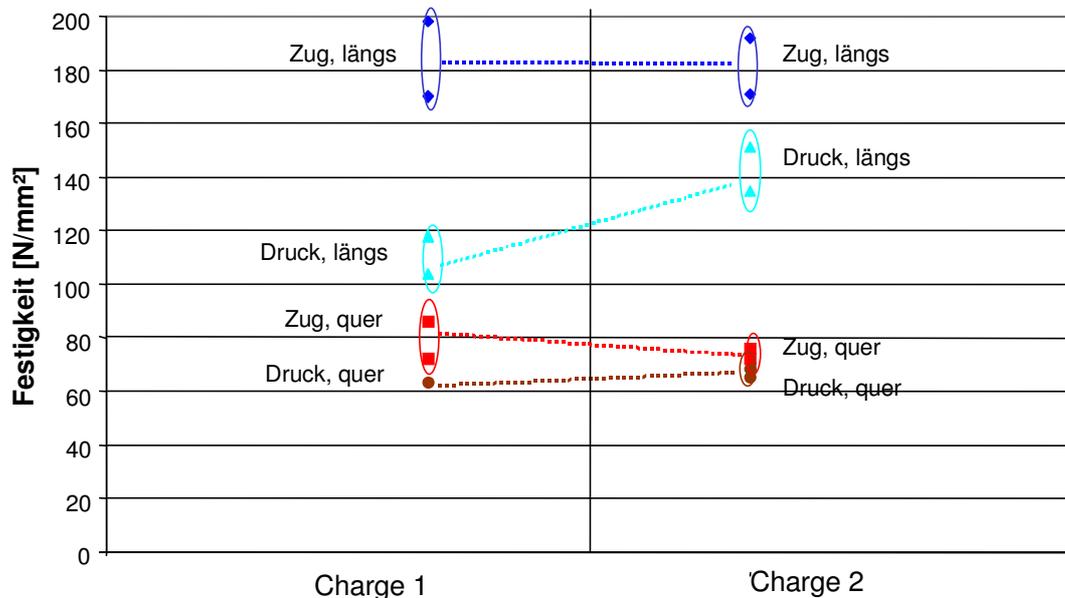
**Abb. 6-32:** Röntgenaufnahme mit Bruchzone, Druckversuch bis zum Bruch, E-Modul (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme längs, Probe QC8a3, Charge 2, Streifenabstand 3 mm, Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min, RT)

### 6.2.1.4 Vergleich von Zug- und Druckversuch (an Charge 1 und 2)

Die Zusammenfassung der gesamten quasistatischen Untersuchungen (Zug-, Druckversuch, längs, quer, Charge 1, 2) ergibt folgendes Bild: bei Charge 1 liegt ein deutlicher Unterschied der Zug- und Druckfestigkeit vor (Längsbelastung), während sich bei Charge 2 die Werte annähern (**Abb. 6-33, Abb. 6-34**). Bei Belastung quer zur Faserrichtung sind die Unterschiede bei Charge 1 relativ gering und fallen bei Charge 2 nahezu zusammen.



**Abb. 6-33:** Lokale Bruchdehnung (min. und max. und Mittelwerte), Probenentnahme längs und quer, Charge 1 und 2 (Gewebeverstärkter Thermoplast, X112-0°)



**Abb. 6-34:** Zug- und Druckfestigkeit (min. und max. Werte), Probenentnahme längs und quer, Charge 1 und 2 (Gewebeverstärkter Thermoplast)

## 6.2.2 Dynamische Belastung

### 6.2.2.1 Zugschwellbelastung

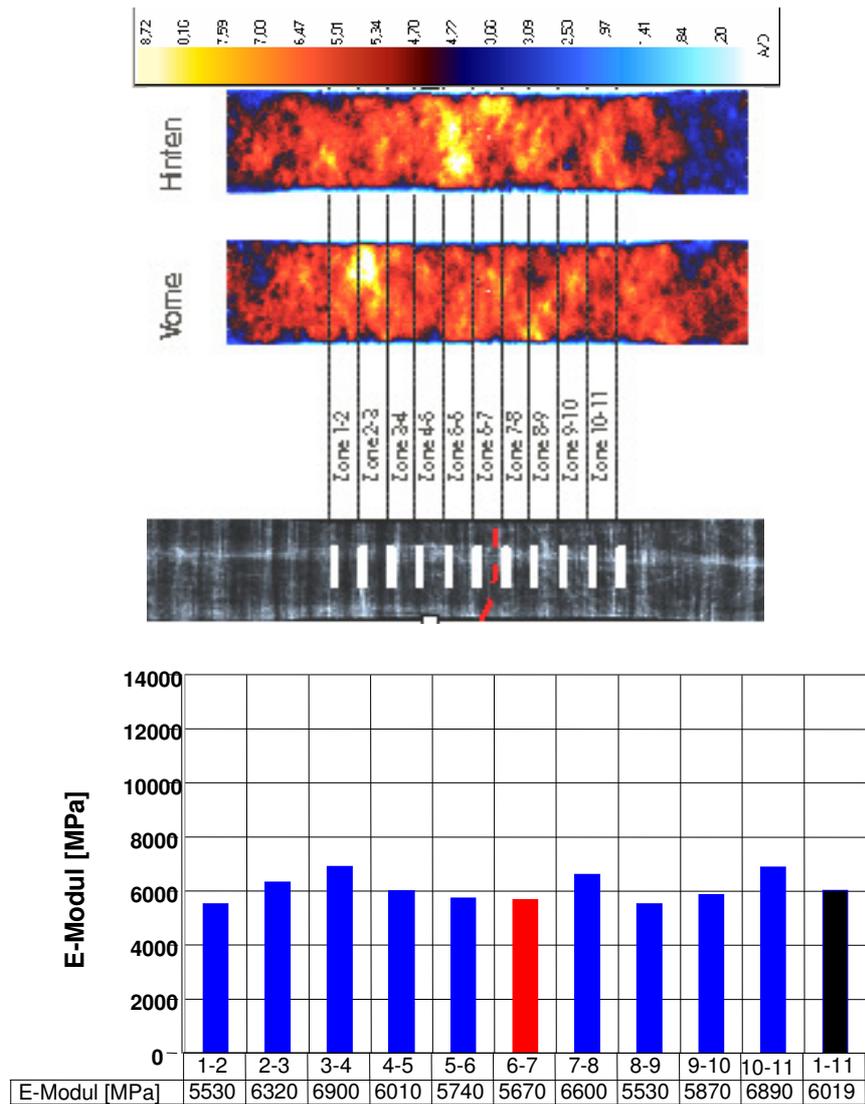
#### 6.2.2.1.1 Versuchsstrategie

Um bei Einstufenversuchen sowohl von einer prognostizierbaren Lastspielzahl ausgehen zu können als auch sicherzustellen, dass die Probe im Messbereich bricht, werden (zumeist) vorbereitende Untersuchungen (Laserextensometer, Thermoelastische Spannungsanalyse) an jeder Probe durchgeführt (**Abb. 6-35**).

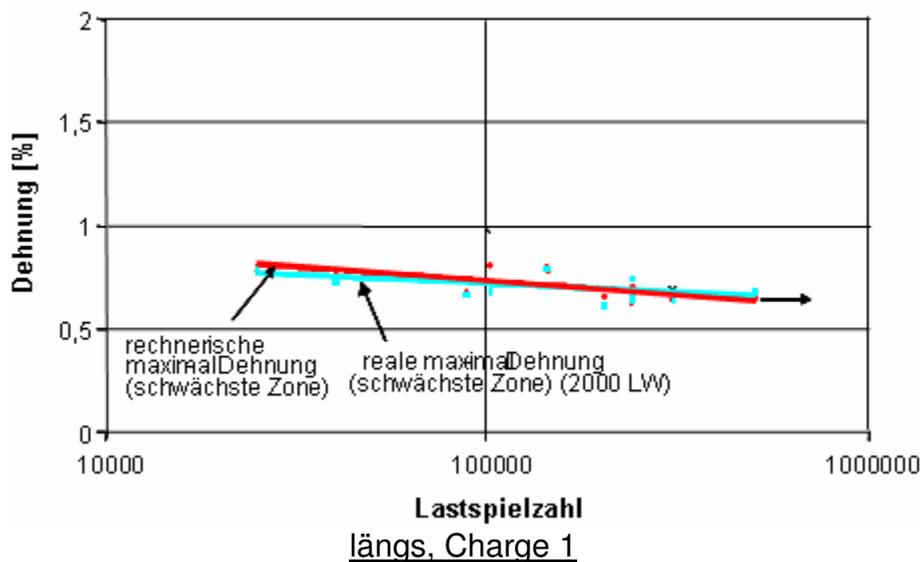
Bei den Ermüdungsversuchen tritt zumeist das Versagensverhalten in der Zone mit der lokal niedrigsten Steifigkeit auf. Dieses Erkenntnis wird zur Abschätzung des anzustrebenden Spannungs- bzw. Dehnungshorizonts bei Ermüdungsversuchen herangezogen (Maximales Totaldehnungskriterium). Basierend auf dem dem Ermüdungsversuch vorangestellten zügigen Belastungsversuch bis ca. 0.4% Dehnung wird die Steifigkeit in den verschiedenen Zonen ermittelt. (Es zeigt sich, dass die rechnerische Maximaldehnung der schwächsten Zone der realen Maximaldehnung dieser Zone bei 2000 LW entspricht (**Abb. 6-36**)).

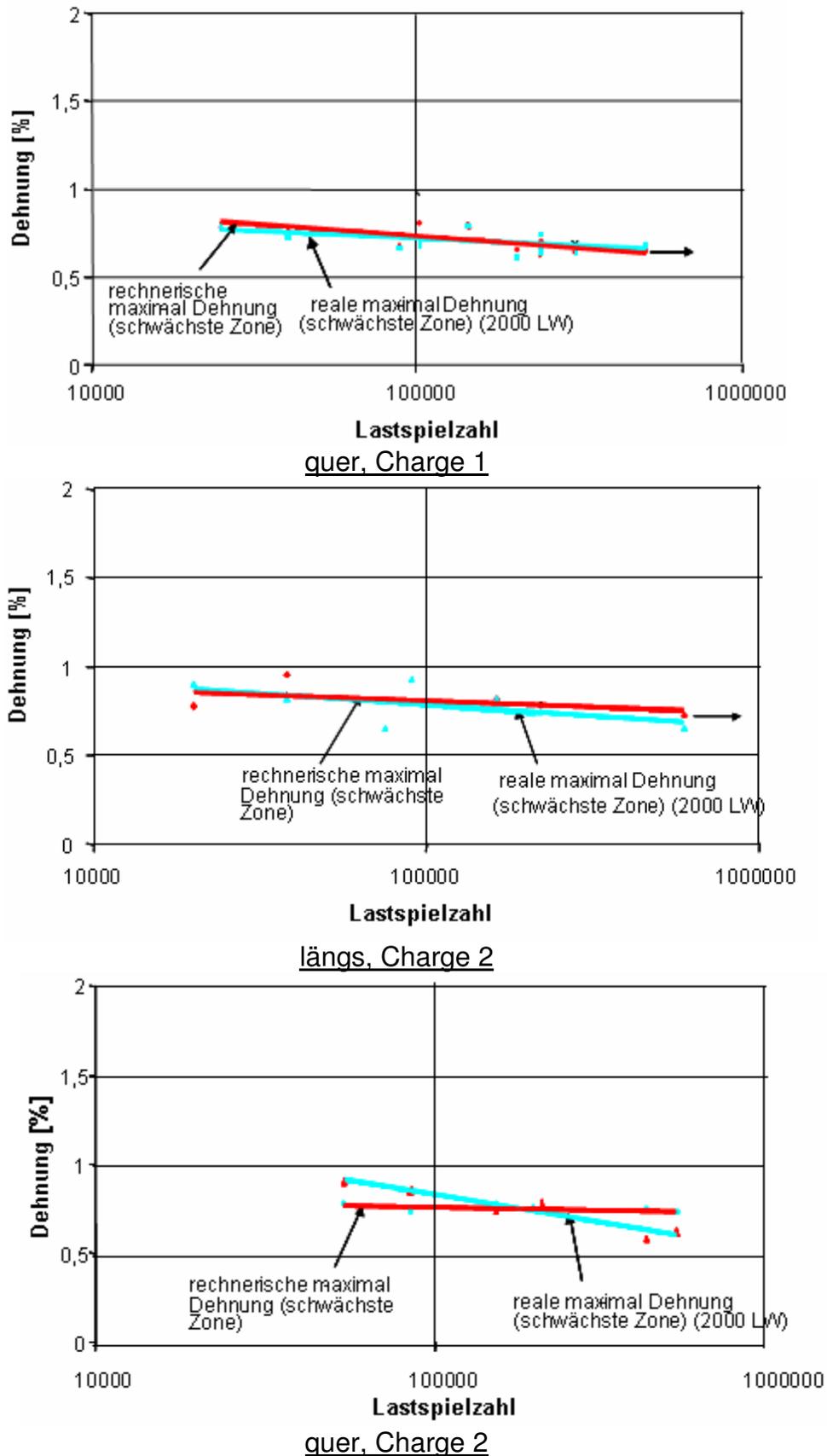
Erfahrungsbasiert kann nun eine Korrelation zwischen rechnerischer Maximaldehnung der schwächsten Zone und der Bruchlastspielzahl hergestellt werden. Diese Beziehung ist die Basis für die auf Erfahrung basierende Festlegung der rechnerischen Anfangsmaximaldehnung.

Im Vorgriff auf die Ergebnisse sei vermerkt, dass dieses Verhalten bei Charge 1 zutrifft, allerdings tritt bei Charge 2 ein abweichendes Versagensverhalten auf, da die Proben zumeist nicht an der schwächsten Stelle brechen. (Dies erschwert die zutreffende Prognose der Spannungshorizonte bei Ermüdungsversuchen).



**Abb. 6-35:** Vorbereitende Untersuchungen für Ermüdungsversuch: TSA-Analyse und Zugversuch mit Laserextensometer (bis 0.4 % Dehnung)(Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme längs, Probe EP5a5, Charge 1, Streifenabstand 5 mm)





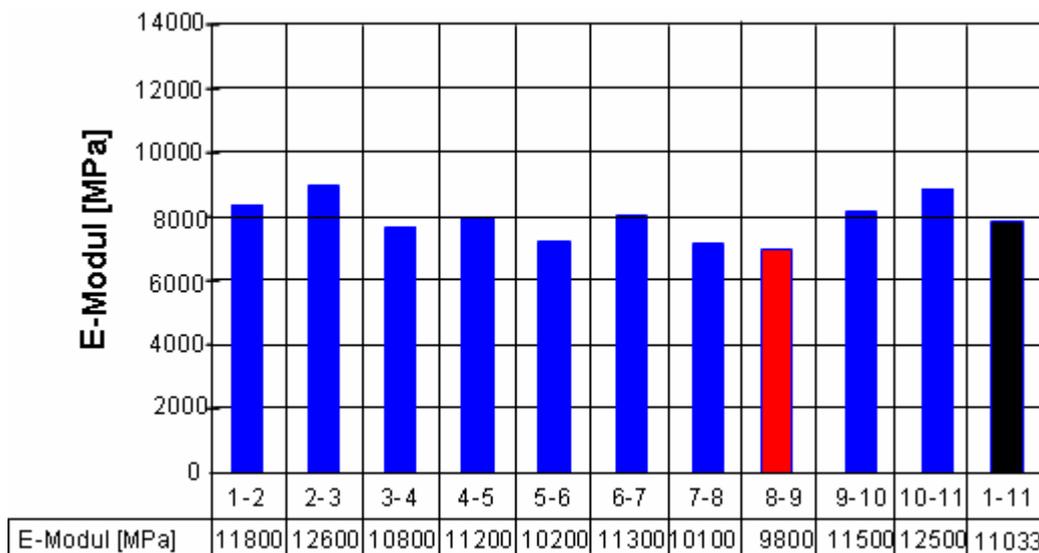
**Abb. 6-36:** Rechnerische Maximaldehnung (basierend auf E-Modulbestimmung im Zugversuch) und reale Maximaldehnung (im Ermüdungsversuch (nach 2000 LW)(Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme längs, quer, Charge 1 und 2, Streifenabstand 5 mm, 5 Hz, RT)

### 6.2.2.1.2 Beispielhafte Darstellung von Ermüdungsversuchen bei Zugschwellbelastung

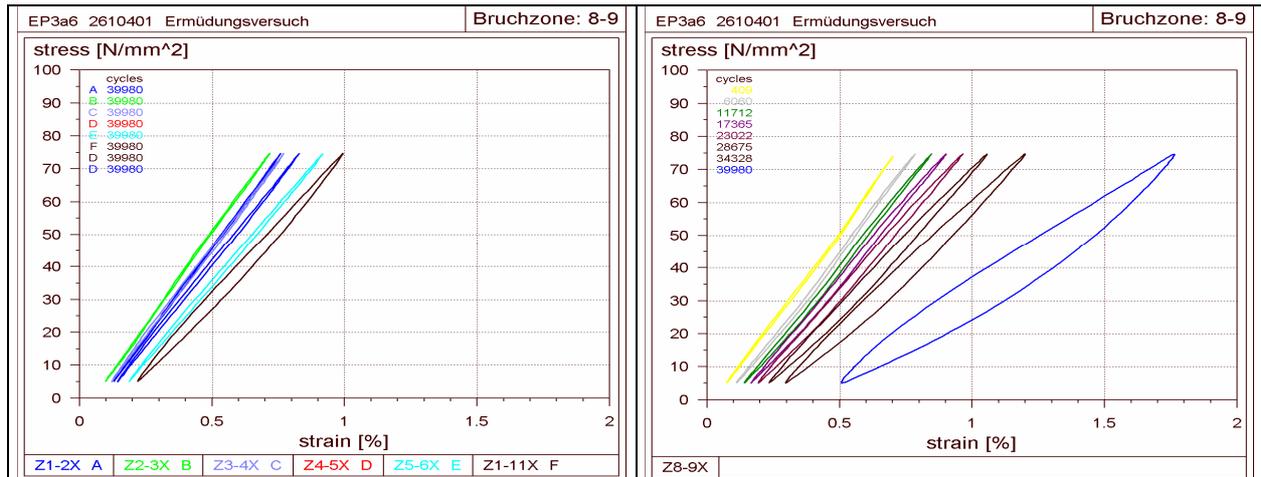
Nachfolgend wird das Ermüdungsverhalten signifikanter Versuche anhand der Veränderung der Hysteresisschleifen und des Verlaufs ausgesuchter mechanisch-dynamischer Kennwerte über der Lastspielzahl dargestellt für Entnahmerichtung längs, Charge 1, (**Abb. 6-37**, **Abb. 6-38**, **Abb. 6-39**) und die Entnahmerichtung quer, Charge 1 (**Abb. 6-40** bis **Abb. 6-42**). Einheitlich ist festzustellen, dass mit zunehmender Lastspielzahl eine Zunahme der maximalen Dehnung und der Mitteldehnung, eine Abnahme des dynamischen Moduls und wiederum eine Zunahme der Dämpfung zu beobachten ist. Diese Veränderungen sind für die Schadenszone zumeist besonders stark ausgeprägt.



Bruchzone 8-9

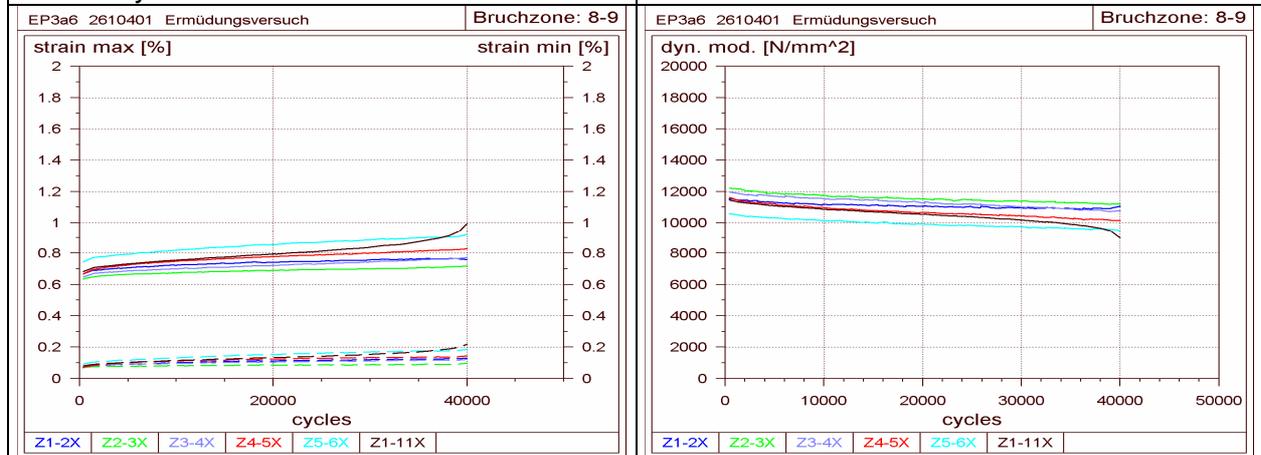


**Abb. 6-37:** Röntgenbild mit Bruchzone und lokale E-Moduli aus Zugversuch (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme längs, Probe EP3A6, Charge 1, Streifenabstand 5 mm)



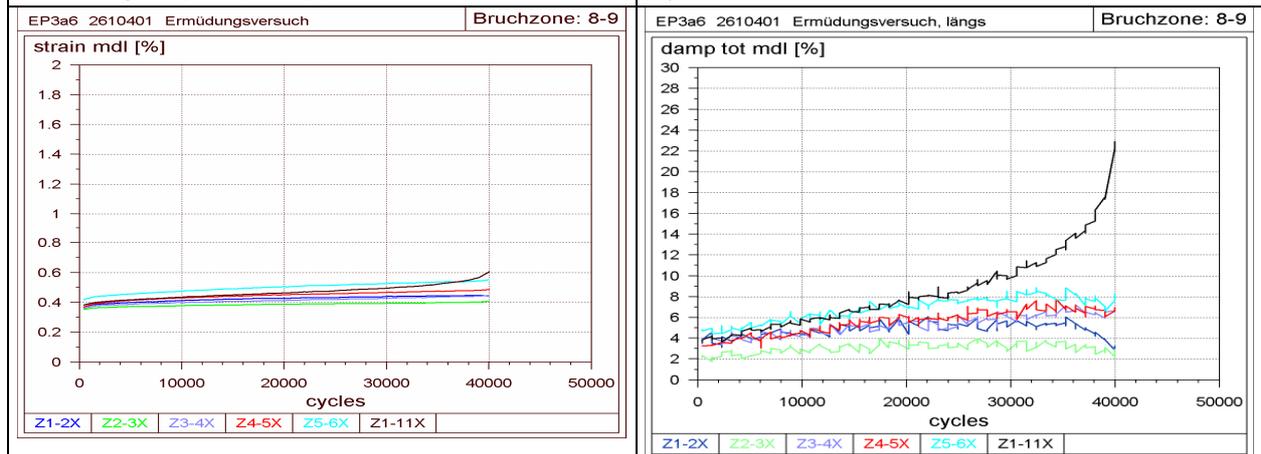
Hysteresisschleifen von erste 5 Zonen nach 40.000 Zyklen

Hysteresisschleifen von der Bruchzone (8-9)



Dehnungen (max, min), erste 5 Zonen

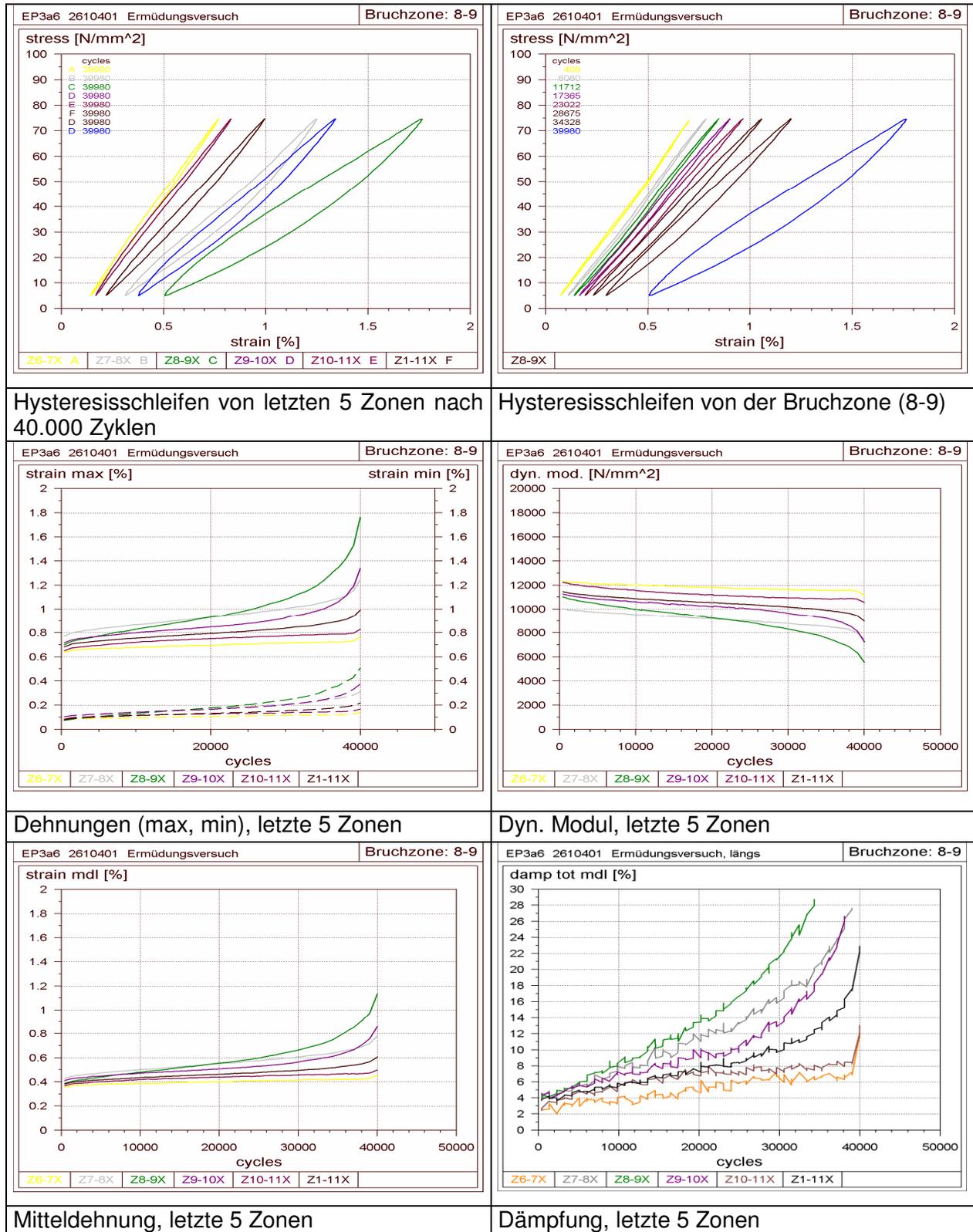
Dyn. Modul, erste 5 Zonen



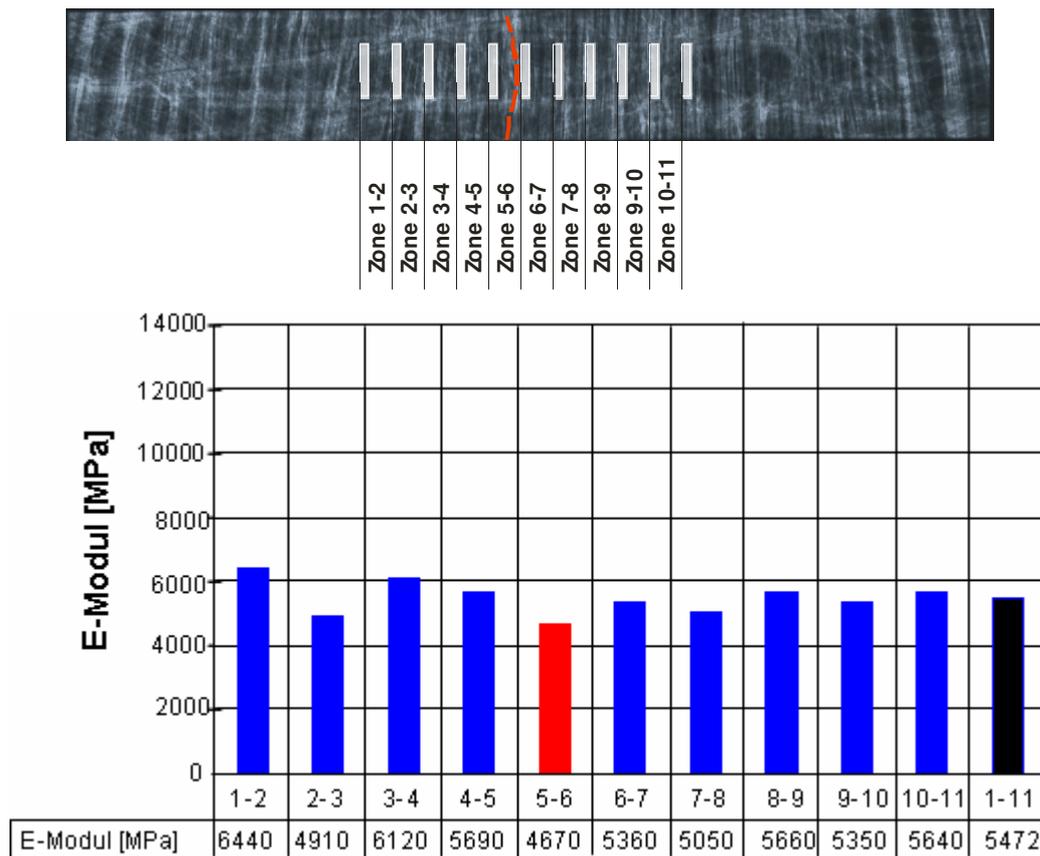
Mitteldehnung, erste 5 Zonen

Dämpfung, erste 5 Zonen

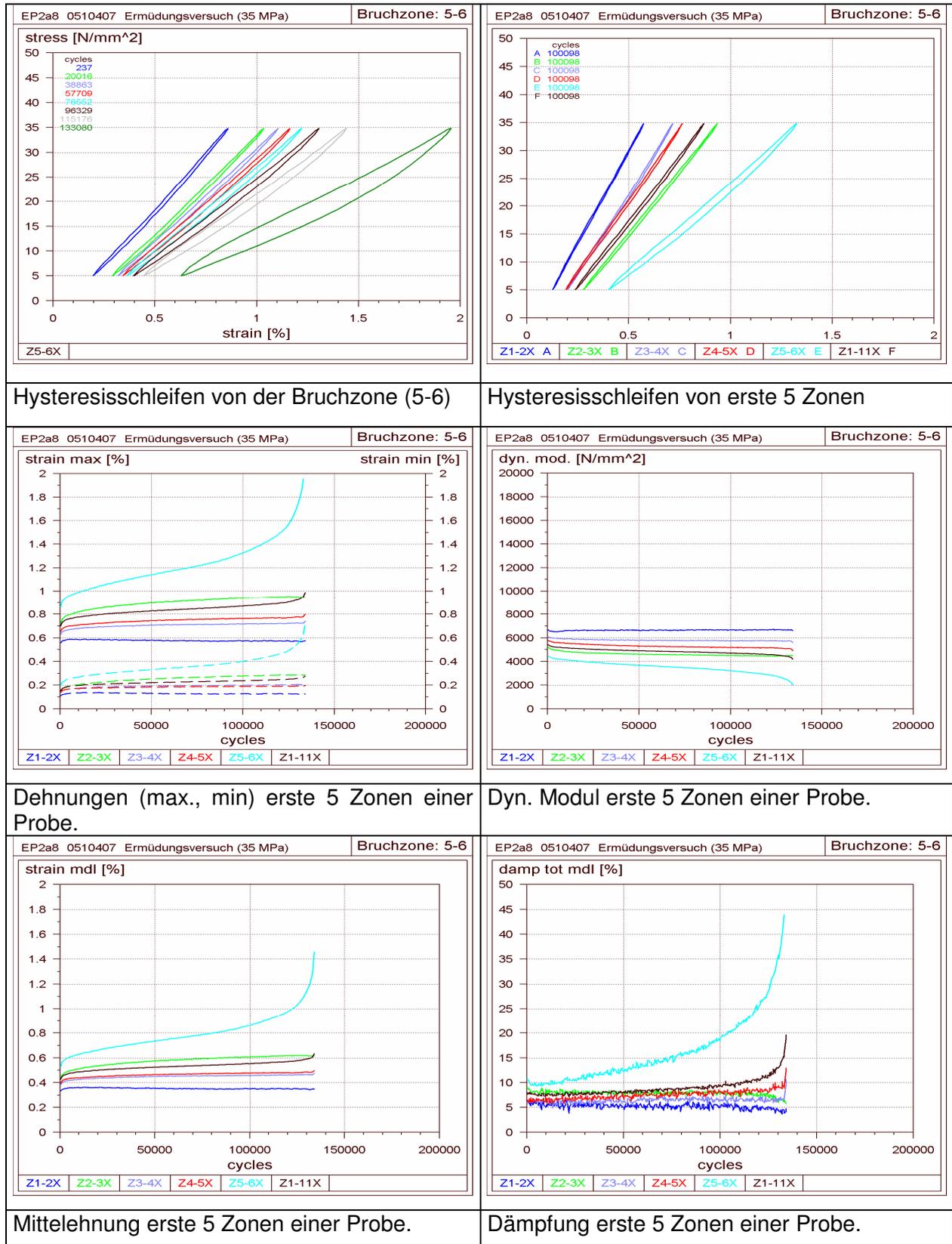
**Abb. 6-38:** Zugschwellversuch, Hysteresisschleifen und mechanisch-dynamische Kennwerte der erste 5 Zonen, Entnahmerichtung längs (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme längs, Probe EP3A6, Charge 1, Streifenabstand 5 mm, 5 Hz, RT,  $\sigma_a = 35 \text{ N/mm}^2$ , RT, NB: ca. 40.000 LW)



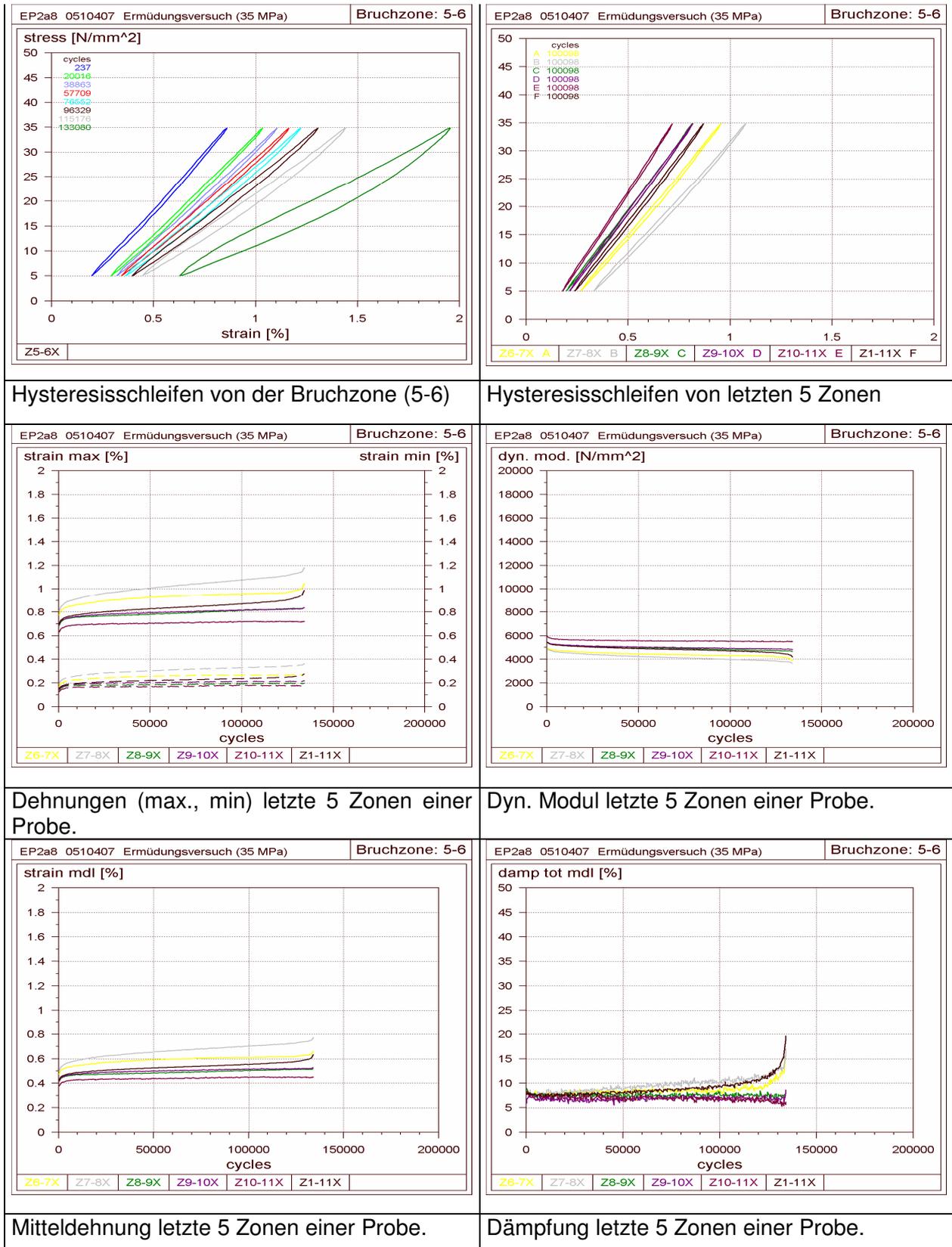
**Abb. 6-39:** Zugschwellversuch, Hysteresisschleifen und mechanisch-dynamische Kennwerte der letzten 5 Zonen, Entnahmerichtung längs (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme längs, Probe EP3A6, Charge 1, Streifenabstand 5 mm, 5 Hz,  $\sigma_a = 35 \text{ N/mm}^2$ , RT, NB: ca. 40.000 LW)



**Abb. 6-40:** Röntgenbild mit Bruchzone und lokale E-Moduli aus Zugversuch (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme quer, Probe EP2a8, Charge 1, Streifenabstand 5 mm)



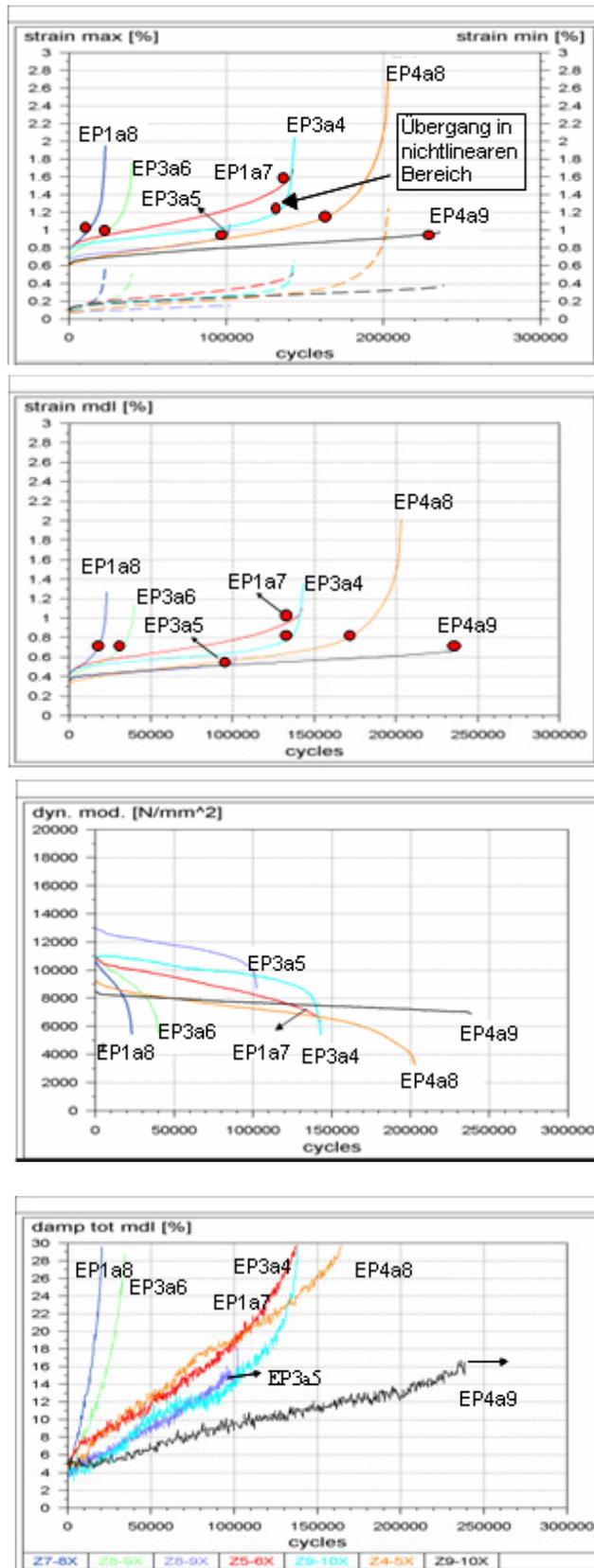
**Abb. 6-41:** Zugschwellversuch, Hysteresisschleifen und mechanisch-dynamische Kennwerte der letzten 5 Zonen, Entnahmerichtung quer (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme quer, Probe EP2a8, Charge 1, Streifenabstand 5 mm, 5 Hz,  $\sigma_a=15 \text{ N/mm}^2$ , RT, NB: ca. 136.000 LW)



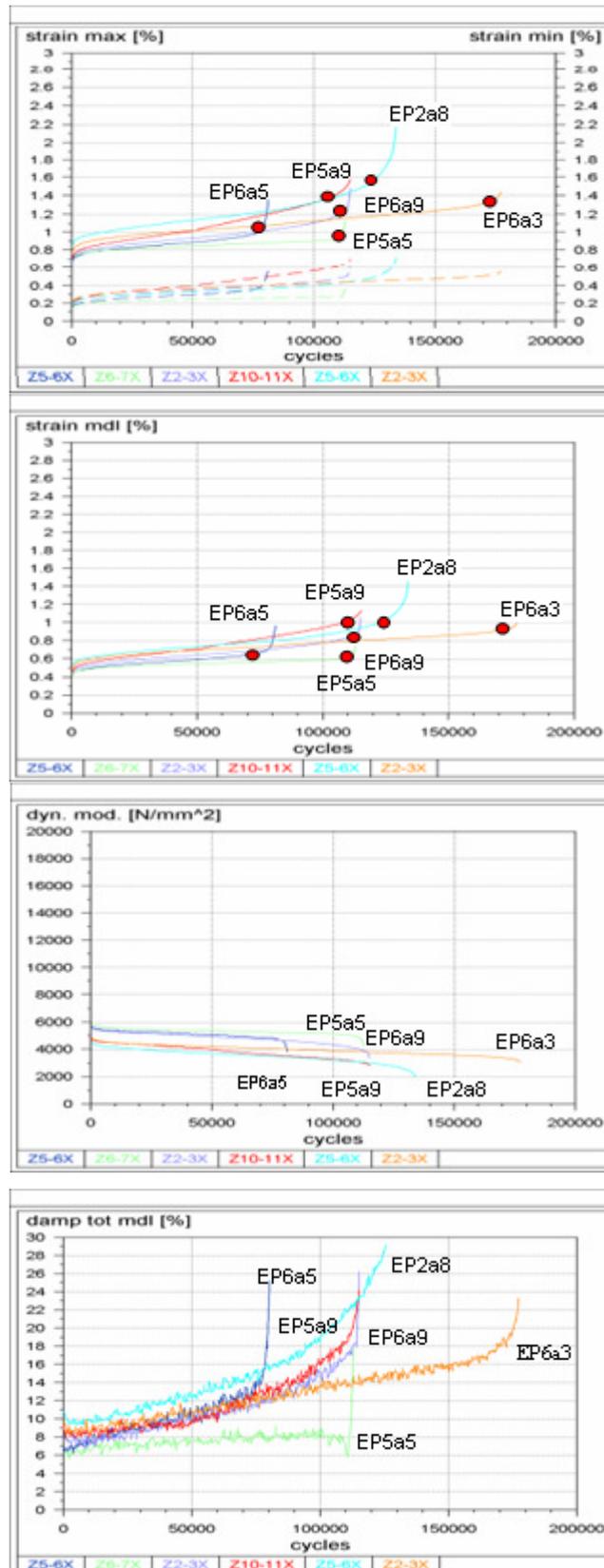
**Abb. 6-42:** Zugschwellversuch, Hysteresisschleifen und mechanisch-dynamische Kennwerte der letzten 5 Zonen, Entnahmerichtung quer (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme quer, Probe EP2a8, Charge 1, Streifenabstand 5 mm, 5 Hz,  $\sigma_a = 15 \text{ N/mm}^2$ , RT, NB: ca. 136.000 LW)

### **Mechanisch-dynamische Kennwerte der späteren Bruchzonen**

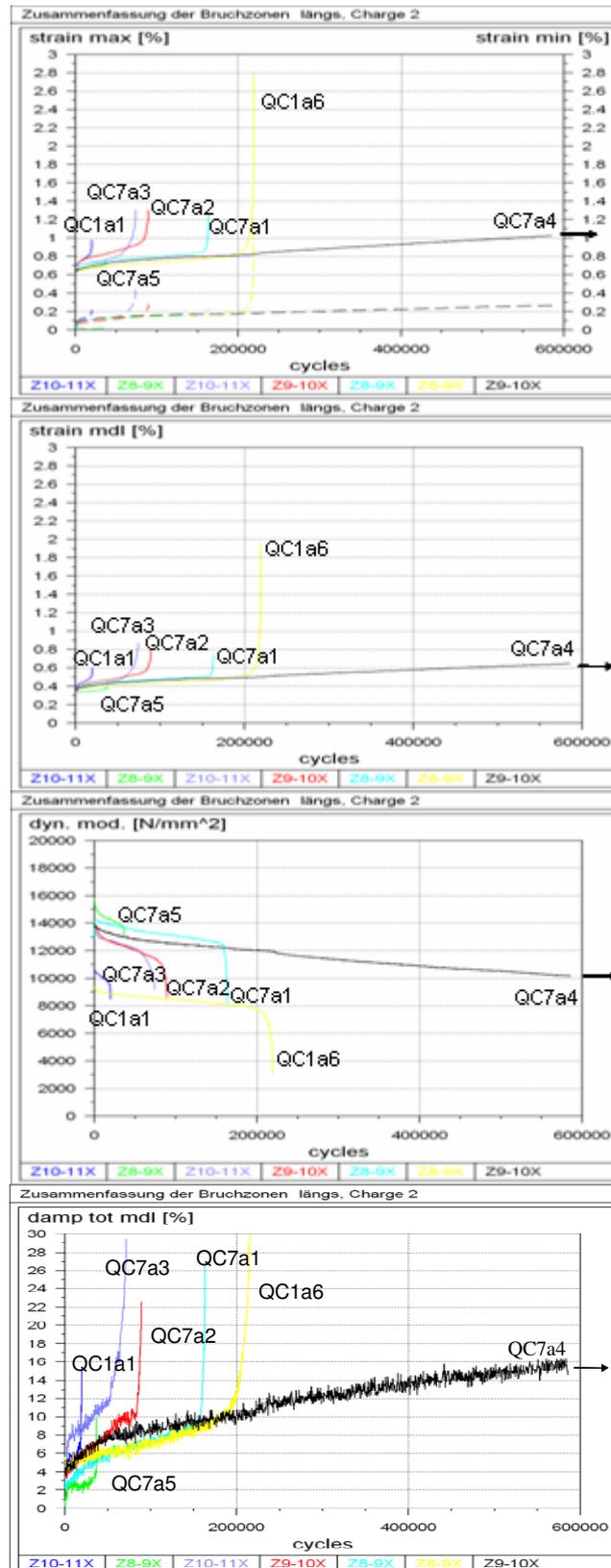
Der Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte der späteren Bruchzonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs werden für Charge 1 in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung dargestellt (**Abb. 6-43, Abb. 6-44**). Besonders signifikant ist bei Längsbelastung von Charge 1 die intensive Dämpfungszunahme der späteren Bruchzone, während bei Charge 2 nur etwas weniger ausgeprägter Dämpfungsanstieg zu verzeichnen ist. Die Einzelauswertungen bei Charge 2 zeigen das beobachtete Versagensverhalten, das nicht mit der schwächsten Zone verbunden ist (**Abb. 6-45, Abb. 6-46**). Im Vorgriff auf die spätere Diskussion kann hier vermerkt werden, dass die Dämpfungsveränderung auf innere Reibungszustände zurückzuführen ist, die z. B. in geringen Haftungs Zuständen begründet sind. Dies ist bei Charge 1 der Fall, jedoch nicht bei Charge 2. Bei dieser liegt eher eine gute Faser-Matrix-Haftung vor (REM-Aufnahme und der lokale Schädigungseffekt (Probe bricht nicht an Stelle mit geringstem E-Modul) ist wahrscheinlich auf ein Überpressen und die damit verbundene lokale Schädigung der Fasern zurückzuführen.



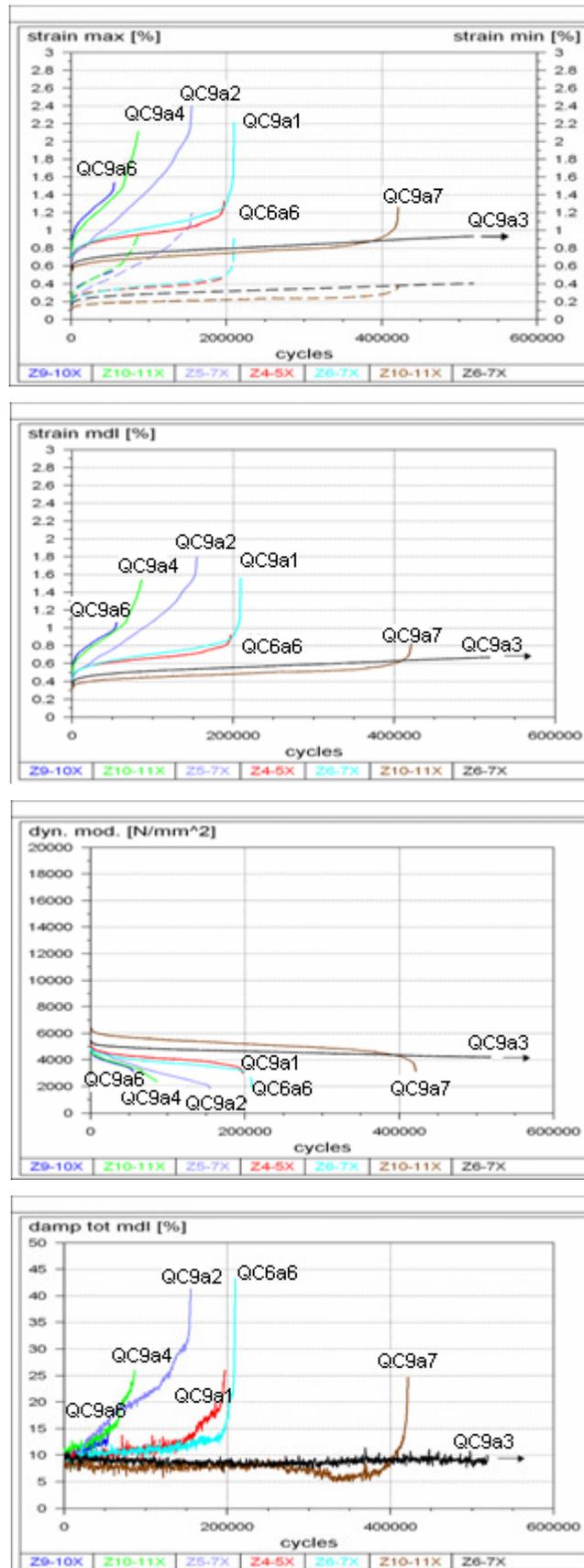
**Abb. 6-43:** Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte der späteren Bruchzonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs bei Zugschwellbelastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, Entnahmerichtung längs, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)



**Abb. 6-44:** Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte der späteren Bruchzonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs bei Zugschwellbelastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, Entnahmerichtung quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)



**Abb. 6.45:** Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte der späteren Bruchzonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs bei Zugschwellbelastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 2, Entnahmerichtung längs, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)

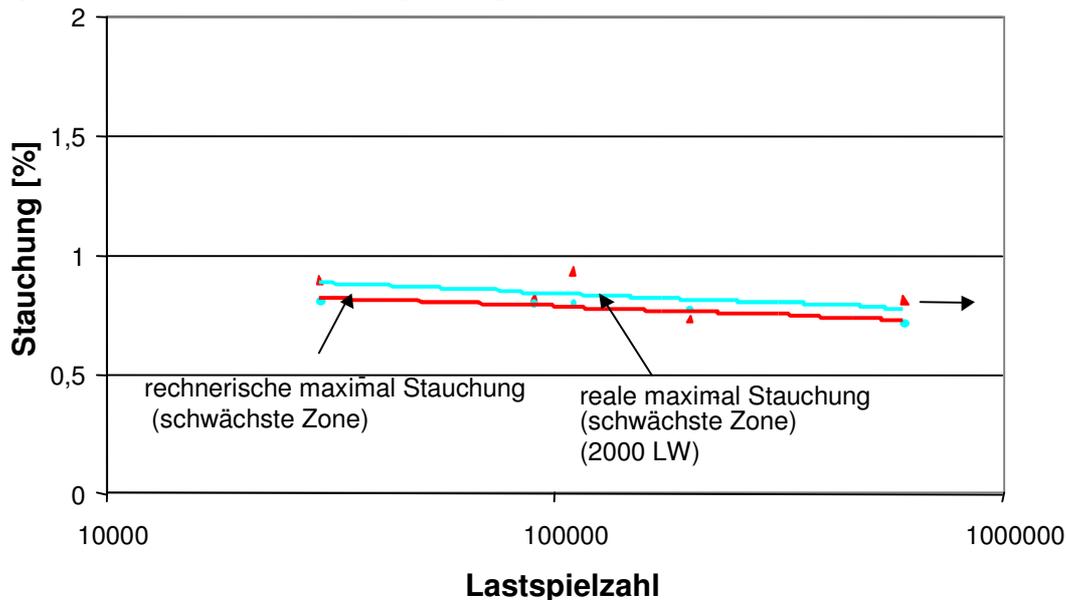


**Abb. 6-46:** Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte der schwächste Zonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs bei Zugschwellbelastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 2, Entnahmerichtung quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)

## 6.2.2.2 Druckschwellbelastung

### 6.2.2.2.1 Versuchsstrategie

Für die orientierende Festlegung von Spannungshorizonten werden in gleicher Weise wie beim Zugversuch eine Druckbelastung der Probe bis zu einer Dehnung von 0,4% durchgeführt und hieraus die lokalen E-Moduli bestimmt. Damit kann erfahrungsbasiert die Höhe der dynamischen Druckbelastung für die Ermüdungsversuche festgelegt werden. Dieses Vorgehen wird beispielhaft für Charge 1, Probenentnahme längs, dargestellt (**Abb. 6-47**).



**Abb. 6-47:** Totaldehnungsorientierte Festlegung der maximalen Stauchung bei Druckschwellbelastung, Vergleich von rechnerischer Dehnung basierend auf Druckversuch und reale Dehnung bei dynamischer Belastung nach 2000 LW (Gewebeverstärkter Thermoplast, Entnahmerichtung längs, Charge 1, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)

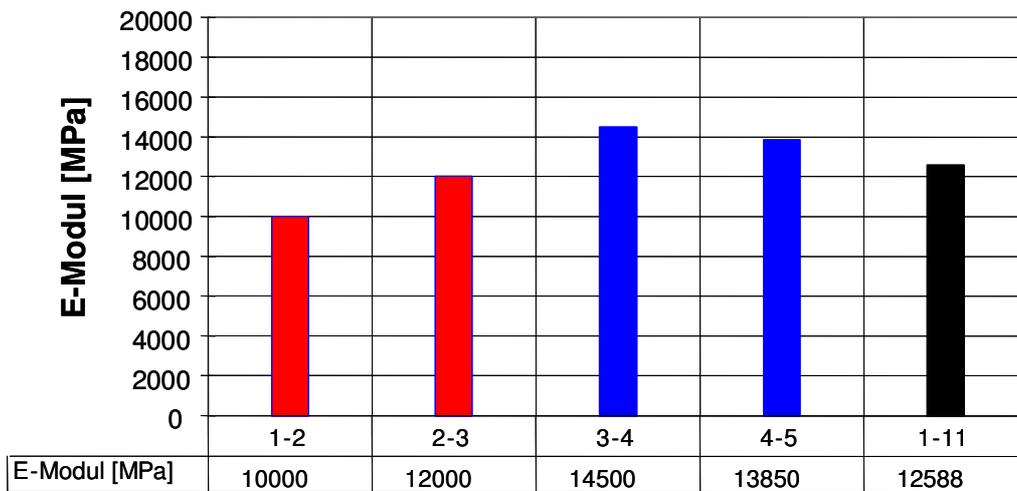
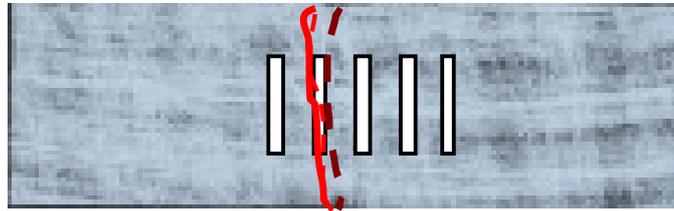
### 6.2.2.2.2 Beispielhafte Darstellung von Druckschwell-Ermüdungsversuchen

Die Ermüdungsversuche werden mit einer eigens entwickelten Einspannvorrichtung durchgeführt (**Abb. 4-1**). Diese gestattet die Beobachtung von vier Messzonen mit dem Laserextensometer. Die versuchsbegleitende Erfassung des lokalen mechanisch-dynamischen Verhaltens bei Druckversuchen ist als Novum anzusprechen.

Jedem Ermüdungsversuch wird, wie angesprochen, ein Kurzzeit-Druckversuch bis ca. 0,4% Dehnung vorangestellt, um über den E-Modul eine Orientierung für den anzustrebenden Spannungshorizont zu erhalten.

Die Hysteresisschleifen zeigen bei den Ermüdungsversuchen eine mit der Lastspielzahl leicht zunehmende Krümmung, und es kann ein deutliches Kriechverhalten, insbesondere für die Bruchzone, direkt beobachtet werden. Die mechanisch-dynamischen Kennwerte zeigen in ihrem Verlauf zumeist eine Unstetigkeit, was durch das Abgleiten (Schern) von Probenbereichen verursacht wird. Die Kennwertveränderung in den als kontinuierlich anzusprechenden Lastspielzahlbereichen ist nur geringfügig. Die Schern kann sich dabei über eine bis zwei Zonen der Probe erstrecken, d. h. die Bruchzone im vorderen Bereich

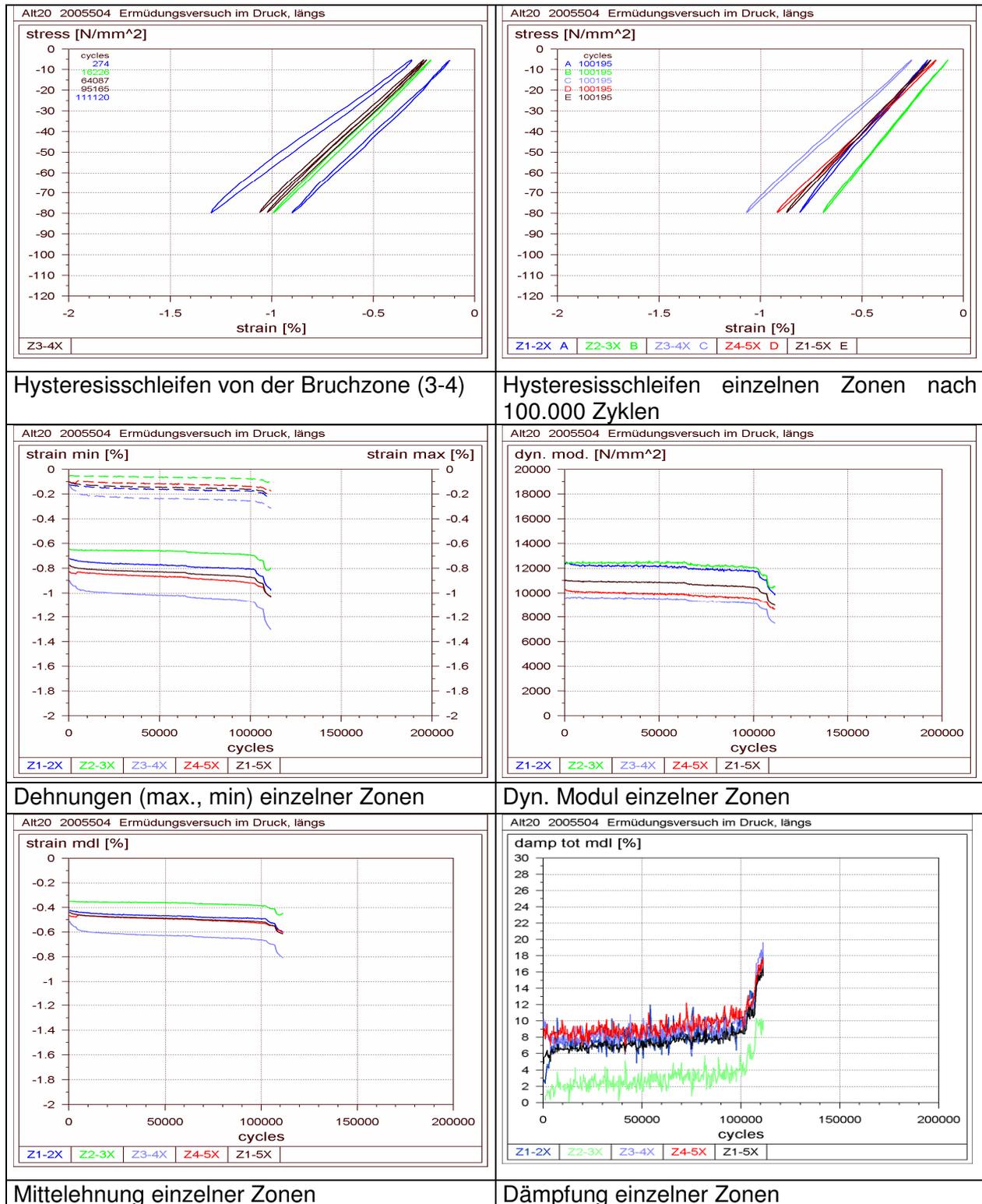
entspricht nicht jener im Bereich auf der Rückseite. Die Schadenszone befindet sich im überwiegenden Maße im Bereich eines niedrigen E-Moduls.  
 (Bilder und Diagramme siehe **Abb. 6-48** bis **Abb. 6-51**).



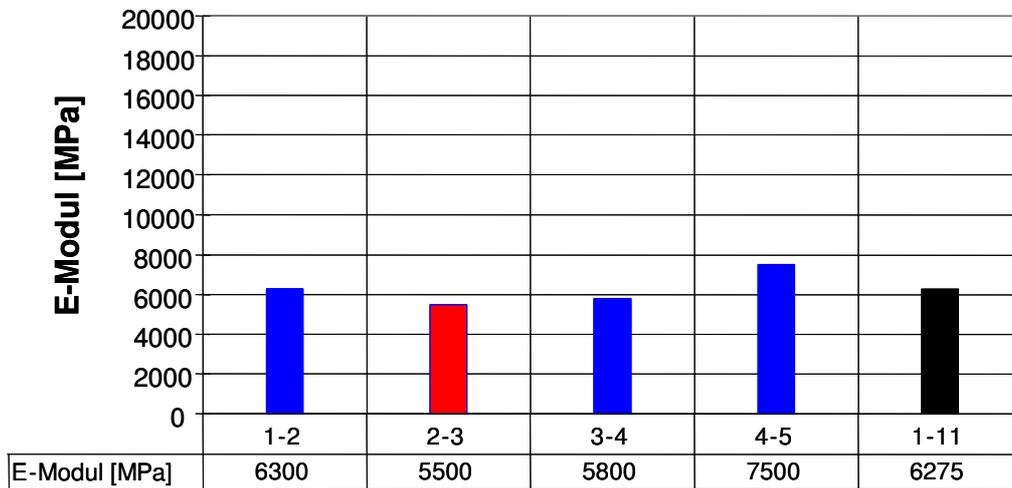
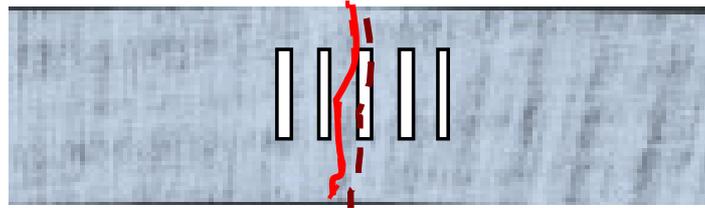
E-Modul (Kurzzeit-Druckversuch bis ca. 0,4 % Dehnung)



**Abb. 6-48:** Röntgenbild mit Bruchzone, lokale E-Moduli aus Druckversuch und Bruchbild, Druckschwellbelastung, (Gewebeverstärkter Thermoplast, Entnahmerichtung längs, Charge 1, 5 Hz, RT, Streifenabstand 3 mm, Probe ALT 20)



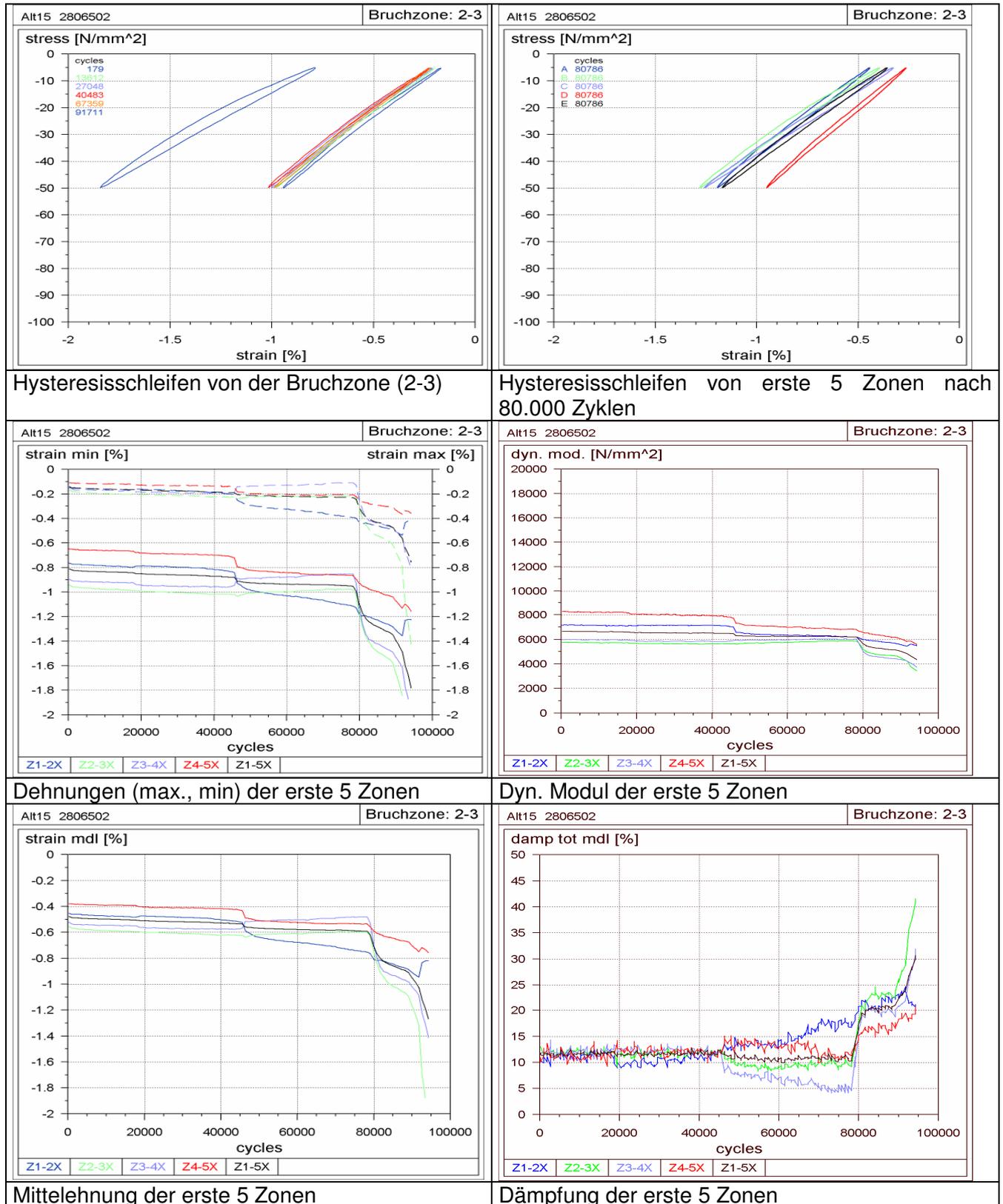
**Abb. 6-49:** Druckschwellversuch, Hysteresisschleifen und mechanisch-dynamische Kennwerte (Gewebeverstärkter Thermoplast, Entnahmerichtung längs, Charge 1, 5 Hz, RT,  $\sigma_a = 37,5 \text{ N/mm}^2$  Streifenabstand 5 mm, Probe ALT 20)



E-Modul( Kurzzeit-Druckversuch bis ca. 0,4 % Dehnung)



**Abb. 6-50:** Röntgenbild mit Bruchzone, lokale E-Moduli aus Druckversuch und Bruchbild, Druckschwellbelastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Entnahmerichtung quer, Charge 1, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm, Probe ALT 15)



**Abb. 6-51:** Druckschwellversuch, Hysteresisschleifen und mechanisch-dynamische Kennwerte (Gewebeverstärkter Thermoplast, Entnahmerichtung quer, Charge 1, 5 Hz, RT,  $\sigma_a = 22,5 \text{ N/mm}^2$  Streifenabstand 5 mm, Probe ALT 15)

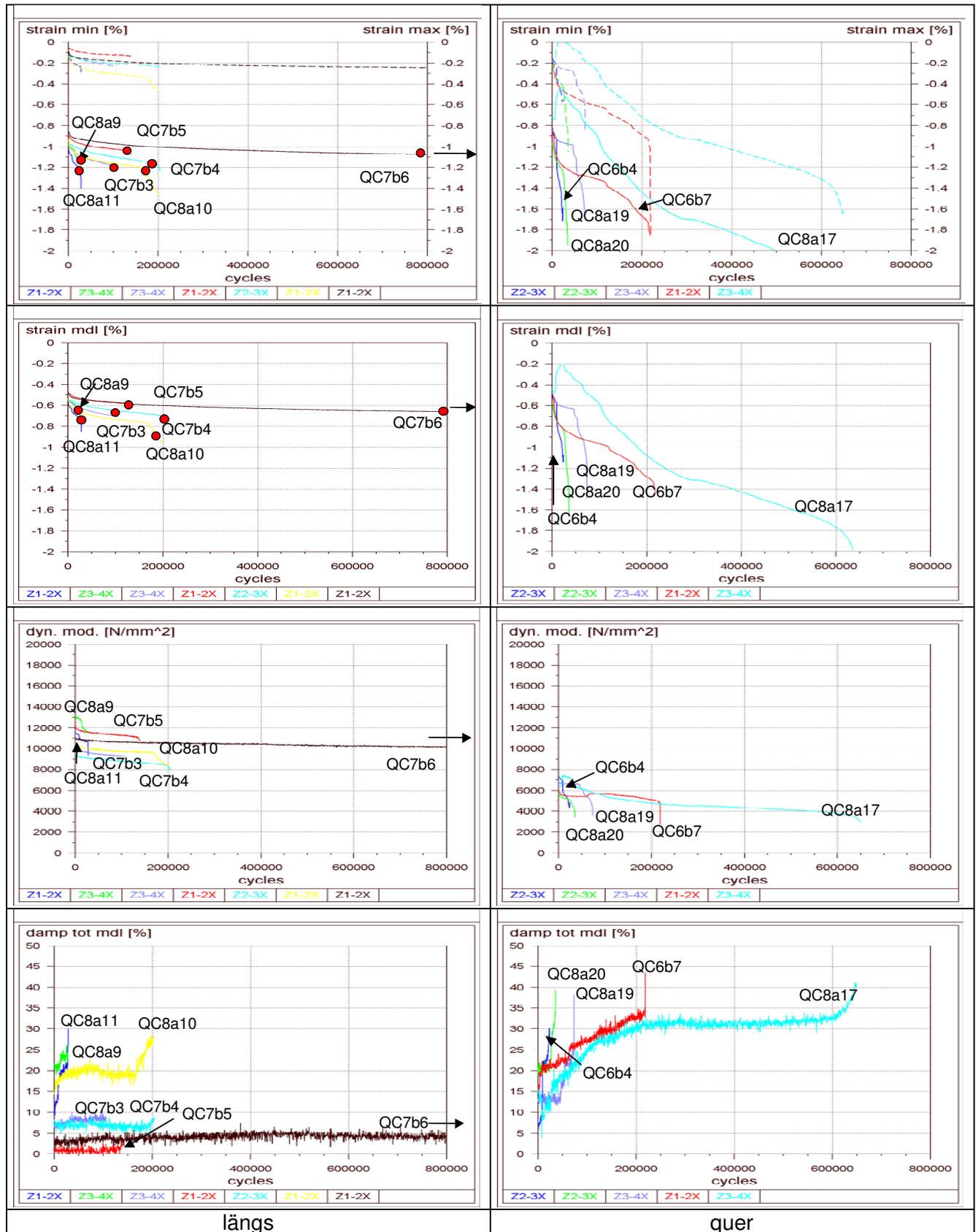
## Mechanisch-dynamische Kennwerte der späteren Bruchzonen

Der Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte der späteren Bruchzonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs bei Druckschwellbelastung wird stark durch die örtlich begrenzte Abscherung bestimmt, die zu einer Unstetigkeit in den jeweiligen Kennwertverläufen führt. Diese Strukturveränderung beeinträchtigt eine Interpretation der Versuchsergebnisse (**Abb. 6-52, Abb. 6-53**).

Bei Charge 2, Belastungsrichtung längs (**Abb. 6-53**), wird die Abscherung weniger häufig beobachtet und man erkennt eine geringe Kriechneigung, Steifigkeitsabnahme und zumeist eine nur geringfügige Dämpfungsveränderung. Bei der Belastungsrichtung quer liegen eine starke Kriechneigung, einbegrenzte Steifigkeitsabnahme und eine deutliche Dämpfungszunahme vor, was auf das matrixdominierte Verhalten zurückzuführen ist.



**Abb. 6-52:** Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte der späteren Bruchzonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs bei Druckschwellbelastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, Entnahmerichtung längs und quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 3 mm)



**Abb. 6-53:** Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte der späteren Bruchzonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs bei Druckschwellbelastung, Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 2, Entnahmerichtung längs, quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 3 mm)

## 7 Diskussion

### 7.1 Direkt-LFT

D-LFT ist ein kostengünstiger Werkstoff. Verfahrensbedingt liegen inhomogene Gefügestände vor, die das mechanische Verhalten beeinflussen. Aus anwendungstechnischer Sicht ist die Inhomogenität des mechanischen Verhaltens des D-LFT von besonderem Interesse, da diese Eigenschaft üblicherweise dem Serienseinsatz von Werkstoffen im Automobil entgegensteht. Dieser Aspekt wird daher eingehender beleuchtet. Außerdem wird auf Ergebnisse bei zügiger und zyklischer Beanspruchung eingegangen.

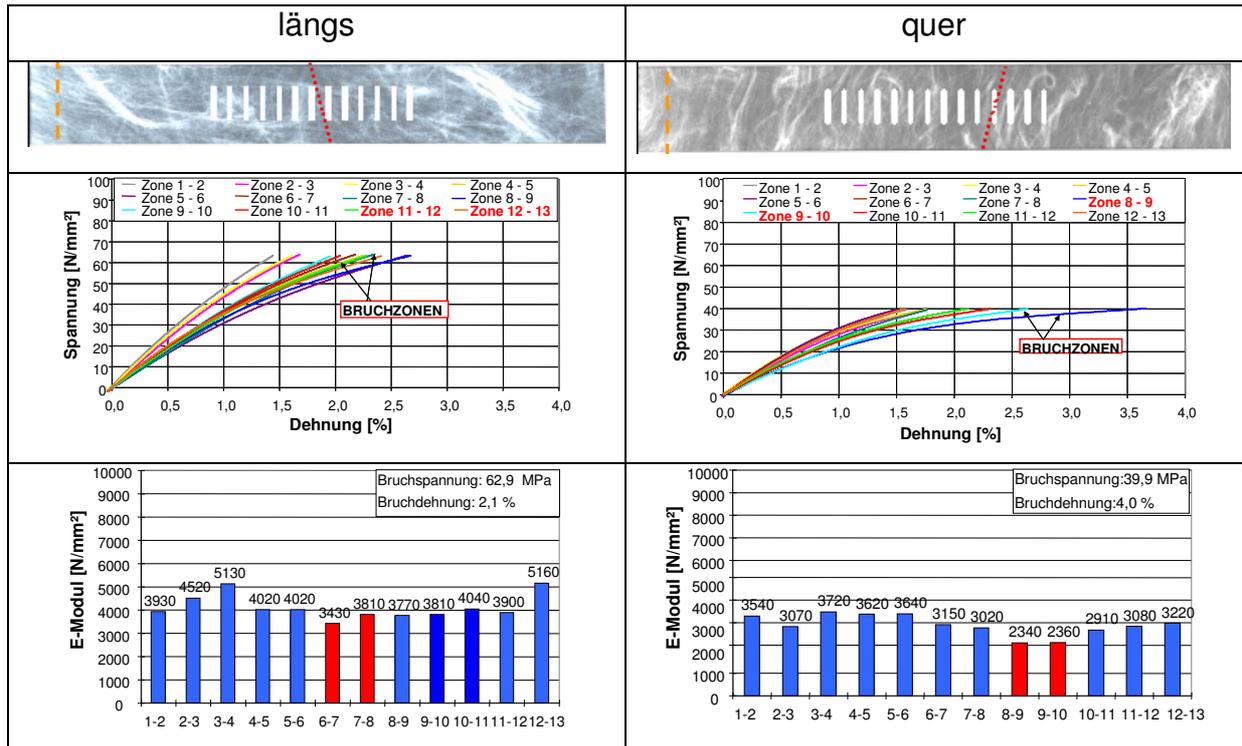
#### 7.1.1 Lokales Deformationsverhalten im Zugversuch

Der Zugversuch zeigt ein inhomogenes Verhalten sowohl entlang eines Probestabes als auch in der gesamten Platte. Die Festigkeitswerte weisen dabei eine größere Streuung auf als die Bruchdehnung. Das inhomogene Verhalten wird anhand von Probkörpern aus Platten mit unterschiedlichen Glasfasergehalten (20, 30, 40 Gew.-%) ausführlich untersucht. Innerhalb einer Probenplatte sind die Festigkeit der einzelnen Probestäbe und die Bruchdehnung der Schadensstelle von Interesse.

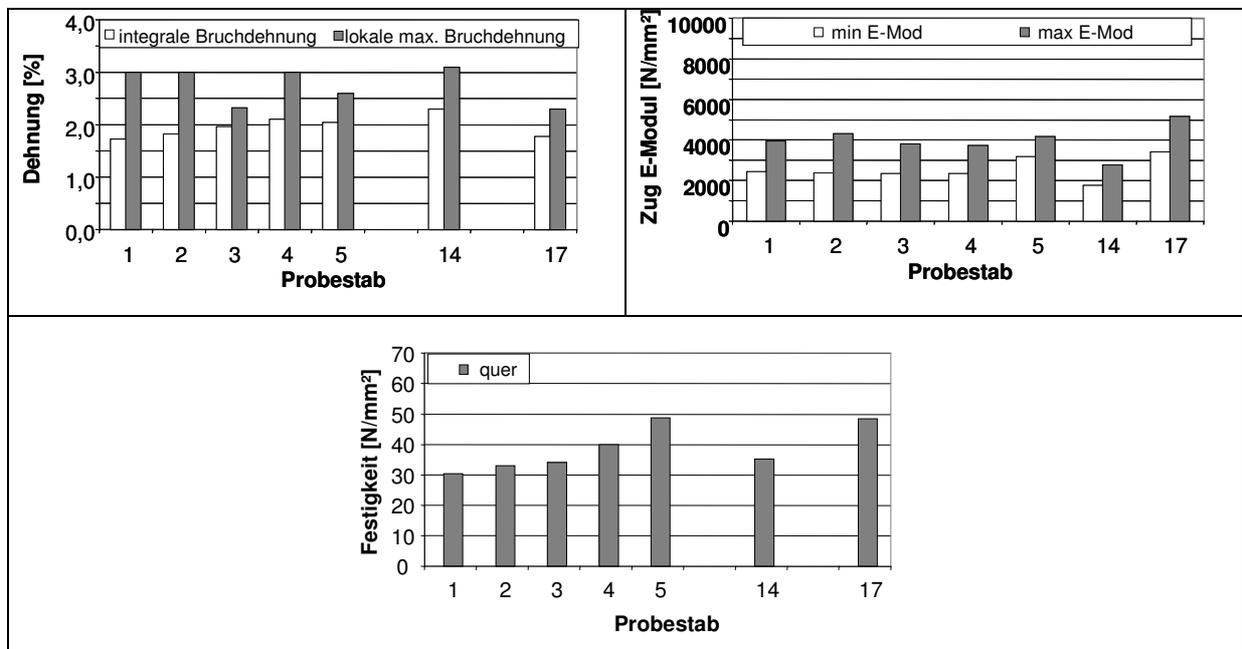
Als Beispiel wird die Probenplatte mit 30 Gew.-% genauer betrachtet (**Abb. 7-1**, **Abb. 7-2**). Die lokale Bruchdehnung weist einen Mittelwert von ca. 2,7 % bei senkrechter Probenentnahme auf, bei paralleler Probenentnahme ca. 2,4 %. Dabei wird eine relativ geringe Streuung der maximalen Bruchdehnungen beobachtet. Die mittels Integral über eine größere Messlänge ermittelte Bruchdehnung ist naturgemäß niedriger als die lokal gemessene.

Eine Gegenüberstellung der Bruchdehnungen (**Abb. 7-3**, **Abb. 7-4**) bei unterschiedlichem Faservolumengehalt und unterschiedlichen Orientierungszuständen zeigt, dass der Wert geringfügig mit dem Fasergehalt absinkt, bei paralleler Entnahme etwas geringer ist als bei senkrechter und die gemittelte lokale Bruchdehnung der einzelnen Fasergehalte und Entnahmerichtungen zwischen 2,2 und 2,8 % liegt. Die Werte weisen damit wie angesprochen eine relativ geringe Streuung auf. Demgegenüber zeigen die Festigkeitswerte längs und quer eine starke Abhängigkeit von der Faserorientierung und eine gegenüber der Dehnung zumeist leicht erhöhte Streuung der Kennwerte.

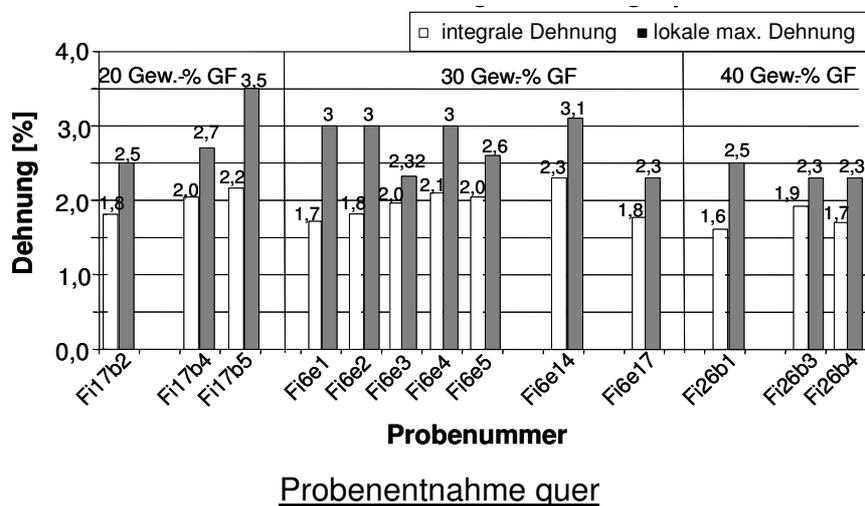
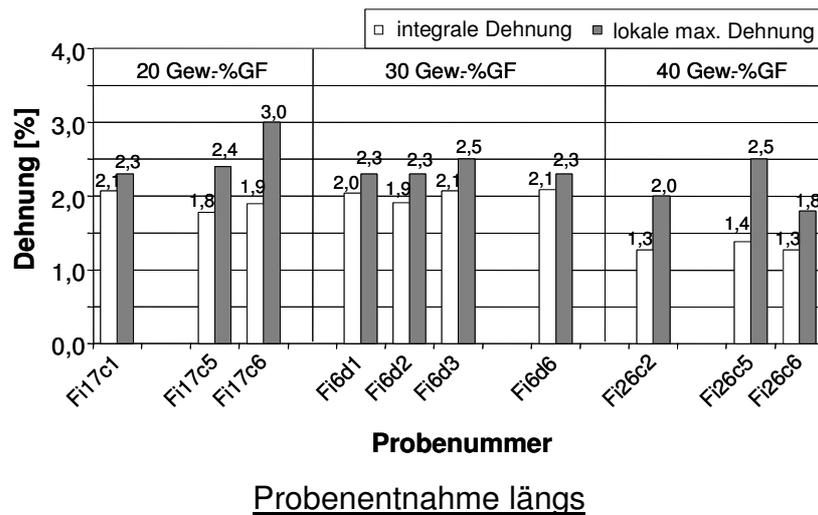
Dieser Befund der geringen Streuung der lokalen Bruchdehnung ist trotz der unterschiedlichen Fasergehalte und der deutlichen Unterschiede der Strukturparameter, die ihre Ursache z. B. in lokalen Inhomogenitäten, Anisotropien und Zonen mit Lunkern und Benetzungsschwächen haben, bemerkenswert. Offenbar führen diese Strukturphänomene zu einem lokalen Versagen mit nahezu ähnlicher Bruchdehnung. Dieses interessante Charakteristikum des Werkstoffs macht das robuste Verhalten bei mechanischer Belastung von D-LFT-Bauteilen verständlich.



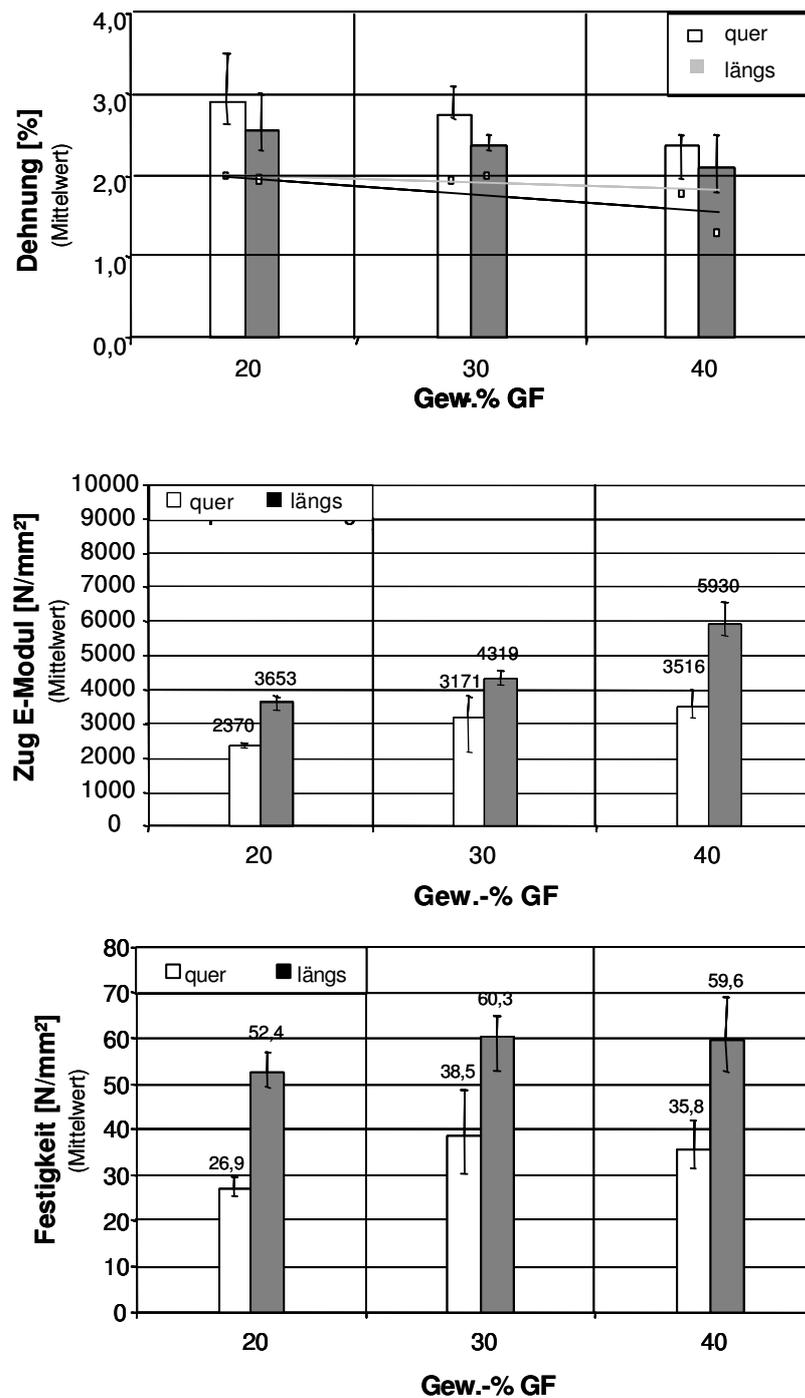
**Abb. 7-1:** Lokaler Spannungs-Dehnungsverlauf, Röntgenbild mit Angabe der Bruchzone und der Verlauf des lokalen E-Moduls (D-LFT, 30 Gew.-% GF, Probenentnahme längs (Probestab Fi6d6), Probenentnahme quer (Probestab Fi6e4), Abzugsgeschwindigkeit 1mm/min)



**Abb. 7-2:** Bruchdehnung, E-Modul, Festigkeit von Probestäben einer Platte (D-LFT, 30 Gew.-% GF, Probenentnahme quer)



**Abb. 7-3:** Einfluss von Glasfasergehalt und Entnahmerichtung auf Werte der Bruchdehnung (Mittelwerte und lokale max. und integrale Werte) (D-LFT, 30 Gew.-% GF, Probenentnahme längs und quer)

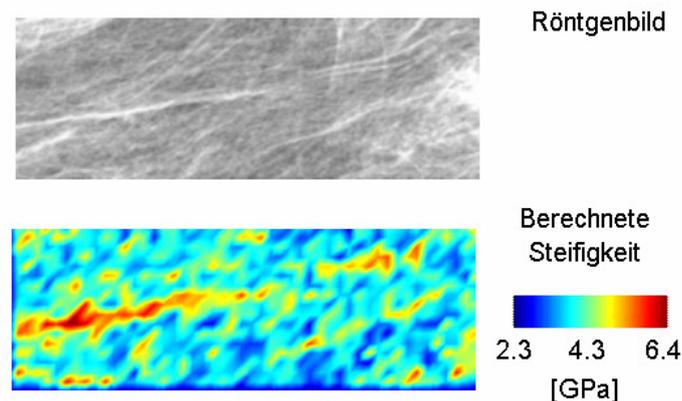


**Abb. 7-4:** Einfluss von Glasfasergehalt und Entnahmerichtung auf Mittelwerte und lokale max. und integrale Werte der Bruchdehnung, des E-Moduls und der Festigkeit (Darstellung von Mittelwerten und min./max. Werten) (D-LFT, 30 Gew.-% GF, Probenentnahme längs und quer)

### 7.1.2 Gefügebasierte Simulation der inhomogenen lokalen mechanischen Eigenschaften

Aus dem zuvor genannten Kontext heraus ist es nahe liegend, dass die Korrelation von Gefügeinhomogenität und den mechanischen Eigenschaften von besonderem Interesse ist. Im Rahmen des Graduiertenkollegs wurde daher in einem Parallelvorhaben versucht, eine gefügebasierte Simulation der inhomogenen lokalen mechanischen Eigenschaften von wirrfaserverstärkten Kunststoffen durchzuführen /GAL04/.

Zur Simulation der lokalen Kennwerte aufgrund der Gefügeanalyse erfolgt im ersten Schritt die experimentelle Gefügecharakterisierung anhand von Röntgenaufnahmen und der Ermittlung des lokalen Fasergehalts. Die Berechnung der Faserorientierung erfolgt anhand von Röntgenaufnahmen mit Hilfe der Gradientenmethode /DIE96/. Der Faservolumengehalt wird anhand der Helligkeit der Röntgenaufnahme bestimmt, was allerdings aufgrund des begrenzten Auflösungsvermögens des Verfahrens derzeit nicht ausreichend genau ist. Unter Verwendung der klassischen Laminattheorien und Halpin-Tsai Gleichungen können die lokalen mechanischen Kennwerte ermittelt werden (**Abb. 7-5**).



**Abb. 7-5:** Röntgenbild des Probestabs aus einer D-LFT (oben) und die berechneten lokalen Steifigkeiten entlang der Probe (unten)

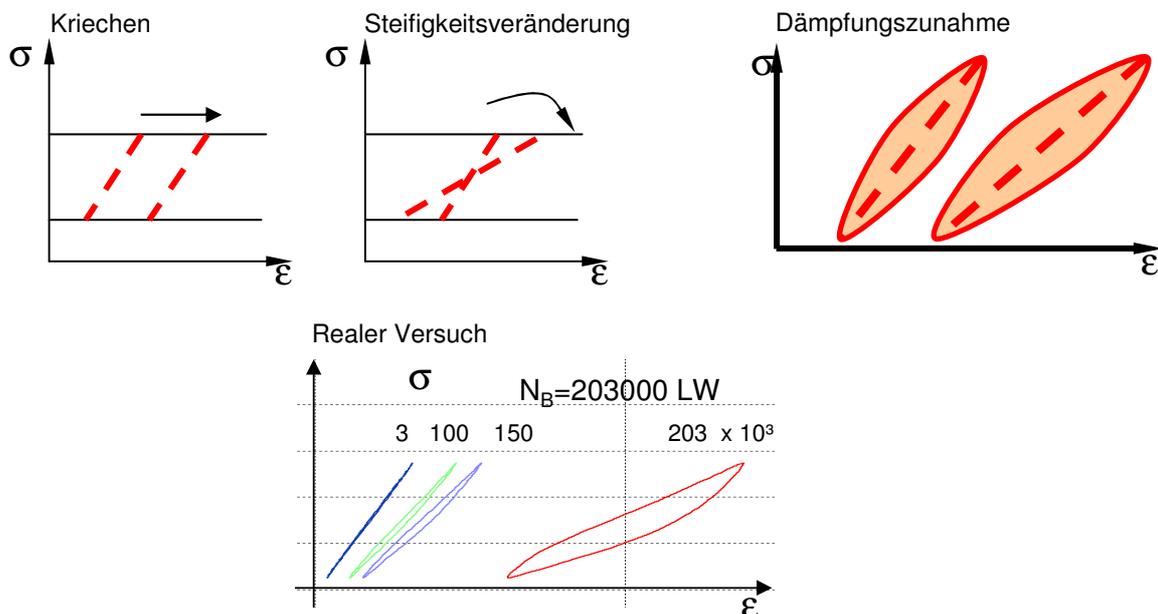
### 7.1.3 Ermüdungsverhalten bei Zugschwellbelastung

Die Untersuchungen wurden bei Zugschwellbelastung durchgeführt, die eine einfach zu realisierende Beanspruchung darstellt.

Die deutlich inhomogenen Eigenschaften des Werkstoffs würden bei normal durchgeführten Ermüdungsuntersuchungen aufgrund der Kennwertstreuungen des Probenmaterials zu nicht prognostizierbaren Lastspielzahlen führen und an sich die Durchführung von Ermüdungsversuchen verbieten. Nur durch die in Kapitel 6.1.2.1 dargestellte Strategie der differenzierten Voruntersuchung der Werkstoffproben konnten überhaupt Ermüdungsuntersuchungen mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden.

Bei der Zugschwellbelastung treten als Folge der Schädigung Werkstoffkriechen, Steifigkeitsabnahme und eine Zunahme der Werkstoffdämpfung auf (**Abb. 7-6**). Die mechanisch-dynamischen Kennwerte charakterisieren im Wesentlichen den Verlauf

der Dehnungen (max, min), der Steifigkeit (Dyn. Modul), des Kriechens (Mitteldehnung) und der Dämpfung.



**Abb. 7-6:** Schädigungseffekte bei Zugschwellbelastung: Werkstoffkriechen, Steifigkeitsabnahme, Zunahme der Werkstoffdämpfung

Im Hinblick auf den beobachteten starken Kriecheinfluss und die unterschiedliche Steifigkeitsabnahme ist es interessant, diese Effekte dehnungsorientiert darzustellen, um sie direkt vergleichen zu können. Hierzu wird die Ausschlagsdehnung (im Zugbereich)  $\varepsilon_a = (\varepsilon_o - \varepsilon_m)$  eingeführt (**Abb. 5-4**).

### 7.1.3.1 Dehnungsorientierte Analyse des Kriechens und der Steifigkeitsabnahme

Die versuchsbegleitenden Untersuchungen mittels ortsaufgelöster Hysteresismessung zeigen, dass von einem primären, sekundären und tertiären Veränderungs- bzw. Schadensprozess ausgegangen werden kann (**Abb. 7-7** bis **Abb. 7-9**). Vereinfachend wird nachfolgend nur der Verlauf im sekundären Bereich analysiert. Es werden Untersuchungen von Probestäben aus Platten (längs und quer) vorgestellt.

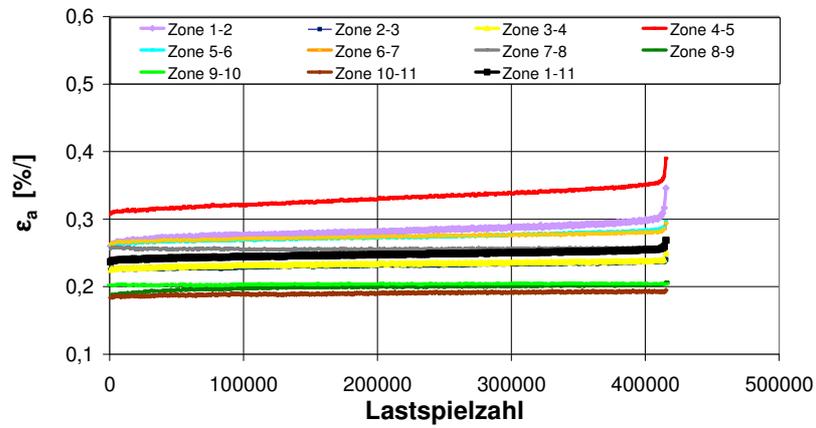
#### Lokale Analyse eines Probestabs

Es werden sämtliche Zonen, die Schadenszone und der integrale Messbereich betrachtet (**Abb. 7-7**, **Abb. 7-8**). Für die Schadenszone ist die Kriechdehnung deutlich höher als die Ausschlagsdehnung. Daraus kann geschlossen werden, dass der Ermüdungsvorgang im Wesentlichen auf Kriechen und nicht auf Faserbruch und -auszug (führt zu Steifigkeitsabnahme) zurückzuführen ist.

Die Messwertveränderungen für den integralen Messbereich sind gegenüber der Schadenszone wesentlich geringer. Daraus folgt, dass eine üblicherweise durchgeführte integrale Messung eine nicht zutreffende Aussage über das schadensrelevante Dehnungsgeschehen macht.

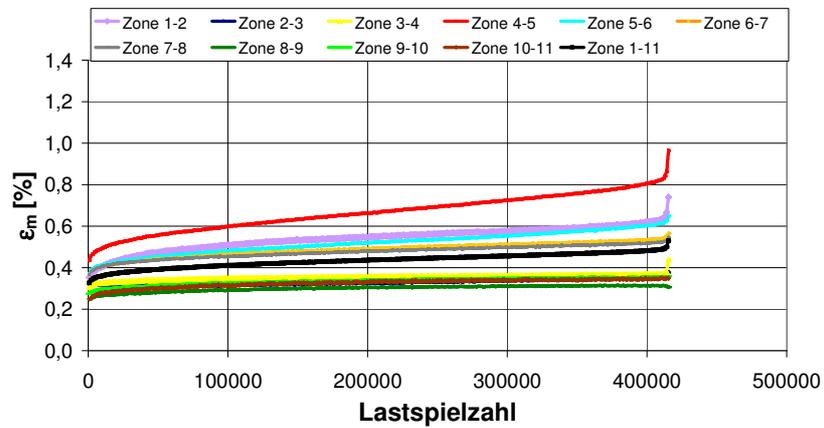
### Ausschlagsdehnung , D-LFT, längs, Fi6f21

Bruchzone: 4-5



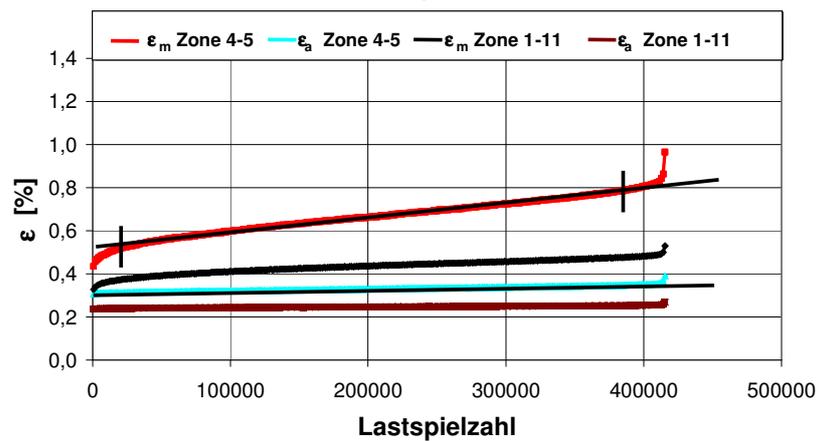
### Dehnung mdl , D-LFT, längs, Fi6f21

Bruchzone: 4-5

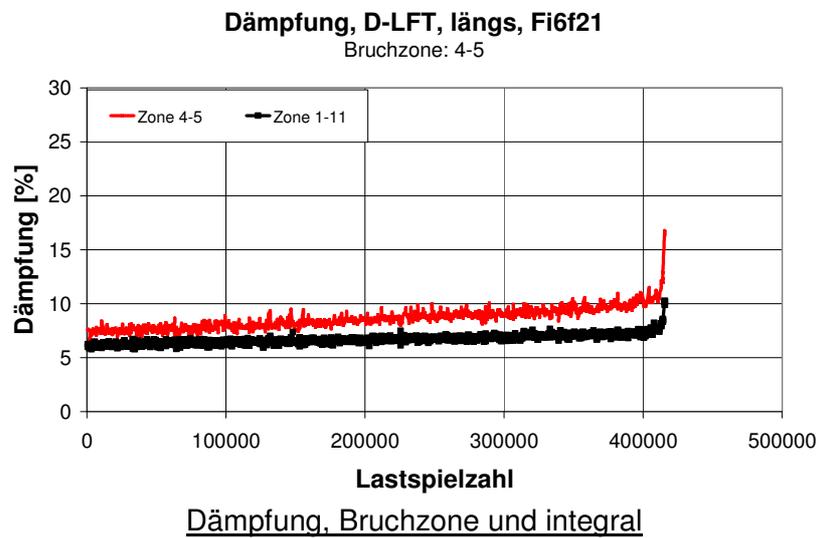
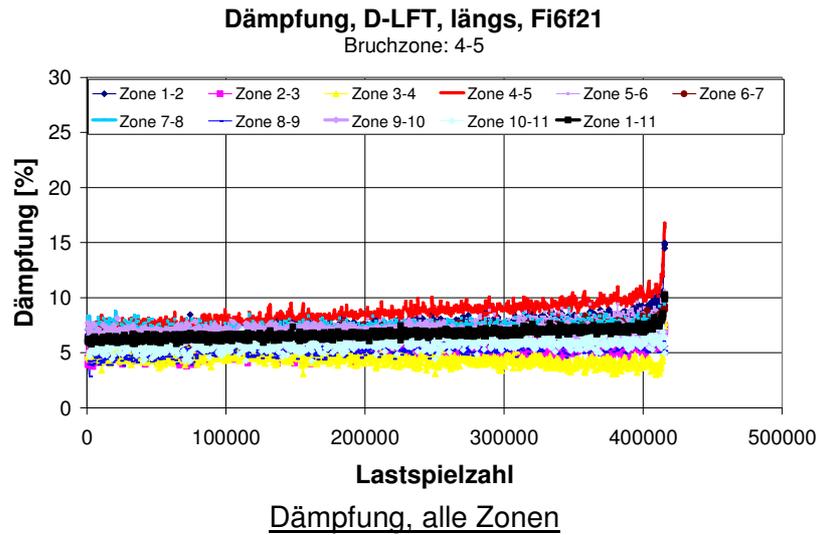


### Ausschlagsdehnung, Dehnung mdl, Zone 4-5, 1-11

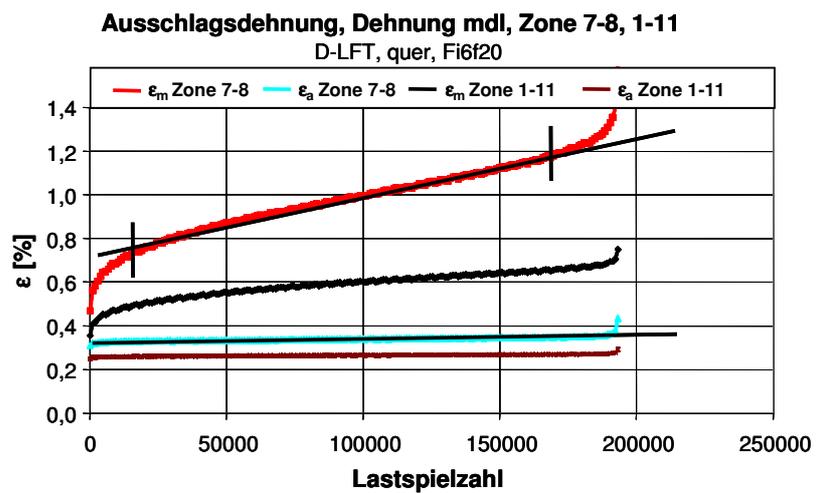
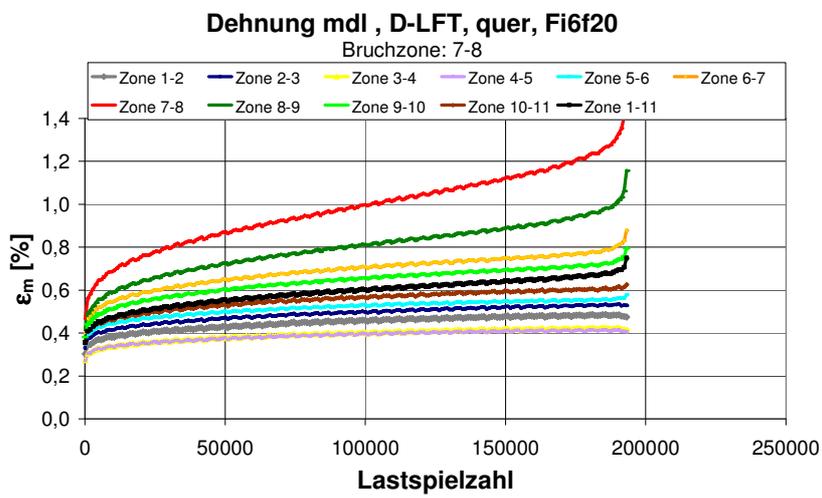
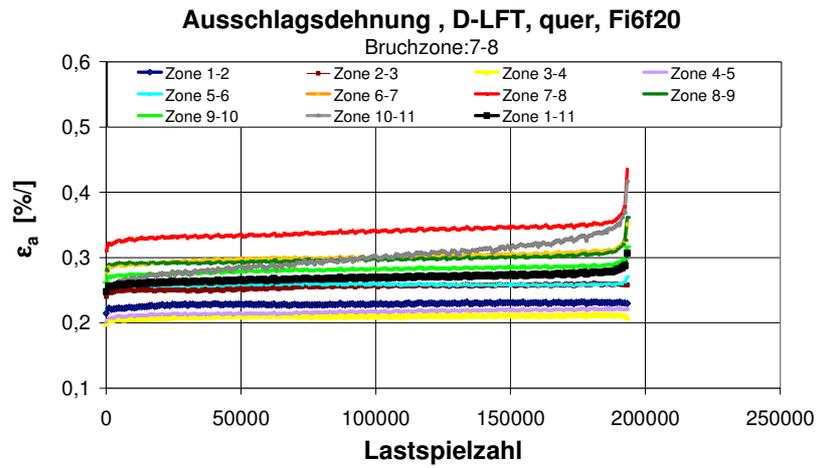
D-LFT, längs, Fi6f21



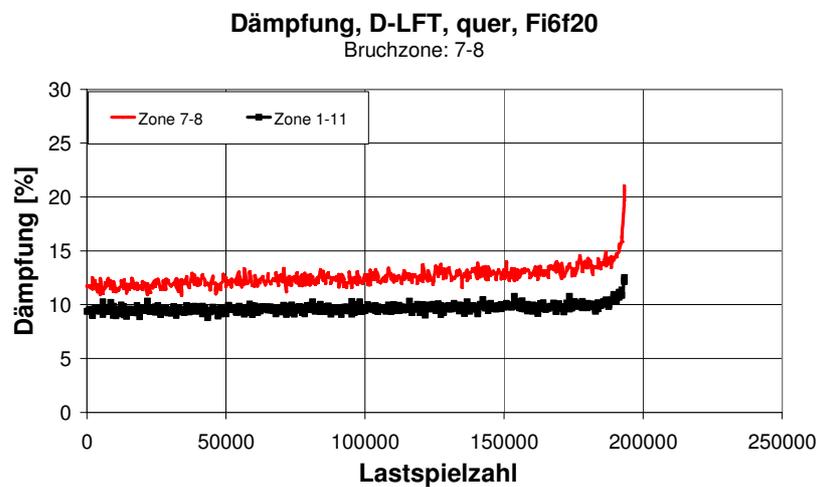
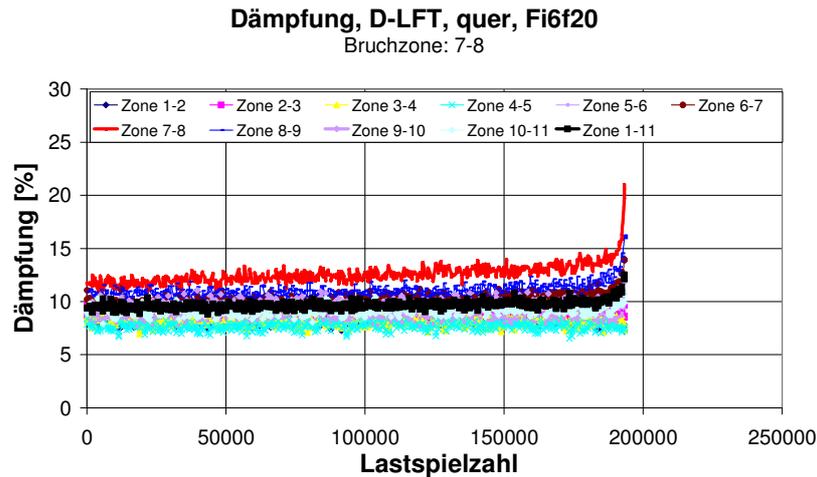
### Ausschlags- und Mitteldehnung, Bruchzone und integral



**Abb. 7-7:** Ausschlags-, Mitteldehnung und Dämpfung eines Ermüdungsversuchs; sämtliche Zonen und Schaden- und integrale Zone (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs, Probe Fi6f21, 5 Hz, RT,  $\sigma_a=15,5 \text{ N/mm}^2$ , Streifenabstand 5 mm)



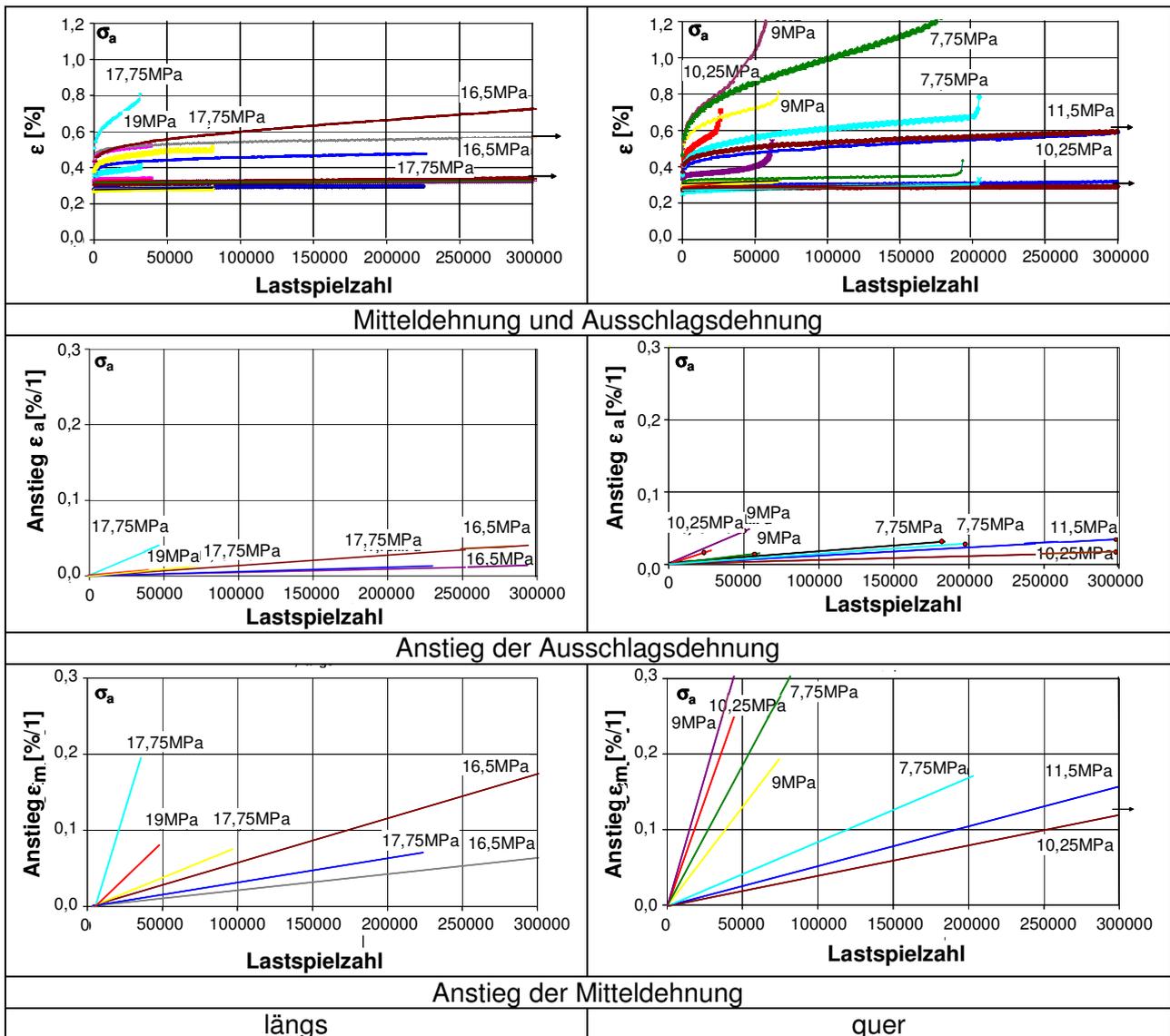
Ausschlags- und Mitteldehnung, Bruchzone und integral



**Abb. 7-8:** Ausschlags-, Mitteldehnung und Dämpfung eines Ermüdungsversuchs; sämtliche Zonen und Schaden- und integrale Zone (D-LFT, 30 Gew.-% GF, quer, Probe Fi6f20, 5 Hz, RT,  $\sigma_a=7,75$  N/mm<sup>2</sup>, Streifenabstand 5 mm)

### Verhalten der Schadenszone von Probestäben

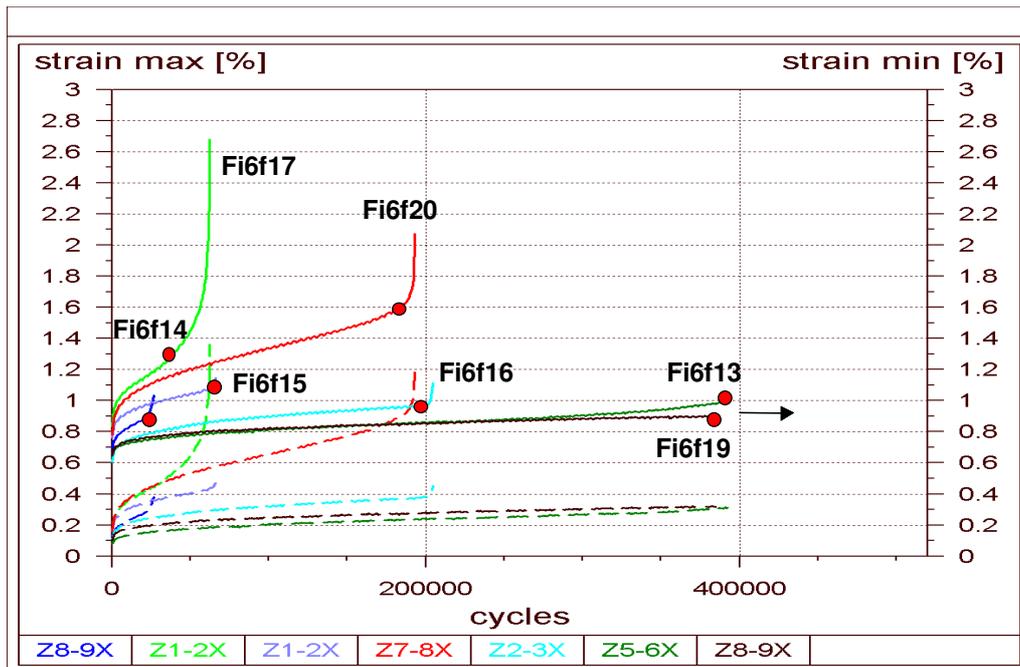
Im Rahmen der Auswertung von Wöhlerversuchen wird von jedem Probestab ausschließlich die Schadenszone betrachtet. Die Versuchsauswertungen zeigen, dass der Kriechanteil gegenüber dem Anstieg der Zugdehnung dominiert (**Abb. 7-9**). An sich würde man eine direkte Beziehung zwischen der Mittel- und Ausschlagsdehnung und der Spannungsamplitude erwarten. Allerdings weisen die Proben eine nicht unerhebliche lokale Streuung der Eigenschaften auf, die diesem Spannungseffekt deutlich überlagert ist. Bei Faserorientierung quer liegt eine besonders starke Kriechneigung vor. Um die Veränderungsgeschwindigkeit der Mitteldehnung und der Ausschlagsdehnung zu charakterisieren, wird der Anstieg der Kurven im sekundären Bereich ermittelt. Die Gegenüberstellung der Diagramme zeigt den starken Anstieg der Mitteldehnung gegenüber der Ausschlagsdehnung, was den intensiven Kriecheinfluss erkennen lässt.



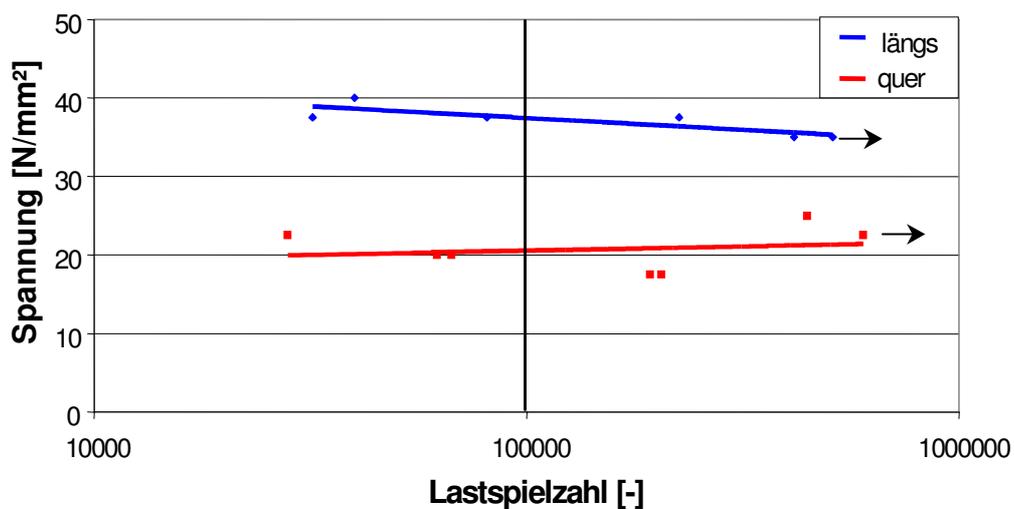
**Abb. 7-9:** Eigenschaften der Schadenszonen bei Ermüdungsuntersuchungen: Mitteldehnung und Ausschlagsdehnung, Anstieg der Ausschlagsdehnung und der Mitteldehnung, Verhältnis des Anstiegs von Ausschlagsdehnung zu Mitteldehnung, (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs, quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)

### 7.1.3.1.1 Spannungs- und Totaldehnungswöhlerkurven

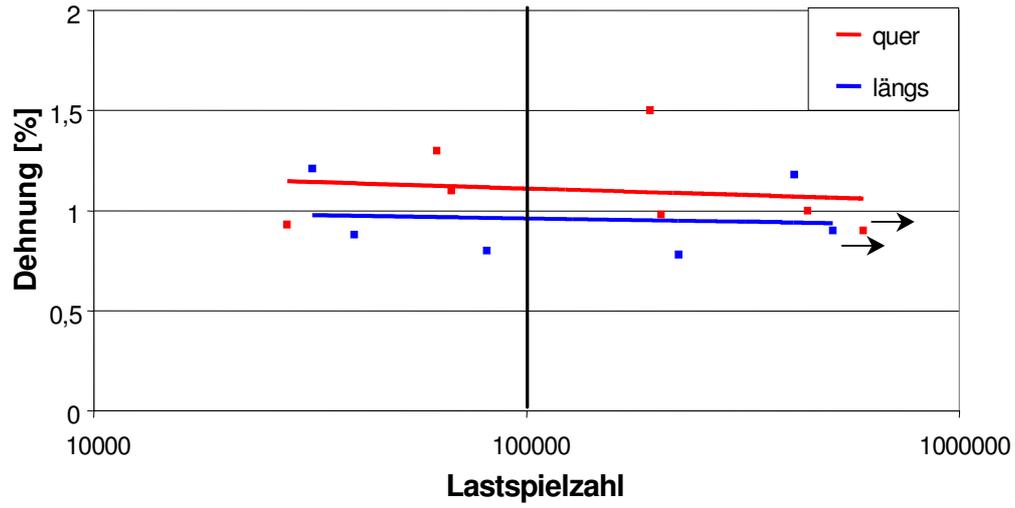
Die Auswertung der Wöhlerversuche erfolgt üblicherweise in einem Spannungs-Wöhlerdiagramm (**Abb. 7-11**). Dieses Diagramm zeigt den Verlauf der Wöhlerlinien für Entnahmerichtungen längs und quer. Ähnlich wie beim Zugversuch erfolgt eine dehnungorientierte Analyse. Hierbei wird als signifikante Größe auf die maximale Totaldehnung (strain max) beim Übergang in den tertiären Bereich zurückgegriffen (**Abb. 7-10**). Für die betrachtete Lastspielzahl (10E5) zeigt sich, dass der durch die Ausgleichgeraden gegebene Mittelwert der Totaldehnung für längs und quer bei 0,8-1,3% liegt (**Abb. 7-12**).



**Abb. 7-10:** Maximale Dehnung mit Angabe des Übergangs in den tertiären Bereich (D-LFT, 30 Gew.-% GF, quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)



**Abb. 7-11:** Spannungs-Wöhlerdiagramm (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs und quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)



**Abb. 7-12:** Totaldehnungswöhlerdiagramm (maximale Dehnung beim Übergang in den tertiären Bereich) (D-LFT, 30 Gew.-% GF, längs und quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)

## 7.2 Gewebeverstärkter Thermoplast

### 7.2.1 Gefüge und lokale Deformationsanalyse

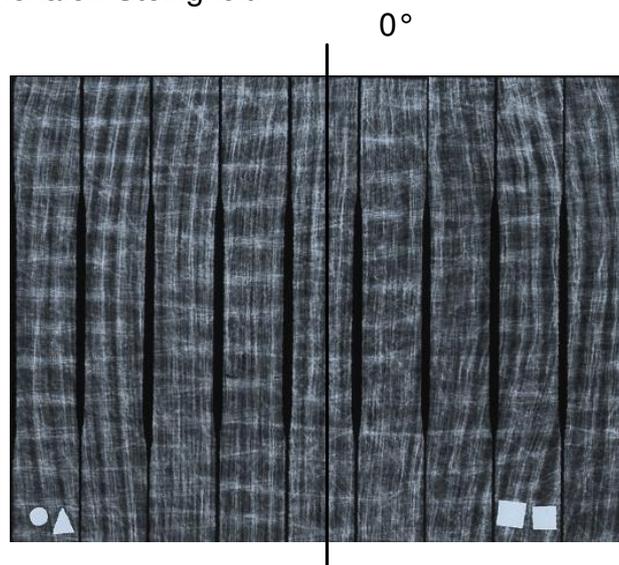
#### 7.2.1.1 Gegenüberstellung von Gefüge und realem Deformationsverhalten

Der Werkstoff besitzt einen dreischichtigen Aufbau: er besteht aus zwei Außenlagen aus Gewebe und einer Matte mit Wirrfaserstruktur als Mittellage. Die Gewebelage hat eine Vorzugsorientierung (Anteile längs zu quer wie 4:1). Der Werkstoff weist aufgrund dieses Aufbaus eine anisotrope und insbesondere durch die Gewebestruktur eine lokal inhomogene Faserstruktur auf, wobei sich die Effekte der Vorder- und Rückseite überlagern und zusätzlich noch ein Einfluss der mittleren Wirrfasermatte vorliegt. Es wurde versucht, eine direkte Korrelation zwischen lokaler Gefügestruktur und dem lokalen Deformationsverhalten zu finden, was allerdings nicht gelang (Kap. 6.3.1.1).

#### 7.2.1.2 Faserorientierung: Experiment und Simulation

Ein anderer Gefügeaspekt ist die lokale Orientierung der Fasern und Faserbündel. Aufgrund des Pressprozesses tritt ein Fließen der Faserbündel auf, wobei die äusseren Lagen stärker gekrümmt werden können als die inneren. Bei Charge 1 ist dies besonders ausgeprägt (**Abb. 7-13**).

Es wird daher der Einfluss der Faserkrümmung auf die Steifigkeit des Werkstoffes nach Laminattheorie (Software-Programms „The Laminator“ /LIN05/) unter Zugrundelegung von Werkstoffkennwerten (**Tab. 7-1**) berechnet. Die lokalen Steifigkeiten werden im Zugversuch ermittelt (0,4% Dehnung) (**Abb. 7-14** bis **Abb. 7-16**). Der Vergleich von Rechnung und Experiment zeigt, dass keine deutliche Korrelation zwischen Faserorientierung und berechneten E-Moduli vorliegt. Offenbar bestimmen andere Struktureffekte, wie z.B. die lokale Faserkonzentration intensiver die Ausprägung der lokalen Steifigkeit.



**Abb. 7-13:** Röntgenaufnahme der gepressten Platte und der daraus hergestellten Probekörper (Platte 300x300 mm, Gewebeverstärkter Thermoplast, Platte EP3a, 1. Charge)

Kennwerte	Glasfaser	PP-Matrix
E-Modul [MPa]	73000	1500
G-Modul [MPa]	28295	573
Poissonzahl [1]	0,29	0,31
Gewichtsanteil [%]	40	60

Tab. 7-1: Eigenschaften für Fasern und Matrix /AAR96/

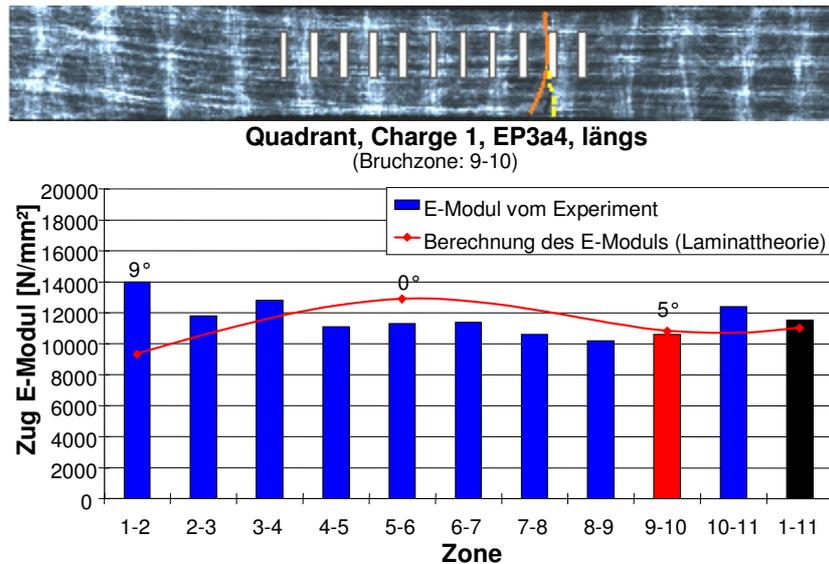


Abb. 7-14: Berechnung des E-Moduls aus Laminattheorie und Experiment (Gewebeverstärkter Thermoplast, EP3a4, Charge 1, längs, Zugschwellbelastung)

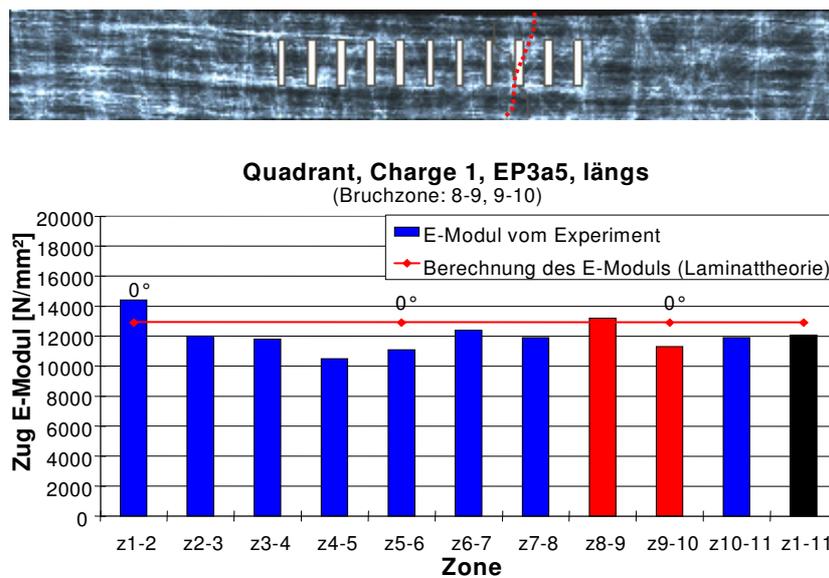
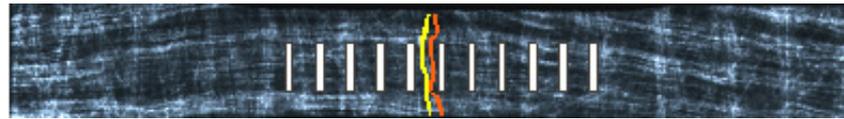
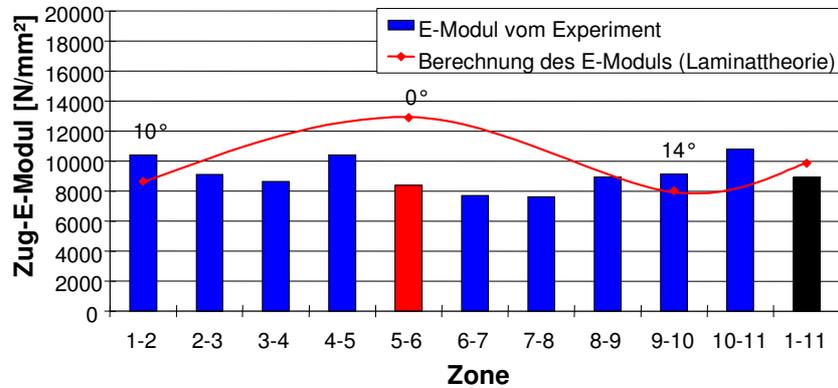


Abb. 7-15: Berechnung des E-Moduls aus Laminattheorie und Experiment (Gewebeverstärkter Thermoplast, EP3a5, Charge 1, längs, Zugschwellbelastung)



Quadrant, Charge 1, Ep3a7, längs



**Abb. 7-16:** Berechnung des E-Moduls aus Laminattheorie und Experiment (Gewebeverstärkter Thermoplast, EP3a7, Charge 1, längs, Zugschwellbelastung)

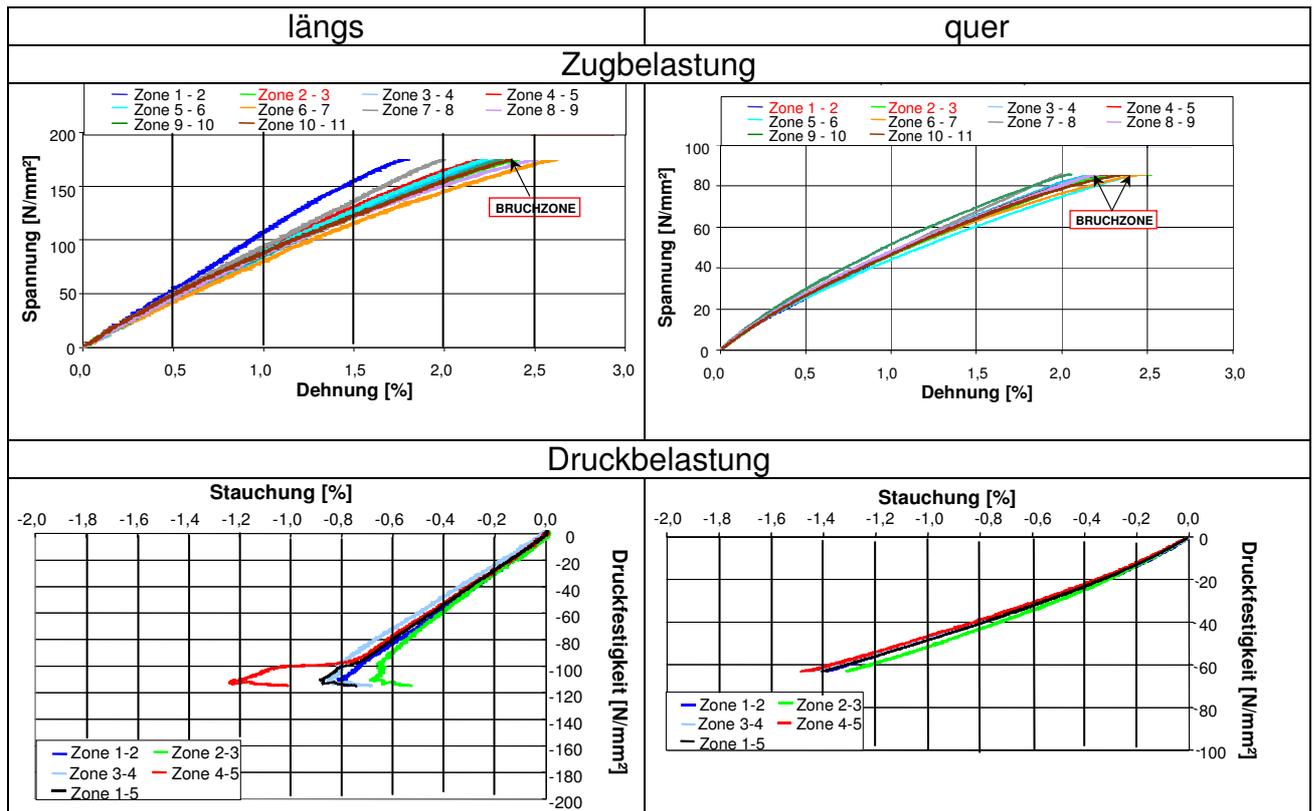
## 7.2.2 Quasistatische Zug- und Druckversuche

### 7.2.2.1 Lokales Deformationsverhalten

Unter Verwendung des Laserextensometers werden Zug- und Druckversuche an den in Längs- und Querrichtung entnommenen Proben durchgeführt. Die hohe Qualität der Messergebnisse (insbesondere beim Druckversuch) ist auf den Einsatz des Laserextensometers zurückzuführen.

Bei Belastung in Längsrichtung liegen lineare oder nur schwach gekrümmte Spannungs-Dehnungs-Diagramme vor. Bei Belastung quer zur Faserrichtung liegt ein ausgeprägtes nichtlineares Verhalten vor (**Abb. 7-17**).

Die einzelnen Zonen zeigen aufgrund der Inhomogenität unterschiedliche Steifigkeiten. Zumeist liegt die Bruchzone im Bereich des geringsten lokalen E-Moduls. Die lokale Versagensdehnung der Versuche insgesamt liegt beim Zugversuch im Bereich von ca. 2%, beim Druckversuch bei ca. 0,8 - 1,5%. Die Bruchzonen erstrecken sich über eine bzw. zwei Zonen des Laserextensometers (Streifenabstand 5 mm).

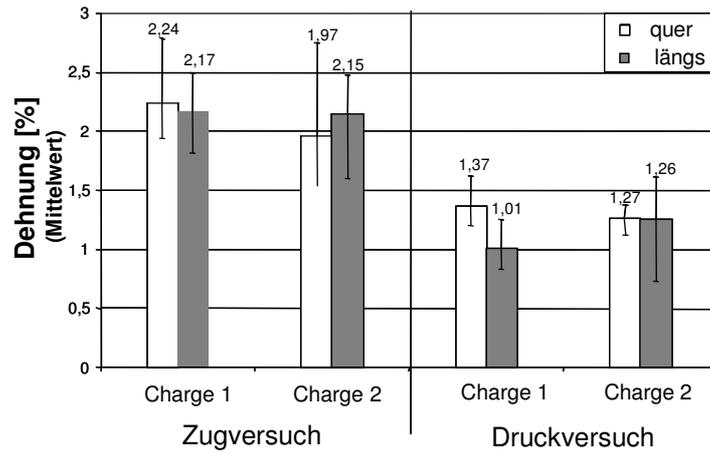


**Abb. 7-17:** Spannungs-Dehnungs-Diagramme bei Zug- und Druckbelastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Zugbelastung (längs, Probe EP1a3, Charge 1; quer, Probe EP2a3, Charge 1), Druckbelastung (längs, Probe Alt11, Charge 1; quer, Probe Alt21, Charge 1))

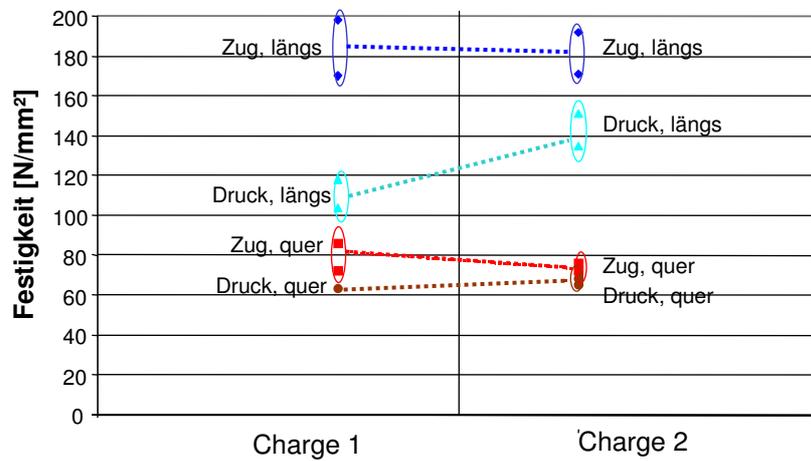
### 7.2.2.2 Zug- und Druckfestigkeit

Die Versuchsergebnisse werden in Form der lokalen Bruchdehnung und der Festigkeit angegeben. Die lokalen Bruchdehnungen der Schadenszonen bei Zugbelastung liegen deutlich über jenen bei Druckbelastung. Der Unterschied der Bruchdehnung für Längs- und Querbelastung ist relativ gering. Hinsichtlich der Festigkeit (Zug-, Druckversuch, längs, quer, Charge 1, 2) ergibt sich folgendes Bild: bei Charge 1 liegt ein deutlicher Unterschied der Zug- und Druckfestigkeit vor (Längsbelastung), während bei Charge 2 diese Werte ähnlich sind. Bei Belastung quer zur Faserrichtung sind die Unterschiede bei Charge 1 und 2 relativ gering (**Abb. 7-18, Abb. 7-19**).

Als Ursache für die hohe Druckfestigkeit bei Charge 2 können die angestrebte Lunkerfreiheit und die bessere Faser-Matrix-Haftung angesehen werden, die z.B. das frühe Mikroklicken der Einzelfasern verhindern könnten. Ein direkter Nachweis möglicher mikrostruktureller Effekte wurde jedoch nicht durchgeführt.



**Abb. 7-18:** Betrag der lokalen Bruchdehnung (min. und max. Werte) (Gewebeverstärkter Thermoplast, längs, quer, Charge 1 und 2 )



**Abb. 7-19:** Zug- und Druckfestigkeit (min. und max. Werte) (Gewebeverstärkter Thermoplast, längs, quer, Charge 1 und 2 )

### 7.2.3 Zugschwellbelastung

Wie beim Werkstoff D-LFT wurde auch hier durch eine detaillierte Voruntersuchung der einzelnen Werkstoffproben ein qualifiziertes Einpeilen der Spannungshorizonte ermöglicht (siehe Kap 6.2.2.1.1), was nur durch die Kopplung von Messverfahren möglich (Laserextensometer und TSA) ist.

Wie bei der Diskussion des D-LFT-Werkstoffs angesprochen, tritt als Folge der Schädigung ein Kriechvorgang, eine Steifigkeitsabnahme und eine Zunahme der Werkstoffdämpfung auf. Ergänzend zu den mech.-dynamischen Kennwerten (strain max, min, Steifigkeit (Dyn. Modul), Mitteldehnung, Dämpfung) wird auch hier noch ergänzend die sog. Ausschlagsdehnung betrachtet.

#### 7.2.3.1 Dehnungsorientierte Analyse des Kriechens und der Steifigkeitsabnahme

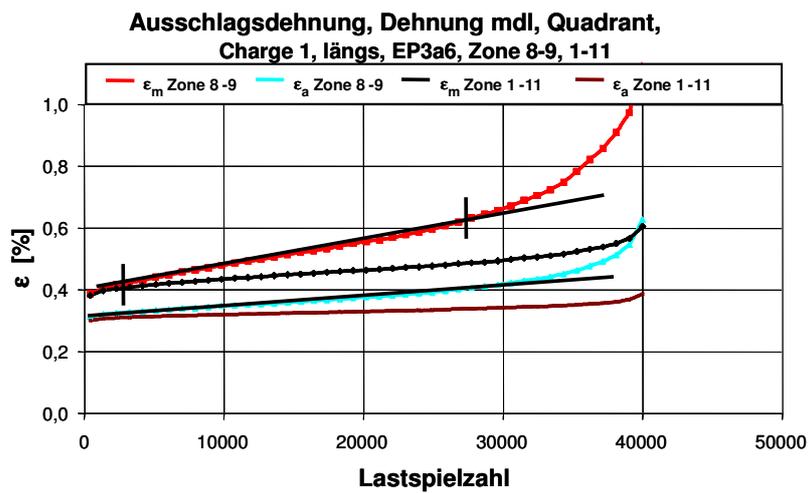
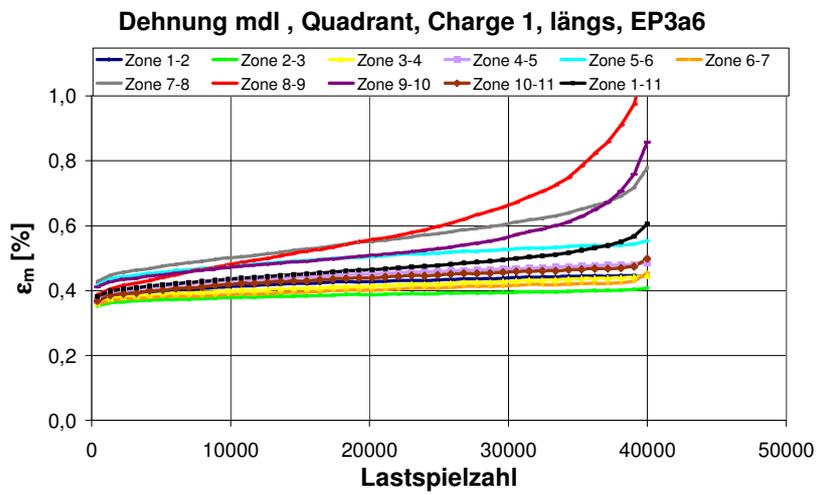
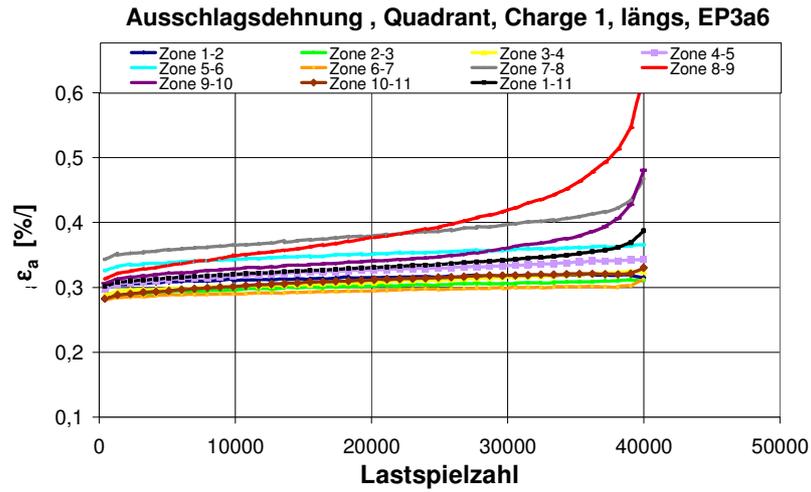
##### Lokale Analyse eines Probestabs

Nachfolgend wird das Ermüdungsverhalten signifikanter Versuche anhand des Verlaufs ausgesuchter mechanisch-dynamischer Kennwerte über der Lastspielzahl für Entnahmerichtungen längs und quer, Charge 1 (**Abb. 7-20**, **Abb. 7-21**) dargestellt.

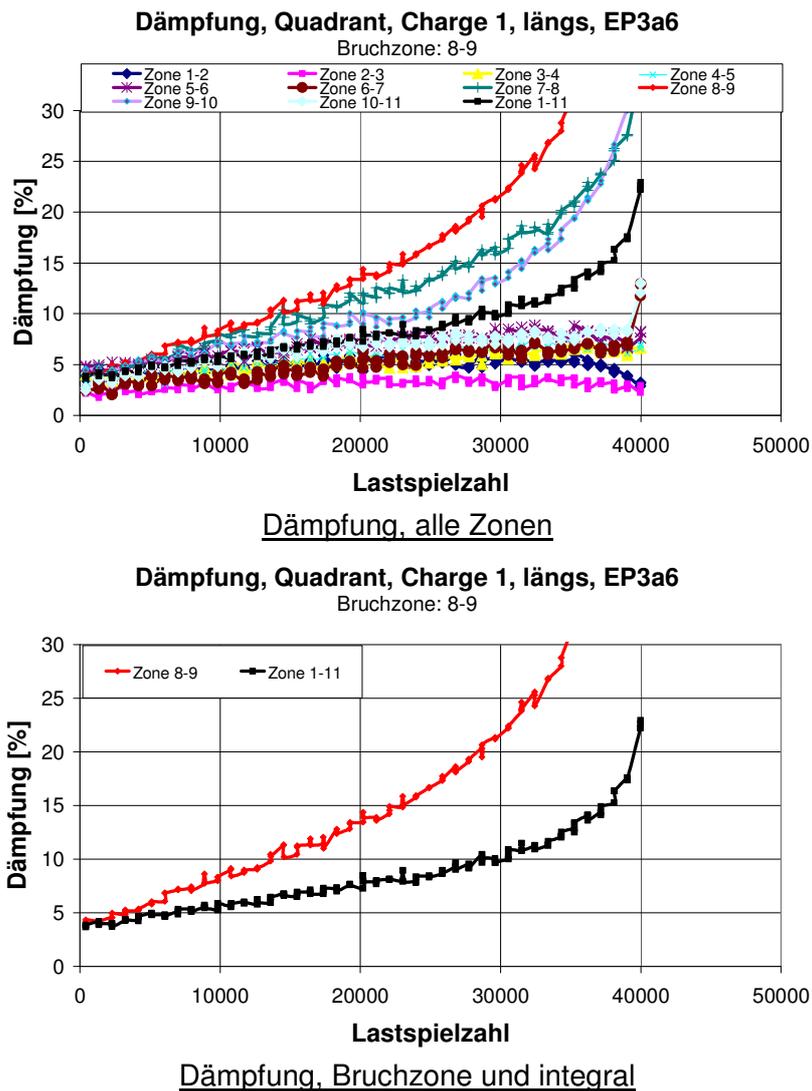
Einheitlich ist festzuhalten, dass mit zunehmender Lastspielzahl eine Zunahme der Ausschlags- und Mitteldehnung und eine Zunahme der Dämpfung zu beobachten ist. Diese Veränderungen sind für die Schadenszone zumeist besonders stark ausgeprägt.

Die z.T. extreme Zunahme der Dämpfung ist auf die Zunahme innerer Reibungsvorgänge z.B. durch sukzessive Abnahme der Grenzflächenanbindung von Faser und Matrix und z.B. durch Reibungserhöhung an Faserenden aufgrund von Faserverkürzung (infolge Faserbrüchen) zurückzuführen. Die Tatsache, dass sich die Dämpfung erst im Verlauf des Ermüdungsversuchs derart intensiv entwickelt, ist mit besonderer Aufmerksamkeit zu betrachten, da z.B. im Rahmen einer Qualitätssicherung der sich erst langsam entwickelnde Effekt nicht beobachtet werden kann.

Hinsichtlich der Kriech- und Ausschlagsdehnung werden die Schadenszone und der integrale Messbereich besonders betrachtet. Für die Schadenszone beträgt die Ausschlagsdehnung ca. 20 - 40% der Kriechdehnung und ist damit wesentlich höher als bei D-LFT. Die Zunahme der Ausschlagsdehnung ist auf Faserbruch und -auszug zurückzuführen. Ein experimenteller Nachweis wurde jedoch nicht angetreten. Der Kennwertverlauf für den integralen Messbereich ist gegenüber der Schadenszone wesentlich flacher. Daraus folgt, dass eine üblicherweise durchgeführte integrale Messung eine nicht zutreffende Aussage über das reale Dehnungsgeschehen vermittelt.

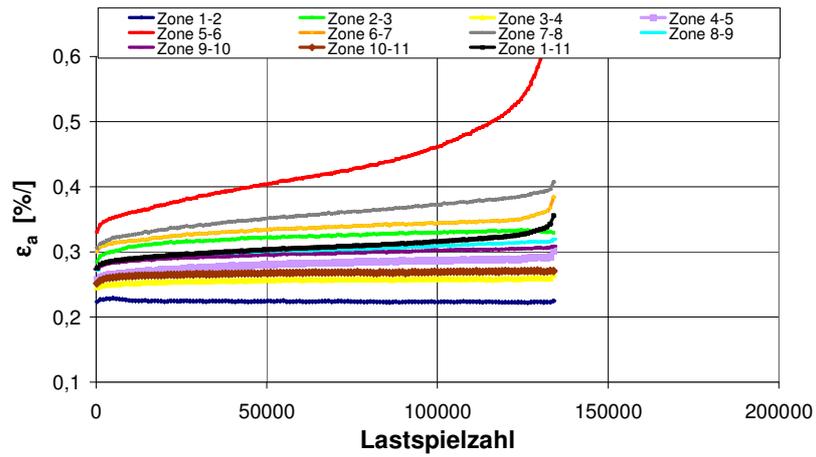


Ausschlags- und Mitteldehnung, Bruchzone und integral

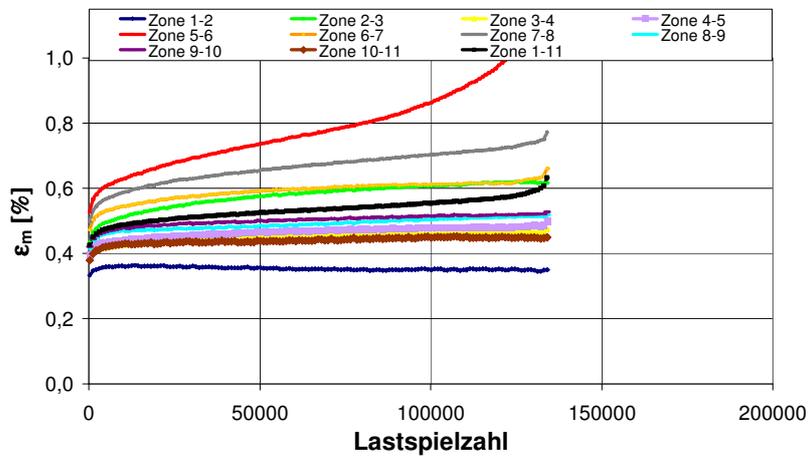


**Abb. 7-20:** Ausschlags-, Mitteldehnung und Dämpfung eines Ermüdungsversuchs; sämtliche Zonen und Schaden- und integrale Zone (Gewebeverstärker Thermoplast, Probenentnahme längs, Probe EP3A6, Charge 1, Streifenabstand 5 mm, 5 Hz, RT,  $\sigma_a = 35 \text{ N/mm}^2$ , RT, NB: ca. 40.000 LW)

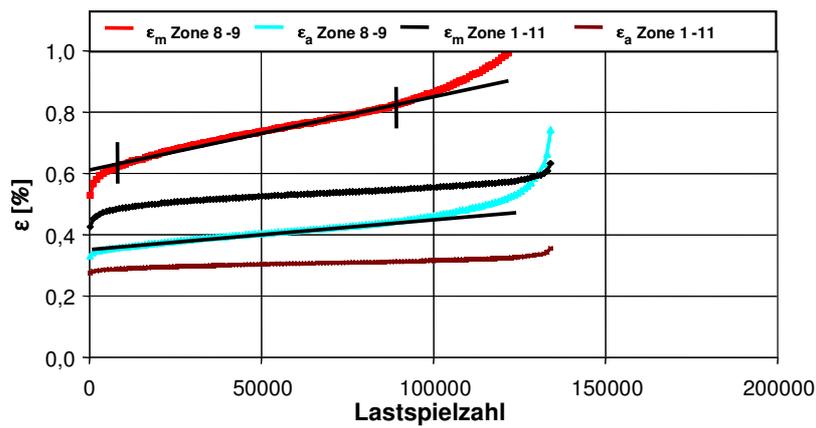
**Ausschlagsdehnung , Quadrant, Charge 1, quer, EP2a8**



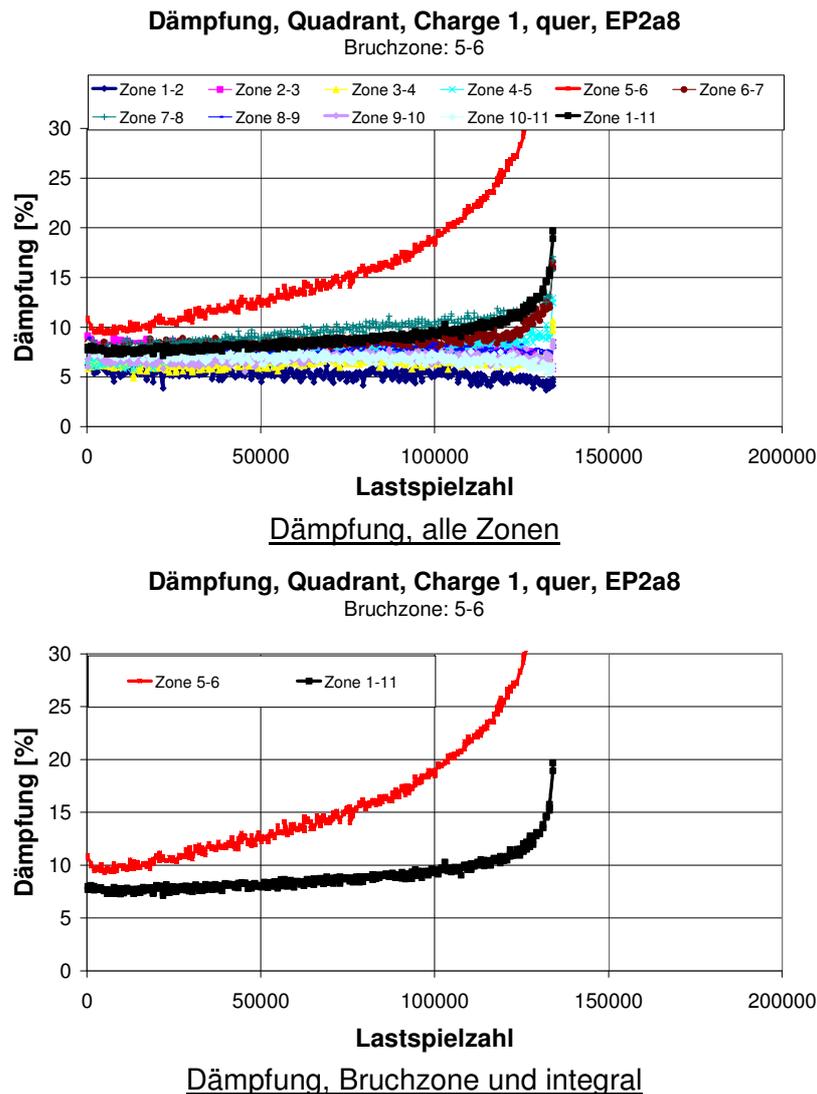
**Dehnung mdl , Quadrant, Charge 1, quer, EP2a8**



**Ausschlagsdehnung, Dehnung mdl, Bruchzone 5-6, Quadrant, Charge 1, quer, EP2a8**



**Ausschlags- und Mitteldehnung, Bruchzone und integral**



**Abb. 7-21:** Ausschlags-, Mitteldehnung und Dämpfung eines Ermüdungsversuchs; sämtliche Zonen und Schaden- und integrale Zone (Gewebeverstärkter Thermoplast, Probenentnahme quer, Probe EP2a8, Charge 1, Streifenabstand 5 mm, 5 Hz,  $\sigma_a = 15 \text{ N/mm}^2$ , RT, NB: ca. 136.000 LW)

### Verhalten der Schadenszone von Probestäben

Aus den Diagrammen (**Abb. 7-22**) kann entnommen werden, dass bei den ausgewählten Versuchen die Ausschlagsdehnung ca. 20 - 40% der Kriechdehnung ausmacht und bei Versuchen mit höherer Lastspielzahl bzw. niedriger Spannung naturgemäß niedriger ausfällt. Allerdings ist dieser Befund nicht so systematisch wie zu erwarten wäre, was auf die Herstellungs- und Kennwertschwankungen der drei untersuchten Platten, aus denen die Probestäbe entnommen wurden, zurückzuführen ist.

Bei vergleichbarer Lastspielzahl ist die Kriechneigung bei Faserorientierung senkrecht höher, was aufgrund des geringen Traganteils der Fasern verständlich ist. Die Dämpfung zeigt bei senkrechter Faserorientierung höhere Anfangswerte, was in der höheren Matrixbelastung begründet ist.



### 7.3 Untersuchungen zum Kriechverhalten

Es wurde untersucht ob zur Ermittlung des Kriechverhaltens bei Ermüdungsbelastung auf das wesentlich einfacher zu ermittelnde Kriechen bei quasistatischer Belastung zurückgegriffen werden kann.

Die Untersuchungen wurden an Proben aus Gewebeversträtktem Thermoplast der Charge1, die parallel zur Einlegerichtung entnommen wurden, durchgeführt.

#### 7.3.1 Messverfahren

Für eine genauere Charakterisierung des Werkstoffs bei statischer und dynamischer Belastung werden Laserextensometer und eine Infrarotkamera eingesetzt.

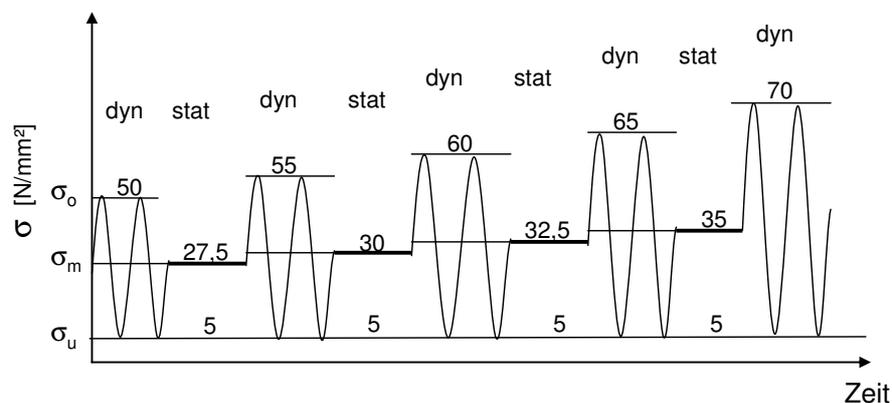
Die Hysteresisschleifen bei den Ermüdungsversuchen zeigen bei der Zugschwellbelastung starkes zyklisches Kriechen des Werkstoffs. Aufgrund der Werkstoffdämpfung erwärmt sich die Probe bei dynamischen Belastung (Messung mit Infrarotkamera).

Es wurden Zugschwellbelastungen und statische Belastungen bei verschiedenen Laststufen aufgebracht. Das Belastungsniveau bei statischen Versuchen stellt die Mittelspannung  $\sigma_m$  des vorangegangenen Zugschwellversuchs dar (**Abb. 7-23**).

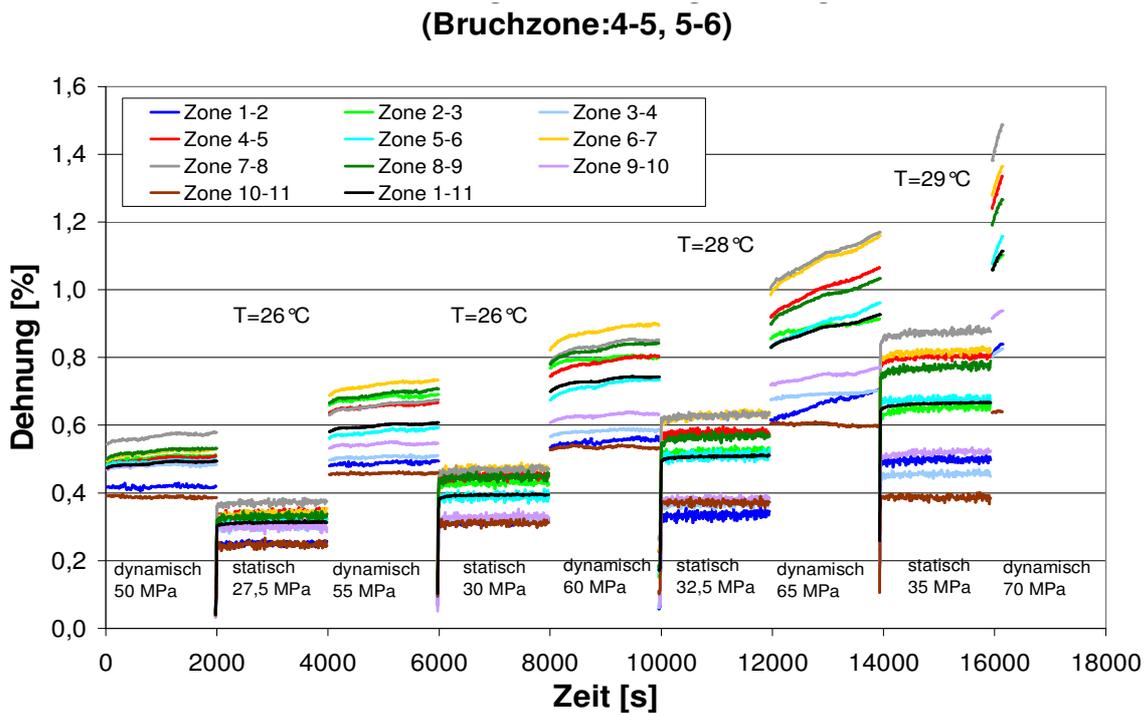
Zuerst wurden die dynamischen Untersuchungen parallel mit dem Laserextensometer und der Infrarotkamera durchgeführt. Das ergibt die lokalen mechanisch-dynamische Eigenschaften und unterschiedlichen lokalen Temperaturen auf der Probe.

Dynamische Versuche wurden bei Raumtemperatur (ca. 23°C), statische Versuche wurden mit Ofentemperierung durchgeführt. Als Temperatur wurde die maximale lokale Temperatur der Probe bei dynamischer Untersuchung gewählt.

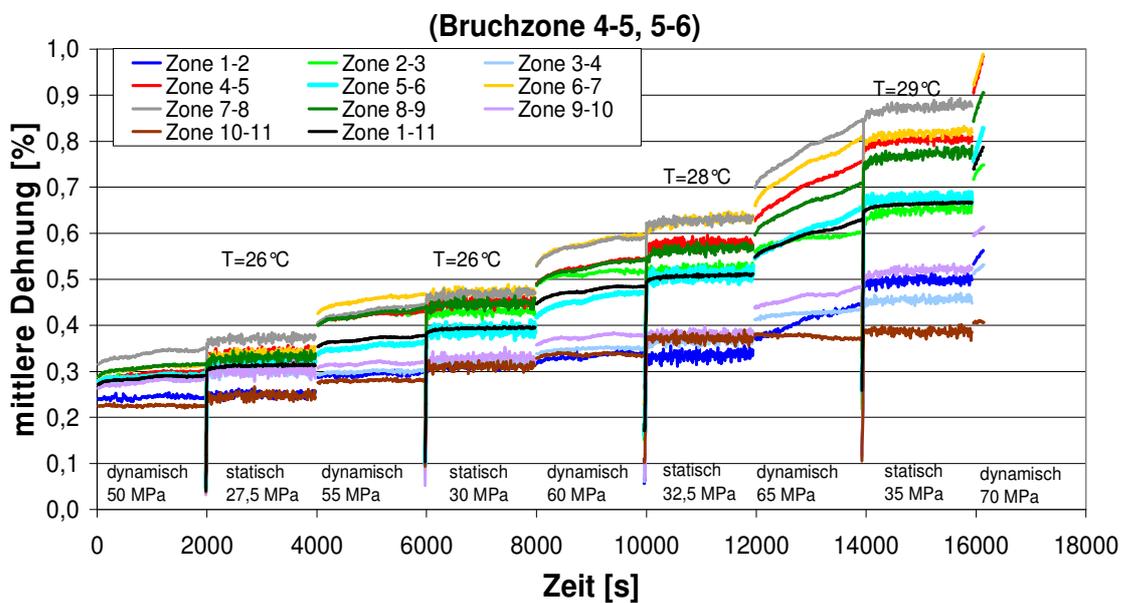
Die Versuchsergebnisse (obere Dehnung ( $\epsilon_o$ ) bzw. Mitteldehnung ( $\epsilon_m$ ) bei dynamischer Belastung und Dehnung bei statischer Belastung) sind in **Abb. 7-24** und **Abb. 7-25** dargestellt.



**Abb. 7-23:** Schematische Darstellung der Untersuchungen von statischer und dynamischer Laststeigerung



**Abb. 7-24:** Obere Dehnung ( $\epsilon_0$ ) bei dynamischer Belastung und Dehnung bei statischer Belastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, Probe EP7a7, längs, Zugschwell- bzw. Zugbelastung, 5Hz, Streifenabstand 5mm)



**Abb. 7-25:** Mitteldehnung ( $\epsilon_m$ ) bei dynamischer Belastung und Dehnung bei statischer Belastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, Probe EP7a7, längs, Zugschwell- bzw. Zugbelastung, 5Hz, Streifenabstand 5mm)

### 7.3.2 Kriechformel nach Nutting

Petermann/Schulte /PES02/ greifen auf einen mathematischer Ansatz nach Nutting zurück zur Approximation von Messkurven aus Ermüdungs- und Kriechversuchen für faserverstärkte Duroplasten. Das Verfahren wird zuerst vorgestellt und dann auf die vorangegangenen Untersuchungen angewandt.

Die Faserorientierung der Proben von Petermann/Schulte betrug  $0^\circ/45^\circ$ . Während die Zugspannungen über die  $0^\circ$ -Lagen abgetragen werden und nach HOROSCHENKOFF keinen Kriechanteil vorweisen, nehmen die  $45^\circ$ -Lagen die Schubspannungen auf und beinhalten abhängig von der Spannungszahl R und der Höhe der Mittelspannung einen mehr oder weniger großen Kriechanteil.

Petermann/Schulte gehen bei Ermüdungsversuchbelastung davon aus, dass sich die Gesamtdehnungen aus 3 Anteilen zusammensetzt, der spontanen Dehnung (elastischen Dehnung), der zeitabhängigen Kriechdehnung und der Lastwechsel- und spannungsamplitudenabhängigen Dehnung:

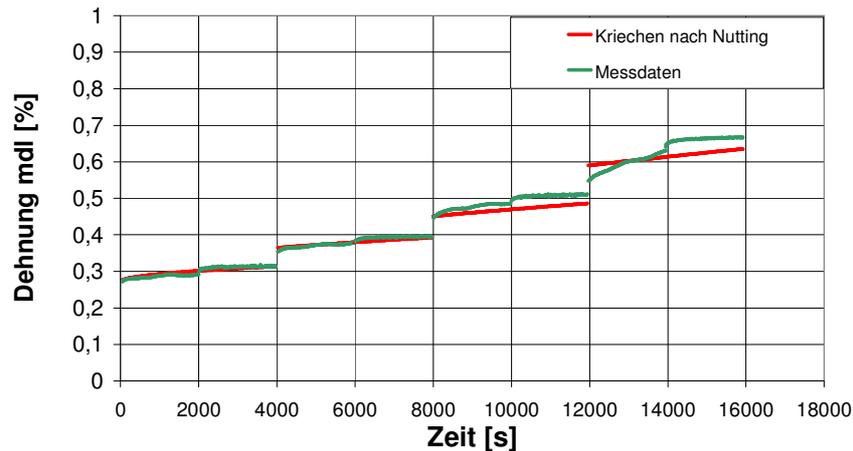
$$\varepsilon_{el} + \varepsilon_{creep}(\sigma_{mean}, t) + \varepsilon_{fatigue}(\sigma_{mean}, \sigma_{amp}, N)$$

Um abschätzen zu können, wann in einem Ermüdungsversuch der Schädigungsanteil signifikant zunimmt hat Nutting folgenden mathematischen Ansatz für den Kriechanteil vorgeschlagen:

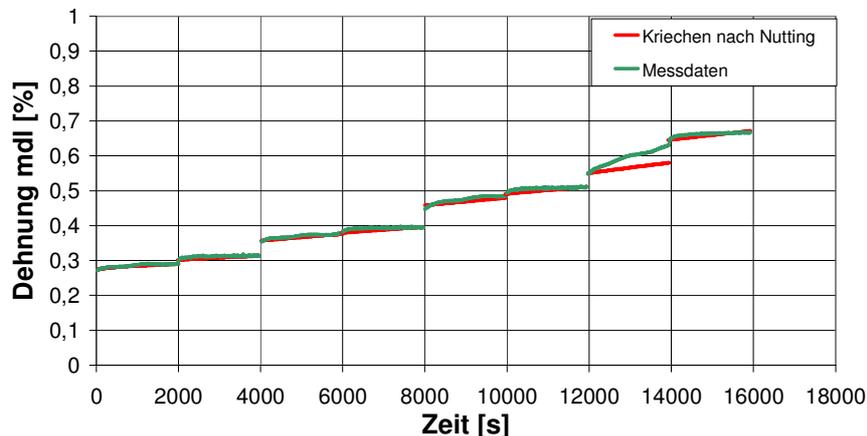
$$\varepsilon_{creep}(\sigma_{mean}, t) = \varepsilon_0(\sigma) + K\sigma^m t^n$$

Bei großen Spannungsamplituden und Spannungszahlen um  $R = 0,1$  zeigt sich, dass eine Dehnungszunahme im Ermüdungsversuch vorwiegend auf Schädigungseffekte zurück zu führen ist. Erst bei kleineren Spannungsamplituden und einer Spannungszahl um  $R = 0,5$  ist bis zu einer gewissen Zyklenzahl Kriechen dominant. Durch einen Vergleich der Messdaten mit den errechneten Werten nach Nutting lässt sich erkennen, ab welchem Spannungsniveau und nach wie vielen Lastwechseln Materialermüdung dominierend wird und sich dem durch die Mittelspannung hervorgerufenen Kriechen des Materials überlagert. Für Zugschwellbelastung bei hohen Spannungszahlen  $R \geq 0,5$  und Maximalspannungen unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze ist die Schädigungsentwicklung vorwiegend auf Kriecheffekte zurück zu führen.

Um eine Übertragbarkeit der Kriechformel nach Nutting auf das in dieser Arbeit untersuchte Material und die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche abzuschätzen wurden geeignete Parametersätze für K, m und n gesucht um die aus dynamischer und statischer Wechselbelastung resultierenden Dehnungs-Lastwechsel-Kurven anzunähern. Es stellt sich dabei heraus, dass mit nur einem Parametersatz für K, m und n die Kurven aus Messdaten im dynamischen und statischen Versuch nur bedingt angenähert werden können (**Abb. 7-26**) und für eine genaue Übereinstimmung bei jeder Mittelspannungsänderung ein anderer Parametersatz zur Approximation benötigt wird (**Abb. 7-27**). In beiden Fällen ist jedoch ab einem gewissen Spannungsniveau keine Annäherung mehr möglich, weshalb man darauf schließen kann, dass die Schädigung bereits dominierend ist.

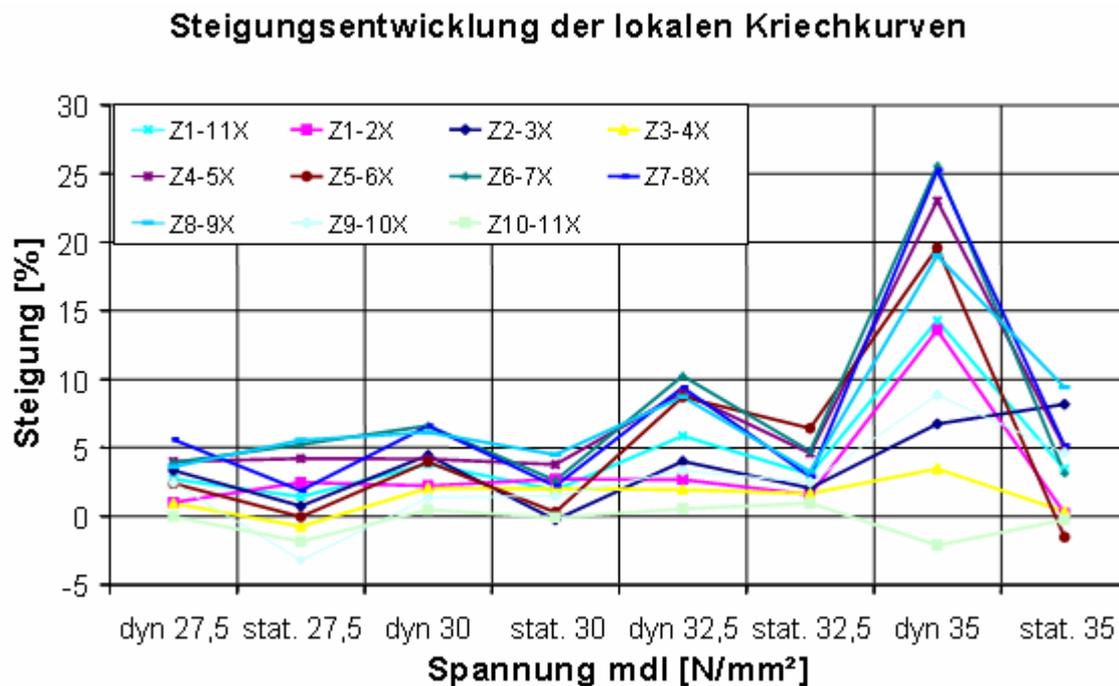


**Abb. 7-26:** Vergleich Kriechen nach Nutting mit Messergebnissen der Probe EP7a7, Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, längs, Zugschwellbelastung, ein Parametersatz



**Abb. 7-27:** Vergleich Kriechen nach Nutting mit Messergebnissen der Probe EP7a7, Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, längs, Zugschwellbelastung, Parametersatz für jede Belastungsstufe angepasst.

In **Abb. 7-28** ist die Entwicklung der Steigung der lokalen Kriechkurven aus **Abb. 7-25** bei zunehmender Mittelspannung von  $27,5 \text{ N/mm}^2$  bis  $35 \text{ N/mm}^2$  dargestellt. Man erkennt, dass sich sowohl die einzelnen Zonen, die Art der Belastung – ob statisch oder dynamisch –, als auch die Höhe der Belastung signifikant auf die Steigung der einzelnen Kurvenabschnitte auswirken. Der Zickzackverlauf in der Steigungsentwicklung zeigt, dass bei den gewählten Belastungen (Mittelspannung bei dynamische Belastung in Höhe der statischen Belastung) eine größere Zunahme der dynamischen Mitteldehnung bei dem untersuchten Material verursacht. Besonders bei größeren Belastungen wie  $32,5$  und später  $35 \text{ N/mm}^2$  ist eine lokal bis zu 5 mal höhere dynamische Mitteldehnungszunahme festzustellen. Während dieses Verhalten in der Bruchzone und den umliegenden Zonen signifikant ist, ist in anderen Zonen auch bei  $35 \text{ N/mm}^2$  kein großer Unterschied zwischen der Mitteldehnungszunahme bei dynamischer und Dehnungszunahme bei statischer Belastung zu erkennen (Zone 3-4 und Zone 10-11).



**Abb. 7-28:** Steigungsentwicklung der lokalen Kriechkurven (aus **Abb. 7-25**)  
(Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, Probe EP7a7, längs, Zugschwell- bzw. Zugbelastung, 5Hz, Streifenabstand 5mm)

Die Ermüdungsfestigkeit des Materials beträgt ca. 80 N/mm<sup>2</sup> (bezogen auf 10E5 LW) (**Tab. 7-2**). Da eine ungefähre Übereinstimmung zwischen Kriechverhalten aus dem Ermüdungsversuch und dem quasistatischen Versuch allenfalls bis ca. 30 N/mm<sup>2</sup> vorliegt, kann für die wesentlich höheren relevanten dynamischen Belastungen nicht auf die wesentlich einfacher zu ermittelnden statischen Kriechwerte zurückgegriffen werden.

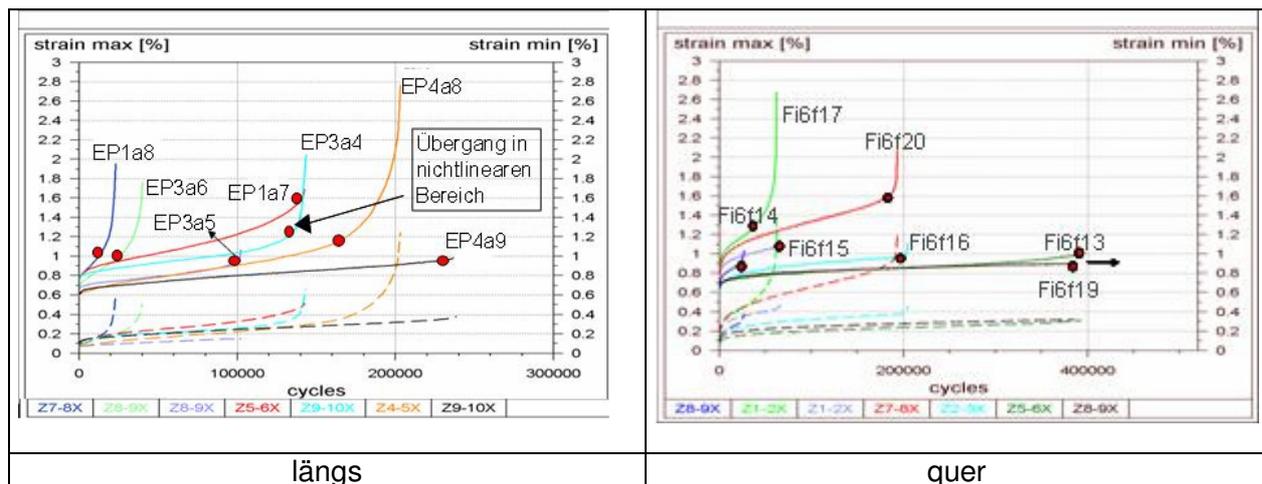
### 7.3.2.1 Spannungs- und Totaldehnungswöhlerkurven

Die Auswertung der Wöhlerversuche erfolgt üblicherweise in einem Spannungs-Wöhlerdiagramm, bei dem die ertragbare Spannung über der Bruchlastspielzahl aufgetragen wird. Aufgrund der deutlichen Anisotropie des gewebeverstärkten Thermoplasts liegen unterschiedliche Wöhlerdiagramme für Längs- und Querbelastung vor (**Abb. 7-30**).

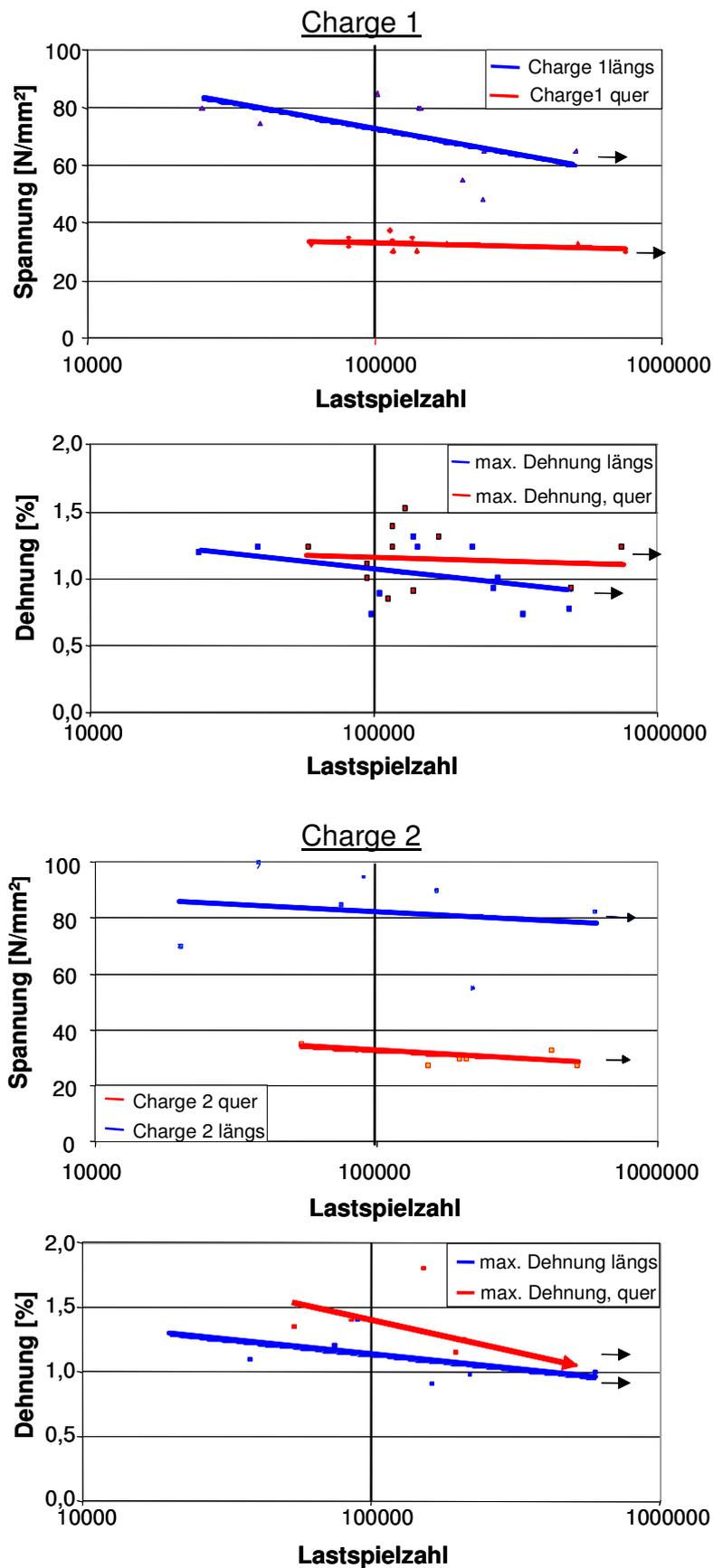
Durch die versuchsbegleitende Erfassung der mechanisch-dynamischen Kennwerte ergibt sich die Möglichkeit einer weitergehenden Analyse des Zerrüttungsvorgangs und Versagensverhaltens. Hierbei wird auf die maximale Dehnung bei den Ermüdungsversuchen zurückgegriffen (**Abb. 7-29**). Der Verlauf der Dehnung über der Lastspielzahl kann - wie schon zuvor bei D-LFT dargestellt - in einen primären, sekundären und tertiären Bereich unterteilt werden. Der sekundäre Bereich charakterisiert die mit der Lastspielzahl nahezu linear zunehmende Dehnung, während der tertiäre Bereich das progressive Ermüdungsverhalten erkennen lässt. Der Übergang vom sekundären in den tertiären Bereich wird als signifikante Dehnungsgröße betrachtet, und hieraus wird ein dehnungsorientiertes Wöhlerdiagramm entwickelt.

Für Längs- und Querdehnung jeder Charge liegt eine ähnlicher Lage der Ausgleichsgeraden vor, weshalb die Vorstellung eines totaldehnungsorientierten Versagensverhaltens nahe liegt. Dieses Verhalten wird bei Charge 1 und Charge 2 in ähnlicher Weise beobachtet (**Abb. 7.30**).

Dieses Phänomen ist für die Auslegung von Strukturbauteilen von hohem Interesse, da bei der hier betrachteten Normalbelastung parallel bzw. senkrecht zur Faserorientierung auf dieses einfache Kriterium der maximal ertragbaren Dehnung zurückgegriffen werden kann, die für ca. 100.000 LW, basierend auf der Ausgleichsgeraden, im Bereich von ca. 1,1-1,2% (Charge 1) und bei ca. 1,2-1,4% (Charge 2) liegt.



**Abb. 7-29:** Verlauf von strain max mit Übergang in den tertiären Bereich der späteren Bruchzonen jedes einzelnen Ermüdungsversuchs bei Zugschwellbelastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, Entnahmerichtung längs, quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)



**Abb. 7-30:** Spannungs- und Maximaldehnungs-Wöhlediagramme bei Zugschwellbelastung (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1 und 2, Entnahmerichtung längs und quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm)

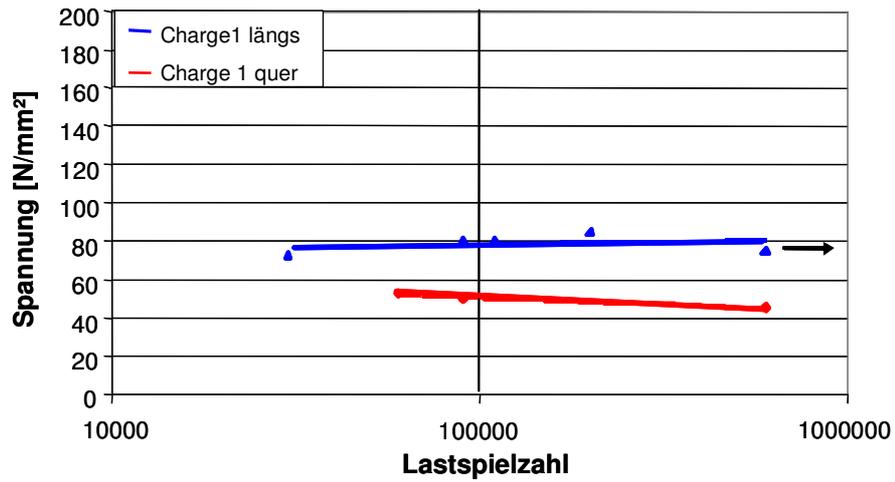
### 7.3.3 Druckschwellbelastung

#### 7.3.3.1 Lokales Deformationsverhalten

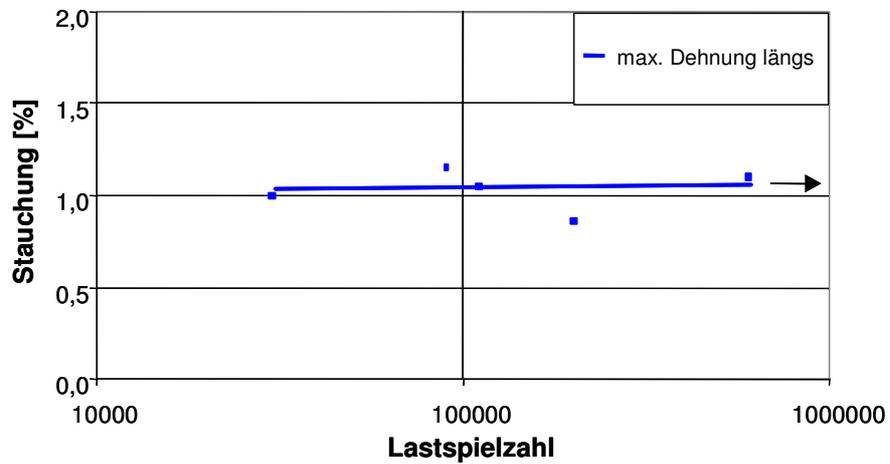
Das Verhalten bei Druckschwellbelastung soll nur kurz angesprochen werden. Die Hysteresisschleifen zeigen bei den Ermüdungsversuchen eine mit der Lastspielzahl leicht zunehmende Krümmung, und es kann ein deutliches Kriechverhalten, insbesondere für die Bruchzone, beobachtet werden. Die mechanisch-dynamischen Kennwerte zeigen in ihrem Verlauf zumeist eine Unstetigkeit, was durch das Abgleiten (Scherung) von Probenbereichen verursacht wird. Die Kennwertveränderung in den als kontinuierlich anzusprechenden Lastspielzahlbereichen ist nur geringfügig. Die Scherung kann sich dabei über eine bis zwei Zonen der Probe erstrecken, d. h. die Bruchzone im vorderen Bereich entspricht nicht jener im Bereich auf der Rückseite. Die Schadenszone befindet sich im überwiegenden Maße im Bereich eines niedrigen E-Moduls.

#### 7.3.3.2 Spannungs- und Totaldehnungswöhlerkurven

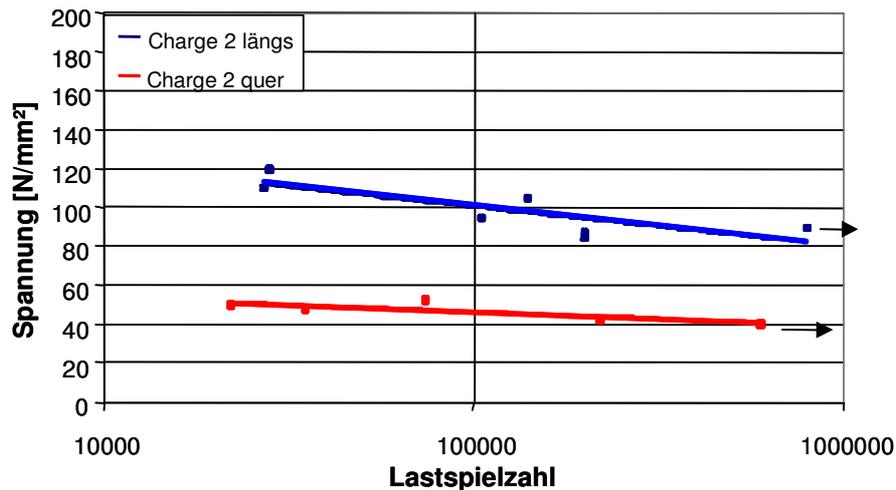
Wie zuvor bei der Zugschwellbelastung, erfolgt auch für die Druckschwellbelastung eine vergleichende Gegenüberstellung der spannungs- und maximaldehnungsorientierten Wöhlerdiagramme (**Abb. 7-31**, **Abb. 7-32**). Die Belastungsrichtung längs zeigt, wie erwartet, in der spannungsorientierten Darstellung eine höhere Belastbarkeit als die Proben in Querrichtung. Die maximaldehnungsorientierte Darstellung zeigt bei der Richtung quer größere Streuungen, daher wird dieser Zusammenhang auch nur für die Belastungsrichtung längs und für die Charge 1 dargestellt.



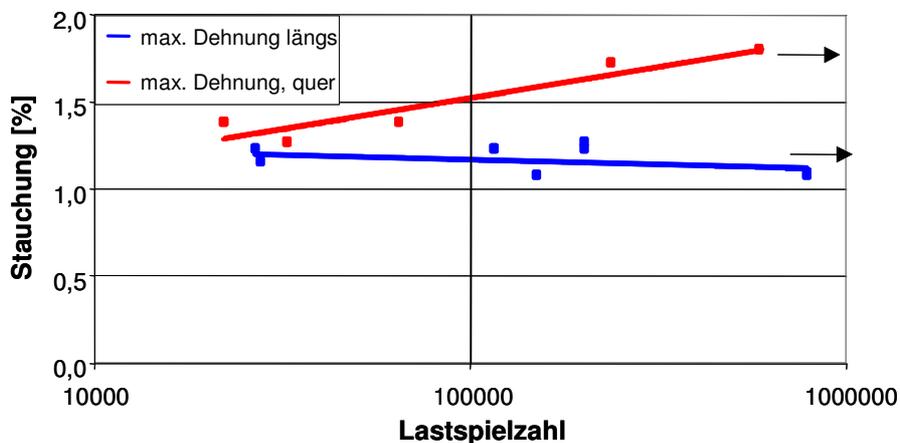
Wöhlerdiagramm max. Dehnung Quadrant, Charge 1, Druckschwellbelastung



**Abb. 7-31:** Spannungs- und Maximaldehnungs-Wöhlediagramme bei Druckschwellbelastung, (Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, Entnahmerichtung längs, 5 Hz, RT, Streifenabstand 3 mm)



Wöhlerdiagramm max. Dehnung Quadrant, Charge 2, Druckschwellbelastung



**Abb. 7-32:** Spannungs- und Dehnungs-Wöhlerdiagramme bei Druckschwellbelastung, Gewebeverstärkter Thermoplast, Charge 1, Entnahmerichtung längs und quer, 5 Hz, RT, Streifenabstand 3 mm)

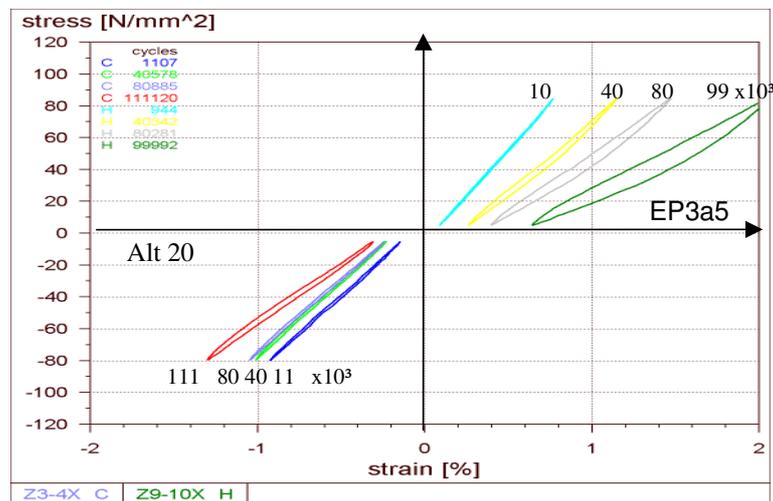
### 7.3.4 Vergleich des Ermüdungsverhaltens bei Zug- und Druckschwellbelastung

Zum Vergleich des Ermüdungsverhaltens bei Zug-, bzw. Druckschwellbelastung werden die Hysteresisschleifen und die mechanisch-dynamischen Kennwerte herangezogen. Es werden Zug- und Druckschwellversuche verglichen, die jeweils zu einer ähnlichen Bruchlastspielzahl von ca. 100.000 LW führen (**Abb. 7-33**). Es wird nur die Belastung in Faserlängsrichtung betrachtet, da dies die Hauptbelastungsrichtung des Werkstoffs darstellt.

#### Hysteresisschleifen und mechanisch-dynamische Kennwerte

Die Hysteresisschleifen der späteren Bruchzonen zeigen ein unterschiedliches Verhalten im Zug- und Druckbereich. Bei Zugschwellbelastung wird ein ausgeprägteres Verhalten hinsichtlich der Steifigkeitsabnahme, des Kriechens und der Zunahme der Schleifenbreite beobachtet als bei Druckschwellbelastung.

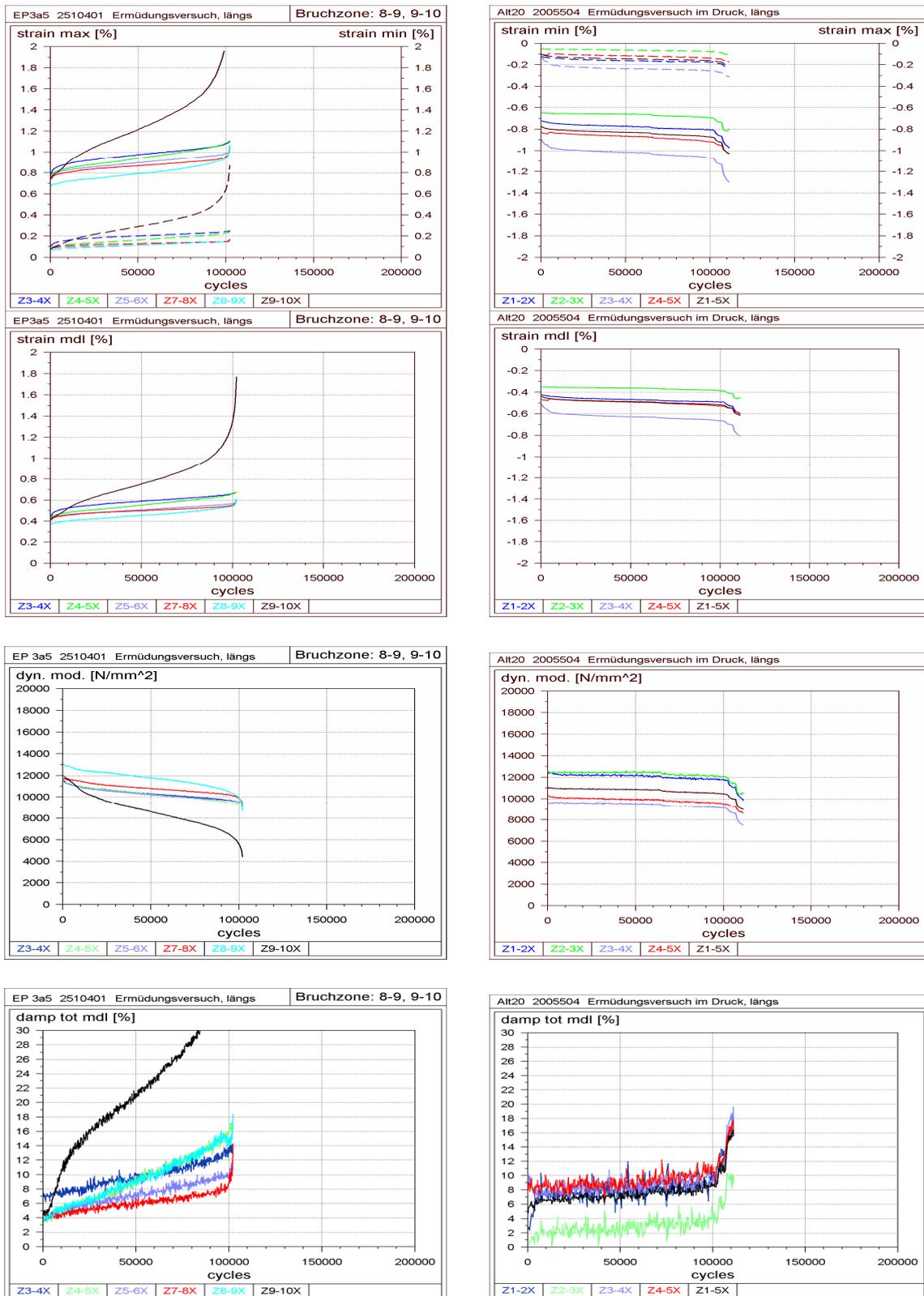
Diese Beobachtungen finden ihre Entsprechung im Verlauf der einzelnen mechanisch-dynamischen Kennwerte über der Lastspielzahl (dargestellt anhand der ausgewählten Versuche, **Abb. 7-34**). Bei Charge 1 wird bei Zugschwellbelastung für die Schadenszonen zumeist ein sehr deutlicher Verlauf der Kenngrößen beobachtet (die Ursache dafür wird in schlechter Benetzung gesehen), während bei Druckbelastung keine derartigen lokalen Abweichungen vorliegen. Auffällig ist die geringere Abnahme des dynamischen Moduls und des Kriechens über der Lastspielzahl. Offenbar tritt bei Druckschwellbelastung ein Abstützeffekt ein, der das Kriechen einschränkt und den dynamischen E-Modulverlust (der bei Zugschwellbelastung auch mit Faserbruch verbunden sein kann) reduziert. Die Dämpfung zeigt im sekundären Bereich nur einen geringfügigen Anstieg (**Abb. 7-34**). Dies ist verständlich, da sich bei Druckbelastung keine Rissufer öffnen und keine Grenzflächenreibung entsteht, wie dies bei Zugbelastung zu erwarten ist. (Bei Charge 2 ist der Verlauf der mechanisch-dynamischen Kennwerte homogen ohne die signifikanten Ausreißer wie bei Charge 1. Die zuvor gemachten Aussagen zum geringeren Kriechverhalten und Abfall des E-Moduls (falls keine Abscherung auftritt) werden bestätigt.)



**Abb. 7-33:** Zug- und Druckschwellversuch, Hysteresisschleifen der späteren Versagenszone (Gewebeverstärkter Thermoplast, Entnahmerichtung längs, Charge 1, 5 Hz, RT, Streifenabstand 5 mm bei Zug-, 3 mm bei Druckschwellbelastung, Probe EP3a5 und Alt20)

Zugschwellbelastung

Druckschwellbelastung

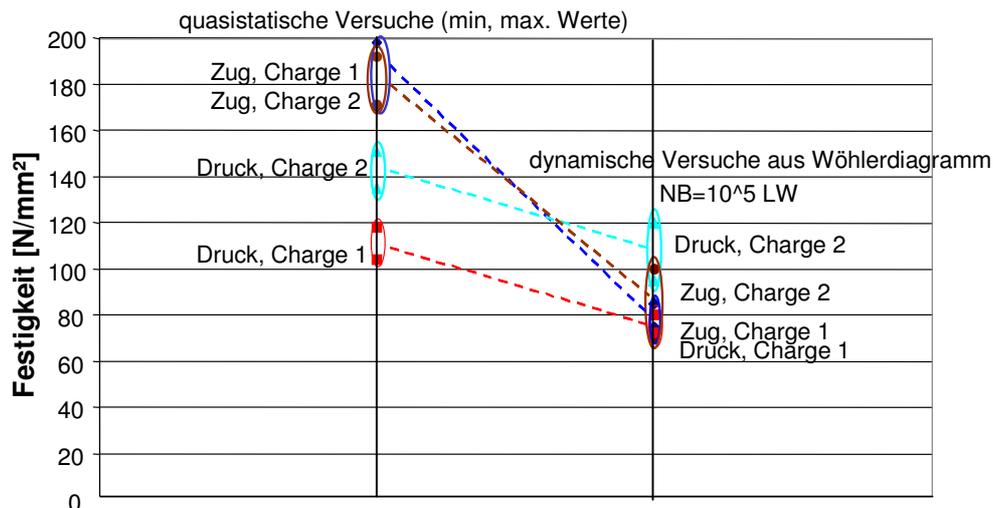


**Abb. 7-34:** Zug- und Druckschwellversuch; mechanisch dynamische Kennwerte verschiedener Zonen (Gewebeverstärker Thermoplast, Entnahmerichtung längs, Charge 1, 5 Hz, RT,  $\sigma_a = 40 \text{ N/mm}^2$  Streifenabstand 5 mm bei Zugschwell- und  $\sigma_a = 37,5 \text{ N/mm}^2$ , 3 mm bei Druckschwellbelastung, Probe EP3a5 und Alt20).

### 7.3.5 Vergleich statischer und dynamischer Festigkeitswerte

Es werden die Festigkeitswerte für statische und dynamische Belastung (für ca. 10 E5 LW) gegenübergestellt (**Abb. 7-35**). Die quasistatische Zugfestigkeit liegt erwartungsgemäß über der quasistatischen Druckfestigkeit. Die quasistatische Zugfestigkeit von Charge 1 und Charge 2 fällt nahezu zusammen, während die Druckfestigkeit der Charge 2 leicht erhöht ist, was im Wesentlichen auf die bessere Faserausrichtung / Lunkerfreiheit und bessere Faser-Matrix-Haftung zurückgeführt werden kann.

Die dynamische Festigkeit liegt unterhalb der statischen. Allerdings überrascht, dass die Zugschwellfestigkeit intensiv abfällt und z. T. unter die Druckschwellfestigkeit absinkt.



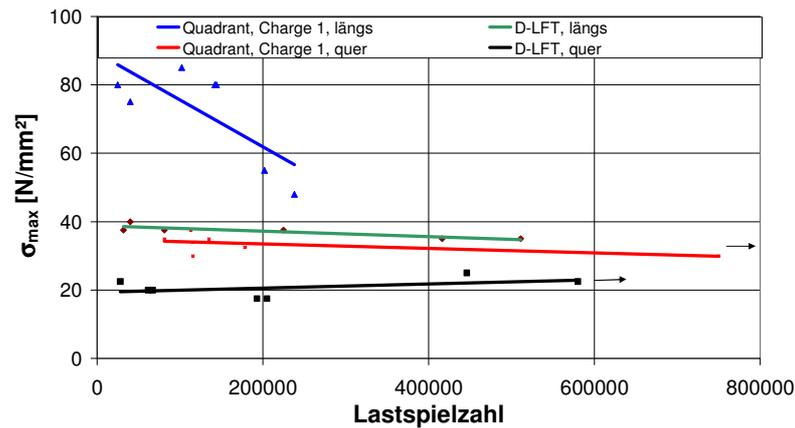
**Abb. 7-35:** Max. und min. Werte der Festigkeit bei quasistatischen und dynamischen Versuchen bei Zug-, Druckbelastung, (Gewebeverstärkter Thermoplast, Entnahmerichtung längs, Charge 1, 2, 5 Hz, RT)

## 7.4 Vergleich von D-LFT und gewebeverstärktem Thermoplast

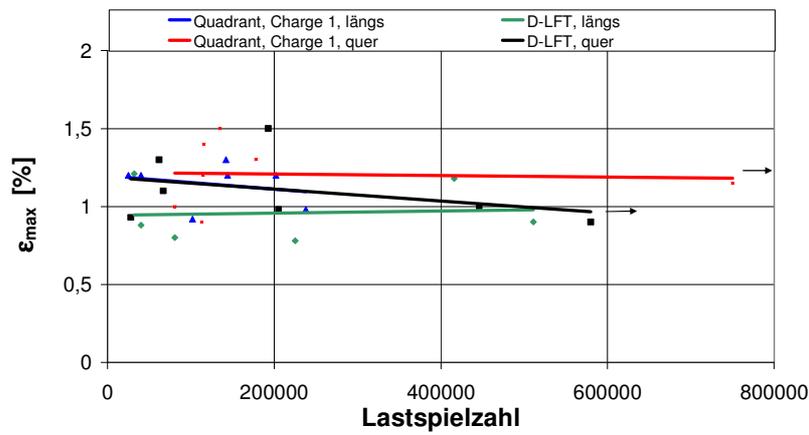
### 7.4.1 Ermüdungsverhalten

#### 7.4.1.1 Wöhlerdiagramme bei Zugschwellbelastung

Die Spannungswöhlerdiagramme zeigen unterschiedliche Niveaus je Werkstofftyp und Belastungsrichtung (**Abb. 7-36**). In der totaldehnungsorientierten Betrachtung ist der Unterschied wesentlich geringer, und die ertragbaren Totaldehnungen liegen im Streuband von 0,8 bis 1,5 %. Dies legt ein maximales Totaldehnungskriterium nahe.



Spannungswöhlerdiagramme



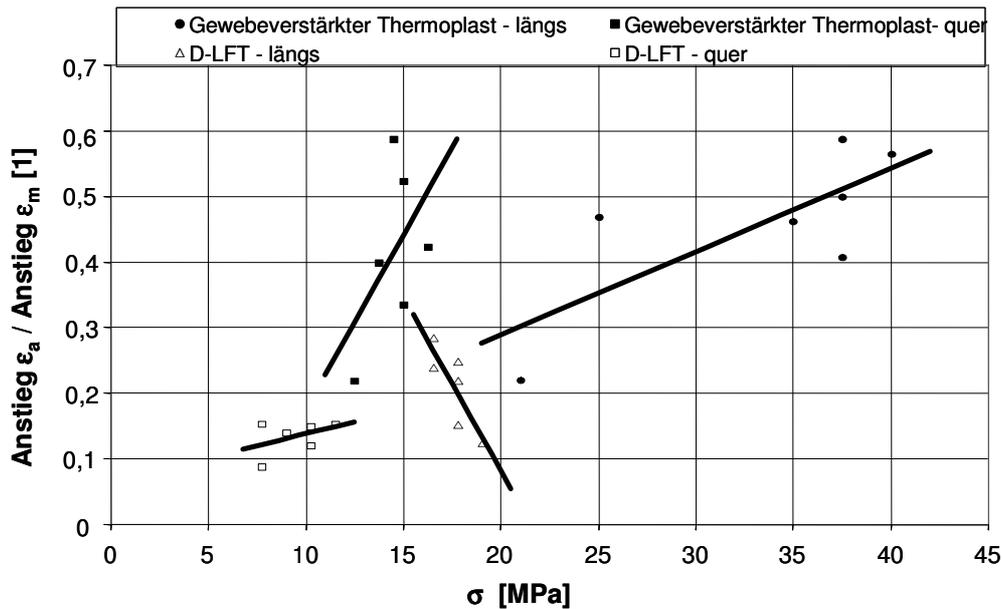
Totaldehnungswöhlerdiagramme

**Abb. 7-36:** Spannungs- und Totaldehnungswöhlerdiagramme; Vergleich von D-LFT und Gewebeverstärkter Thermoplast (Entnahmerichtung längs und quer, 5 Hz, RT; Charge 1 des gewebeverstärkten Thermoplasts)

#### 7.4.1.2 Anstieg von Mittel- und Ausschlagsdehnung

Für die vergleichende Bewertung des Verlaufs der Mittel- und Ausschlagsdehnung wird deren Anstieg im sekundären Bereich herangezogen (siehe Kap. 7.1.3.1 und 7.2.3.1). Eine Gegenüberstellung von D-LFT und gewebeverstärktem Thermoplast, jeweils längs und quer, lässt nun deutlich den Einfluss der Orientierungsrichtung und des Werkstofftyps erkennen. Allerdings zeigt der Anstieg der Werte der Mittel- und Ausschlagsdehnung über der Lastspielzahl keine systematische Tendenz hinsichtlich des Einflusses der Spannungsamplitude. Beispielsweise wäre zu erwarten, dass die Steigung der Geraden mit der Spannungsamplitude konsequent ansteigt, was allerdings nicht beobachtet wird. Diese Abweichungen werden, wie zuvor angesprochen, auf Inhomogenitäten zurückgeführt, die z. B. bei dem gewebeverstärkten Thermoplast dominierend in der ungleichmäßigen Faserbenetzung zu suchen sind.

Zur weiteren Auswertung wird daher eine Relativbetrachtung hinsichtlich Mittel- und Ausschlagsdehnung für jeden einzelnen Versuch angestellt und hierfür der Wert von Ausschlagsdehnung / Mitteldehnung ermittelt (**Abb. 7-37**).



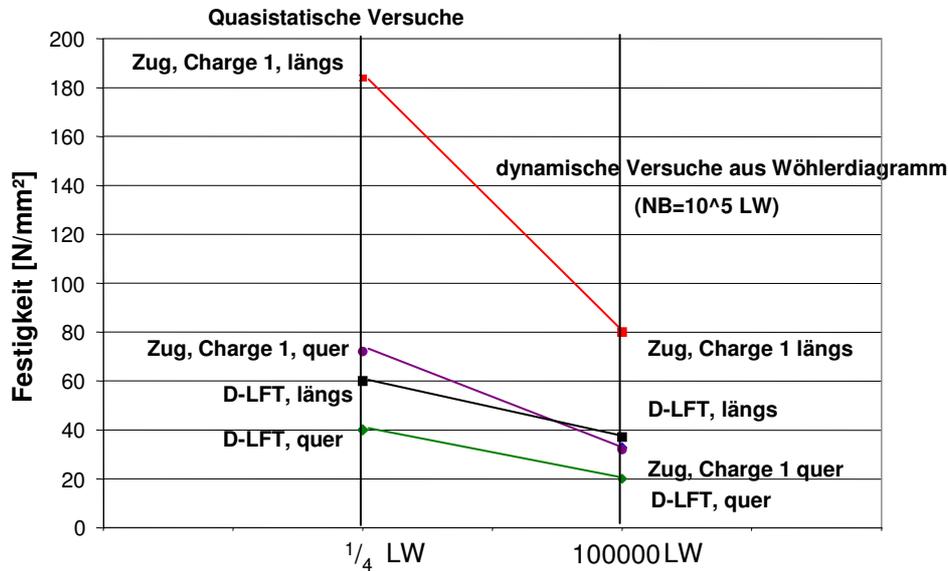
**Abb. 7-37:** Verhältnis des Anstiegs von Ausschlagsdehnung zu Mitteldehnung (D-LFT, Gewebeverstärkter Thermoplast (Charge 1), Entnahmerichtung längs und quer, 5 Hz, RT)

Beim gewebeverstärkten Thermoplast sind, basierend auf der Kennwertbildung, die Streuungen bezüglich des Spannungseinflusses reduziert worden, und es kann ein Tendenzverlauf der Messwerte in Abhängigkeit von der Spannung angegeben werden. Bei zunehmender Spannungsamplitude (Faserorientierung längs) wird eine Zunahme des Verhältniswertes beobachtet. Dies besagt, dass mit Zunahme der Spannungsamplitude eine relativ starke Zunahme der Dehnungsamplitude aufgrund von Materialzerrüttung auftritt und die spannungsabhängige Zunahme des Kriechens geringer ist. Bei Belastung senkrecht zur Faserorientierung liegt ein sehr starker Anstieg des Verhältniswertes vor. Dies besagt, dass mit zunehmender Spannungsamplitude die Zunahme der Dehnungsamplitude (entspricht Steifigkeitsabfall) gegenüber dem Kriechvorgang noch dominierender ist.

Die Absolutwerte von strain max / strain middle liegen für gewebeverstärkten Thermoplast im Bereich von 0,2 bis 0,6 und damit deutlich höher als bei D-LFT (0,1 - 0,3). Bei D-LFT erwartet man aufgrund der geringen durchgängigen Faserverstärkung einen hohen Kriechanteil, der sich in den niedrigen Werten von strain max / strain middle zwischen 0,1 und 0,3 widerspiegelt. Bei diesem Werkstoff wird in der Tat kaum eine Steifigkeitsabnahme, jedoch eine starke Kriechneigung beobachtet.

### 7.4.2 Vergleich statischer und dynamischer Festigkeitswerte

Ein Vergleich der quasistatischen und dynamischen Festigkeit erfolgt für die gemittelte Ermüdungsfestigkeit 10E5 LW (**Abb. 7-38, Tab. 7-2**). Der Quotient von Ermüdungsfestigkeit zur Zugfestigkeit zeigt einen mäßigen Einfluss der Orientierung. Auffallend ist die beim gewebeverstärkten Thermoplast vorliegende deutlich höhere Belastungsfähigkeit bei Druckbelastung.



**Abb. 7-38:** Quasistatische und dynamische Festigkeit (Zug- und Zugschwellbelastung) von D-LFT und gewebeverstärktem Thermoplast (Charge 1) (Entnahmerichtung längs und quer, 5 Hz, RT)

Werkstoff/Entnahmerichtung	Zugfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	Ermüdungsfestigkeit 10E5 LW (N/mm <sup>2</sup> )	Ermüdungsfestigkeit/ Zug- bzw. Druckfestigkeit (%)
Zugbelastung			
D-LFT längs	60	37	60
D-LFT quer	40	20	50
Gew. Thermopl. Charge 1 längs	184	80	45
Gew. Thermopl. Charge 1 quer	75	35	40
Gew. Thermopl. Charge 2 längs	182	85	45
Gew. Thermopl. Charge 2 quer	70	32	40
Druckbelastung			
Gew. Thermopl. Charge 1 längs	120	80	70
Gew. Thermopl. Charge 1 quer	65	ca 50	75
Gew. Thermopl. Charge 2 längs	140	100	70
Gew. Thermopl. Charge 2 quer	70	50	70

**Tab. 7-2:** Quasistatische und dynamische Festigkeit (Zug- und Zugschwellbelastung) von D-LFT und gewebeverstärktem Thermoplast (Charge 1) (Entnahmerichtung längs und quer, 5 Hz, RT)

## 8 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden das quasistatische und das Ermüdungsverhalten von wirrfaserverstärktem Thermoplast mit Endlosfasern (D-LFT) und von gewebeverstärktem Thermoplast untersucht. Hierbei wurden ortsaufgelöste Verfahren der Deformationsanalyse, schwerpunktmäßig die Ortsaufgelöste Hysteresismessung und ergänzend die Thermoelastische Spannungsanalyse, eingesetzt. Zur genauen Erfassung des Zerrüttungsvorgangs war in einer vorangegangenen Arbeit die Messgenauigkeit der Hysteresismessung deutlich verbessert worden, und es konnte auf diese sehr wichtigen Vorleistungen zurückgegriffen werden.

Zur Gefügeanalyse wurden Röntgengrobstrukturuntersuchungen, Ultraschall- und REM-Untersuchungen durchgeführt.

Bei der Untersuchung der quasistatischen Eigenschaften von D-LFT gibt die ortsaufgelöste Dehnungsanalyse wichtige Hinweise zum Werkstoffverhalten. Das Versagen tritt an der Stelle mit dem geringsten E-Modul auf. Die Festigkeitswerte zeigen relativ starke Streuungen aufgrund der Inhomogenität des Gefüges. Bei lokaldehnungsorientierter Betrachtung tritt eine wesentlich geringere Streuung der Kennwerte auf. Die Bruchdehnung liegt in Abhängigkeit von Fasergehalt und Entnahmerichtung im Mittel zwischen 2,2 und 2,8 %. Dieser Befund der geringen Streuung der lokalen Bruchdehnung ist trotz der deutlichen Unterschiede der Strukturparameter und unterschiedlichen Fasergehalte bemerkenswert. Dieses interessante Charakteristikum des Werkstoffs macht das robuste Verhalten bei mechanischer Belastung von D-LFT-Bauteilen verständlich.

Die starken Schwankungen der Festigkeit wirken sich auch beim Ermüdungsverhalten aus. Nur durch geeignete Voruntersuchungen, die sich auf das dehnungsorientierte Materialverhalten stützten, konnte der Prüfaufwand in einem vertretbaren Rahmen gehalten werden. Die mechanisch-dynamischen Kennwerte zeigen bei Ermüdungsbelastung eine mäßige Dämpfungszunahme und eine geringe Steifigkeitsabnahme, verbunden mit einer starken Kriechneigung. Für die Analyse der beiden letzteren Effekte ist eine dehnungsorientierte Betrachtung hilfreich. Die Steifigkeitsabnahme wird durch die Kenngröße der Ausschlagsdehnung ersetzt und kann dann unmittelbar mit dem Kriechen, das durch die Mitteldehnung beschrieben wird, verglichen werden. Wie beim Zugversuch konnte auch beim Ermüdungsversuch eine dehnungsorientierte Analyse des Ermüdungsvorgangs durchgeführt werden. Diese führt zu einem Totaldehnungswöhlerdiagramm, in dem die Wöhlerlinien für Belastung senkrecht und quer zur Faserorientierung nahezu zusammenfallen. Es kann daher von einem maximalen Totaldehnungskriterium des Versagens ausgegangen werden.

Der anisotrope, gewebeverstärkte Thermoplast wird statischen und dynamischen Zug- und Druckbelastungen unterworfen. Ergänzende Gefügeuntersuchungen ergeben leider keinen Zusammenhang zwischen der lokalen Kennwerteigenschaft und dem Gefügezustand, was auf den komplexen Aufbau (Wirrfasermittelschicht, beide Randschichten gewebeverstärkt) zurückzuführen ist. Die Werkstoffcharakterisierung an gewebeverstärktem Thermoplast wird bei zwei Chargen unter Zug-, und Druckschwellbelastung untersucht. Bei quasistatischer und dynamischer Belastung tritt das Versagen zumeist an der Stelle mit der geringsten

lokalen Steifigkeit auf. Das mechanische Verhalten wird durch die anisotropen Eigenschaften stark bestimmt.

Bei Zugschwellbelastung werden Kriechen und Steifigkeitsabnahme beobachtet, wobei bei senkrechter Belastung das Kriechen relativ stärker und die Steifigkeitsabnahme relativ schwächer ausfällt. Die Dämpfungszunahme bei der Ermüdungsbelastung ist z. T. intensiv. Insbesondere bei Charge 1 wird aufgrund von Haftungsschwächen bzw. Lunkern ein intensiver Dämpfungsanstieg mit der Lastspielzahl beobachtet. Bei Druckschwellbelastung sind Steifigkeitsabnahme und Kriechen geringer. Als Schadensphänomen wird vielfach ein spontanes Abscheren der Probe beobachtet.

Ähnlich wie bei D-LFT führt eine totaldehnungsorientierte Betrachtung zu einem vergleichbaren Verlauf der Totaldehnungswöhlerdiagramme bei paralleler und senkrechter Belastung, während die Diagramme bei spannungsorientierter Betrachtung weit auseinander liegen.

Das Verhalten von Ausschlags- und Mitteldehnung quantifiziert in Kenngrößen (mit gleichen physikalischen Einheiten) das Ermüdungsgeschehen hinsichtlich Steifigkeitsabnahme und Kriechen. Allerdings zeigt der Verlauf der Kenngrößen über der Lastspielzahl keine systematische Tendenz hinsichtlich des Einflusses der Spannungsamplitude, was auf Werkstoffinhomogenitäten zurückgeführt wird. Zur weiteren Auswertung wird daher eine Relativbetrachtung angestellt und hierfür der Wert von  $\text{strain max} / \text{strain middle}$  ermittelt. Durch diese Kennwertbildung wird die Streuung bezüglich des Spannungseinflusses deutlich reduziert, und es kann ein Tendenzverlauf der Messwerte in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude angegeben werden.

## 9 Literatur

- AAR96 Altenbach, H.; Altenbach, J.; Rikards, R. Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996
- ALT87 Altstädt, V.: Hysteresis-Messungen zur Charakterisierung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften von R-SMC. Dissertation, Universität Kassel, 1987
- AVK04 N.N.: Faserverstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, AVK-TV Handbuch. Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe-Technische Vereinigung e.V. 2004
- BGK03 Brüssel, R.; Geiger, O.; Krause, W.; Henning, F.; Ernst, H.: Tailored LFTs developed for Series Productio - Results of the „Smart Part“ R&D Project. AVK-TV Tagung, Paper A9, 2003, Baden-Baden
- BGS01 Berlich, R; Gabriel, R; Schmachtenberg, E.: Analyse der Datenbank Campus. Kunststoffe 10/2001, Carl Hanser Verlag München, S. 64-67
- BRK98 Brüssel R., Kühfusz, R.: Ein Jahr Serienproduktion von Menzolit-Fibron Lang-Faserverstärktem Thermoplast mit dem Direktverfahren; 1. Internationale AVK-TV Tagung 1998
- CAM Campus 5.0 Materialdatenbank, Chemie Wirtschaftsförderungs-GmbH, D-60329 Frankfurt
- DEP01 Degrieck, J.; Van Paepegem, Wim: Fatigue Damage Modelling of Fibre-reinforced Composite Materials: Review. Applied Mechanics Reviews, 54(4), 2001, 279-200
- DIE96 Diest v., K.: Presssimulation und Faserorientierungserkennung von GMT-Bauteilen, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1996
- DIT03 Dittmar, H. et. al.: Anwendungsbeispiele hochfester GMT-Werkstoffe: Reserveradmulden, Heckklappen, Getriebe- und Motorträger; EATC Automotive-Seminar, 1.-2. Juli 2003, Wolfsburg
- DIT05 Dittmar, H.: Advanced glass-mat thermoplastic composite applications for the automotive industry. SAMPE, Japan, 2005
- DUS99 Dulieu-Barton, J. M.; Stanley, P.: Applications of thermoelastic stress analysis to composite materials. Strain, May 1999, 41 – 48
- EHF68 Dämpfungseigenschaften glasfaserverstärkter Kunststoffe. Vortrag auf der 7. Öffentlichen Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaften Verstärkte Kunststoffe, 1 bis 4. Oktober 1968 in Freudenstadt
- EHR 93 Ehrenstein, G. W.; Herausgeber: Hysteresis-Meßverfahren - das flexible Verfahren zur dynamischen Werkstoffprüfung nach R. Renz, Tagung am Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Universität Erlangen, 8. Juli 1993, Tagungsband

- EHR05 Ehrenstein, G. W.: Tragende Hybridstrukturen. VDI Seminar 356503, Tagungsband VDI Wissensforum16.-17.11.2005 in Fürth
- EHR93 Ehrenstein, G. W. (Hrsg): Hysteresis – Messverfahren. Seminarband LKT, Erlangen 1993
- EHR99 Ehrenstein, G. W.; Polymer-Werkstoffe. Struktur-Eigenschaften-Anwendung. Carl Hanser Verlag, München, Wien:Hanser, 1999, ISBN 3-446-21161-6
- EIF03 Eifler, D.: "Umdrucke und Bildvorlagen zu Vorlesung. Lebensdauervorhersage von metallischen Werkstoffen". Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Technische Universität Kaiserslautern, 2003.
- FEW06 Frik, St.; Ergräber, M.; Wüst, A. ; Glaser, St.: Entwicklung eines thermoplastischen Lower Bumper Stiffeners für den Fußgängerschutz. Beitrag zur VDI-Tagung: Kunststoffe im Automobil, Mannheim 2006
- FGE06 Friebe, H.; Galanulis, K; Erne,O.; Müller, E.. FLC Determination And Forming Analysis by Optical Measurement Systems, FLC-Zurich 06, March 15<sup>th</sup>-16<sup>th</sup> 2006, ETH Zurich, Switzerland
- FIE06 <http://www.fiedler-oe.com>
- FUS04 Funck, R.; Steffens, M.: Hybridstrukturen aus Thermoplasten. Kunststoffe 09/2004, Carl Hanser Verlag München, S. 264-267
- GAL04 Galewski, T.: Experimentelle Untersuchungen und Modellierung der inhomogenen lokalen Eigenschaften von wirrfaserverstärkten Kunststoffen (SMC/LFT). DFG Graduiertenkolleg 814 „Ingenieurmaterialien auf verschiedenen Skalen: Experiment Modellierung und Simulation“, Interner Bericht, 2004
- GOM06 <http://www.gom.com>
- GWA85 Walter, G.: Kunststoffe und Elastomere in Kraftfahrzeugen. 1985, Kohlhammer-Verlag
- HAB04 Haag, R.; Brinkmann, T.: Die richtige Orientierung. Anisotopie Bauteilauslegung. Kunststoffe 11/2004, Carl Hanser Verlag München, S. 72-74
- HAC91 Harwood, N.; Cummings, W. M.: Thermoelastic Stress Analysis. IOP Publishing Ltd, Bristol, 1991
- HIM04 Himmel, N.: Ermüdung und Lebensdaueranalyse von Faserverbundwerkstoffe. Manuskript Ermüdung und Lebensdaueranalyse, DFG-Graduiertenkolleg, Universität Kaiserslautern, 20.01.2004
- HOF99 Hoffmann L.: Ermüdungsverhalten glasfaserverstärkter Duroplaste. Neue Ansätze für eine praxisgerechte Charakterisierung. Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen- Nürnberg 1999.
- HOR95 Horoschenkoff A.: Beitrag zur Charakterisierung des nichtlinear thermoviskoelastischen Kriechverhaltens von Faserverbundwerkstoffen. PhD thesis, Technische Universität München, 1995.

- KAR99 Karger-Kocsis, J.: Fatigue Performance of polypropylen and related composites. In: Polypropylen – An A-Z Reference. Kluwer Academic Publishers, 1999, 227-232
- KDS98 Kugler, H. P., Drude, H., Senftleben, K.-U., Laser-Extensometer flexibel einsetzbar. Materialprüfung 40 (1998) 6
- KFB91 Karger-Kocsis, J., Friedrich, K.; Bailey, R.S.: Fatigue crack propagation in short and long glass fiber reinforced injection-molded polypropylene composites. Adv. Composite Mat., 1 1991, 103-121
- KFB91 Karger-Kocsis, J., Friedrich, K.; Bailey, R.S.: Fatigue crack propagation in short and long glass fiber reinforced injection-molded polypropylene composites. Adv. Composite Mat., 1 1991, 103-121
- KKP99 Koch, B.; Knözinger, G.; Pleschke, T.; Wolf, H. J.: Hybrid-Frontend als Strukturbauteil. Kunststoffe 03/1999, Carl Hanser Verlag München, S. 82-86
- LIN05 M. Lindell: "The Laminator", Version 3.50. Classical Laminated Plate Theory analysis of composites mechanical, thermal and hygral loads. Copyright 2005.
- LAZ68 Lazan, B. J.: Damping of Materials and Members in Structural Mechanics. Pergamon Press Inc., Oxford, First Edition 1968
- LUH00 Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Wichmann Verlag Heidelberg, 2000
- MCW02 Michaeli, W.; Capellmann, R.; Weibelhaus, K.: 3D-FEM Simulation des Spritzgießens. Kunststoffe 03/2000, Carl Hanser Verlag München, S. 68-74
- MOL MoldFlow Dokumentation  
Moldflow Vertriebs GmbH, 50354 Hürth-Efferen
- NSS02 Neft, J. F.; Schulte, K.; Schwarzer, P.: Mechanical Degradation of Continuous Glass Fibre-Reinforced Thermoplastics under Static and Cyclic Loading. A Prepreg Laminate – Technical Comparison. Composite Materials: Testing, Design and Acceptance Criteria, ASTM STP 1416, 2002
- NUT21 Nutting PG, Proc. ASTM Nr. 21, 1921. p. 1162
- PAR Part Converse Dokumentation. PART - Plastics And Rubber Technology GmbH, 51429 Bergisch Gladbach
- PER02 Pegoretti, A.; Ricco, T.: Crack growth in discontinuous glass fibre reinforced polypropylene under dynamic and static loading conditions. Composites: Part A 33 (2002), 1539-1547
- PES02 Petermann, J, Schulte, K,; " The effects of creep and fatigue stress ratio on the long-term behaviour of angle-ply CFRP". Polymer Composites, Technical University of Hamburg-Harburg. Composite Structures 57 (2002) S. 205-210
- POL04 Pongratz, S.; Laich, H.: Es muss nicht immer Stahl sein. Kunststoffe 07/2004, Carl Hanser Verlag München, S. 106-110

- QUA06 Informationen der Fa. Quadrant Plastic Composites AG, Hardstrasse 5, PO Box, CH-5600, Lenzburg 1, Switzerland
- RAE97 Raue, F.; Ehrenstein, G. W.: Kriechen aus dynamischen Versuchen abgeschätzt. Langzeitverhalten von elastomermodifizierten Thermoplasten (EMT). Materialprüfung 39 (1997) 6, Carl Hanser Verlag, München 1997
- REE00 Reese, O.: Ortsaufgelöste Hysteresismessung mit Hilfe eines Laser-Extensometers. Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften von Werkstücken. Dissertation TU Kaiserslautern, 2000
- REP01 Renz, R. Paiva, R.: Forschungsvorhaben: Statische und dynamische Eigenschaften charakteristischer Strukturelemente von Bauteilen aus langfaserverstärkten Thermoplasten. Förderung: Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation, 01.10.2001 – 30.09.2003
- RER77 Renz, R.: Zum zügigen und zyklischen Verformungsverhalten polymerer Hartschaumstoffe. Dissertation Universität Karlsruhe 1977
- RER97 Renz, R.; Reese, O.: Verfahren und Vorrichtung zur Untersuchung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften eines Werkstücks. Deutsches Patent DE 19707968, 27. 2. 1997
- RKM03 Roth, S.; Kühnert, I.; Mennig, G.: Fiber Orientation in weldline Areas - Investigation of an air manifold from the SMART Car International Journal of Plastics Technology, 2003
- RKS02 Roth, S.; Küster, B.; Sura, H.: 2 ½ D oder 3D?. Kunststoffe 07/2004, Carl Hanser Verlag München, S. 65-67
- RMM01 Roth, S.; Meyer, F.; Mennig, G.: Bindenahtuntersuchung am Oberteil des Kunststoffsaugrohres Pkw Smart. TECHNOMER '01, Chemnitz (2001)
- RRE00 Renz, R.; Reese, O.: Verfahren und Vorrichtung zur Untersuchung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften eines Werkstücks. Erfinderpreis 2000 Rheinland-Pfalz, Dezember 2000
- RRE97 Renz, R.; Reese, O.: Verfahren und Vorrichtung zur Untersuchung der mechanisch-dynamischen Eigenschaften eines Werkstücks. Deutsches Patent DE 19707968
- RRH00 Renz, R.; Reese, O.; Hennes, F.: *LOCALLY RESOLVED HYSTERESIS MEASUREMENT WITH LASER EXTENSOMETER*. 3rd International Conference on Mechanics of Time Dependent Materials. September, 17 to 20th, 2000, Erlangen, Tagungsband
- RRK00 Reese, O.; Renz, R.; Kugler, R.: *LOCALLY RESOLVED HYSTERESIS MEASUREMENT WITH LASER EXTENSOMETER*. 3<sup>rd</sup> International Conference on Mechanics of Time Dependent Materials. September, 17 to 20<sup>th</sup>, 2000, Erlangen, Tagungsband

- RSS04a Renz, R.; Stelzer, G.; Szymikowski, R.: Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Direkt-LFT. 7. Internationale AVK-TV Tagung, 28.-29. September 2004, Tagungsband zur gleichnamigen Fachtagung
- RSS04b Renz, R.; Staub, P.; Stelzer, G.: LOCALLY RESOLVED MEASUREMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF LONG-FIBRE REINFORCED THERMOPLASTICS (LFT). ICEM12 – 12th International Conference on Experimental Mechanics, 29 August – 2 September 2004, Politecnico di Bari, Conference Report
- SAB93 Schlarb, A. K.; Altstädt, V.; Baumgartl, H.; Drumm, R.; Brentrup, K.: Glasmattenverstärktes Polypropylen – ein recyclingfähiger Werkstoff. Kunststoffe 83 (1993) 5, 377- 382
- SBM04 Schmachtenberg, E.; Brandt, M.; Mennig, G.; Roth, S.; Renz, R.; Soós, E.; Küster, B.; Sura, H.: Faserverstärkung richtig simulieren. Kunststoffe 05/2004, Carl Hanser Verlag München, S. 94-99
- SCB05 Schmachtenberg, E.; Brinkmann, M.: Materialdatenermittlung. Crashsimulation. Kunststoffe 11/2005, Carl Hanser Verlag München, S. 135-138
- SCE74 Scheerer, H. G.: Die Ermittlung die Rissbildungsgrenzen von glasfaserverstärkten Kunststoffen bei ein- und zweiachsiger Beanspruchung, Dissertation Universität Karlsruhe 1974
- SCM04 Schmachtenberg, E.; Mannigel, M.: Auslegung von Bauteilen aus gewebeverstärkten Thermoplasten. Kunststoffe 04/2004, Carl Hanser Verlag München, S. 57-60
- SCR01 Schröder, B.: Dämpfungseigenschaften von Formgedächtnislegierungen. Anwendungen im Automobilbau, Dissertation Universität Stuttgart 2001
- STO06 Stojek, M.: Faserorientierungen in Kunststoffbauteilen berücksichtigen – Das Schnittstellenprogramm CONVERSE -. PART-GmbH, Bergisch-Gladbach, 2006
- STR06 <http://www.stressphotonics.com>.
- SZY02 Szymikowski, R.: Experimentelle Untersuchungen des mesomechanischen Schädigungsverhaltens von anisotropen Werkstoffproben aus SMC und LFT bei dynamischer Belastung. DFG Graduiertenkolleg "Ingenieurmaterialien auf verschiedenen Skalen: Experiment, Modellierung und Simulation", TU Kaiserslautern, 2002-2005
- TOP01 Tomasz Topolinski; „Zmeczenie tworzyw polimerowych. Mechanizmy niszczenia, fenomenologiczne hipotezy procesu zmeczeniowego niszczenia“. Akademia Techniczno-Rolnicza, wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw i Inzynierii Mechanicznej i Mechatroniki
- TRO03 Tröster, S.: Materialentwicklung und –charakterisierung für thermoplastische Faserverbundwerkstoffe im Direktverfahren. Dissertation, Universität Stuttgart, 2003

- WAE97 Wäber, R.: Zum Ermüdungsverlauf verstärkter Thermoplaste bei dynamischer Belastung. *Mat.-wiss. u. Werkstofftechnik.*, 28, 1997, 25-33
- WIL03 Wilson, J. M.: *Finite Element Analysis of Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composites for Structural Automotive Components*. Dissertation, 2003, University of Nottingham, School of Mechanics, Materials, Manufacturing, Engineering and Management
- WLX73 Willax, H. O.; *Der Einfluss der Werkstoffkomponenten und deren Tränkungs- und Benetzungseigenschaften auf das mechanische Verhalten von Glasfaserverstärkten Kunststoffen*, Dissertation Universität Karlsruhe 1973
- ZYZ92 Zysk, T.; Zhao, S. G.; Ehrenstein, G. W. : *Struktur und Eigenschaften von elastomermodifizierten Thermoplasten*. *Kautschuk, Gummi, Kunststoffe* 45 (1992) 11

# LEBENS LAUF

## Zur Person

Name	Rafal Szymikowski
Geboren	07. Mai 1976 in Gdansk (Danzig)
Familienstand	verheiratet
Staatsangehörigkeit	polnisch

## Schul Ausbildung

1983-1991	Grundschule in Gdansk (Danzig)
1991-1996	Energetiktechnikum in Gdansk (Danzig) Abschluss: Techniker für Heizungsenergie Abitur

## Studium

1996-2001	Technische Universität in Gdansk (Danzig) Studienschwerpunkt: Mechanik und Maschinenbau Vertiefungsrichtung: Ingenieurwesen für Konstruktionsmaterialien
2001	Abschlusstitel: Dipl.-Ing. Maschinenbau

## Berufliche Tätigkeiten

1997-2001	Grund- und Hauptpraktika in verschiedenen Bereichen des Maschinenbaus
2002-2006	Doktorand des Graduierten Kollegs und Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technische Universität Kaiserslautern am Lehrstuhl für Ressourcengerechte Produktentwicklung