

Einfluss unterschiedlicher RTM-Harze und Fasertypen auf das mechanische Eigenschaftsprofil von NCF-Composites

Diplomarbeit

von

Wolfgang Kitzmüller

erstellt an der

Polymer Competence Center Leoben GmbH

eingereicht am

**Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe
an der Montanuniversität Leoben**



Betreuung: Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald Pinter

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

Leoben, November 2007

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

Leoben, November 2007

Wolfgang Kitzmüller

DANKSAGUNG

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

An dieser Stelle möchte ich mich beim Vorstand des IWPK, Herrn o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Reinhold W. Lang für die Ermöglichung, Durchsicht und Korrektur der vorliegenden Arbeit bedanken.

Ganz besonders möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald Pinter für die Betreuung dieser Arbeit bedanken. Durch sein umfangreiches Fachwissen und seine Kenntnisse zum Verfassen von wissenschaftlichen Arbeiten, welches er mir in unzähligen Gesprächen vermittelte, gab er mir stets wertvolle Anhaltspunkte zum Interpretieren der Ergebnisse und Gelingen dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeitern des PCCL und des IWPK für das kollegiale Arbeitsklima und die zahlreichen Hilfestellungen. Speziell Herrn Dipl.-Ing. Markus Wolfahrt für die Hilfe bei der Literatursuche und Durchsicht der Ergebnisse und Herrn Mario Lintschinger für die motivierende Unterstützung möchte ich an dieser Stelle danken.

Einen weiteren Dank richte ich an die Mitarbeiter der FACC für die Erzeugung der Probekörper und im Einzelnen an Herrn Dipl.-Ing. Swen Zaremba für die stets kompetente Beantwortung meiner Fragen bezüglich Fertigung und Materialien.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und hier besonders bei meinem Vater, Wilfried Kitzmüller, bedanken. Er ermöglichte mir meinen gewählten Bildungsweg zu beschreiten und gab mir stets den nötigen Rückhalt.

KURZFASSUNG

Ziel dieser Arbeit war es verschiedene RTM-Laminat mechanisch zu charakterisieren. Als Faserhalbzeug dienten sogenannte Non-Crimp Fabrics (NCFs) aus Kohlenstofffasern. Es wurde der Einfluss unterschiedlicher Fasertypen, Matrix-Harzsysteme und Lagenaufbauten untersucht und dabei die wesentlichen Eigenschaften unter monotoner Zug- und Druckbelastung (Festigkeit und E-Modul) als auch das Ermüdungsverhalten unter wechselnder Last bestimmt.

Bei der Charakterisierung der Prüfkörper bezüglich ihrer Länge zeigte sich durchgehend eine um etwa 10 % höhere Zugfestigkeit für die ungelochten Kurzproben. Bezüglich E-Modul konnte kein Einfluss der Prüfkörperlänge ermittelt werden.

Die Untersuchungen der Fasertypen zeigten für die Proben mit dem Fasertyp HTS eine höhere Zugfestigkeit, was der höheren Festigkeit der Faser selbst entsprach. Die Probekörper mit der Faser HTA, hingegen, wiesen eine höhere Festigkeit auf Druck und auch ein etwas besseres Ermüdungsverhalten auf. Das wurde auf die Unterschiede in der Schlichte der beiden Fasern zurückgeführt. Bei den E-Modulwerten ergaben sich keine Unterschiede für beide Faservarianten.

Beim Vergleich der vier Harzsysteme (RTM6, EPS 600, EPS 601 und 977-2) zeichneten sich prinzipiell keine großen Unterschiede ab. Das Harzsystem EPS 601 hatte tendenziell die höchsten Zugfestigkeitswerte aber etwas niedrigere Festigkeitswerte auf Druck. In Bezug auf den E-Modul konnte kein Unterschied bei den Harzen ermittelt werden. Das beste Ermüdungsergebnis zeigten die Proben mit dem zäh-modifizierten Harzsystem 977-2 der Firma Cytec.

Die Untersuchungen des Einflusses vom Lagenaufbau (biaxial und quasi-isotrop) ergaben wie erwartet deutlich höhere E-Modulwerte und Festigkeiten der $0^\circ/90^\circ$ -Proben, sowohl auf Zug als auch auf Druck. Ebenso war ein besseres Ermüdungsverhalten der biaxialen Proben festzustellen.

Zusammenfassend kann insbesondere hinsichtlich der unterschiedlichen Matrix-Harzsysteme gesagt werden, dass das untersuchte mechanische Eigenschaftsprofil nur geringe Unterschiede aufwies und somit zumindest in dieser Hinsicht sich Alternativen zum bereits in der Luftfahrt qualifizierten RTM-Harzsystem HexFlow RTM6 anbieten würden.

ABSTRACT

The aim of this work was the mechanical characterization of different RTM-laminates. The fibre preforms, so called non-crimp fabrics, were made of carbon fibres. The influence of different fibre-types, resins-systems and lay-ups had been analyzed and the significant properties under monotonic tensile and compression load (stiffness and strength) as well as the fatigue behaviour under alternating load were determined.

The characterisation of the test specimens concerning their length showed an increase in tensile strength of 10 % for the short specimens. With regard to stiffness (Young's modulus) there no influence of specimen geometry was detected.

Concerning the influence of fibre-type the HTS fibre showed a higher tensile strength, whereas the specimens with the HTA fibre gave a higher compression strength and slightly better result in the fatigue tests. No effect was noticed on the results for stiffness. The differences observed were explained based on stiffness and sizing of the fibres itself.

The comparison of the four different resin-systems (RTM6, EPS 600, EPS 601, 977-2) yielded no significant differences in their property profile. There was a tendency to the highest tensile strength and the smallest compression strength for EPS601. No differences could be measured for stiffness. The best fatigue results were achieved with the toughness modified resin 977-2 from the company Cytec.

As expected the lay-up of the fibres showed a higher strength and stiffness for the biaxial lay-up, for both tensile and compression loads. Also a better fatigue performance was achieved with the biaxial samples.

Summarizing it can be concluded that there were just little differences in the mechanical property profile of the several resin-types investigated. Therefore, at least in this respect, alternative RTM-resin systems would be possible in addition to the only one qualified in civil aircraft (HexFlow RTM6).

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	III
ABSTRACT	IV
ABBILDUNGSSVERZEICHNIS	VII
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
2. GRUNDLAGEN	3
2.1 Kohlenstofffaser	3
2.2 Non-Crimp Fabric (NCF).....	4
2.2.1 Gelegeherstellung	5
2.2.2 Nähen	6
2.2.3 Mechanische Eigenschaften.....	9
2.3 Spezielle Elastizitätsgesetze	9
2.4 Epoxidharze	12
3. EXPERIMENTELLES	16
3.1 Werkstoffe	16
3.1.1 Harz-Systeme	16
3.1.2 Faserhalbzeuge und Plattenherstellung	20
3.2 Prüfkörper.....	24
3.3 Versuchsdurchführung	27
3.3.1 Zugeigenschaften	29
3.3.2 Druckeigenschaften.....	30
3.3.3 Ermüdungseigenschaften	31
3.4 Normalisierung der Testergebnisse	33
4. ERGEBNISSE	37
4.1 Einfluss der Prüfkörpergeometrie.....	37
4.2 Einfluss des Fasertyps.....	39
4.3 Einfluss des Matrix-Harz-Systems	45
4.4 Einfluss des Lagenaufbaus	50
5. ZUSAMMENFASSUNG	56
6. LITERATUR:	58

7. ANHANG	61
7.1 Airbus Tabellen - Monotone Versuche	65
7.1.1 001001 – RTM6 HTA Quasi-isotrop	65
7.1.2 001002 – RTM6 HTS Quasi-isotrop	71
7.1.3 001003 – RTM6 HTS BIAXIAL	77
7.1.4 002002 – EPS601 HTS Quasi-isotrop	83
7.1.5 003002 – EPS600 HTS Quasi-isotrop	89
7.1.6 001002 – Cycom 977-2 HTS Quasi-isotrop	95
7.2 Airbus Tabellen - Dynamische Versuche	101
7.2.1 001001 – RTM6 HTA Quasi-isotrop	101
7.2.2 001002 – RTM6 HTS Quasi-isotrop	103
7.2.3 001003 – RTM6 HTS Biaxial	105
7.2.4 002002 – EPS601 HTS Quasi-isotrop	107
7.2.5 003002 – EPS600 HTS Quasi-isotrop	109
7.2.6 001002 – Cycom 977-2 HTS Quasi-isotrop	111
7.3 Dynamische Versuche - Einzelergebnisse	113
7.3.1 001001 – RTM6 HTA Quasi-isotrop	113
7.3.2 001002 – RTM6 HTS Quasi-isotrop	115
7.3.3 001003 – RTM6 HTS Biaxial (0°/90°)	117
7.3.4 002002 – EPS 601 HTS Quasi-isotrop	119
7.3.5 003002 – EPS 600 HTS Quasi-isotrop	121
7.3.6 001002 – Cycom 977-2 HTS Quasi-isotrop	123

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1:	Schematischer Aufbau der Fertigungsmaschine für NCF-Verbunde nach LIBA (LIBA, 2007).	6
Abb. 2.2:	Darstellung eines möglichen Schichtenaufbaus (LIBA, 2007).....	6
Abb. 2.3:	Nahtarten durch die drei Stichverfahren (Gries, 2007).....	7
Abb. 2.4:	Ablauf des Doppelsteppstich-Vorgangs (Gries, 2007).	8
Abb. 2.5:	Meso-Scale Welligkeit bei 0° Faser (Mattsson et al., 2005).....	8
Abb. 2.6:	Beispiel für einen quasi-isotropen Aufbau aus UD-Lagen.....	12
Abb. 2.7:	Härtungsreaktion von EP-Harz mit Amin (Schwarz, 2000).....	14
Abb. 2.8:	Viskosität in Abhängigkeit der Reaktionszeit beim RTM-Prozess (McHugh et al., 2001).....	15
Abb. 3.2:	Zuschnittsplan der Einzelschichten (FACC, 2005).....	23
Abb. 3.2:	Konstruktionszeichnung der Kurzprobe, wahlweise mit Bohrung, nach AIM 1-0008 Issue 3.	27
Abb. 3.3:	Konstruktionszeichnung der Langprobe, wahlweise mit Bohrung, nach AIM 1-0007 Issue 3.....	27
Abb. 3.4:	Hysteresisschleife im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei zyklischer Belastung.....	32
Abb. 3.5:	Versuchsplan für Ermüdungsversuche.	33
Abb. 4.1:	Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten von Plain Tensile (PT), Short Plain Tensile (SPT), Open Hole Tensile (OHT) und Short Open Hole Tensile (SOHT) Proben mit unterschiedlichen Matrix-Harzen.....	38
Abb. 4.2:	Gegenüberstellung der E-Moduli von Plain Tensile (PT) und Short Plain Tensile (SPT) Proben mit unterschiedlichen Matrix-Harzen.....	39
Abb. 4.3:	Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten von Plain Tensile (PT), Short Plain Tensile (SPT), Open Hole Tensile (OHT) und Short Open Hole Tensile (SOHT) Proben mit HTA- und HTS-Faser.	40
Abb. 4.4:	Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten von Plain Compression (PC) und Open Hole Compression (OHC) Proben mit HTA- und HTS Faser.....	41
Abb. 4.5:	Gegenüberstellung der E-Moduli von Plain Tensile (PT), Open Hole Tensile (OHT) und Plain Compression (PC) Proben mit HTA- und HTS-Faser.	42

Abb. 4.6:	Dynamischer E-Modul über Zykluszahl für Proben mit HTA und HTS Faser bei 30 % der Zug-Bruchfestigkeit.	43
Abb. 4.7a:	Wöhlerdiagramm für Short Plain Proben mit HTA und HTS Fasern.	44
Abb. 4.7b:	Wöhlerdiagramm für Open Hole Proben mit HTA und HTS Fasern.	45
Abb. 4.8:	Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten von Plain Tensile (PT) und Open Hole Tensile (OHT) Proben mit unterschiedlichen Harzsystemen.	46
Abb. 4.9:	Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten von Plain Compression (PC) und Open Hole Compression (OHC) Proben mit unterschiedlichen Harzsystemen.....	47
Abb. 4.10:	Gegenüberstellung der E-Moduli von Plain Tensile (PT) und Plain Compression (PC) Proben mit unterschiedlichen Harzsystemen.	47
Abb. 4.11a:	Wöhlerdiagramm für Short Plain Proben der vier Harzsysteme.	49
Abb. 4.11b:	Wöhlerdiagramm für Short Open Hole Proben der vier Harzsysteme.	49
Abb. 4.12:	Dynamischer E-Modul über Zykluszahl für die verschiedenen Harzsysteme bei 30 % der Zug-Bruchfestigkeit.....	50
Abb. 4.13:	Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten von Plain Tensile (PT) und Open Hole Tensile (OHT) Proben mit quasi-isotropem und biaxialem Aufbau.....	51
Abb. 4.14:	Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten von Plain Compression (PC) und Open Hole Compression (OHC) Proben mit quasi-isotropem und biaxialem Aufbau.....	52
Abb. 4.15:	Gegenüberstellung der E-Moduli von Plain Tensile (PT) und Plain Compression (PC) Proben mit quasi-isotropem und biaxialem Aufbau.....	53
Abb. 4.16a:	Wöhlerdiagramm für Short Plain Proben mit biaxialem und quasi-isotropem Aufbau in normierten Werten dargestellt.....	54
Abb. 4.16b:	Wöhlerdiagramm für Open Hole Proben mit biaxialem und quasi-isotropem Aufbau in normierten Werten dargestellt.....	54
Abb. 4.17:	Dynamischer E-Modul über der Zykluszahl für die Proben mit biaxialem und quasi-isotropem Aufbau bei 30 % der Zug-Bruchfestigkeit.....	55

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Verbundwerkstoffe (Composites) sind Materialien, die sich aus zwei oder mehreren unterschiedlichen Komponenten zusammensetzen und so gezielte Werkstoffeigenschaften erreichen. Bei Metallen die sich aus unterschiedlichen Mischkomponenten zusammensetzen ergibt eine Verbindung meist ein homogenes Gefüge und wird daher nicht als Verbundwerkstoff, sondern als Legierung bezeichnet. Wird bei Kunststoffen eine signifikante Änderung der Werkstoffeigenschaften gewünscht, müssen Materialien (wie Glas, Aramid oder Kohlenstoff) eingebracht werden, die einen heterogenen Verbund ergeben. Dabei wird, je nach Länge und Geometrie des Füll- bzw. Verstärkungsstoffes, zwischen teilchenverstärkten und faserverstärkten Kunststoffen unterschieden, wobei die Faser das Verstärkungsmittel und das verbindende Polymere die Matrix darstellt. Das immer stärkere Auftreten von Faserverbund-Kunststoffen ist nicht nur auf ihre mechanischen Eigenschaften zurückzuführen, sondern sie ermöglichen außerdem das Fertigen von komplexen Bauteilen aus einem Stück und bieten dabei eine hohe Formstabilität und Korrosionsbeständigkeit (Wörndle, 1996; Lang, 2005; Matsson, 2005).

Besonders im Flugzeugbau werden Strukturbauteile aus faserverstärkten Kunststoffen gefertigt und haben durch ihre hohen Modulwerte und Festigkeiten bei geringem Gewicht Materialien wie Stahl und Aluminium ergänzt und sogar teilweise ersetzt. So ist im Airbus 380 der Anteil der Strukturbauteile aus faserverstärkten Kunststoffen über 20 %, was einer Vervierfachung des Anteils seit Mitte der 1980er Jahre entspricht. Bei der Boeing 787 (Dreamliner) liegt der Gewichtsanteil an Composite-Komponenten sogar bei 50 % (Chambers, 2003; Lang, 2005; Stephan, 2007).

Um die einzelnen Fasern für Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde verwenden zu können, müssen sie zu einem Flächengebilde verarbeitet werden. Hierfür sind mehrere Methoden bekannt, wobei sich in letzter Zeit das Verfahren der Gelege durch exzellente Eigenschaften in Faserrichtung und kostengünstige Fertigung auszeichnete. Diese Gelege sind bekannt als Non-Crimp Fabric (NCF), also als nicht gewellte (und somit nicht gewebte) Textilien (Mattsson, 2005).

Die Eigenschaften der Verbunde werden besonders bei nicht in Faserrichtung wirkenden Beanspruchungen stark von der Matrix bestimmt. So sind Debonding (das Ablösen der Matrix von der Faser) und die darauf folgende Delamination (die Schichtentrennung im Laminat) Versagensarten, die auf die Matrix und deren Haftung an der Faser zurückzuführen sind (Wörndle, 1996; Ehrenstein, 2006).

Der Anlass und das Ziel dieser Arbeit war neuentwickelte Harzformulierungen für den Resin Transfer Moulding (RTM) Einsatz in Kombination mit unterschiedlichen NCF Kohlenstofffaserhalbzeugen zu charakterisieren. Es wurden sechs grundlegend verschiedene Verbundwerkstoffe festgelegt, bei denen sich die Proben in ihrem Aufbau (quasi-isotrop und biaxial), den zwei eingesetzten Fasertypen und vier verschiedenen Epoxid-Matrixharzen unterschieden. Für jeden der Werkstoffe wurden sechs verschiedene Probentypen definiert, die im monotonen Zug- und Druckversuch, sowie auf Ermüdung unter wechselnder Last untersucht wurden. Es kamen dabei gelochte (open hole) und ungelochte (plain) Proben zum Einsatz, die weiters in zwei Längen hergestellt wurden. Zur Charakterisierung wurden die Zug- und Druck-Eigenschaften wie Steifigkeit (E-Modulwerte) und Festigkeit ermittelt. Weiters wurde der Verlauf des dynamischen E-Moduls über der Zyklenzahl bei unterschiedlichen Lastniveaus untersucht und damit das Maß der Schädigung ermittelt.

2. Grundlagen

2.1 Kohlenstofffaser

Aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften ist die Kohlenstofffaser, oder C-Faser, die am häufigsten eingesetzte Faser bei hochbelasteten Bauteilen und kommt meist in Kombination mit einer polymeren Matrix zum Einsatz. Sie wird durch Pyrolyse und Verstreckung von Polyacrylnitril (PAN) oder anderen organischen Ausgangsstoffen erzeugt. Wichtig dabei ist, dass die Faser während des Fertigungsprozesses nicht schmilzt, da das zu einer Reduktion des Kohlenstoffgehaltes führen würde. Das Endprodukt ist dann eine Kohlenstofffaser mit einem Durchmesser zwischen 5 und 10 μm aus einer Modifikation von fast reinem Kohlenstoff, der in Längsrichtung orientiert ist (Lang et al., 1986; Bergmann 1992). Praktisch erfolgt das Erzeugen in zwei bzw. drei Schritten. Zuerst wird die Ausgangsfaser zu dem so genannten Precursor verstreckt und dann bei maximal 300°C unter Zugspannung dehydriert. Dadurch ist das Material soweit vorbehandelt, dass ein anschließendes Schmelzen verhindert wird. Es bildet sich eine Graphitstruktur in Leiterform, die in der zweiten Phase unter einer inerten Gasatmosphäre bei bis zu 1600°C zu einer graphitischen Schichtengruppe umgewandelt wird. Dabei bleibt die Zugspannung weiterhin aufrecht und aufgrund des bereits stark gereckten Ausgangsstoffes wird eine gute Ausrichtung der Kohlenstoffschichten längs der Streckachse erreicht. Dieser Vorgang wird als Streckgraphitierung bezeichnet, der eine hochfeste Faser mit Zugfestigkeiten von über 5 GPa liefert, die als High Tenacity oder High Tension Fasern (HT-Fasern) bezeichnet werden. Im dritten Schritt wird die Graphitstruktur der HT-Faser durch eine Glühbehandlung bei 3000°C und eine weitere Verstreckung umgewandelt. Der Vorgang, Graphitierung genannt, liefert als Endprodukt eine Faser mit einem E-Modul der bis zu 400 GPa erreichen kann. Diese Fasern werden dann, je nach Modulwert, als High Modulus (HM) oder Ultra High Modulus (UHM) Fasern bezeichnet (Bergmann, 1992; Wörndle, 1996; Ehrenstein, 2006).

Mit steigender Glühtemperatur nimmt der E-Modul zu, während die Festigkeit ab einer gewissen Temperatur wieder abfällt. Weitere Entwicklungen der C-Fasern

gehen in Richtung hohe Dehnung bei hoher Festigkeit mit Bruchdehnungen von 2 % und mehr. Diese Fasern werden als HTS-Fasern (High Strain and Tenacity) bezeichnet. Eine Kompromisslösung zwischen HT- und HM-Fasern stellt die Intermediate Modulus (IM) Faser dar (Bergmann, 1992).

2.2 Non-Crimp Fabric (NCF)

Die Erzeugung von Fasern, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, liefert zunächst eine Elementarfaser, oder auch Filament genannt. Diese wird mit mehreren tausend weiteren Fasern zu einem Spinnfaden oder Garn zusammengefasst. Auf diesem Garn wird meist eine organische Substanz aufgebracht, um Schädigungen durch Scheuern bei der Verarbeitung zu minimieren. Diese Substanz wird als Schlichte bezeichnet und enthält Filmbildner, Gleitmittel und Antistatika. Weiters dient sie als Haftvermittler, da der Garn anschließend zu einem Strang (Roving) vereint wird. Nun kann daraus ein Flächengebilde entstehen. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten, wobei die gebräuchlichsten die unidirektionalen Lagen (UD-Schichten), die aus UD-Schichten aufgebauten Gelege, Gewebe und Geflechte sind (Ehrenstein, 2006).

Die Gewebe setzen sich aus sich rechtwinklig kreuzenden Kett- und Schussfäden zusammen (Spinnfäden und Rovings) und haben daher immer bidirektionale mechanische Eigenschaften. Je nach Webestil ergeben sich unterschiedliche Webemuster (Bindungen), wobei das Verhältnis des Fadengewichts von Kett- (0° Richtung) zu Schussfäden (90° Richtung) bis zu 20:1 betragen kann. Es entsteht so beinahe ein unidirektionales Gewebe. Allerdings kommt es aufgrund der Verwebung zu Einbußen der mechanischen Eigenschaften in 0° Richtung (Bergmann, 1992).

Die Geflechte (Braidings) sind relativ neue Flächengebilde, die es erlauben, die gewünschte Bauteilform bereits vorgeformt und sehr verschnittarm zu erzeugen. Aufgrund des komplexen Fertigungsprozesses ergibt sich eine multiaxiale Verstärkung, die hohe Festigkeit und Steifigkeit ergibt (Kruckenberg und Paton, 1998).

Unidirektionale (UD) Schichten stellen die einfachste Form der Hochleistungsverbunde dar, in der die Fasern parallel zueinander gerade ausgerichtet vorliegen und von der Matrix verbunden werden. Hier ergibt sich das höchste Maß an Anisotropie, wobei die Zugeigenschaften quer zur Faserrichtung niedriger sein können, als beim ungefüllten Matrixharz (Ehrenstein, 2006).

Diese UD-Schichten zeichnen sich durch ihre nicht gewellten Fasern über die ganze Länge aus und lassen sich zu einem Verbund mit unterschiedlichen Lagenwickeln verarbeiten, was zu einer bewussten Beeinflussung der Anisotropie führt. Diese Art Verbunde werden als Non-Crimp Fabrics, NCF, bezeichnet. Neben den exzellenten mechanischen Eigenschaften durch den unabgelenkten Kraftfluss, haben sich die NCF aufgrund ihrer kostengünstigen Fertigung in den letzten Jahren immer mehr in der praktischen Anwendung durchsetzen können (Mattsson, 2005; Ehrenstein, 2006).

2.2.1 Gelegeherstellung

Das vollautomatisierte Legen von Fasern stammt, so wie das Weben, Stricken und Flechten von Matten aus technischen Fasern, ursprünglich aus der Textilindustrie. Die Gelege können aus Glas-, Aramid- und Kohlenstofffasern (GFK, AFK und CFK) erzeugt werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten einen NCF-Verbund zu erzeugen, aber am stärksten verbreitet ist das Verfahren der Firma LIBA Maschinenfabrik GmbH (Naila, D). Hier wird, wie in Abb. 2.1 dargestellt, der gesamte trockene Verbund auf einer Maschine gelegt und abschließend vernäht. Es können dabei bis zu sieben Schusslagen (in Modulen erweiterbar) mit Winkeln von $+20^\circ$ bis -20° durch jeweils ein Schuss-System gelegt werden, die mit einer oben liegenden 0° Schicht (den Stehfäden) verstärkt wird. Jede Schicht wird aus einzelnen Fasern aus dem Magazin mittels Legeköpfen in den gewünschten Winkel übereinander positioniert. Dabei erfolgt der Aufbau von unten nach oben. Nach der letzten Schussschicht wird die Stehfadenschicht gelegt und das noch unvernähte, trockene Gelege wird in der Schneideeinrichtung am Rand beschnitten (in der Abb. 2.1 rot dargestellt). Vor dem Vernähen kann oben und unten zusätzlich eine Fasermatte eingearbeitet werden. Abschließend wird das Faserhalbzeug vernäht, so dass die einzelnen Lagen miteinander fixiert sind und bei der späteren Formge-

bung die Fasern in den gewünschten Winkeln bleiben. Abb. 2.2 zeigt einen Gelgeverbund beim Vernähen. Am Ende der Maschine wird das Flächengebilde über ein Walzensystem abgezogen und aufgerollt (Kruckenberg und Paton, 1998; Leong et al., 2000; LIBA, 2007).

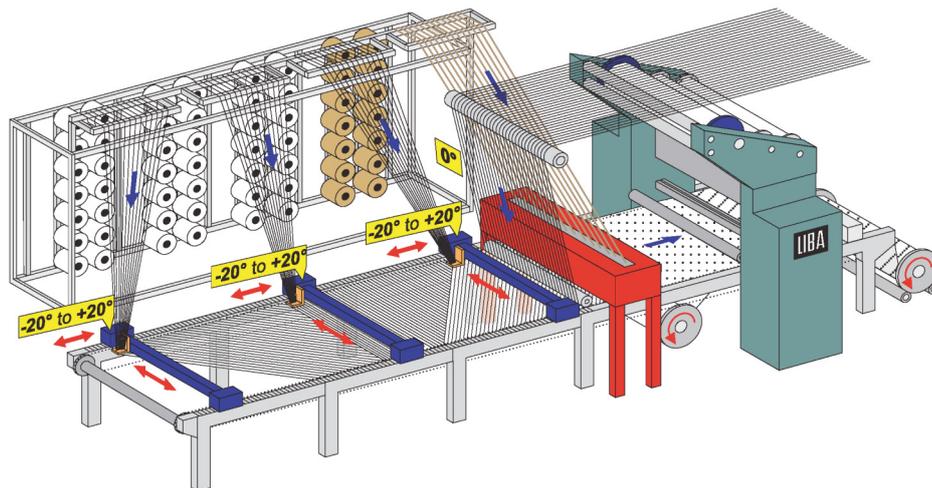


Abb. 2.1: Schematischer Aufbau der Fertigungsmaschine für NCF-Verbunde nach LIBA (LIBA, 2007).

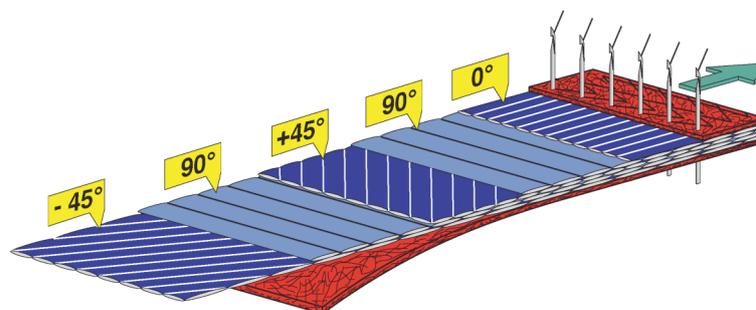


Abb. 2.2: Darstellung eines möglichen Schichtenaufbaus (LIBA, 2007).

2.2.2 Nähen

Das Nähen erfolgt zum Schluss des Legeprozesses und sorgt für einen Kraftfluss in der Fügezone und eine lokale Verstärkung des Verbundes (besonders in z-Richtung). In der Praxis kommen momentan zwei Stichverfahren zum Einsatz: der Kettenstich (chain stitch) und der Steppstich (lock stitch). Ein noch unkonventio-

nelles Verfahren, bei dem rechter und linker Nadelfaden auf einer Seite zusammengeführt werden, ist das einseitige Nähen (one-sided). Abb. 2.3 stellt die Nähte der drei Verfahren dar. Für die Nahtqualität und somit auch die Verbundqualität sind Nähparameter wie Nähgeschwindigkeit, Fadenzugkräfte, Stichdichte und Nahtanzahl, sowie der Einfluss der Nadel durch Spitzenform, Öhrdurchmesser und Nadelschaft von Bedeutung (Gries, 2007).

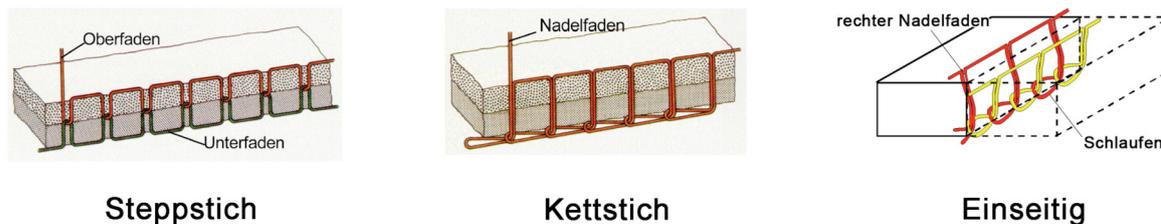


Abb. 2.3: Nahtarten durch die drei Stichverfahren (Gries, 2007).

Der Stepstich (genauer: Doppelstepstich) hat sich durch seine Möglichkeit verschiedene Garne auf Ober- und Unterseite zu verwenden und seine gute Nahtfestigkeit in der Praxis am häufigsten durchgesetzt. Besonders wenn die Dicke des Verbundes variiert, zeichnet sich das Verfahren durch konstante Nahtfestigkeit und gute Handhabbarkeit aus. Weiters zeichnet sich dieser Stichtyp durch eine geringe Dehnung der Nähte im Vergleich zu anderen Verfahren aus, die nur mehr schwer aufgetrennt werden können, was bei der Vorbereitung von Faserhalbzeugen, besonders bei einem nachfolgendem Zuschnitt, wichtig ist um die Formgenauigkeit zu erhalten. Der Mechanismus des Nähens basiert auf dem Prinzip der Überkreuzung von Ober- und Unterfaden und gliedert sich in drei Schritte, wie in Abb. 2.4 zu sehen ist. Zuerst sticht die Nadel von oben ein und bildet bei der Aufwärtsbewegung eine Fadenschleife die vom Greifer (von unten) erfasst wird (Bild 1 und 2). Dieser weitet die Schleife auf und legt sie um die Spule (Bild 3 bis 5). Anschließend wird der Oberfaden wieder zurückgezogen und es kommt zur Fadenverkreuzung im Material (Bild 6) (Weimer, 2002; Gries, 2007).

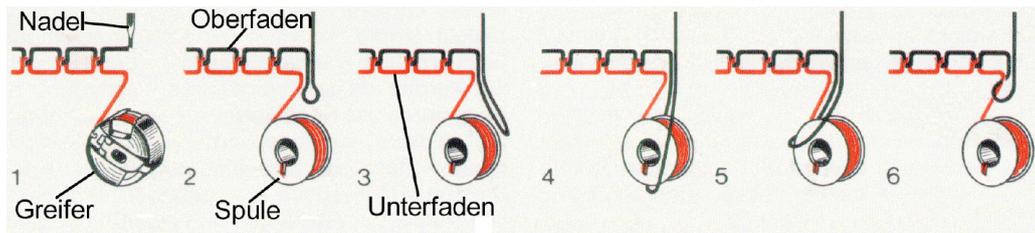


Abb. 2.4: Ablauf des Doppelstepstich-Vorgangs (Gries, 2007).

Obwohl das Vernähen der Laminat eine Verbesserung der Eigenschaften in z-Richtung bewirkt, so werden durch das Einstechen der Nadel die Fasern geschädigt, was zu einer Verschlechterung der Festigkeit in Ebenenrichtung führt (Gries, 2007).

Durch das Eindringen der Nadel werden Faserbündel geteilt und Fasern abgebrochen, oder es bilden sich Harznester zwischen den Fasern (Miller, 1996).

Weiters kann das Nähen eine Welligkeit der 0° Fasern hervorrufen. Besonders bei biaxialen Gelegen kommt es aufgrund von hohen Fadenzugkräften und einem Aufspalten der 0° Faserngarne zu Welligkeiten in und senkrecht zur Faser-Ebenenrichtung, wie in Abb. 2.5 zu sehen ist. Bei quasi-isotropen Laminaten ist der Effekt der Welligkeit praktisch nicht feststellbar (Mattsson et al., 2005).

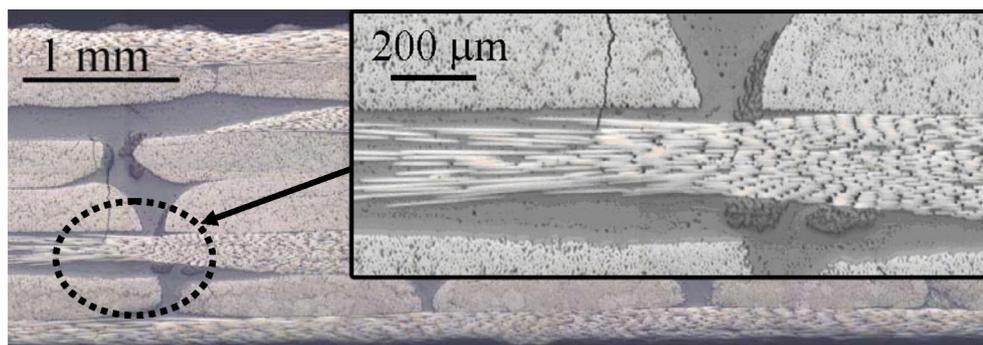


Abb. 2.5: Meso-Scale Welligkeit bei 0° Faser (Mattsson et al., 2005).

2.2.3 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften der Gelege unterscheiden sich von denen der Gewebe oder Geflechte deutlich. Dies kann auf die gerade Anordnung der Fasern zurückgeführt werden, aber auch auf die zusätzliche Versteifung durch die Vernähung. So zeigen sich bei NCF deutlich höhere Steifigkeiten besonders senkrecht zur Faserebene („out-of-plane“). In der Faserebene („in-plane“) gibt es in der veröffentlichten Literatur unterschiedliche Ergebnisse und so kann nicht genau gesagt werden, ob der Nähprozess einen Einfluss auf die in-plane Eigenschaften hat (Mouritz et al., 1997; Tsai und Chen, 2005).

Die **Zugfestigkeiten** der NCF liegen im Allgemeinen niedriger als bei Gewebeproben mit gleichem Aufbau und Querschnitt (bis 35 %). Ursache hierfür liegt beim Vernähen der Schichten, wo es zu Schädigungen in der Faser durch die Nadel kommt. Die Steifigkeit liegt ebenfalls etwas niedriger und ist stark abhängig vom Faservolumengehalt und dem Anteil von Fasern in Zugrichtung und deren Welligkeit.

Ebenso liegt die **Druckfestigkeit** und -steifigkeit generell bei Gelegen niedriger als bei vergleichbaren Geweben. Auch hier streuen die Angaben in der Literatur, so dass keine allgemeine Aussage möglich ist. Zu den Haupteinflüssen zählt wieder der Faservolumengehalt und die Anzahl der Schichten in der jeweiligen Richtung (Godbehere, 1994; Bibo et al., 1997; Mattsson, 2005).

2.3 Spezielle Elastizitätsgesetze

Wird ein Körper einer Kraft ausgesetzt, verformt sich dieser mit einer, der Kraft entsprechenden, Dehnung. Wenn sich die Dehnung linear zur Kraft, bzw. der im Körper auftretenden Spannung verhält, wird dieser Bereich von dem verallgemeinerten Hooke'schen Gesetz beschrieben und der Körper ist vollkommen elastisch. Die Spannungen und Dehnungen bilden je einen Tensor zweiter Ordnung mit neun Komponenten. Für die Dehnungen lautet die Formel (Wörndle, 2007):

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{C}} * \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{\alpha}} * \Delta T \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei ε die Dehnung, C der Nachgiebigkeitstensor (6 x 6 Matrix), σ die Spannung, α der Temperaturexpansionskoeffizient und ΔT die (eventuelle) Temperaturänderung in Matrixschreibweise ist.

Je nach Lagenanordnung und Aufbau des Verbundes ergeben sich laut Schürmann (2004) unterschiedliche Eigenschaften, die sich mit nachfolgenden Gesetzmäßigkeiten erklären lassen.

Allgemeine Anisotropie:

Die allgemeine, oder trikline Anisotropie ist die allgemeinste Form der Anisotropie. Ein Material das vollständig Anisotrop ist, besitzt keine Symmetrieebenen. Der Nachgiebigkeits- bzw. Steifigkeitstensor (s. Gl. 2) ist voll besetzt und daher weist das Material in unterschiedlichen Richtungen unterschiedliche Modulwerte auf. Es herrscht somit eine Kopplung der diversen Beanspruchungsarten, wie Zug, Biegung und Torsion. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn eine unidirektionale Faserschicht (UD-Schicht) außerhalb ihrer drei Hauptachsen belastet wird. Die Gleichung 2a zeigt die Beschreibung der wichtigsten Terme der Steifigkeitsmatrix. Diese haben für alle weiteren Materialgesetze Gültigkeit (Schürmann, 2004; Würndle, 2007).

$$\underline{\underline{C}} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$\text{mit} \quad \begin{array}{lll} C_{11} = \frac{1}{E_X} & C_{12} = -\frac{\nu_{YX}}{E_Y} & C_{13} = -\frac{\nu_{ZX}}{E_Z} \\ C_{21} = -\frac{\nu_{XY}}{E_X} & C_{22} = \frac{1}{E_Y} & C_{23} = -\frac{\nu_{ZY}}{E_Z} \\ C_{31} = -\frac{\nu_{XZ}}{E_X} & C_{32} = -\frac{\nu_{YZ}}{E_Y} & C_{33} = \frac{1}{E_Z} \\ C_{44} = \frac{1}{G_{YZ}} & C_{55} = \frac{1}{G_{ZX}} & C_{66} = \frac{1}{G_{XY}} \end{array} \quad (\text{Gl. 2a})$$

Rhombische Anisotropie (Orthotropie):

Die Orthotropie stellt einen Sonderfall der Anisotropie dar. Hier fallen die drei Hauptebenen der elastischen Eigenschaften mit den drei Koordinatenebenen zusammen. Es fallen die Kopplungen der Schubspannungen und Längsdehnungen und Schubspannungen untereinander weg (s. Gl. 3). Der E-Modul bleibt aber richtungsabhängig. In der Praxis treten meistens orthotrope Werkstoffe auf, so ist Stahl zwar isotrop (siehe später), allerdings aufgrund von Walzprozessen wird daraus ein orthotropes Material. Eine UD-Schicht ist durch ihre in eine Richtung orientierte Faser ebenfalls orthotrop (Schürmann, 2004; Wörndle, 2007).

$$\underline{\underline{C}} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 3})$$

Isotropie:

Die Isotropie ist ein Sonderfall der Orthotropie. Ist ein Material isotrop, so besitzt es in alle Richtungen gleiche elastische Eigenschaften. Dies zeigt sich im Nachgiebigkeitstensor (Gl. 5) dadurch, dass die in den Gleichungen 4a bis 4c angegebenen Terme die selben Werte einnehmen. Ein Faserverbund kann, aufgrund seiner orthotropen Einzelschichten, keine Isotropie erreichen. Es wird daher oft eine **Quasi-Isotropie** angestrebt. Bezogen auf die Steifigkeit lässt sich das durch einen zur Mittelebene symmetrischen Aufbau aus 0° , $+45^\circ$, -45° und 90° angeordneten Schichten erreichen. Abb. 2.3 zeigt einen typischen quas-isotropen Aufbau aus unidirektionalen Einzelschichten. Die Festigkeit ist immer abhängig von der Faserorientierung und daher lässt sich ein wirklich quasi-isotroper Verbund nur durch unendlich viele Schichten mit entsprechend kleinen Winkelunterschieden (oder einer Wirrfasermatte) realisieren (Wörndle, 1996; Schürmann, 2004; Wörndle, 2007).

$$C_{11} = C_{22} = C_{33} \quad (\text{Gl. 4a})$$

$$C_{12} = C_{13} = C_{23} \quad (\text{Gl. 4b})$$

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} \quad (\text{Gl. 4c})$$

$$\underline{\underline{C}} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 5})$$

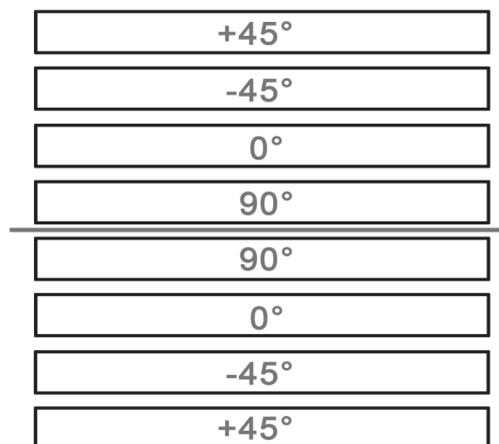


Abb. 2.6: Beispiel für einen quasi-isotropen Aufbau aus UD-Lagen.

2.4 Epoxidharze

Um aus dem trockenen Faservorformling ein technisches Bauteil zu erzeugen, muss das Faserhalbzeug mit einer Matrix verbunden werden. Diese gewährt den Zusammenhalt zwischen den Fasern und die Formhaltigkeit des Bauteils. Die Wahl des Matrixwerkstoffes hängt besonders von dem eingesetzten Bereich und von den dort vorherrschenden Temperaturen und der Feuchtigkeit ab. Weiters entscheidet auch die Art der Verarbeitung die Wahl der Matrix. Bei Faserverbunden kommen meist Polymermatrizen zum Einsatz, obwohl auch Metall, Keramik, Glas oder auch Kohlenstoff als Matrix möglich wäre (Bergmann, 1992).

Einer der wichtigsten Vertreter der polymeren Matrizen sind die Epoxid-Harze (EP), die zu der Gruppe der Duromere gehören. Sie zeichnen sich durch einen amorphen Aufbau mit einer sehr engen dreidimensionalen Vernetzung aus. Die

Haupteigenschaften der Epoxidharze sind hohe Chemikalienbeständigkeit, sehr gute mechanische Festigkeiten und Wärmeformbeständigkeit. Für die Verarbeitung wichtige Merkmale sind unter anderem die niedrige Viskosität und die thermische Aushärtung (Wörndle, 1996; Lang, 2001).

Konventionell werden Epoxid-Harze durch eine Umsetzungsreaktion der Ausgangsstoffe Bisphenol-A und Epichlorhydrin hergestellt, wobei sich dabei Chlorwasserstoff abspaltet. Es entstehen dann lineare Epoxid-Harz-Moleküle mit sehr reaktionsfreudigen Hydroxylgruppen am Ende der Ketten. Für die Aushärtung werden Härter benötigt, die sich durch Additionsreaktion an das Harz binden. Üblicherweise werden für kalthärtende Systeme aliphatische Amine und für die Warmaushärtung aromatische Amine verwendet. Die warmhärtenden Systeme zeichnen sich durch deutlich kürzere Reaktionszeiten und höhere Vernetzungsgrade aus und haben sich daher in der Verbundtechnologie durchgesetzt. Die Temperaturbeständigkeit und die mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe steigen mit dem Vernetzungsgrad, der wiederum von der Aushärtetemperatur abhängig ist. So liegen die Verarbeitungstemperaturen der Verbunde zwischen 120 °C und 180°C. Ein direkt anschließendes Nachhärten mit einer Temperaturerhöhung von 20 °C ist möglich und führt zu einer noch besseren Temperaturresistenz, allerdings mit gleichzeitiger Reduktion der Duktilität. Nachteilig ist zu erwähnen, dass die Epoxid-Harze dazu neigen, Wasser aufzunehmen und dadurch die mechanischen Eigenschaften deutlich verschlechtern (besonders in Kombination mit hohen Temperaturen)(Bergmann, 1992; Wörndle, 1996; Schwarz, 2000).

Die Härtingsreaktion verläuft bei den Epoxidharzen über die Ringöffnung der Epoxidgruppe, genauer Ethylenoxidgruppe, durch eine stufenweise Additionsreaktion ab. In Abb. 2.7 ist eine aminische Härtingsreaktion vereinfacht dargestellt.

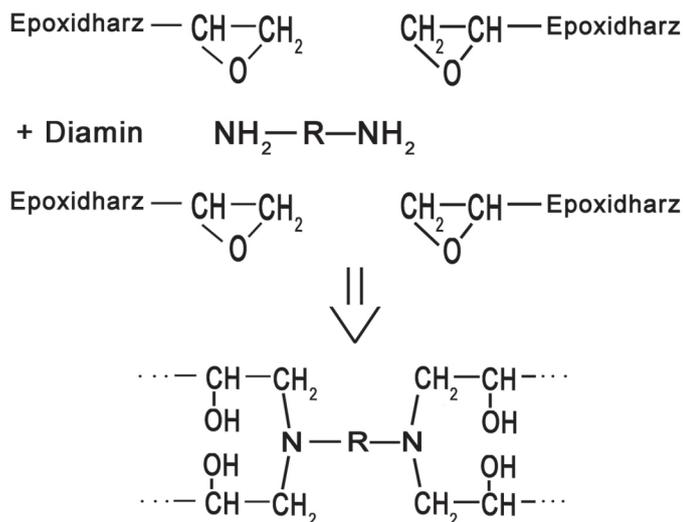


Abb. 2.7: Härtungsreaktion von EP-Harz mit Amin (Schwarz, 2000).

Der genaue Verlauf und die gewünschten Eigenschaften hängen stark vom verwendeten Harz-Härter-System ab und können mittels Zusatzstoffen, wie Beschleunigern weiter beeinflusst werden (Lang et al., 1986).

Bei der Verarbeitung von Verbundwerkstoffen ist nach wie vor die Prepreg-Technologie Stand der Technik, allerdings gewinnt das Resin Transfer Moulding (RTM) Verfahren durch kurze Zykluszeiten und einfache Formgebung zunehmend an Bedeutung. In diesem Verfahren wird das noch trockene Gewebe in eine beheizbare Pressform gebracht. Nach dem Schließen wird Harz in Überschuss in die Form eingespritzt, wobei das eingesetzte Harz-Härter-System die Aushärtezeit bestimmt. Dieses Verfahren setzt eine niedrige Viskosität des Harzes voraus, da sonst die Fasern nicht vollständig mit Harz getränkt werden. Für diesen Prozess ist die Fließfähigkeit des Standard Harz-Härter-Gemisches meist zu hoch und daher muss mit weiteren Zusatzstoffen gearbeitet werden. Hier bietet sich die Beigabe von organischen Lösungsmitteln an, die während der Verarbeitung entweichen. Die Herabsetzung der Viskosität der flüssigen Phase führt zu einer Versprödung des Harzes im ausgehärtetem Zustand, daher muss eine Kompromisslösung gefunden werden, um das Harz-System für den RTM Prozess und den späteren Einsatz brauchbar zu machen. Die Harz-Systeme werden darum zäh modifiziert (Ehrenstein und Bittmann, 1997; Rudd et al., 1997).

Das Wichtigste beim Füllprozess ist, dass es zu keinen Lufteinschlüssen und trockenen Stellen kommt. Daher empfiehlt es sich, den Verlauf der Fließfront zu kennen und während des Füllens zu kontrollieren, wodurch Korrekturmaßnahmen in der Phase, während das Harz noch niedrigviskos ist, möglich sind. Wie schon vorher beschrieben, ist der Aushärtungsprozess bestimmend für den Vernetzungsgrad. Während des Härtens ändert sich der Zustand des Harzes von flüssig über gelartigen auf fest. Für die Verarbeitung ist es wichtig zu wissen, ab wann das Harz den noch fließfähigen Zustand verlässt und in den festen Zustand übergeht. Dieser Punkt wird als Gelpunkt bezeichnet. Mit fortschreitender Vernetzung steigt die Steifigkeit des Harzes, wobei mit zunehmendem Vernetzungsgrad die Reaktion immer langsamer abläuft, da die Molekülbeweglichkeit immer mehr behindert wird. Ab dem Glaspunkt gilt das Harz als Festkörper. Um eine vollständige Durchhärtung zu erreichen, müssen alle Ausgangsstoffe vernetzen. Dazu muss die Reaktionstemperatur über der Glasstemperatur liegen und eine gewisse Zeit anhalten, damit das Harz durchhärten kann. Praktisch kann dies in einem DSC (Dynamic Scanning Calorimetry) Versuch bestimmt werden und so die Zeit festgelegt werden, ab wann entformt werden kann. In Abb. 2.8 ist die Änderung der Viskosität des Harzes und der Schubmodul im Laufe der Reaktionszeit abgebildet (McHugh et al., 2001).

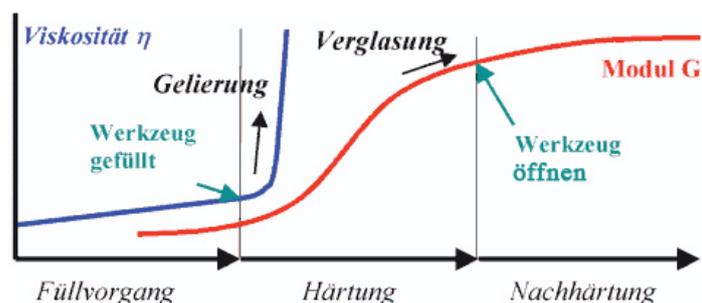


Abb. 2.8: Viskosität in Abhängigkeit der Reaktionszeit beim RTM-Prozess (McHugh et al., 2001).

3. Experimentelles

3.1 Werkstoffe

In dieser Diplomarbeit wurden vier verschiedene Epoxid-Harz-Systeme in Kombination mit zwei verschiedenen Kohlenstofffasertypen, die zu NCF-Verbunden mit unterschiedlichem Aufbau verarbeitet waren, charakterisiert und miteinander verglichen. Voraussetzung für alle Harzsysteme war die Eignung für den Resin Transfer Moulding (RTM) Prozess.

3.1.1 Harz-Systeme

Zum Einsatz kamen vier sogenannte Einkomponenten-RTM-Epoxid-Harz-Systeme, wobei als Referenz das bisher einzige in der Luftfahrt zugelassene Harz, HexFlow[®] RTM6, des französischen Herstellers Hexcel Composites (Dagneux, F) diente. Die drei anderen Harze waren das Bakelite[®] EPS 600 und Bakelite[®] EPS 601 der zum US-amerikanischen Konzern Hexion Speciality Chemicals, Inc. (Columbus, OH) gehörenden Firma Bakelite AG (Duisburg-Meiderich, D), sowie das CYCOM[®] 977-2 der Firma Cytec Engineered Materials, Inc. (Tempe, AZ, USA). Die vier Harze charakterisieren sich wie nachfolgend beschrieben.

HexFlow[®] RTM6

Das RTM6-Harz ist ein für die Verarbeitung fertig gemischtes (Harz und Härter sind im stöchiometrischen Verhältnis bereits gemischt, was das Harz streng genommen zu keinem Einkomponenten-Harz macht) Epoxid-Harz, das für eine Einsatztemperatur von -60°C bis +180°C ausgelegt ist. Bei Raumtemperatur ist das Harz eine braune, lichtdurchlässige, sehr zähfließende Masse. Für die Verarbeitung muss das Harz auf 80°C und die Pressform auf 120°C vorgewärmt werden (laut Hersteller). Der Verarbeitungsdruck liegt zwischen 1 und 3 bar. In der Werkzeugform härtet das Harz bei 160°C innerhalb 75 min aus. Bei Raumtemperatur lässt sich das Harz mindestens 15 Tage lagern (Shelf Life), bei Reduktion der Lagertemperatur auf -18°C werden 9 Monate garantiert (Guaranteed Shelf Life). Das

RTM6 wird bereits entgast angeliefert und kann direkt verarbeitet werden. Folgende Spezifikationen wurden aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen (Hexcel Corporation Publication ITA 065d (März 2007)).

Gel Zeit T_{GEL} [min]:

$T_{\text{GEL}} > 240$ min bei 120°C

$T_{\text{GEL}} = 30$ min bei 180°C

Viskosität η [mPa.s] bei 120°C:

$\eta = 33$ mPa.s

Glasübergangstemperatur T_g [°C] (des vernetzten Harzes):

$T_g = 160^\circ\text{C}$ im trockenen Zustand

$T_g = 183^\circ\text{C}$ im trockenen Zustand, nachvernetzt (120 min, 180°C)

Dichte ρ [g/cm³] bei 25°C

$\rho = 1,11$ g/cm³ des ungehärteten Harzes

$\rho = 1,14$ g/cm³ des gehärtet Harzes

Wasseraufnahme Δm [%] (14 Tage bei 70°C in destilliertem Wasser):

$\Delta m = 2,1$ %

Bakelite® EPS 600

Das Harzsystem EPS 600 ist ein Einkomponenten Epoxid-Harz, dass sich besonders durch seine guten Verarbeitungseigenschaften als noch unvernetztes Harz und seine guten mechanischen Eigenschaften im ausgehärteten Zustand auszeichnet. Es zeigt weiters eine niedrige Wasseraufnahme im unvernetzten Zustand. Die Lagerhaltbarkeit hängt stark von der Lagertemperatur ab und reicht von drei Monaten bei 5°C bis zu 9 Monaten bei -18°C. Es zeigt gute Resistenz gegen Chemikalien wie Hexan, Natriumhydroxid und Toluol. Allerdings kommt es bei Kontakt mit Methylethyketon (MEK), Schwefel- und Salpetersäure zu erheblichen Schädigungen. Die Verarbeitungs-/ Einspritztemperatur sollte bei 120°C liegen. Es sollten keine größeren Mengen des Harzes auf über 80°C erwärmt werden, da das zu lokalen Temperaturüberhöhungen führen kann und so eine unkontrollierbare exotherme Reaktion ausgelöst werden kann. Folgende Spezifikationen wurden

aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen (Bakelite AG ATE-E1 (Oktober 2003)).

Gel Zeit T_{GEL} [*min*]:

$$T_{\text{GEL}} = 260 \pm 20 \text{ min} \quad \text{bei } 120^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{GEL}} = 23 \pm 5 \text{ min} \quad \text{bei } 180^{\circ}\text{C}$$

Viskosität η [*mPa.s*] bei 120°C :

$$\eta = 50 \pm 20 \text{ mPa.s}$$

Glasübergangstemperatur T_g [$^{\circ}\text{C}$]:

$$T_g = 202^{\circ}\text{C} \quad \text{im trockenen Zustand}$$

$$T_g = 216^{\circ}\text{C} \quad \text{im trockenen Zustand, nachvernetzt (120 min, } 180^{\circ}\text{C)}$$

Dichte ρ [*g/cm³*] bei 25°C

$$\rho = 1,10 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3 \quad \text{des ungehärteten Harzes}$$

Wasseraufnahme Δm [%] (14 Tage bei 70°C in destilliertem Wasser):

$$\Delta m = 2,5 \%$$

Bakelite[®] EPS 601

Das Harzsystem EPS 601 ist ebenfalls ein Einkomponenten Epoxid-Harz, dass sich vom EPS 600 vor allem durch seine hohe Bruchfestigkeit und seine sehr niedrige Wasseradsorptionsneigung (auch bei hohen Temperaturen) unterscheidet. Durch den hohen Glasübergangsbereich von über 200°C ist es besonders gut für den „hot-wet“ Einsatz, also dem Einsatz unter erhöhter Luftfeuchtigkeit und hohen Temperaturen (z.B. 70°C), geeignet. Die Lagerhaltbarkeit hängt stark von der Lagertemperatur ab und reicht von drei Monaten bei 5°C bis zu 9 Monaten bei -18°C . Auch beim EPS 601 liegt, wie beim EPS 600, die Verarbeitungs-/ Einspritztemperatur bei 120° und es gelten die gleichen Sicherheitshinweise. Folgende Spezifikationen wurden aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen (Bakelite AG ATE-E1 (Oktober 2003)).

Gel Zeit T_{GEL} [min]:

$$T_{\text{GEL}} = 260 \pm 20 \text{ min} \quad \text{bei } 120^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{GEL}} = 23 \pm 5 \text{ min} \quad \text{bei } 180^{\circ}\text{C}$$

Viskosität η [mPa.s] bei 120°C :

$$\eta = 50 \pm 20 \text{ mPa.s}$$

Glasübergangstemperatur T_g [$^{\circ}\text{C}$]:

$$T_g = 217^{\circ}\text{C} \quad \text{im trockenen Zustand}$$

$$T_g = 205^{\circ}\text{C} \quad \text{im trockenen Zustand, nachvernetzt (120 min, } 180^{\circ}\text{C)}$$

Dichte ρ [g/cm^3] bei 25°C

$$\rho = 1,10 \pm 0,02 \text{ g}/\text{cm}^3 \quad \text{des ungehärteten Harzes}$$

Wasseraufnahme Δm [%] (14 Tage bei 70°C in destilliertem Wasser):

$$\Delta m = 1,7 \%$$

Cycom[®] 977-2

Cycom[®] 977-2 ist ein schlagfest modifiziertes Epoxid-Harz-System, das für den Autoklaven und den RTM-Prozess geeignet ist. Es zeichnet sich durch hervorragende mechanische Werte aus, wobei besonders die Impact Eigenschaften herausstechen. Die Aushärtung findet bei 177°C statt und die Einsatztemperatur kann bis 138°C im trockenen und 104°C im feuchten Zustand betragen. Als Lagerzeit bei -18°C werden 12 Monate vom Hersteller angegeben. Folgende Spezifikationen wurden aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen (Cytac Engineered Materials, Rev. E (Februar 2002)).

Glasübergangstemperatur T_g [$^{\circ}\text{C}$]:

$$T_g = 212^{\circ}\text{C} \quad \text{im trockenen Zustand}$$

Dichte ρ [g/cm^3] bei 25°C

$$\rho = 1,30 \text{ g}/\text{cm}^3 \quad \text{des ungehärteten Harzes}$$

3.1.2 Faserhalbzeuge und Plattenherstellung

Es wurden zwei verschiedene Hochleistungskohlenstofffasern der Firma Toho Tenax Europa GmbH (Wuppertal, D) verwendet, die sich maßgeblich durch die aufgetragene Schlichte (s. Kapitel 2.3) unterscheiden.

Zum Einsatz kamen die Fasertypen Tenax-E-HTA-5131-400tex-f6000-Z10 und Tenax-E-HTS-5631-800tex-f12000-Z10. Die Nomenklatur der Fasern war dabei folgende:

Tenax [®]	Markenname
E	Werk Oberbruch, Deutschland (E = Europa, J = Japan, A = USA)
HTA	Garntyp (Standardmodul, HT-Fasern) HTA: Faser mit Epoxid-Harz Schlichte HTS: Faser mit Polyurethan Schlichte
5131	Garntypcode (Beinhaltet speziell die Präperationsart) 5131 = Type mit ca. 1,3 % Schlichteauftrag auf Epoxidharz-Basis 5631 = Type mit ca. 1,0 % Schlichteauftrag auf Polyurethan-Basis
400tex	Garnfeinheit (1tex = 1 Gramm/ 1000 Meter)
f6000	Filamentanzahl
Z10	Drehrichtung des Garns und Garndrehungen pro Meter (ohne Drehung wäre es t0)

Die Spezifikationen der HTA und HTS Fasern sind in der Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Produktbeschreibung und Eigenschaften der Tenax HTS und HTA Faser.

Eigenschaft	Tenax® HTA 5131	Tenax® HTS 5631
Filamentdurchmesser [μm]	7	7
Dichte [g/cm^3]	1,76	1,77
Zugfestigkeit [MPa]	3950	4300
Zug-Modul [GPa]	238	240
Bruchdehnung [%]	1,7	1,8

Die beiden Fasertypen sind klassische Hochleistungskohlenstofffasern und gehören zur Gruppe der High Tenacity (HT) Fasern (s. Kapitel 2.1). Die HTA Faser ist die ältere Faservariante im Produktprogramm der Firma Toho Tenax GmbH und wird bei der Produktion mit einer Schlichte aus Epoxid-Harz mit einem Auftrag von ca. 1,3 %, versehen. Die HTS Faser wird mit einer Polyurethanschlichte mit einem Präparationsauftrag von ca. 1 %, versehen. Beide Fasern werden aus Polyacrylnitril (PAN) gewonnen. Sie zeichnen sich neben den oben erwähnten Eigenschaften noch durch chemische Resistenz, wie zum Beispiel die Beständigkeit gegen Säuren, Alkalien und organische Lösungsmittel, geringe Wärmeausdehnung und gute elektrische Leitfähigkeit aus. Die HTS-Faser zeigt einen etwas höhere E-Modulwert und Festigkeit im Vergleich zur HTA-Faser. Beide Fasertypen weisen dabei die selbe Bruchdehnung auf.

Die Fasern wurden von der Firma Saertex GmbH & Co. KG (Saerbeck, D) auf einer Schusseintragsmaschine der Firma LIBA Maschinenfabrik GmbH (Naila, D) (siehe auch Kapitel 2.3.1) zu zweischichtigen, bidiagonalen Karbon Gelegen, unter den Winkeln $+45^\circ$ und -45° , mit 1270 mm Breite verarbeitet und vernäht. Dabei wies jede Lage ein Flächengewicht von $267 \text{ g}/\text{m}^2$ und der Nähfaden (PES 74 dtex SC) ein Flächengewicht von $6 \text{ g}/\text{m}^2$ auf. Das Gesamtflächengewicht des trockenen

Verbundes war somit 540 g/m^2 . Abb. 3.1 zeigt die Orientierung der Fasern im bidiaogonalen Gelege zur Produktionsrichtung ($x = 0^\circ$ oder Kett-Richtung).

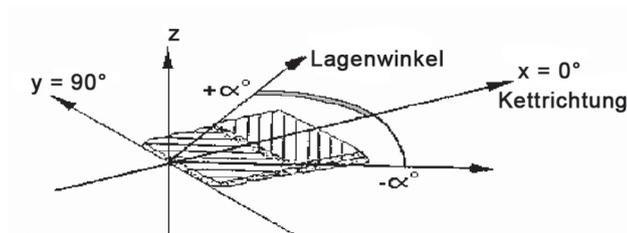


Abb. 3.1: Orientierung der Fasern im bidiaogonalen Gelege (Saertex, 2004).

Bei der Firma FACC AG wurden die zweilagigen Gelege zu Verbunden verarbeitet, wobei zu Beginn des Fertigungsprozesses darauf zu achten war wie die Produktionsrichtung (Kett-Richtung) lief, um beim Legen der Verbunde die quasi-isotropie zu garantieren. Der Zuschnitt erfolgte wie in Abb. 3.2 dargestellt, wobei alle Lagen des gleichen Typs aus der gleichen Matte erfolgten um den Verschnitt gering zu halten. Das obere Bild zeigt dabei den Zuschnitt der $\pm 45^\circ$ Einzelschichten und das untere der $0^\circ/90^\circ$ Schichten. Alle Zuschnitte erfolgten auf das Maß $350 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$. Nach dem Zuschneiden war darauf zu achten, dass die Lagen alle richtig markiert wurden, um eine spätere Zuordnung zu ermöglichen. Dabei war ein direktes Beschreiben oder Bekleben der Fasern nicht zulässig, sondern erfolgte auf der Verpackung, wobei die Angabe der Kett-Richtung und die Vorder- und Hinterseite des zweilagigen Verbundes wichtig war.

Nach dem Zuschnitt wurde die RTM-Anlage mit Heizpresse und der Form mit den Abmaßen $350 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ (Breite \times Länge \times Höhe) vorbereitet. Weiters wurde das Harz aufgetaut. Der Aufbau der quasi-isotropen Platten erfolgte in 16 Lagen. Dabei wurden acht Lagen im abwechselnden $\pm 45^\circ - 0^\circ/90^\circ$ Takt gelegt und dann spiegelgleich weiter aufgebaut, sodass in der Mittelebene zwei 90° Lagen aufeinander trafen. Die biaxialen ($0^\circ/90^\circ$) Proben wurden ebenfalls in 16 Lagen alternierend $0^\circ - 90^\circ$ aufgebaut. So ergaben sich 32 Einzelschichten für jeden Probekörper. In Tabelle 3.2 sind die Verarbeitungsparameter des RTM-Injektionsprozesses angeführt.

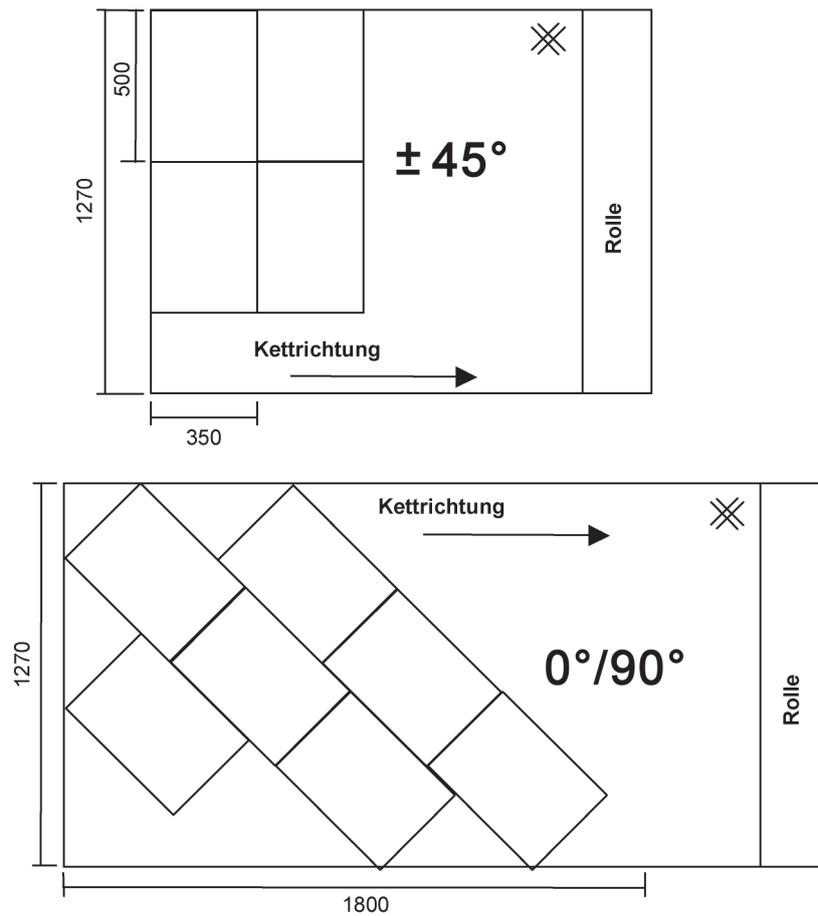


Abb. 3.2: Zuschnittsplan der Einzelschichten (FACC, 2005).

Tabelle 3.2: Injektionsdaten des RTM-Prozesses.

Injektionsdaten	
Injektionsfluss [cm^3/min]	500
Injektionsdruck [bar]	1 – 2
Druck nach Injektion [bar]	2 - 3
Injektionstemperatur der Form [$^\circ\text{C}$]	110
Aushärtung	durch die Heizpresse
Aufheizrate [$^\circ\text{C}/\text{min}$]	2

Zeit bis zur Vernetzung [min]	90
Temperatur bei der Vernetzung [°C]	180
Haltezeit [min]	70
Temperatur bei der Haltezeit [°C]	120

Nach der Entformung der Platte wurde eine Sichtkontrolle des ausgehärteten Teiles auf offensichtliche Porositäten oder sonstige Fehlstellen durchgeführt. Bei auftretenden Fehlern wurden diese mit einem weißen Marker gekennzeichnet. Eine weitere Qualitätssicherung erfolgte über eine Ultraschallprüfung, um Fehlstellen im Inneren der Platten zu lokalisieren. Weiters wurde die fertige Plattendicke an acht Punkten vermessen und die Messwerte wurden im jeweils zugehörigen Lebensdatenblatt eingetragen.

Abschließend wurde der Faservolumengehalt der Platte nach Gleichung 14 (s. Seite 36) bestimmt.

3.2 Prüfkörper

Im vorgegebenen Prüfplan (s. Tabelle 3.3) wurden sechs verschiedene monotone Prüfverfahren festgelegt, zu denen jeweils eigene Prüfkörper gefertigt wurden. Anhand der Daten, die im monotonen Zug- und Druckversuch ermittelt wurden, wurden weiters mit den Kurzproben Ermüdungsversuche festgelegt (s. Kapitel 3.3). Dabei wurde der erste Prüfkörper mit 50 % der maximalen Last aus den monotonen Versuchen beaufschlagt. Bei einem Versagen unter 200.000 Zyklen wurde der zweite Prüfkörper mit 40 % der Maximallast getestet. Bei einem Durchlaufen der 200.000 Zyklen wurde die Last auf 60 % erhöht. Beim dritten Prüfkörper wurde auf das Verhalten des zweiten eingegangen und die Last dementsprechend gewählt (s. Abb. 3.5). Bei unschlüssigen Ergebnissen wurde jeweils eine Probe zur Reproduzierung eingerechnet, in der Tabelle 3.3 mit (+1) dargestellt ist.

Zum Einsatz kamen:

Lange Zugproben

gelocht (Open Hole Tensile - OHT)

ungelocht (Plain Tensile - PT)

Kurze Zugproben

gelocht (Short Open Hole Tensile - SOHT)

ungelocht (Short Plain Tensile - SPT)

Kurze Druckproben

gelocht (Open Hole Compression - OHC)

ungelocht (Plain Compression - PC)

Die Prüfkörper wurden entsprechend der Airbus internen Normen für Zug AITM 1-0007 (Issue 3) und Druck AITM1-0008 (Issue 3) gefertigt, in der die gelochten Proben als Type B und die ungelochten als Type A Prüfkörper bezeichnet werden.

Tabelle 3.3: Prüfplan mit Probekörperanzahl (für alle Harz/ Faserkombinationen gültig).

Prüfverfahren	Prüf- richtung	Norm	Anzahl monoton	Ermüdung 1 50%	Ermüdung 2 40%/ 60 %	Ermüdung 3 //// %
PT	0°	AITM 1.0007	6			
Short PT	0°	- ,, -	6	1 (+1)	1 (+1)	1 (+1)
OHT	0°	- ,, -	6			
Short OHT	0°	- ,, -	6	1 (+1)	1 (+1)	1 (+1)
PC	0°	AITM 1.0008	6	1 (+1)	1 (+1)	1 (+1)
OHC	0°	- ,, -	6	1 (+1)	1 (+1)	1 (+1)

Die Prüfkörper unterscheiden sich demnach geometrisch nur durch ihre Gesamtlänge L bzw. der in der Norm definierten Einspannlänge (s. Abb. 3.2 und 3.3). Alle Proben wurden mit Aufleimern versehen, die eine theoretische Dicke von 1,68 mm pro Aufleimer aufwiesen. Die Aufleimer wurden aus dem Glasfaser-Prepreg Airpreg 8150 der Firma Isovolta AG (Wiener Neudorf, A) in 5 Lagen Biaxial (+/- 45°) bei der FACC AG gefertigt und für die Langproben zusätzlich einseitig angefast. Aufgebracht wurden die Aufleimer mit dem Epoxid-Klebefilm Scotch Weld AF 163-2L in einer Heizpresse für 60 min bei ca. 3 bar Druck und einer Pressentemperatur von 125°C. Bei den kurzen Proben (Short PT, Short OHT, PC, OHC) wurde dabei auf eine Parallelität der Flächen zueinander zu achten, die 0,05 mm nicht überschreiten darf. Die Gesamtlänge der Probekörper wurde von der Länge der GFK-Aufleimer bestimmt, die laut AITM (1-0007 und 1-0008) größer als $l = 50$ mm sein sollte. Von der FACC AG wurden die Aufleimer mit $l = 60$ mm (Aufleimer Typ 2) festgelegt, was bei den Langproben zu einer Gesamtlänge von $L = 300$ mm und bei den Kurzproben zu einer Gesamtlänge von $L = 152$ mm führte. Der Zuschnitt der Proben erfolgte auf einer Diamantkreissäge. Dabei war eine Parallelität der Probekörperlängsseiten zueinander, mit einer maximalen Abweichung von 0,05 mm, gefordert. Die Dicke der Probekörper war vom Aufbau der Proben abhängig. Sowohl für den quasi-isotropen, als auch den biaxialen (0°/90°) Aufbau ergaben sich ca. 4 mm, was sich mit der Forderung der AITM deckte. Die Abweichungen sollten dabei max. 4 % der mittleren gemessenen Dicke betragen, was eingehalten wurde. Die kurzen Zugproben (Short PT und Short OHT) stellten dabei eine Sonderform dar, da in der Zugprüf-Norm (AITM 1-0007) keine Kurzproben definiert sind. So wurden diese nach der Druckprüf-Norm (AITM 1-0008) gefertigt und nach der Zugnorm (AITM-1-0007) geprüft.

Bei den gelochten Proben (OHT, Short OHT, OHC) war sowohl die Position, als auch der Durchmesser D der Bohrung wichtig und der AITM-Norm zu entnehmen. Die Bohrung wurde mit einem Spezialbohrer angefertigt, da der Durchmesser D innerhalb der Fertigungstoleranz von $D = 6,339$ mm und $6,384$ mm liegen musste.

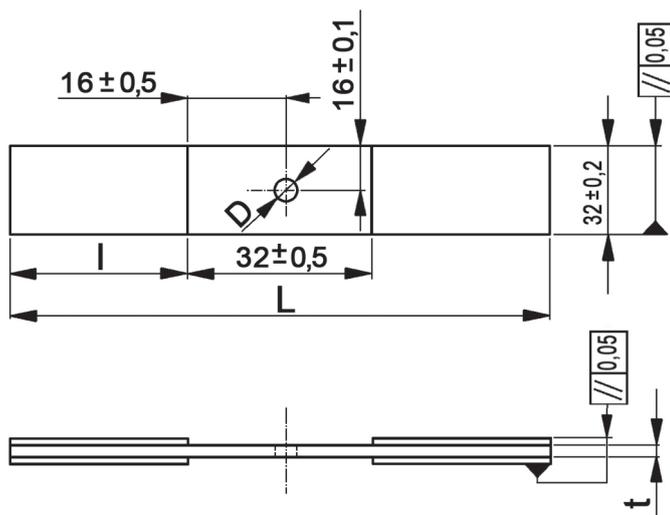


Abb. 3.2: Konstruktionszeichnung der Kurzprobe, wahlweise mit Bohrung, nach AITM 1-0008 Issue 3.

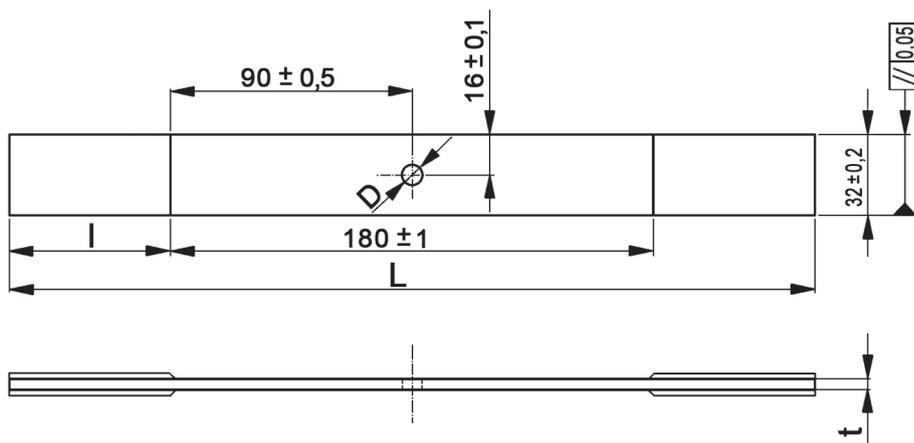


Abb. 3.3: Konstruktionszeichnung der Langprobe, wahlweise mit Bohrung, nach AITM 1-0007 Issue 3.

3.3 Versuchsdurchführung

Laut vorgegebenem Prüfplan (s. Tabelle 3.4) wurden an den einzelnen Laminaten sowohl monotone Zugversuche als auch monotone Druckversuche durchgeführt. Basis dieser Ergebnisse wurden unter vorgegebener Kraft Ermüdungsversuche bei einem R-Verhältnis von $R = -1$, also unter wechselnder Belastung, und einer Prüffrequenz von $f = 5$ Hz durchgeführt, die bei maximal 200.000 Zyklen abgebrochen wurden, sofern kein vorzeitiges Versagen eintrat. Alle Versuche erfolgten auf einer

servohydraulischen Prüfmaschine Typ MTS 810 (Fa. MTS Systems GmbH, Berlin, D) und wurden mit der Maschinensoftware „Testware SX“ gesteuert. Alle Proben wurden beidseitig mit Dehnmessstreifen (DMS) vom Typ 1-LY41-6/120 (Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, D) ausgestattet, zusätzlich wurde auf den Langproben Plain Tensile und Open Hole Tensile ein Axialextensometer Typ MTS 634.11F-24 angebracht, das nach ca. 70 % der Bruchlast abgenommen wurde. Bei den gelochten Kurzproben Short Open Hole Tensile und Open Hole Compression wurden aufgrund der hohen lokalen Spannungen um die Bohrung und Platzmangel keine Dehnmessstreifen angebracht.

Tabelle 3.4: Werkstoffe und Lagenaufbau.

Harz-System	Faseranordnung und -typ	Aufbau
HexFlow RTM6	+/- 45° HTA	Quasi-Isotrop
HexFlow RTM6	+/- 45° HTS	Quasi-Isotrop
HexFlow RTM6	+/- 45° HTS	0°/90°
Bakelite EPS 600	+/- 45° HTS	Quasi-Isotrop
Bakelite EPS 601	+/- 45° HTS	Quasi-Isotrop
Cycom 977-2	+/- 45° HTS	Quasi-Isotrop

Durch das Applizieren von zwei Dehnmessstreifen konnten eventuelle Effekte des Einspannens, wie zum Beispiel Biegung des Probekörpers aufgrund nicht fluchtender Einspannbacken, detektiert werden, und außerdem war es eine zusätzliche Absicherung der Daten, für den Fall, dass ein DMS ausfallen sollte. Als Messverstärker und Datenwandler diente die Messelektronik Spider 8, die mit dem zusätzlichen Messcomputer über die Druckerschnittstelle verbunden war. Mit der dazugehörigen Software „Catman“ (Version 4.5) konnten die Daten erfasst werden (jeweils Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, D) (Kitzmüller, 2007).

3.3.1 Zugeigenschaften

Die Ermittlung der Zugeigenschaften (E-Modul und Festigkeit) erfolgte nach der Airbus Prüfnorm AIM 1-0007 Issue 3. Für die Prüfung wurden die Proben Plain Tensile, Open Hole Tensile, Short Open Hole Tensile und Short Plain Tensile verwendet. Wie in der AIM 1-0007 vorgeschrieben und eingangs erklärt, wurden bei den Langproben Plain Tensile und Open Hole Tensile sowohl DMS als auch Extensometer verwendet und bei den Short Plain Tensile Proben wurden nur DMS appliziert um die genaue Dehnung des Prüfkörpers zu messen. Dies war notwendig da der induktive Wegaufnehmer des Hydraulikkolbens der Prüfmaschine auch die Nachgiebigkeit dieser mit gemessen und so zu verfälschten Ergebnissen geführt hätte. Bei den Short Open Hole Tensile Proben wurden aufgrund der hohen lokalen Spannungen um die Bohrung und Platzmangel auf der Probenoberfläche weder DMS noch Extensometer angebracht und daher konnte nur die Zugfestigkeit ermittelt werden. Die Prüfgeschwindigkeit war 2 mm/min und es wurde die Längenänderung in Abhängigkeit der Kraft mittels Catman - Software im Falle der DMS und mittels Testware SX - Software im Falle des Extensometer aufgezeichnet. Bei den Short Open Hole Tensile Proben wurde nur die Bruchlast notiert. Alle Messungen erfolgten bei genormtem Raumklima von $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ und 50 % rel. Luftfeuchte.

Ausgewertet wurden die Zugfestigkeit σ_{zB} und der Elastizitätsmodul für Zug E_z nach folgenden Gleichungen:

$$\sigma_{zB} = \frac{F_m}{B \cdot t} \quad (\text{Gl. 6})$$

wobei σ_{zB} die Zug-Spannung beim Bruch (Zugfestigkeit) in [MPa], F_m die maximal auftretende Kraft in [N], B die Breite und t die Dicke des Prüfkörpers in [mm] waren.

$$E_z = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon_x \cdot B \cdot t} = \frac{\frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{10}}{\Delta \varepsilon_x \cdot B \cdot t} \quad (\text{Gl. 7})$$

wobei E_z der Zug-E-Modul in [MPa], ΔF die Differenz der Zugkraft bei 50 % und 10 % der Zug-Kraft in [N], $\Delta \varepsilon_x$ die Differenz der zur Kraft gehörenden Dehnungen in [-] und B und t wieder die Breite und die Dicke des Prüfkörpers in [mm] waren. Bei den gelochten Proben wurde der ungeschädigte Querschnitt als Bezugsfläche herangezogen, was zu einem scheinbaren E-Modul führte, der im Folgenden ebenfalls mit E-Modul bezeichnet wurde.

3.3.2 Druckeigenschaften

Die Ermittlung der Druckergebnisse erfolgte nach der Airbus internen Norm AITM 1-0008 Issue 3. Für die Prüfung wurden die Proben Plain Compression und Open Hole Compression verwendet. Aufgrund der hohen lokalen Spannungen um die Bohrung und Platzmangel wurden bei den gelochten Proben keine Dehnungsmessstreifen angebracht. Weiters wurde auf das Applizieren des Extensometers verzichtet, da es in der Norm nicht vorgesehen und zudem auf dem Prüfkörper kein Platz war. Die Prüfgeschwindigkeit war laut Norm zwischen 0,5 und 1 mm/min zu wählen und wurde auf 0,5 mm/min festgelegt. Es wurden - analog zu den Zugversuchen - die Längenänderung in Abhängigkeit der Kraft mittels Catman - Software im Falle der DMS aufgezeichnet. Bei den Open hole Compression Daten wurde nur die Bruchlast notiert. Alle Messungen erfolgten bei genormtem Raumklima von $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ und 50 % rel. Luftfeuchte.

Ausgewertet wurden die Druckfestigkeit σ_{dB} und der Elastizitätsmodul für Druck E_D nach folgenden Gleichungen:

$$\sigma_{dB} = \frac{F_m}{B \cdot t} \quad (\text{Gl. 8})$$

wobei σ_{dB} die Druck-Spannung beim Bruch (Druckfestigkeit) in [MPa], F_m die minimal auftretende Kraft in [N], B die Breite und t die Dicke des Prüfkörpers in [mm] waren.

$$E_d = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon_x \cdot B \cdot t} = \frac{F_m - F_m}{\Delta \varepsilon_x \cdot B \cdot t} \quad (\text{Gl. 9})$$

wobei E_d der Druck-E-Modul in [MPa], ΔF die Differenz der Druckkraft bei 50 % und 10 % der Druck-Kraft in [N], $\Delta \varepsilon_x$ die Differenz der zur Kraft gehörenden Dehnungen in [-] und B und t wieder die Breite und die Dicke des Prüfkörpers in [mm] waren. Der Druck-E-Modul wurde nur für die ungelochten Proben bestimmt.

3.3.3 Ermüdungseigenschaften

Die Ermüdungsbeanspruchung stellt die kritischste Belastung für Verbundmaterialien dar. Eine der wichtigsten Kenngrößen bei zyklischen Versuchen ist das R-Verhältnis. Es gibt das Verhältnis von minimaler Spannung (oder Dehnung) zur maximalen Spannung an. Bei der Belastung wird dabei zwischen einer schwellenden Zug ($0 \leq R < 1$), schwellenden Druck ($1 < R \leq \infty$) und einer Wechselbelastung ($-1 \leq R < 0$) unterschieden. Besonders eine wechselnde Belastung um die Null-Linie, also $R = -1$, führt oft zu einem schnellen Versagen und ist der empfindlichste Belastungsfall (Hertzberg und Manson, 1980).

Aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften der polymeren Matrix ergibt sich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei Ermüdungsbelastung keine Gerade, sondern es zeichnet sich eine Elypse (Hysterese) ab, an der sich, wie in Abb. 3.4 zu sehen, zwei verschiedene Moduli definieren lassen: der Sekanten-Modul und der Dynamische-Modul. In dieser Arbeit wurde nur der dynamische Modul gemessen, der sich als Steigung in der Hysterese definiert und sich nach Gleichung 10 berechnen lässt. Er stellt daher die Schädigung im Augenblick dar und gilt so als „single-cycle-Effekt“ (Zahnt, 2003).

$$E_{\text{dyn}} = \frac{\Delta F}{\Delta \varepsilon \cdot B \cdot t} = \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{min}}}{(\varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_{\text{min}}) \cdot B \cdot t} \quad (\text{Gl. 10})$$

Dabei ist E_{dyn} der dynamische Modul in [MPa], ΔF die Differenz der maximal auftretenden und minimal auftretenden Kraft in [N], $\Delta \varepsilon$ die dazugehörige Dehnung [-], B die Breite und t die Dicke des Prüfkörpers jeweils in [mm].

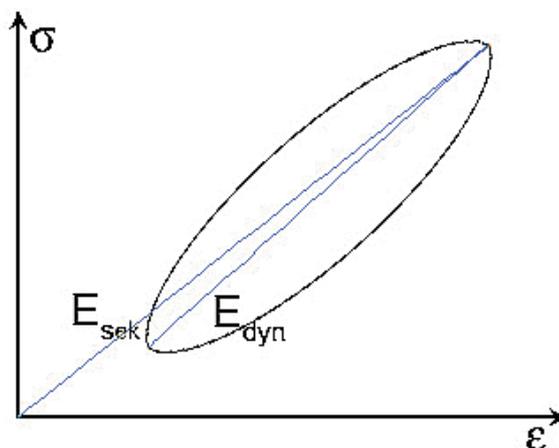


Abb. 3.4: Hysteresisschleife im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei zyklischer Belastung.

Die Ergebnisse einer Serie von Ermüdungsversuchen können in einem doppellogarithmischen Diagramm dargestellt werden, wobei die Nennspannung über der ertragenen Zyklenzahl aufgetragen wird. Es zeigt sich eine zu Beginn rasch abfallende Kurve, die mit steigender Zykluszahl flacher wird (wobei Kunststoffe nicht zwingend eine so genannte Dauerfestigkeit aufweisen). Dieses Diagramm wird als Wöhlerschaubild bezeichnet und ist eine Möglichkeit das Ermüdungsverhalten grafisch darzustellen. Eine andere Möglichkeit ist die Gegenüberstellung des dynamischen Moduls über der Zykluszahl, was die Materialschädigung gut darstellt (Zahnt, 2003; Pinter, 2006).

Die Ermüdungsversuche wurden auf Basis der Ergebnisse der monotonen Zug- und Druckversuche durchgeführt. Dazu wurde die erste Probe mit 50 % der Zug- bzw. Druckfestigkeit aus den monotonen Versuchen zyklisch bei 5 Hz und einem R-Verhältnis von $R = -1$ getestet. Kam es hier zu einem Versagen unter 200.000 Zyklen, so wurde die Last auf 40 % reduziert und im Falle eines Durchlaufens wurde die Last auf 60 % erhöht. In Abb. 3.5 ist der von Airbus speziell festgelegte Versuchsablauf grafisch dargestellt, für den je Laststufe ein Probekörper vorgesehen war. So ergaben sich, durch die unterschiedlichen Zug- und Druckfestigkeiten zwei verschiedene Ausgangsniveaus für die Ermüdungsversuche, was gemäß des Versuchsplans zu insgesamt sechs verschiedenen Lastniveaus für die zyklische Belastung und somit sechs Punkte für das Wöhlerschaubild führte. Für die Versuche wurden nur die kurzen Proben (Short Plain Tensile, Short Open Hole Tensile,

Plain Compression und Open Hole Compression) verwendet, da bei den Langproben die Gefahr des Ausknickens bestand. Die ungelochten Proben wurden wieder mit zwei DMS vom Typ 1-LY41-6/120 (Fa. Hottinger-Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, D) bestückt um die exakte Dehnung zu Messen und so den Verlauf des dynamischen E-Moduls über der Zyklenzahl darstellen zu können. Die DMS lösten sich allerdings nach wenigen Zyklen ab und so konnte nicht bis zum Schluss mit der exakten Dehnung gemessen werden. Allerdings konnte mit der wahren Dehnung des DMS' die Maschinennachgiebigkeit bestimmt und so ein Korrekturfaktor ermittelt werden. Mit diesem Korrekturfaktor konnte dann die Dehnung über den induktiven Wegaufnehmer des Hydraulikkolbens über die gesamte Versuchsdauer aufgezeichnet werden. Die gelochten Proben wurden ohne DMS getestet. Es konnte daher kein E-Modul bestimmt werden und so wurden die Ergebnisse auf den Anfangswert normiert und der prozentuelle Abfall des Moduls, also die Schädigung, konnte bis zur maximalen Zykluszahl dargestellt werden. Alle Messungen erfolgten bei genormtem Raumklima von $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ und 50 % rel. Luftfeuchte.

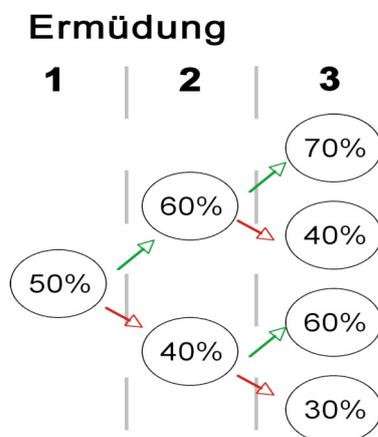


Abb. 3.5: Versuchsplan für Ermüdungsversuche.

3.4 Normalisierung der Testergebnisse

Bei der Berechnung von Verbunden bezieht man sich in der Regel auf den Volumenanteil der Komponenten, also der Faser und der Matrix (die Schlichte nimmt einen zu geringen Anteil am Volumen des Verbundes ein). In der Praxis hat sich der Faservolumenanteils φ_F als internationaler Kennwert durchgesetzt. Dieser

Kennwert errechnet sich nach Gleichung 11, wobei V_F das Volumen der Fasern und V_M das Volumen der Matrix ist. Beide Volumina zusammen ergeben das Gesamtvolumen des Verbundes. Diese Gleichung ist auch als Mischungsregel bekannt (Wörndle, 1996).

$$\varphi_F = \frac{V_F}{V_V} = \frac{V_F}{V_F + V_M} \quad (\text{Gl. 11})$$

Um den genauen Fasergehalt eines Verbundes zu bestimmen, sind Methoden wie das Auskochen der Matrix oder optische Bestimmung mittels Mikroskop geläufig. In der Praxis unterscheiden sich die Faseranteile von unterschiedlichen Verbunden trotz gleicher Herstellungsparameter, daher wurden die Messergebnisse in dieser Arbeit auf einen Faservolumengehalt von 57 % mit der nachstehenden Methode normalisiert (Painold, 2003).

$$\text{normalisierter Wert} = \text{gemessener Wert} \cdot \frac{\varphi_{F,\text{normalisiert}}}{\varphi_{F,\text{gemessen}}} \quad (\text{Gl. 12})$$

Gleichung 12 zeigt die allgemeine Variante, wie Ergebnisse normalisiert werden können, wobei $\varphi_{F,\text{normalisiert}}$ dem selbst gewählten Prozentsatz entspricht (in diesem Fall 57 %) und $\varphi_{F,\text{gemessen}}$ der gemessene Faservolumengehalt über beispielsweise Veraschung eines Reststückes der Probenplatte. Dies führt zu einem gemittelten Ergebnis, da der Faservolumenanteil prozessbedingt über die Platte nicht konstant ist.

Eine andere Variante, den Faservolumengehalt zu bestimmen führt über die Dicken der Ebenen. Dazu wird eine äquivalente Schichtdicke t_f einer kompakten Faserschicht angenommen, die entstehen würde, wenn die Fasern kompakt – also ohne Hohlraum zwischen den Faserfilamenten – angeordnet wären. Dies errechnet sich über das Faserflächengewicht FAW und die Dichte der Faser ρ_F , wie in Gleichung 13 zu sehen ist.

$$t_f = \frac{\text{FAW}}{\rho_F} \quad (\text{Gl. 13})$$

Diese Dicke bezogen auf die absolute Laminatdicke einer Gewebelage ergibt den Faservolumengehalt φ_F einer Laminatplatte. Diese absolute Laminatdicke wird als „cured ply thickness“ – CPT – bezeichnet.

$$\varphi_F = \frac{FAW}{\rho_F \cdot CPT} \quad (\text{Gl. 14})$$

Wird die Gleichung 14 mit Indizes versehen, so ergeben sich die Gleichungen für den normierten Faservolumengehalt $\varphi_{F,\text{normalisiert}}$, der selbst definiert wurde, und den gemessenen Faservolumengehalt des Prüfkörpers $\varphi_{F,\text{gemessen}}$.

$$\varphi_{F,\text{normalisiert}} = \frac{FAW_{\text{nominal}}}{\rho_F \cdot CPT_{\text{normalisiert}}} \quad (\text{Gl. 15a})$$

$$\varphi_{F,\text{gemessen}} = \frac{FAW_{\text{gemessen}}}{\rho_F \cdot CPT_{\text{gemessen}}} \quad (\text{Gl. 15b})$$

Dabei sind FAW_{nominal} das nominelle und FAW_{PK} das gemessene Faserflächengewicht, $CPT_{\text{normalisiert}}$ die selbst definierte, normalisierte und CPT_{gemessen} die gemessene absolute Laminatdicke einer einzelnen Gewebeschicht. Werden die Gleichungen 15a und 15b ins Verhältnis zueinander gesetzt, so ergibt sich:

$$\frac{\varphi_{F,\text{normalisiert}}}{\varphi_{F,\text{gemessen}}} = \frac{FAW_{\text{nominal}} \cdot CPT_{\text{gemessen}}}{FAW_{\text{gemessen}} \cdot CPT_{\text{normalisiert}}} \quad (\text{Gl. 16})$$

Wird die Gleichung 16 mit der Ausgangsgleichung 12 kombiniert, so ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\text{normalisierter Wert} = \text{gemessener Wert} \cdot \frac{FAW_{\text{nominal}} \cdot CPT_{\text{gemessen}}}{FAW_{\text{gemessen}} \cdot CPT_{\text{normalisiert}}} \quad (\text{Gl. 17})$$

Durch Umformen der Gleichung 15a auf die absolute Laminatdicke $CPT_{\text{normalisiert}}$ und anschließendes Einsetzen in die Gleichung 17 lassen sich so alle Prüfergebnisse eines jeden Probekörpers auf den selbst definierten Faservolumengehalt $\varphi_{F,\text{normalisiert}}$ normalisieren, sofern die Dichte der Faser ρ_F , das gemessene Faserflächengewicht FAW_{gemessen} und die gemessene absolute Laminatdicke CPT_{gemessen} des Prüfkörpers bekannt sind. Die endgültige Gleichung dafür lautet dann:

$$\text{normalisierter Wert} = \text{gemessener Wert} \cdot \frac{\varphi_{F,\text{normalisiert}} \cdot CPT_{\text{gemessen}} \cdot \rho_F}{FAW_{\text{gemessen}}} \quad (\text{Gl. 18})$$

Laut Arbeitsanweisung der FACC AG wird der Faservolumengehalt nach Gleichung 19 berechnet. Dabei handelt es sich um eine Modifizierung der Mischungsformel (Gl. 11) mit Berücksichtigung des Nähfadenanteils. m_F ist dabei die Masse

der Faser (die für jede produzierte Platte gemessen wird), $GA_{\text{Nähfaden}}$ ist der Gewichtsanteil des Nähfadens am Gesamthalbzeug, ρ_F ist die Dichte der Faser, wobei der Wert für HTA-Fasern bei $1,76 \text{ g/cm}^3$ und für HTS-Fasern bei $1,77 \text{ g/cm}^3$ liegt und t ist die theoretische Dicke des Verbundes, für den $t = 4 \text{ mm}$ eingesetzt wird. Die Fläche der Platte beträgt $350 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ und wird in der Gleichung mit A_{Platte} bezeichnet.

$$\varphi_F = \frac{V_{\text{Faser}}}{V_{\text{Platte}}} = \frac{m_F \cdot (1 - GA_{\text{Nähfaden}})}{\rho_F \cdot A_{\text{Platte}} \cdot t} \quad (\text{Gl. 19})$$

4. ERGEBNISSE

Alle monotonen Versuche wurden, wie in den Abschnitten 3.3.1. und 3.3.2. beschrieben, durchgeführt. Dabei wurden je Faser-Harz-Kombination und Probekörpertyp sechs Proben für die Messungen herangezogen und die Festigkeiten und E-Moduli ermittelt. Auf Basis der Festigkeitswerte aus den Zug- und Druck-Versuchen, wurden die Ermüdungsversuche, wie in Kapitel 3.3.3. beschrieben, durchgeführt. Die Aufbereitung der Daten für die quasi-statischen Messungen erfolgte in Form von Spannungs-Dehnungs Diagrammen. Für die dynamischen Versuche wurde einerseits der dynamische E-Modul als Funktion der Zyklenzahl (wobei bei 200.000 Zyklen der Versuch abgebrochen wurde) für die jeweilige Einzelmessung dargestellt. Um den Zusammenhang der einzelnen Laststufen bzw. das Verhalten der Proben bei ansteigender Last zu veranschaulichen, wurden andererseits alle Proben vom selben Typ (Short Plain Tensile und Plain Compression, bzw. Short Open Hole Tensile und Open Hole Compression) in Form von Wöhlerkurven dargestellt. Alle Einzelverläufe der Ermüdungsversuche sind im Anhang angeführt.

Es wurden vier verschiedene Einflüsse untersucht und verglichen:

- Einfluss der Prüfkörpergeometrie (Kurz- und Langproben)
- Einfluss des Fasertyps (HTA, HTS)
- Einfluss des Matrix-Harz-Systems (RTM6, EPS600, EPS601, 977-2)
- Einfluss des Lagenaufbaus (quasi-isotrop, biaxial)

4.1 Einfluss der Prüfkörpergeometrie

4.1.1 Monotone Versuche

Beim Vergleich der verschiedenen Probekörperspezifikationen wurde besonders auf den Einfluss der Probekörperlänge eingegangen. Da für die Ermüdungsversuche nur Kurzproben verwendet werden konnten, werden in diesem Kapitel nur die

Proben, die unter monotoner Zug-Belastung getestet wurden, miteinander verglichen, da so auf die beiden Prüfkörperlängen eingegangen werden konnte. Dabei ergaben sich für die ungelochten Proben aller Matrixharze durchgehend höhere Festigkeitswerte für die Kurzproben. Dies lässt sich nach der Theorie erklären, dass in einem längeren Prüfkörper die Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen deutlich höher ist und daher die Festigkeit negativ beeinflusst werden kann (Ehrenstein, 2006). Bei den Open Hole Proben waren die Festigkeiten der Lang- und Kurzprobe beinahe gleich, was sich durch die Bohrung und dem dadurch bestimmten Versagensquerschnitt erklären lässt. Die Festigkeitsverläufe der gelochten und ungelochten Proben mit quasi-isotropem Aufbau, Toho Tenax HTS-Faser und unterschiedlichen Matrix-Harzen sind in der Abb. 4.1 dargestellt.

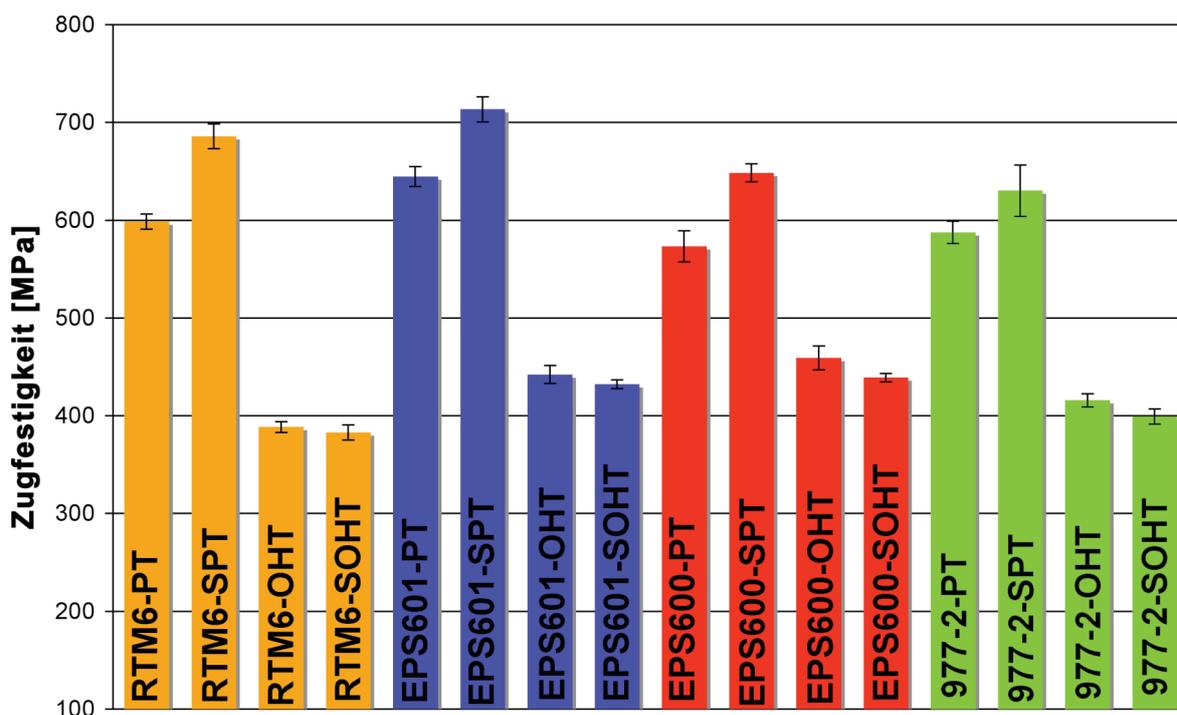


Abb. 4.1: Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten von Plain Tensile (PT), Short Plain Tensile (SPT), Open Hole Tensile (OHT) und Short Open Hole Tensile (SOHT) Proben mit unterschiedlichen Matrix-Harzen.

Beim Vergleich der Probekörperlängen im Bezug auf den E-Modul wurden nur die Plain Tensile und Short Plain Tensile Proben miteinander verglichen. Es ergaben sich keine klaren Tendenzen, dass die Probekörperlänge einen Einfluss auf den

E-Modul hätte. Abb. 4.2 zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichung der E-Moduli der Plain Tensile und Short Plain Tensile Proben mit quasi-isotropem Aufbau, HTS-Faser und unterschiedlichen Matrixharzen.

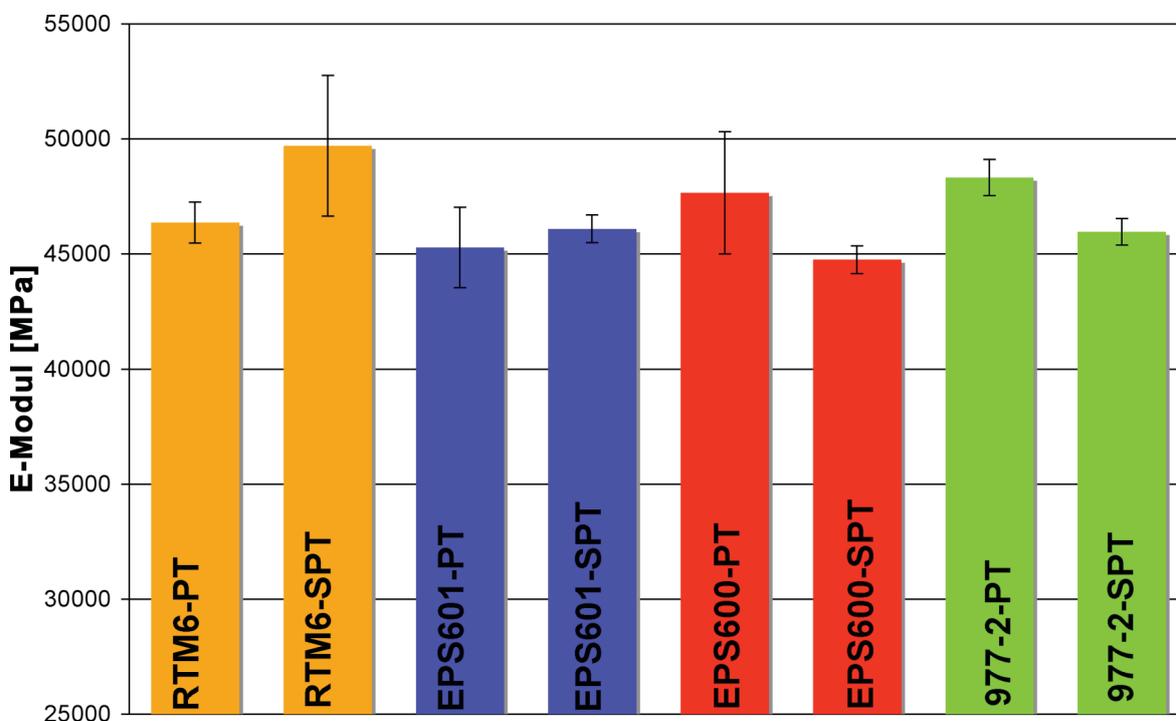


Abb. 4.2: Gegenüberstellung der E-Moduli von Plain Tensile (PT) und Short Plain Tensile (SPT) Proben mit unterschiedlichen Matrix-Harzen.

4.2 Einfluss des Fasertyps

4.2.1 Monotone Versuche

Bei den Untersuchungen des Fasertypeneinflusses wurden die Proben mit den Fasertypen HTA und HTS bei quasi-isotropem Aufbau und dem Harz-System RTM6 als Matrix miteinander verglichen. Die beiden Fasertypen unterschieden sich in erster Linie durch ihre Schlichte, wobei die HTA Faser mit einer Epoxidharz Schlichte mit einem Auftrag von ca. 1,3 % und die HTS Faser mit einer Polyurethan Schlichte mit ca. 1 % Auftrag präpariert war. Die Untersuchungen der Zugeigenschaften zeigten durchgehend eine höhere Festigkeit der Proben mit der HTS Faser, wobei der Unterschied von 20 MPa bei den Plain Tensile Proben bis 60 MPa bei den Short Plain Tensile Proben variierte. In Abb. 4.3 sind die Zugfes-

tigkeit der Plain Tensile, Short Plain Tensile, Open Hole Tensile und Short Open Hole Tensile Proben einander gegenübergestellt. Die Resultate der auf Zug ermittelten Festigkeiten entsprachen den Erwartungen aus den Datenblättern der Fasern (HTS Faser hat eine etwas höhere Festigkeit als die HTA-Faser). Der Festigkeitsunterschied von den Kurz- zu den Langproben belegte die Theorie von Ehrenstein der höheren Fehlstellen in Langproben.

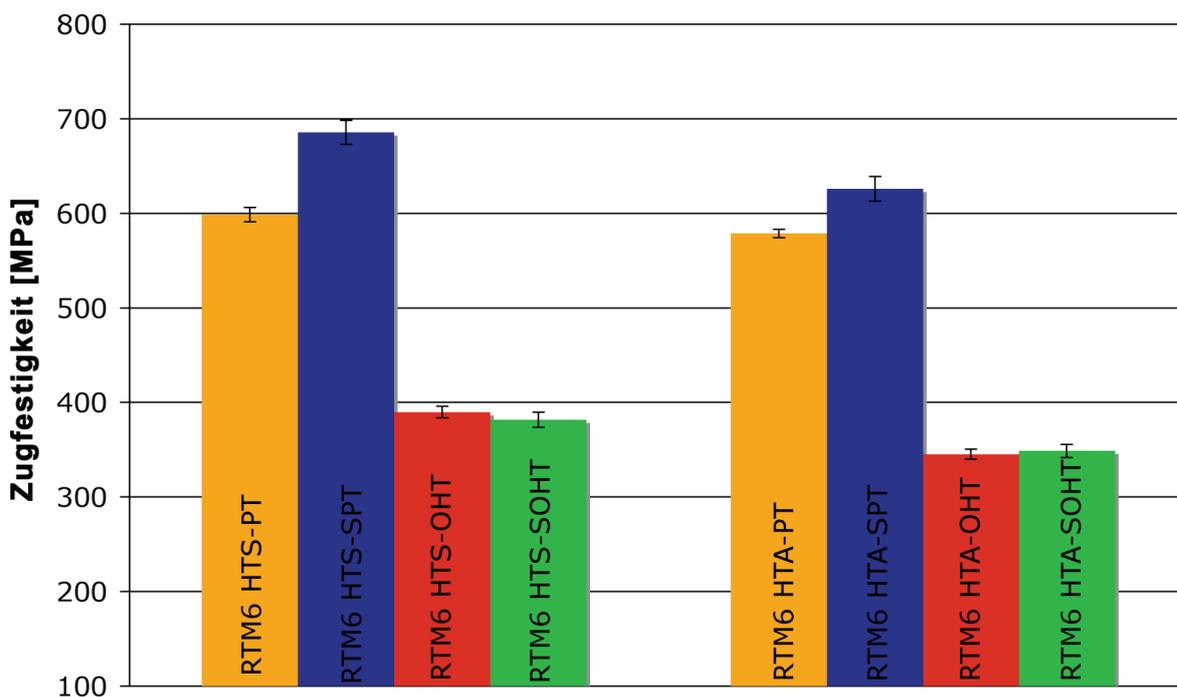


Abb. 4.3: Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten von Plain Tensile (PT), Short Plain Tensile (SPT), Open Hole Tensile (OHT) und Short Open Hole Tensile (SOHT) Proben mit HTA- und HTS-Faser.

Bei den Druck-Versuchen zeigte sich ein gegenteiliges Ergebnis. Die aus der HTA-Faser gefertigten Plain Compression Probekörper wiesen eine im Schnitt um 25 MPa höhere Festigkeit auf, bei einer mittleren Festigkeit von 420 MPa für die HTA Faser. Bei den Open Hole Compression Versuchen war praktisch kein Unterschied der beiden Fasertypen zu erkennen. Beide Typen zeigten eine Festigkeit von 281 MPa. In Abb. 4.4 sind die Festigkeiten der Plain Compression und Open Hole Compression Proben einander gegenüber gestellt. Möglicherweise ist eine bessere Anbindung der HTA-Faser mit Epoxy-Schlichte an die Matrix für die etwas besseren Druckeigenschaften verantwortlich. Der generelle Vergleich der Zug-

und Druckeigenschaften zeigt für beide Fasertypen deutlich niedrigere Druckfestigkeiten.

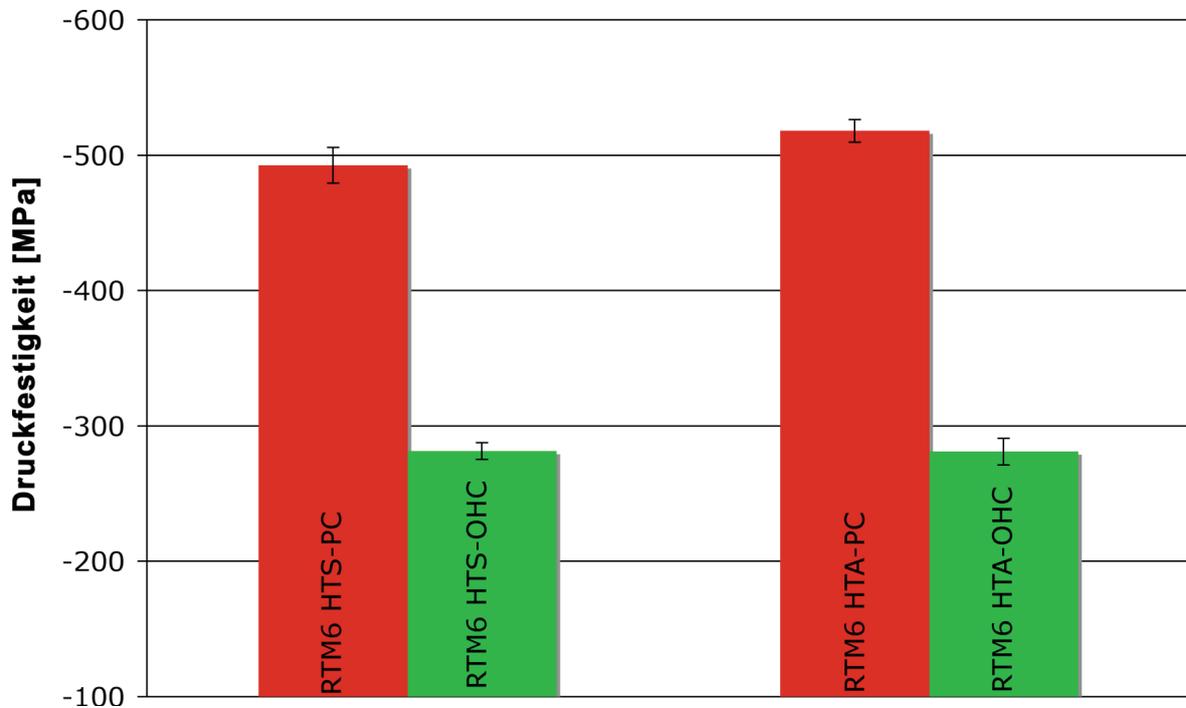


Abb. 4.4: Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten von Plain Compression (PC) und Open Hole Compression (OHC) Proben mit HTA- und HTS Faser.

Hinsichtlich der E-Modulwerte zeigte sich beim Vergleich der auf Zug belasteten Prüfkörper sowohl bei den Plain Tensile, als auch bei den Open Hole Tensile Proben für beide Fasertypen, unter Berücksichtigung der Standardabweichung, kein Unterschied. Im Schnitt lagen die Werte für die Proben bei ca. 46.000 MPa. Bei der Ermittlung der E-Modulwerte der auf Druck belasteten Prüfkörper wiesen die Proben mit der HTA Faser im Vergleich zu den HTS Faserproben etwas geringere Werte auf. Des Weiteren zeigte sich, dass die Proben mit der HTS Faser auf Zug und Druck annähernd die selben E-Modulwerte aufwiesen, während die Proben mit der HTA Faser etwas geringere Druckmoduli zeigten (s. Abb. 4.5). Die Ursache für den leichten Abfall im Druckmodul der HTA-Proben ist vorallem auch unter dem Aspekt der höheren Druckfestigkeiten dieser Proben (s. Abb. 4.3) nicht unmittelbar erklärbar.

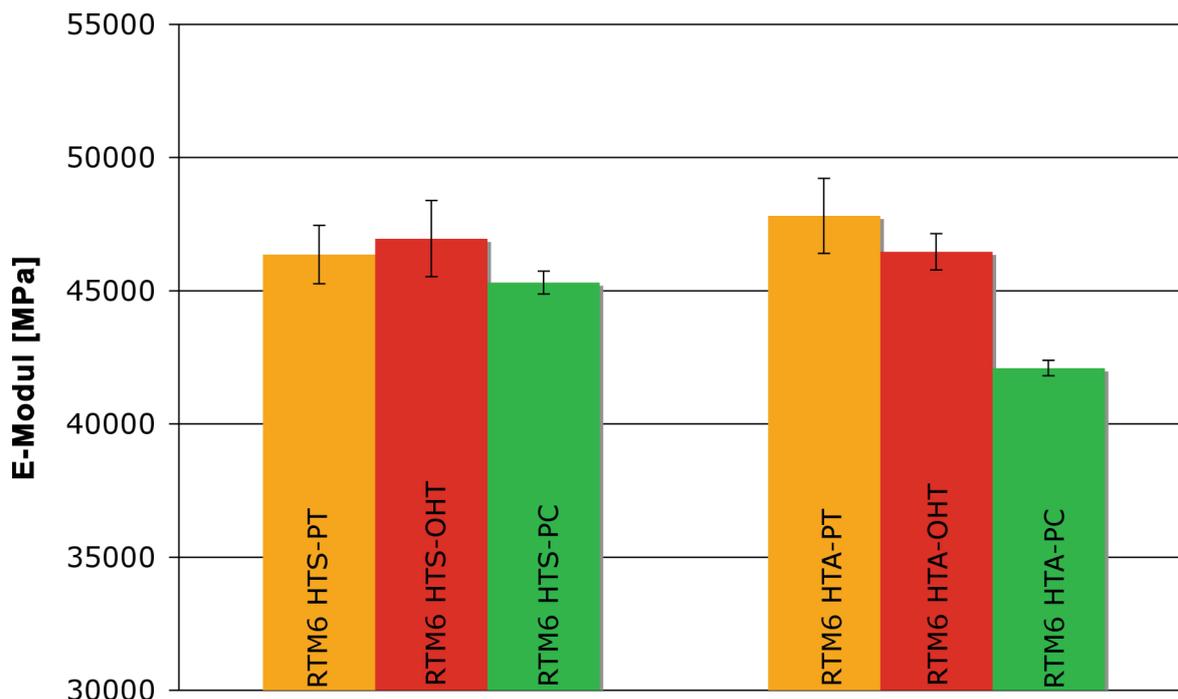


Abb. 4.5: Gegenüberstellung der E-Moduli von Plain Tensile (PT), Open Hole Tensile (OHT) und Plain Compression (PC) Proben mit HTA- und HTS-Faser.

4.2.2 Ermüdungsversuche

Bei den Einzelmessungen wurde der dynamische E-Modul normiert. Das heißt, der sich während der Messung verändernde Modulwert wurde auf den Anfangswert bezogen, und so wurde der prozentuelle Abfall des Moduls dargestellt. Dies war nötig, weil für die genaue Modulwert-Ermittlung die wahre Dehnung bis zum Schluss nötig gewesen wäre. Da sich aber die Dehnungsmessstreifen bei der Messung ablösten, wurden das Wegsignal über den induktiven Wegaufnehmer des Hydraulikkolbens der Maschine für die Auswertung herangezogen.

Um Schädigungsvorgänge im Material darzustellen, wurde der dynamische E-Modul über der ertragenen Zyklenzahl dargestellt. Das Verhalten mehrerer Proben vom selben Typ bei unterschiedlichen normierten Spannungsamplituden S_a wurde in Form von Wöhlerkurven dargestellt. Die normierte Spannungsamplitude errechnet sich nach der Gleichung 20 und stellt die Spannungsamplituden bei den jeweiligen Laststufen mit den Zug- und Druckfestigkeiten aus den monotonen Versuchen ins Verhältnis.

$$S_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{z,B} - \sigma_{d,B}} \quad (\text{Gl. 20})$$

S_a ist dabei die normierte Spannungsamplitude [-], σ_{\max} und σ_{\min} sind die größte und kleinste auftretende Spannung aus der zyklischen Messung in [MPa] und $\sigma_{z,B}$ und $\sigma_{d,B}$ sind die Bruchspannungen aus den monotonen Zug bzw. Druck Versuchen in [MPa].

Abb. 4.6 zeigt beispielhaften den Verlauf des normierten dynamischen E-Moduls über der Zykluszahl für Short Plain Tensile Proben aus der HTA und HTS Faser bei 30 % der gemittelten Bruchkraft aus den monotonen Zugversuchen. Hier zeigte sich die HTA Faser über den Zykluszahlen als durchwegs steifer. Auch das Versagen setzte bei der HTA Faser später ein. So kam es bei der HTS Probe nach bereits 26.000 Zyklen zum Versagen, während die HTA Faser Probe erst nach 65.000 Zyklen brach.

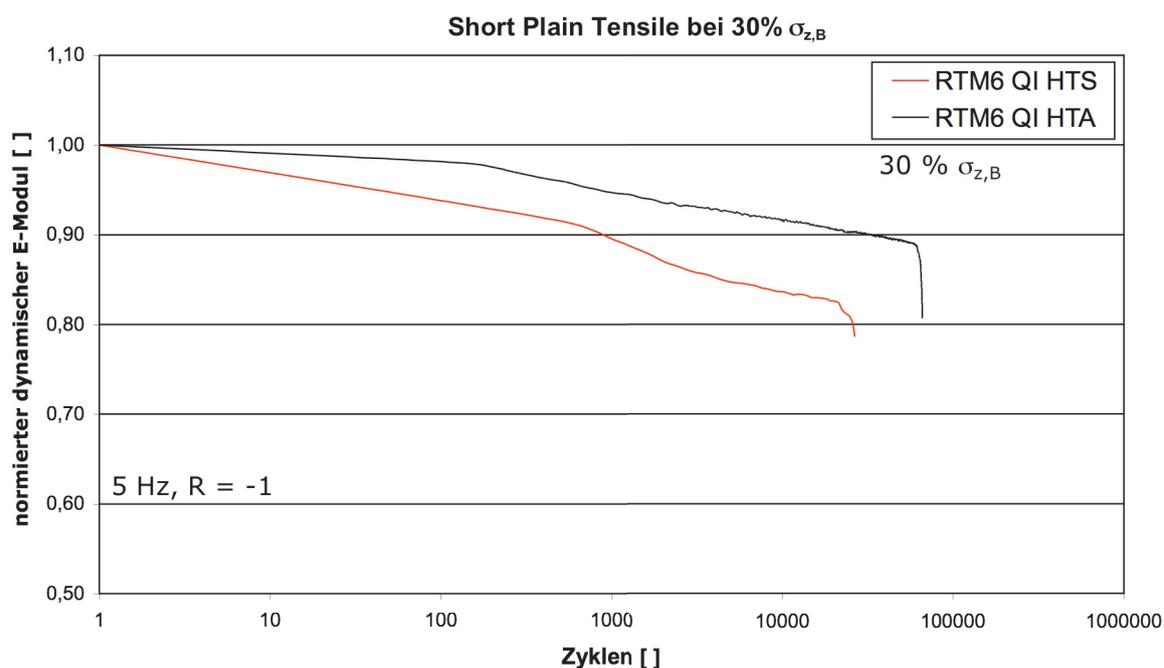


Abb. 4.6: Dynamischer E-Modul über Zykluszahl für Proben mit HTA und HTS Faser bei 30 % der Zug-Bruchfestigkeit.

Das in Abb. 4.6 dargestellte Verhalten zeigte sich auch bei den anderen Short Plain Proben mit höheren Lasten und spiegelt sich auch in den Wöhlerdiagrammen (s. Abb. 4.7a und 4.7b) wieder. So zeigte sich bei den Proben mit HTS Faser

ein früheres Versagen, als bei den Proben mit HTA Faser. Bei der niedrigsten Laststufe ergaben sich für beide Fasertypen Durchläufer (> 200.000 Zyklen), was durch einen Pfeil im Diagramm dargestellt wurde. Bei den Short Open Hole Proben fällt die größere Streuung der HTS Prüfkörper im Vergleich zu den Short Plain Proben auf, während die HTA Proben wieder auf einer Linie verliefen. Bei der niedrigsten Laststufe kam es bei beiden Fasertypen wieder zu einem Durchlaufen der vorgegebenen 200.000 Zyklen. In Absolutwerten liegt die Spannungsamplitude bei der niedrigsten Laststufe bei den Short Plain Proben bei 300 MPa und bei den Open Hole Proben bei 220 MPa. Das bessere Ermüdungsverhalten der HTA-Faserproben dürfte hier wieder auf die Epoxy-Schichte und die daraus resultierende bessere Faser-Matrix-Anbindung zurückzuführen sein.

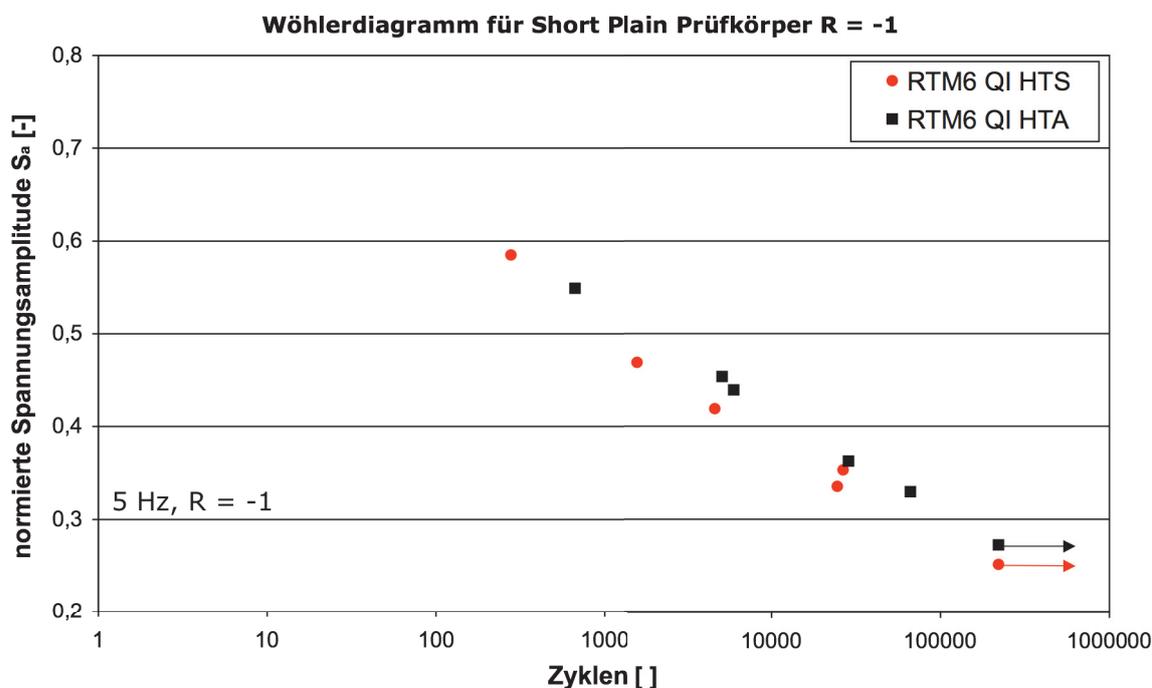


Abb. 4.7a: Wöhlerdiagramm für Short Plain Proben mit HTA und HTS Fasern.

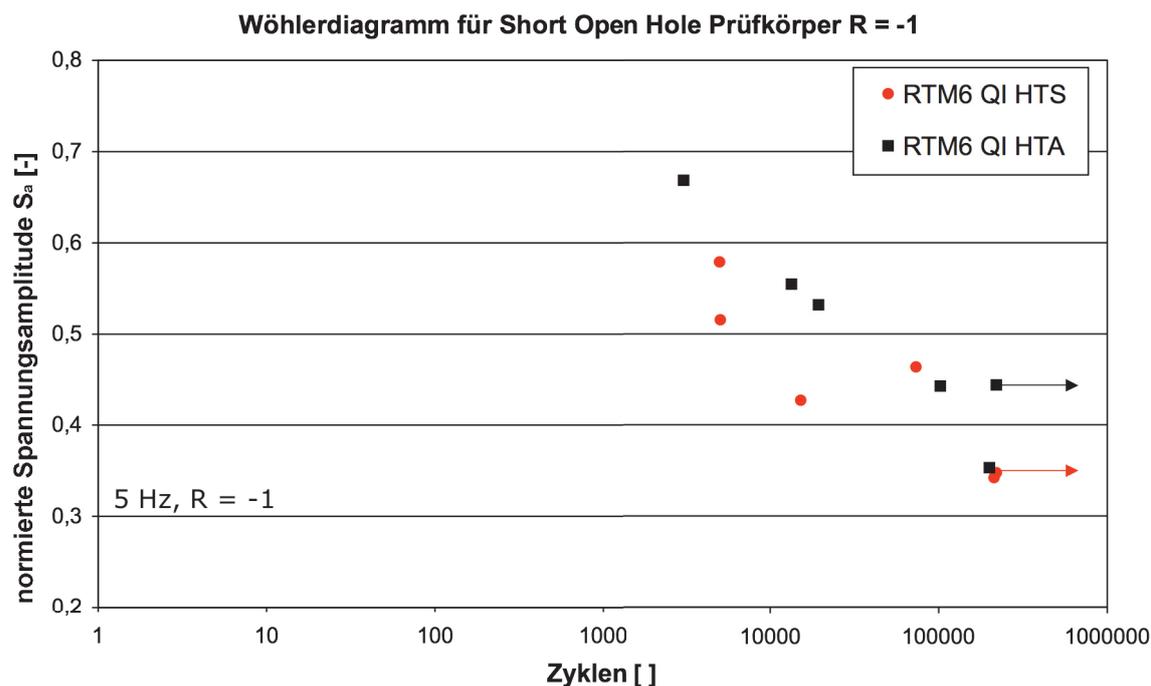


Abb. 4.7b: Wöhlerdiagramm für Open Hole Proben mit HTA und HTS Fasern.

4.3 Einfluss des Matrix-Harz-Systems

4.3.1 Monotone Versuche

Um die vier verwendeten Matrixharze RTM6, EPS600, EPS601 und 977-2 zu vergleichen, wurden alle Proben mit dem selben quasi-isotropem Aufbau und dem selben Fasertyp (HTS) verwendet.

In der Abb. 4.8 sind die Zugfestigkeiten der Plain Tensile und Open Hole Tensile Proben mit unterschiedlichen Matrixharzen einander gegenüber gestellt. Dabei wurde auf die Darstellung der Kurzproben (sowohl Short Plain als auch Short Open Hole) verzichtet, da sich bei diesen die selbe Wertung ergab. Während bei den gelochten Proben sich lediglich EPS 601 etwas von den anderen Systemen abhob, lagen bei den gelochten Proben sowohl EPS 601 als auch EPS 600 etwas über den Festigkeiten der beiden anderen Systeme.

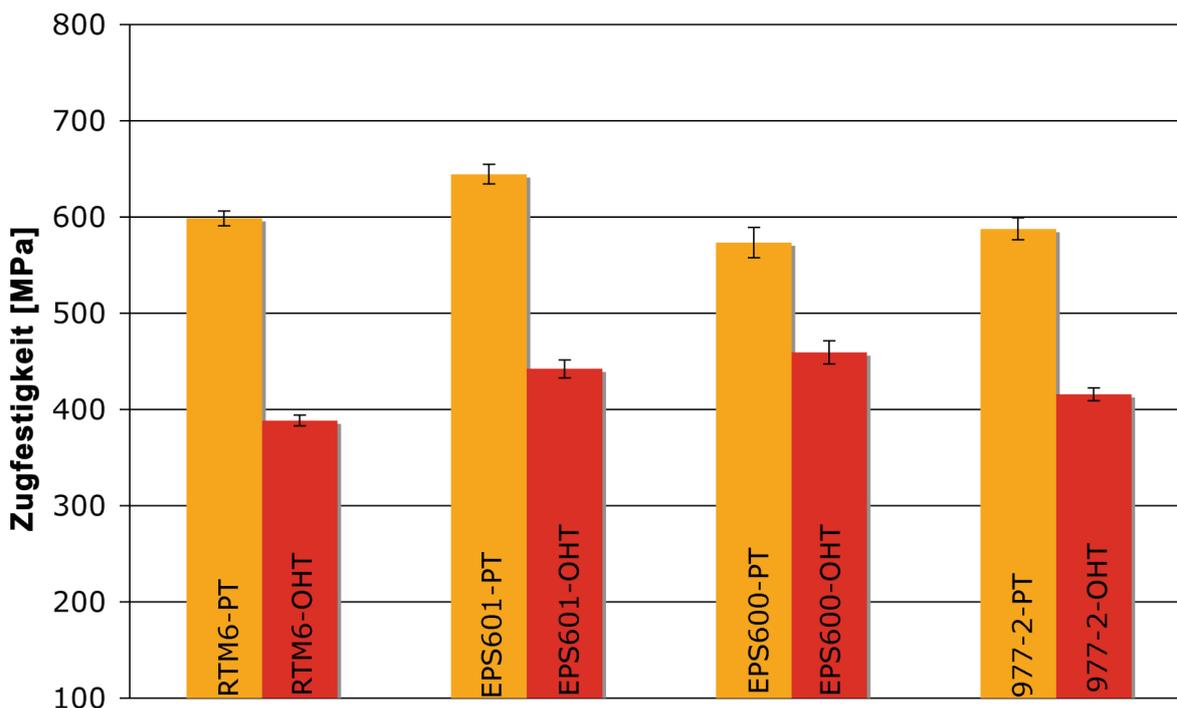


Abb. 4.8: Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten von Plain Tensile (PT) und Open Hole Tensile (OHT) Proben mit unterschiedlichen Harzsystemen.

Bei Composites werden die Druckeigenschaften stärker von der Matrix bestimmt, als die Zugeigenschaften, die hauptsächlich durch die Fasern in 0°-Richtung geprägt werden. Die Gegenüberstellung der Druckfestigkeit der vier verschiedenen Harzsystem ist in Abb. 4.9 zu sehen. Hier wurden die Plain Compression und Open Hole Compression Proben einander gegenüber gestellt. Es zeigten sich nur sehr geringe Unterschiede in den Festigkeiten, aber tendenziell zeigten, Im Gegensatz zu den Ergebnissen auf Zug, die beiden EPS Systeme etwas niedrigere Werte, mit den geringsten Werten für das EPS601 System. Generell zeigten sich auf Druck etwas niedrigere Festigkeitswerte als auf Zug.

Die Untersuchungen der E-Moduli zeigten ebenfalls nur geringe Unterschiede. Dabei lag der Mittelwert der Plain Tensile Proben bei 46.500 MPa (s. Abb. 4.10). Unter Druck ergaben sich, wie es für Composites generell gültig ist, etwas niedrigere Werte. Lediglich das RTM6 Harz zeigte unter Druck etwas höhere E-Modulwerte im Vergleich zum Zugmodul.

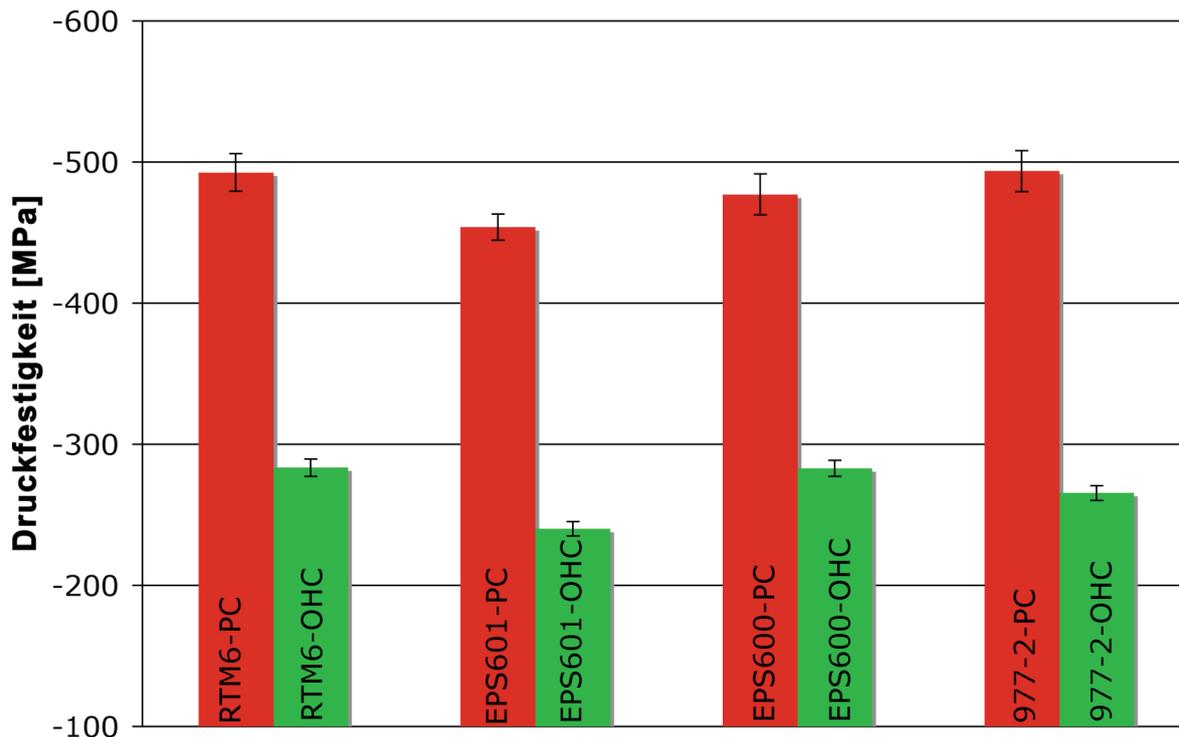


Abb. 4.9: Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten von Plain Compression (PC) und Open Hole Compression (OHC) Proben mit unterschiedlichen Harzsystemen.

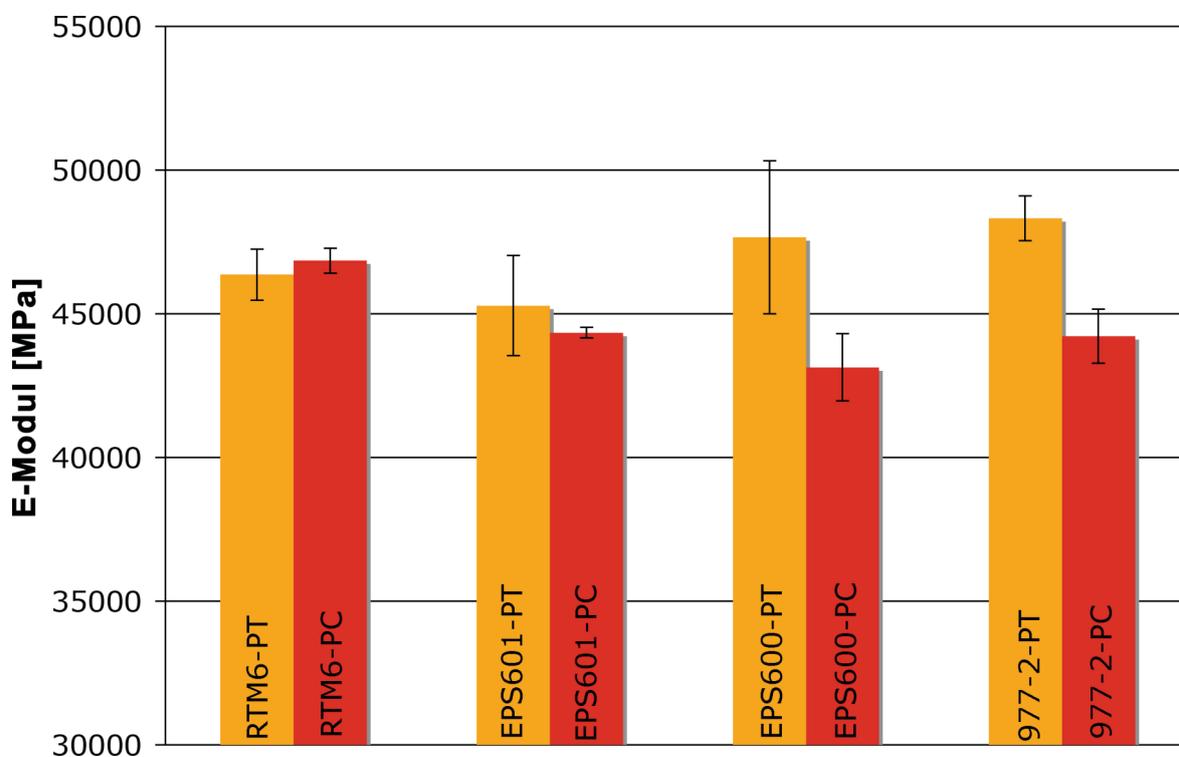


Abb. 4.10: Gegenüberstellung der E-Moduli von Plain Tensile (PT) und Plain Compression (PC) Proben mit unterschiedlichen Harzsystemen.

4.3.2 Ermüdungsversuche

Bei den Ermüdungsversuchen zeigten die Proben mit dem EPS601 Harzsystem die kürzesten und die mit dem Cycom 977-2 Harzsystem die längsten Laufzeiten, was in der Abb. 4.13a, dem Wöhlerschaubild für Short Plain Proben, gut zu sehen ist. Auch hier wurden die Proben, die nach der vorgegebenen Laufleistung von 200.000 Zyklen nicht brachen, mit einem Pfeil als Durchläufer markiert. Zur Reproduktion wurden je eine Short Plain Probe jedes Harztyps (mit Ausnahme des EPS600, da dieses die vorgegebenen 200.000 Zyklen nicht erreichte) bei der niedrigsten Laststufe wiederholt getestet. Es wurde dabei die maximale Zyklenzahl auf bis zu eine Million Zyklen angesetzt. Die selben Tendenzen können auch aus den Verläufen der Short Open Hole Messungen gezogen werden, obwohl hier eine größere Streuung der einzelnen Messungen vorlag (s. Abb. 4.11b).

Beispielhaft für die unterschiedlichen Laststufen, wurden die Verläufe der Short Plain Tensile Proben der unterschiedlichen Harzformulierungen bei 30 % der Zug-Bruchlast aus den monotonen Versuchen in Abb. 4.12 einander gegenübergestellt. Es zeigte sich bereits kurz nach dem Start der Versuche ein Abfall des E-Moduls bei allen Proben. Die Short Plain Tensile Probe mit dem EPS 601 Harz versagte bereits nach 7.000 Zyklen. RTM6 zeigte den stärksten Modulabfall, allerdings hielt dieses Harz-System mehr Lastwechseln stand, als die EPS Harze. Das zäh-modifizierte Harzsystem 977-2 zeigte bei einem sehr ähnlichen Verlauf des E-Moduls wie die EPS Systeme die längste Standfähigkeit und brach bei knapp 65.000 Zyklen. Die in Abb. 4.12 gezeigten Verläufe und Tendenzen konnten auch bei den Messungen mit höheren Lasten bestätigt werden.

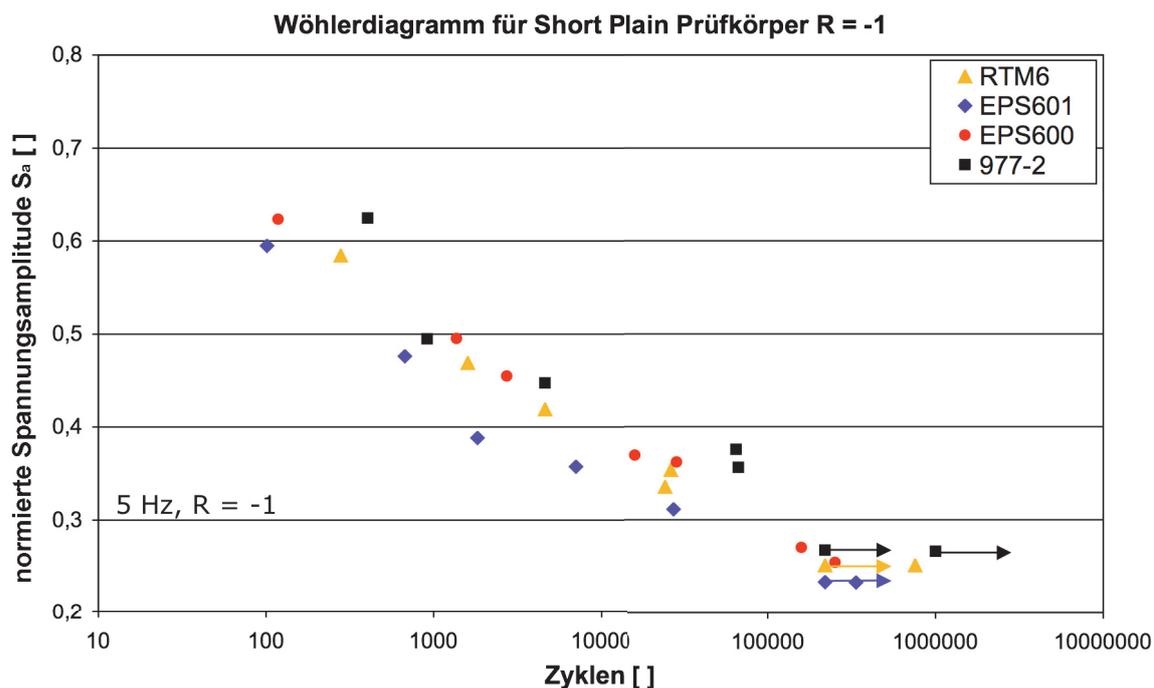


Abb. 4.11a: Wöhlerdiagramm für Short Plain Proben der vier Harzsysteme.

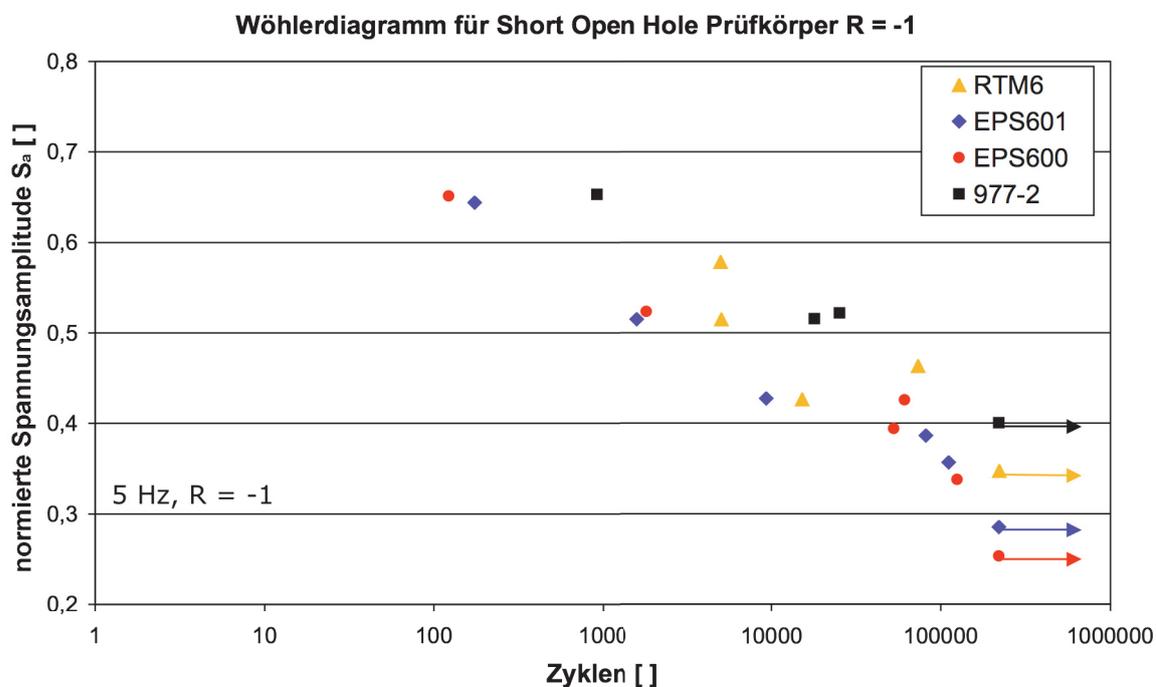


Abb. 4.11b: Wöhlerdiagramm für Short Open Hole Proben der vier Harzsysteme.

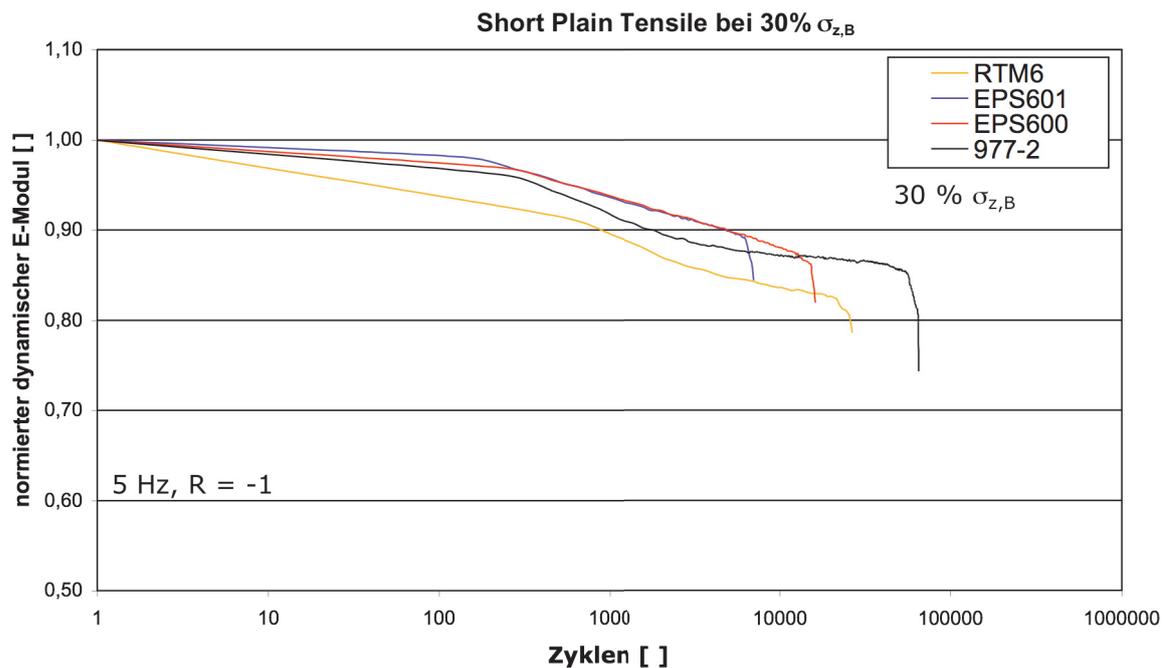


Abb. 4.12: Dynamischer E-Modul über Zykluszahl für die verschiedenen Harzsysteme bei 30 % der Zug-Bruchfestigkeit.

4.4 Einfluss des Lagenaufbaus

4.4.1 Monotone Versuche

Zur Untersuchung des Lagenaufbaus, wurden Proben mit der selben Fasertypen (HTS) und dem selben Harzsystem (RTM6) verwendet. Dabei wurde einerseits ein quasi-isotroper andererseits ein biaxialer Aufbau (Faserorientierung $0^\circ/90^\circ$) realisiert.

Bei den Untersuchungen der Zugeigenschaften ergab sich, wie erwartet, eine deutlich höhere Festigkeit der biaxialen Proben. Dies lässt sich durch den doppelt so hohen Anteil an Fasern in 0° Richtung bei den biaxialen Probekörpern, im Vergleich zu den quasi-isotropen Proben, begründen. Bei den biaxialen Plain Tensile Proben wurde eine Zugfestigkeit von 900 MPa erreicht. Die Zugfestigkeit der quasi isotropen Proben erreichte einen Mittelwert von 600 MPa. Die Versuche an den Short Plain Tensile Proben ergaben die selben Verhältnisse und werden daher nicht explizit dargestellt. Bei den Open Hole Tensile Proben lag die Festigkeit für die biaxialen Proben im Schnitt bei 550 MPa, während die quasi-isotropen Probe-

körper ca. 200 MPa niedriger lagen. In Abb. 4.13 sind die Zugfestigkeiten der Plain Tensile und Open Hole Tensile Proben dargestellt.

Bei den auf Druck belasteten Proben zeigten ebenfalls die biaxialen Prüfkörper eine deutlich höhere Festigkeit, allerdings war hier der Festigkeitsunterschied zwischen den zwei Aufbauvarianten geringer. Dies begründet sich durch die Druckempfindlichkeit der Elementarfaser, die beim leichtesten Ausknicken bereits bricht. Weiters sind Druckeigenschaften mehr von der Matrix dominiert als die Zugeigenschaften. Dies wirkt sich besonders bei den biaxialen Gelegen aus, da hier die Stützwirkung der +/- 45° Fasern, wie beim quasi-isotropen Aufbau gegeben, fehlt. So reichten die Festigkeiten der biaxialen Plain Compression Proben bis 600 MPa und die der quasi-isotropen Proben bis 500 MPa. Die gelochten Proben zeigten ebenfalls eine höhere Druckfestigkeit für die biaxialen Gelege (s. Abb. 4.14). Auch hier lagen, wie schon bei vorherigen Gegenüberstellungen, die Druckfestigkeiten etwas niedriger als die Zugfestigkeiten

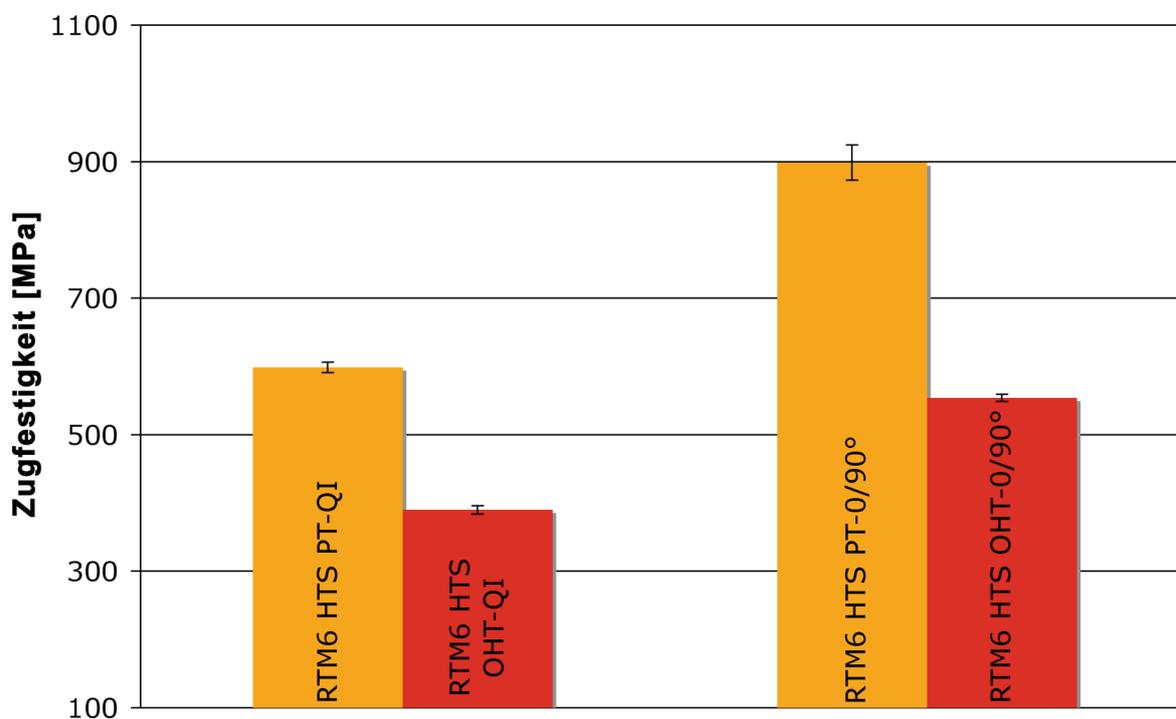


Abb. 4.13: Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten von Plain Tensile (PT) und Open Hole Tensile (OHT) Proben mit quasi-isotropem und biaxialem Aufbau.

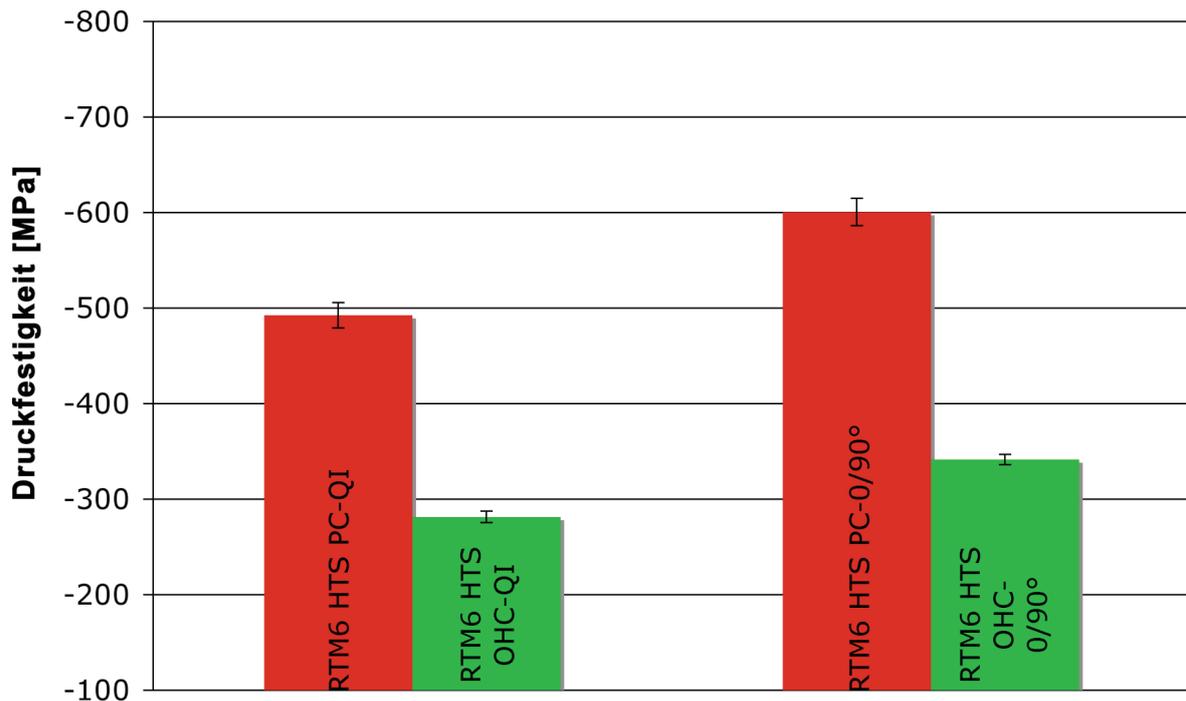


Abb. 4.14: Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten von Plain Compression (PC) und Open Hole Compression (OHC) Proben mit quasi-isotropem und biaxialem Aufbau.

Durch den biaxialen Aufbau ergaben sich erwartungsgemäß auch höhere E-Modulwerte für die $0^\circ/90^\circ$ Prüfkörper. Die Werte lagen dabei bei einem Mittelwert von 68.000 MPa für die biaxialen Zugproben. Der Modulunterschied zu den Druckproben ist nicht stark ausgeprägt. Die Werte lagen bei einem Mittelwert von 61.000 MPa für die biaxialen Prüfkörper. Die quasi-isotropen Proben wiesen einen E-Modul von ca. 46.000 MPa auf, unabhängig vom Probekörpertyp und Belastungsart (Zug bzw. Druck). In der Abb. 4.15 sind die Modalauswertungen für die Plain Tensile und Plain Compression Proben gemeinsam dargestellt.

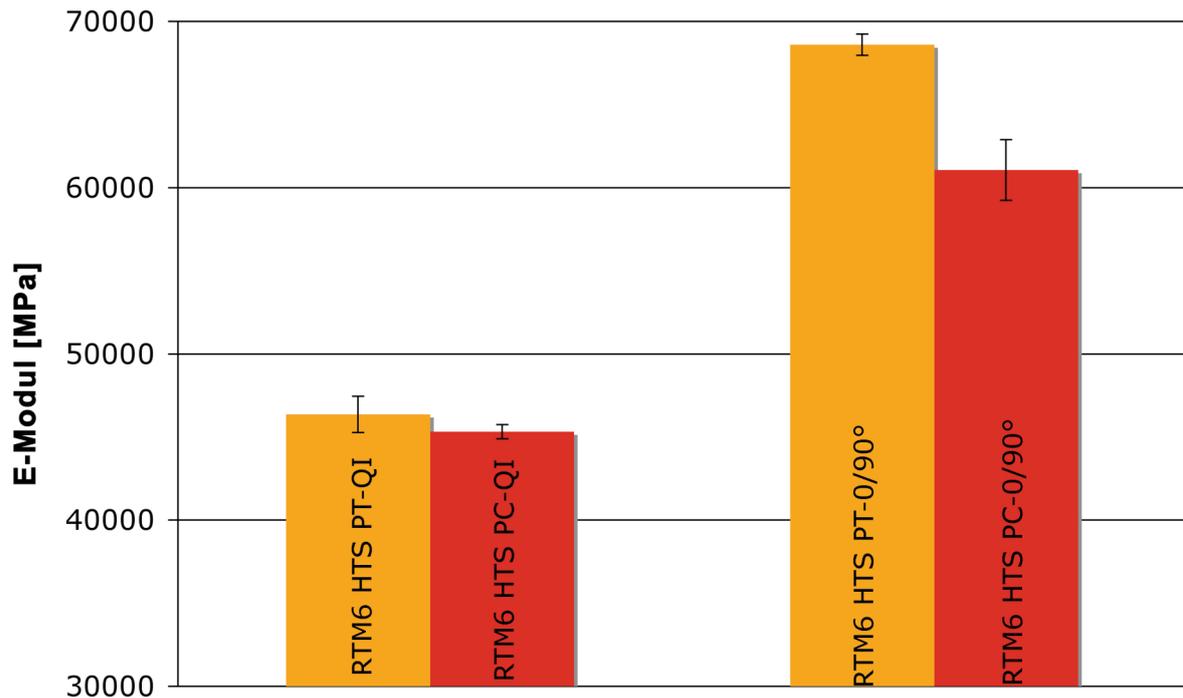


Abb. 4.15: Gegenüberstellung der E-Moduli von Plain Tensile (PT) und Plain Compression (PC) Proben mit quasi-isotropem und biaxialem Aufbau.

4.4.2 Ermüdungsversuche

In Abb. 4.16a sind die Wöhlerkurven der zwei Aufbauvarianten für Short Plain Proben in normierter Form dargestellt. Es ergab sich ein besseres Verhalten der Proben mit biaxialem Aufbau, besonders bei geringen Lasten. Auch hier wurde bei der niedrigsten Laststufe mit beiden Aufbauvarianten ein Durchlaufen (>200.000 Zyklen) erzielt. Aufgrund der höheren Streuung der quasi-isotropen Proben konnte bei den Tests mit den Open Hole Proben kein Ranking getroffen werden (s. Abb. 4.16b)

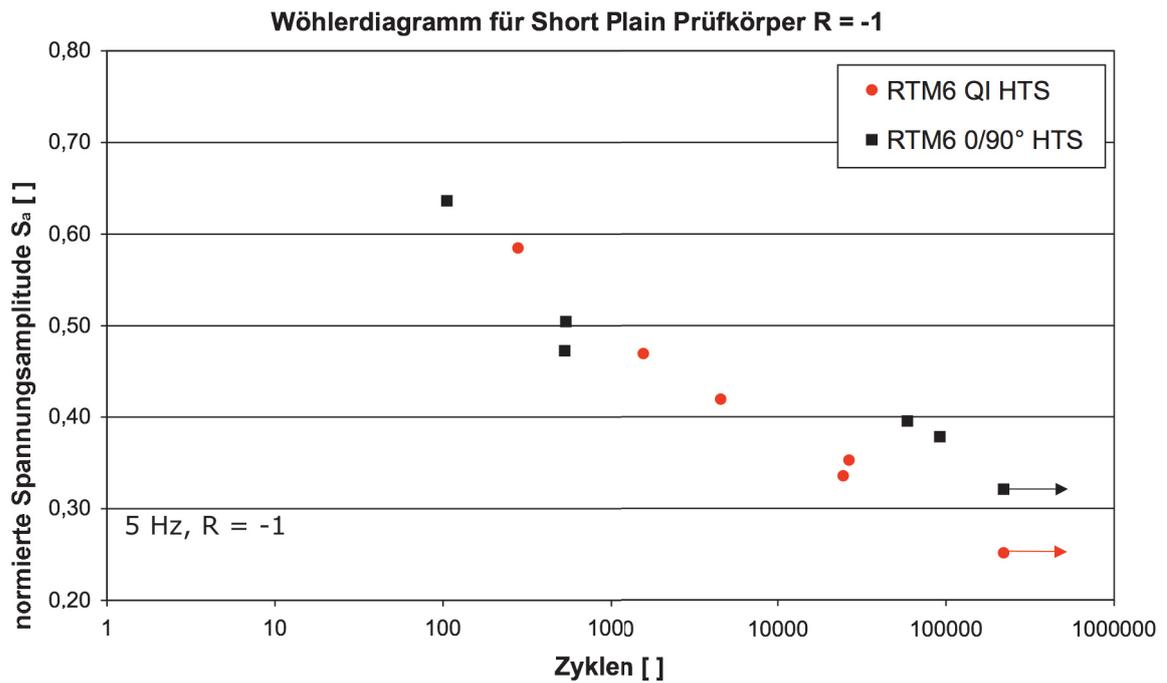


Abb. 4.16a: Wöhlerdiagramm für Short Plain Proben mit biaxialem und quasi-isotropem Aufbau in normierten Werten dargestellt.

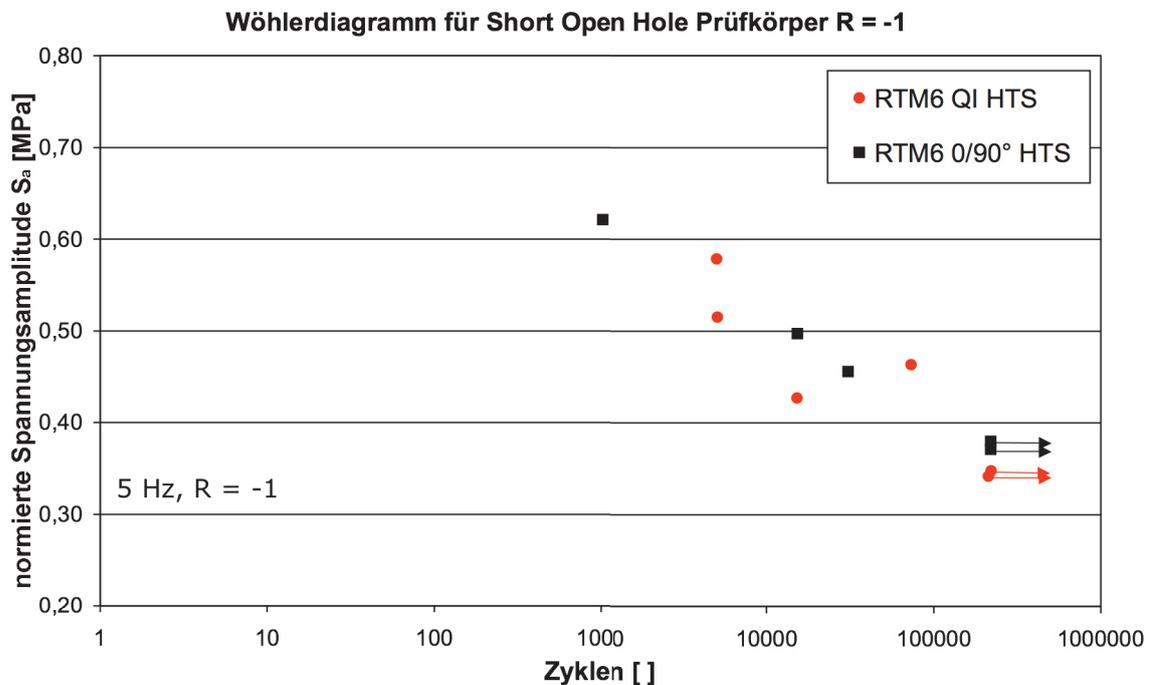


Abb. 4.16b: Wöhlerdiagramm für Open Hole Proben mit biaxialem und quasi-isotropem Aufbau in normierten Werten dargestellt.

Als Ergänzung der Ergebnisse aus den Wöhlerdiagrammen ist in Abb. 4.17 der Verlauf der dynamischen E-Moduli der Short Plain Tensile Proben bei 30 % der Bruchlast aus den monotonen Zugversuchen dargestellt. Es ist für beide Kurven ein ähnlicher Modulverlauf zu sehen, der sich nur durch ein vorzeitiges Versagen der quasi-isotropen Probe unterscheidet.

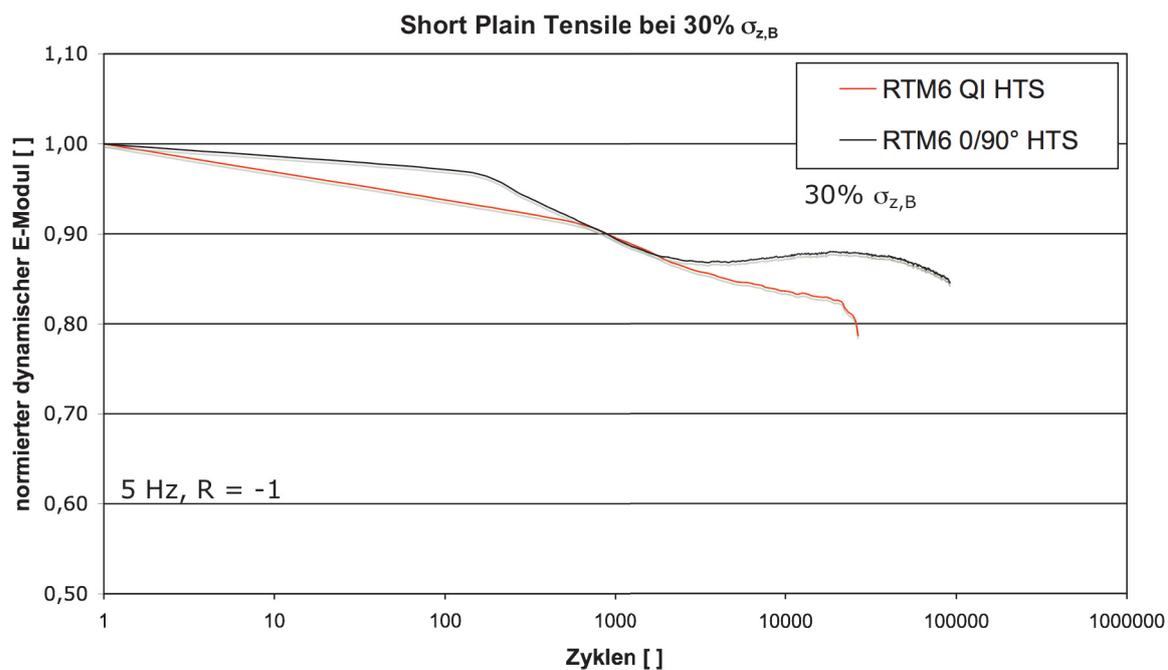


Abb. 4.17: Dynamischer E-Modul über der Zykluszahl für die Proben mit biaxialem und quasi-isotropem Aufbau bei 30 % der Zug-Bruchfestigkeit.

5. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es die mechanischen Eigenschaften von RTM-Laminaten zu beschreiben, für die als Faserhalbzeug Kohlenstofffaser-Gelege, sogenannte Non-Crimp Fabrics (NCFs), verwendet wurden. Insbesondere sollte der Einfluss unterschiedlicher Fasertypen, Matrix-Harzsysteme und Lagenaufbauten untersucht werden. Es wurden die wesentlichen Eigenschaften unter monotoner Zug- und Druckbelastung (Festigkeit und E-Modul) als auch das Ermüdungsverhalten unter wechselnder Last bestimmt.

Die Untersuchungen unter monotoner Zugbelastung wurden generell mit zwei unterschiedlichen Prüfkörperlängen durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Zugfestigkeit der kurzen Proben durchgängig um ca. 10 % höher lag. Das wurde auf die geringere Fehlstellenwahrscheinlichkeit in den kurzen Proben zurückgeführt. Open Hole Festigkeit bzw. die Modulwerte blieben erwartungsgemäß von der Prüfkörperlänge unbeeinflusst.

Hinsichtlich des Fasertypeneinflusses wurden zwei Fasern, die sich im wesentlichen durch ihre Schlichte unterschieden, untersucht. Unter monotoner Zug Belastung zeigten die quasi-isotropen Lamine mit der Fasertypen HTS, die eine etwas höhere Festigkeit als die Vergleichsfaser HTA aufweist, auch etwas höhere Festigkeiten. Den nicht unbeträchtlichen Einfluss der Schlichte auf die mechanischen Eigenschaften spiegelten die Ergebnisse unter monotonem Druck und wechselnder Ermüdungsbelastung wieder, wo die Faser HTA bessere Ergebnisse erzielte.

Die Untersuchungen der vier verschiedenen Matrix-Harzsysteme ergab prinzipiell keine großen Unterschiede in den Werten, aber es zeigte sich eine Tendenz mit den höchsten Festigkeitswerten auf Zug und den niedrigsten Werten auf Druck für das Harzsystem EPS 601. Für den E-Modul wurden, unter Berücksichtigung der Standardabweichung, mit allen vier Harzsystemen die selben Werte erzielt. Einzig auf Druck wies das RTM6 Harz eine etwas höheren Modul auf. Auf Ermüdung hob sich das zähmodifizierte Harzsystem 977-2 durch etwas höhere Versagenszyklen im Wöhlerdiagramm hervor, während das EPS 601 die geringsten Versagenszyklen

len aufwies. Generell waren aber auch unter Ermüdungsbelastung die Unterschiede nur gering.

Die Untersuchungen des Lagen-Aufbautyps (quasi-isotrop, biaxial) belegten die Erwartungen für höhere Festigkeiten und E-Modulwerte für die $0^\circ/90^\circ$ Probekörper auf Zug und auf Druck. Allerdings war der Festigkeitsunterschied der beiden Aufbauvarianten auf Druck kleiner als auf Zug, da die Druckeigenschaften mehr von der Matrix dominiert werden. Unter zyklischer Belastung zeichneten sich die Proben mit biaxialem Aufbau durch ein besseres Ermüdungsverhalten aus.

Zusammenfassend kann insbesondere hinsichtlich der unterschiedlichen Matrix-Harzsysteme gesagt werden, dass das untersuchte mechanische Eigenschaftsprofil nur geringe Unterschiede aufwies und somit zumindest in dieser Hinsicht sich Alternativen zum bereits in der Luftfahrt qualifizierten RTM-Harzsystems RTM6 anbieten würden.

6. Literatur:

Bergmann H.W. (1992). „Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile“, Springer, Berlin, D.

Bibo G.A., Hogg G. J. und Kemp M. (1997). „Mechanical Characterization of glass- and carbon-fibre reinforced composites made with non-crimp fabrics“, Composites Science and Technology, 57: 1221-1241, Elsevier, St. Louis, MO, USA.

Chembers J.R. (2003). „Concept to Reality: Contribution of the Langley Research Center to U.S. civil aircraft of the 1990s“, Technical Report, SP-2003-4529, NASA, Washington, DC, USA.

Ehrenstein G.W. und Bittmann E. (1997). „Duroplaste – Aushärtung – Prüfung – Eigenschaften“, Hanser, München, D.

Ehrenstein G.W. (2006). „Faserverbund-Kunststoffe“, Hanser, München, D.

Goldberg A.P., Mills A.R. und Irving P. (1994). „Non-crimped fabrics versus prepregs CFRP composites – A comparison of mechanical performance“. 6th int. Conference on Fibre Reinforced Composites, FRC94, Paper 6, Newcastle University, Newcastle, GB.

Griess T. (2007). Vorlesungsunterlagen zu „Faserverbundwerkstoffe II/ Preforming“, Institut für Textiltechnik (ITA), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, D.

Hertzberg R.W. und Manson J.A. (1980). „Fatigue of engineered plastics“, Academic Press, New York, USA.

Kitzmüller W. (2007). „Hysteretische Erwärmung von RTM-Laminaten unter Ermüdungsbelastung“, Studienarbeit, Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität, Leoben, A.

Kruckenberger T. und Paton W. (1998). „Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures“, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, NL.

Lang R.W., Stutz H. Heym M. und Nissen D (1986). „Die Angewandte Makromolekulare Chemie“, 145/146, 267.

Lang R.W. (2001). Vorlesungsunterlagen zu „Physik und Werkstoffkunde der Kunststoffe“, Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität, Leoben, A.

Lang R.W. (2001a). Vorlesungsunterlagen zu „Werkstoffprüfung der Kunststoffe“, Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität, Leoben, A.

Lang R.W. (2005). „Faserverbundwerkstoffe – Composites: Entwicklungstrends gestern – heute – morgen“, Präsentation am Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, A.

Leong K.H., Ramakrishna S., Huang Z.M. und Bibo G.A. (2000). „The potential of knitting for engineering composites – a review“, Composites Part A, 31: 197-220, Elsevier, St. Louis, MO, USA.

LIBA (2007). Firmen-/ Produktinformation, URL:

<http://liba.de/download/brochure/04%20Multiaxial/Copcentra%20MAX%203%20CNC.pdf>

Mattsson D. (2005). „Mechanical performance of NCF composites“, Dissertation, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Polymer Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, S.

McHugh J., Döring J., Stark W. (2001). „Ultraschallcharakterisierung von vernetzenden Epoxid-Harze“, Jahrestagung 2001 – Zerstörungsfreie Materialprüfung, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsdreie Prüfungen e.V., Berlin, D.

Miller A.J. (1996). „The Effect of microstructural parameters on the mechanical properties of non-crimp fabric composites“, M.Phil Thesis, Cranfield University, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield, UK.

Mouritz A.P., Leong K.H. und Hertzberg I.A. (1997). „A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites“, Composites Vol. 28 A, 28: 979-991, RMIT University, Melbourne, AU.

Painold M. (2003). „Basischarakterisierung und Untersuchung des Ermüdungsverhaltens Karbonfaserverstärkter RTM-Laminat“, Diplomarbeit, Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität, Leoben, A.

Pinter G. (2006). „Characterisation of the tensile fatigue behaviour of RTM-laminates by isocyclic stress-strain-diagrams“, International Journal of Fatigue, Elsevier, St. Louis, MO, USA.

Rudd C.D., Long A.C., Kendall K.N. und Mangin C.G.E. (1997). „Liquid Moulding Technologies“, Woodhead Publishing Ltd., Abington, GB.

Schwarz O. (2000). „Kunststoffkunde“, Vogel, Würzburg, D.

Schürmann H. (2004). „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, Springer, Berlin, D.

Stephan W. (2007). Artikel im „der Standard“ (10.07.2007), „Von Reichersberg nach Everett“, Wien, A.

Tsai G-C und Chen J-W (2005). „Effect of stitching on Mode I strain energy release rate“, Composite Structures, 69: 1-9, Elsevier, Orlando, FL, USA..

Weimer C. (2002). „Zur nähtechnischen Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde“, Dissertation, Institut für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Universität Kaiserslautern, D.

Wörndle R. (1996). Verlesungsunterlagen zu „Verbundwerkstoffe I+II“, Institut für Konstruieren in Kunststoffen, Montanuniversität, Leoben, A.

Wörndle R. (2007). Verlesungsunterlagen zu „Wiederholung und Ergänzung zu Mechanik“, Institut für Konstruieren in Kunststoffen, Montanuniversität, Leoben, A.

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

7. ANHANG

Alle folgenden Tabellen und Diagramme wurden nach den Vorgaben der Projektpartner angefertigt und sind für den internen Gebrauch bestimmt.

7.1. Airbus Tabellen - Monotone Versuche

A.1:	RTM6 HTA QI Plain Tensile.....	65
A.2:	RTM6 HTA QI Open Hole Tensile.	66
A.3:	RTM6 HTA QI Short Plain Tensile.	67
A.4:	RTM6 HTA QI Short Open Hole Tensile.....	68
A.5:	RTM6 HTA QI Plain Compression.....	69
A.6:	RTM6 HTA QI Open Hole Compression.....	70
A.7:	RTM6 HTS QI Plain Tensile.....	71
A.8:	RTM6 HTS QI Open Hole Tensile.	72
A.9:	RTM6 HTS QI Short Plain Tensile.....	73
A.10:	RTM6 HTS QI Short Open Hole Tensile.....	74
A.11:	RTM6 HTS QI Plain Compression.....	75
A.12:	RTM6 HTS QI Open Hole Compression.....	76
A.13:	RTM6 HTS Biax Plain Tensile.	77
A.14:	RTM6 HTS Biax Open Hole Tensile.....	78
A.15:	RTM6 HTS Biax Short Plain Tensile.....	79
A.16:	RTM6 HTS Biax Short Open Hole Tensile.....	80
A.17:	RTM6 HTS Biax Plain Compression.....	81
A.18:	RTM6 HTS Biax Open Hole Compression.....	82

A.19:	EPS 601 HTS QI Plain Tensile.....	83
A.20:	EPS 601 HTS QI Open Hole Tensile.....	84
A.21:	EPS 601 HTS QI Short Plain Tensile.	85
A.22:	EPS 601 HTS QI Short Open Hole Tensile.	86
A.23:	EPS 601 HTS QI Plain Compression.	87
A.24:	EPS 601 HTS QI Open Hole Compression.	88
A.25:	EPS 600 HTS QI Plain Tensile.....	89
A.26:	EPS 600 HTS QI Open Hole Tensile.....	90
A.27:	EPS 600 HTS QI Short Plain Tensile.	91
A.28:	EPS 600 HTS QI Short Open Hole Tensile.	92
A.29:	EPS 600 HTS QI Plain Compression.	93
A.30:	EPS 600 HTS QI Open Hole Compression.	94
A.31:	977-2 HTS QI Plain Tensile.....	95
A.32:	977-2 HTS QI Open Hole Tensile.....	96
A.33:	977-2 HTS QI Short Plain Tensile.	97
A.34:	977-2 HTS QI Short Open Hole Tensile.	98
A.35:	977-2 HTS QI Plain Compression.	99
A.36:	977-2 HTS QI Open Hole Compression.	100

7.2. Airbus Tabellen - Monotone Versuche

A.37:	RTM6 HTA QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.....	101
A.38:	RTM6 HTA QI Plain Compression/ Open Hole Compression.....	102
A.39:	RTM6 HTS QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.....	103
A.40:	RTM6 HTS QI Plain Compression/ Open Hole Compression.....	104
A.41:	RTM6 HTS Biax Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.....	105

A.42:	RTM6 HTS Biax Plain Compression/ Open Hole Compression.....	106
A.43:	EPS601 HTS QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.	107
A.44:	EPS601 HTS QI Plain Compression/ Open Hole Compression.	108
A.45:	EPS600 HTS QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.	109
A.46:	EPS600 HTS QI Plain Compression/ Open Hole Compression.	110
A.47:	977-2 HTS QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.	111
A.48:	977-2 HTS QI Plain Compression/ Open Hole Compression.	112

7.3. Dynamische Versuche - Einzelverläufe

A.49:	RTM6 HTA QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.	113
A.50:	RTM6 HTA QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.	113
A.51:	RTM6 HTA QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.....	114
A.52:	RTM6 HTA QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.....	114
A.53:	RTM6 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.	115
A.54:	RTM6 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.	115
A.55:	RTM6 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.....	116
A.56:	RTM6 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.....	116
A.57:	RTM6 HTS biax - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben. .	117
A.58:	RTM6 HTS biax - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben. .	117
A.59:	RTM6 HTS biax - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.....	118
A.60:	RTM6 HTS biax - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.....	118

A.61:	EPS601 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.....	119
A.62:	EPS601 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.....	119
A.63:	EPS601 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.....	120
A.64:	EPS601 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.....	120
A.65:	EPS600 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.....	121
A.66:	EPS600 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.....	121
A.67:	EPS600 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.....	122
A.68:	EPS600 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.....	122
A.69:	977-2 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.....	123
A.70:	977-2 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.....	123
A.71:	977-2 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.....	124
A.72:	977-2 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.....	124

material short name:		Bifaxonal-Carbon-Fabric+45° HTS		nominal fibre volume content:		80,0%		Short Open Hole Tensile																									
Prepreg fabric (CF, U) designation:		Sartex S32C100K40S4-Q1270-284000 (PES 74del) [Sartex/Wagner GmbH]		fibre:		textile batch: S1717809		test place:																									
(including exact FWA, construction, ...)		+ symmetric counter-tensile S32C100K40S3-Q1270-284000 (PES 74del) [Sartex/Wagner GmbH]		binder:		binder batches		date of test:																									
				resin:		resin batches		operator:																									
				RTM6		M22704-I		Krzemler/Vollberg																									
laminale mass ratio:		285025 (Q)		fastener, washer, nut,		na.		test standard:																									
detailed drawing seq.:		(45/135030945/13501902)		collar reference:				SV 09001/23																									
ageing:		as received		attachments		(cure cycles, NDT maps, micrographs photos, ...)		sheet reference:																									
fatigue:		none						Krzemler/Vollberg																									
test conditions:		23°C, dry						August 8, 2008																									
only white fields to be filled in								© Airbus-Deutschland GmbH 2008																									
batch ID	of specimens	individual specimen name	specimen dimensions						rupture				modulus						poissons ratio		valid failure (needs to be checked for)	remarks	specimen photo attached?	attachments									
			thickness	width	length	width	length	width	rupture load	ultimate strain	strength related to L_{max}	strength related to L_{nom}	E-modulus in longitudinal direction related to L_{max}	E-modulus in longitudinal direction related to L_{nom}	E-modulus in transverse direction related to L_{max}	E-modulus in transverse direction related to L_{nom}	ν_{long}	ν_{trans}	ν_{long}	ν_{trans}													
			mm	mm	mm	mm	mm	F	%	sMPa	sMPa	sMPa	sMPa	sMPa	sMPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa					
X	1	RTM001002C-001	4,20	4,09	32,20	150	60	32,38	48015	382,4	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	372,1	X					
	2	RTM001002C-002	4,20	4,09	32,20	150	60	32,65	50391	377,6	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	392,5	X					
	3	RTM001002C-003	4,20	4,09	32,03	150	60	32,70	52998	385,1	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	403,5	X					
	4	RTM001002C-004	4,20	4,09	32,00	150	60	32,60	50272	374,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	394,0	X					
	5	RTM001002C-005	4,20	4,09	32,00	150	60	32,60	51144	380,5	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	390,7	X					
	6	RTM001002C-006	4,20	4,09	32,00	150	60	32,00	46884	347,2	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	371,6	X					
	7																																
	8																																

A.10: RTM6 HTS QI Short Open Hole Tensile.

7.1.3 001003 – RTM6 HTS BIAXIAL

material short name: Bidagonal Carbon Fabric 445 HTS																																							
Prepreg fabric (NCF full designation) Saertex S32C100K4053A01270-284000 (FES 74dex) / Saertex / Wegener GmbH (+ symmetric counter fabric S32C100K4053A01270-284000 (FES 74dex) / Saertex / Wegener GmbH)																																							
fibre: TENAX HTS 8031 12K binder: RTM6 resin:			fibre batch: S117009 binder batches: M620744 resin batches:			nominal fibre volume content: 60.0%			Plane Tensile																														
laminate mass ratio: 50.0/50 detailed stacking seq.: (08000000000002)																																							
ageing: as received fatigue: none test conditions: 23°C, dry																																							
sheet reference: Wölbang Kitzmüller completed by: October 02, 2009 date:																																							
sheet reference: na. attachments: (see copies, NOT maps, micrographs, photos...) @ Mikus Deutschland GmbH 2006																																							
Batch ID	# of specimens	individual specimen name	specimen dimensions						rupture				modulus				poissons ratio				specimen photo	remarks	activated for statistics	valid failure															
			off. fibre	width	thickness	nominal thickness	width	length	width	load	rupture strain	ultimate strain	strength	strength	E-modulus in longitudinal direction	E-modulus in transverse direction	ν _{xx}	ν _{yy}	ν _{xy}	ν _{yx}																			
			mm	mm	mm	mm	F	ε	ε _{max}	σ _u	σ _{max}	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		
1	RTM01003A-04		0	413	409	32.0	300	80	180.25	11810	1.31	844.2	852.3	8718	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	67451	
2	RTM01003A-05		0	414	409	32.0	300	80	180.15	122580	1.38	824.1	852.2	8710	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650	68650
3	RTM01003A-06		0	413	409	31.99	300	80	179.98	118885	1.37	833.3	831.9	8832	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947
4	RTM01003A-07		0	414	409	32.0	300	80	180.25	109800	1.24	822.0	831.9	8832	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658	68658
5	RTM01003A-08		0	413	409	31.99	300	80	180.25	118888	1.34	889.9	831.9	8832	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711	67711
6	RTM01003A-09		0	414	409	31.97	300	80	180.25	127118	1.42	890.4	831.9	8832	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947	67947
7																																							
8																																							

A.13: RTM6 HTS Biax Plain Tensile.

material short name:		Biaxional-Carbon-Fabric-140° HTS									
Prepreg/fabric/CF full designation:		Saertex S32C/00K-0334-01/270-26-4000 PES, 74dexl (Saertex/Waagner GmbH)									
(including exact FAW, construction, ...)		+ symmetric counter-tensile S32C/00K-0335-01/270-26-4000 PES, 74dexl (Saertex/Waagner GmbH)									
fiber:		fire-retardant batches: textile batch: S177809									
binder:		binder batches									
resin:		resin batches									
formate mass ratio:		n.a.									
detailed stacking seq.:		MS87339-1									
oven:		fastener, washer, nut,									
fatigue:		color reference:									
test conditions:		attachments									
		(core cycles, NDT marks, micrographs, photos, ...)									
		steel reference:									
		controlled by:									
		date:									
		Wolfram Kitzröller									
		August 20, 2006									
		© Airbus Deutschland GmbH 2006									

Batch ID	# of specimen	individual specimen name	specimen dimensions						rupture		strength		modulus						poissons ratio	yield strength (need to be attached?)	remarks	specimen photo attached?								
			off-axis	measured thickness	nominal thickness	specimen width	specimen length	specimen length	rupture local	ultimate strain	strength related to L_{max}	strength related to L_{min}	E-modulus in longitudinal direction related to L_{max}	E-modulus in longitudinal direction related to L_{min}	E-modulus in transverse direction related to L_{max}	E-modulus in transverse direction related to L_{min}														
			α	t_{max}	t_{nom}	l_{max}	l_{min}	l	q	f	F	N	ϵ	σ_{max}	σ_{max}	MPa	mmMPa	MPa	mmMPa	MPa	mmMPa	MPa	mmMPa	MPa	mmMPa	ν	σ_{yld}			
	1	RTM001003E-002	0	3.79	4.09	32.43	300	60	180.25	71008	0.78	584.9	541.9	541.9	541.9	75079	69480	70039	70039	70039	70039	70039	70039	70039	70039	0.25				
	2	RTM001003E-003	0	4.09	4.09	32.51	300	60	180.05	75512	0.8	587.9	587.8	587.8	587.8	70125	70039	70039	70039	70039	70039	70039	70039	70039	70039	0.25				
	3	RTM001003E-004	0	4.04	4.09	32.53	300	60	180.075	75053	0.98	571.1	584.0	584.0	584.0	80399	80399	80399	80399	80399	80399	80399	80399	80399	80399	0.25				
	4	RTM001003E-005	0	4.05	4.09	32.47	300	60	180.02	74022	0.84	582.9	587.2	587.2	587.2	67464	66802	66802	66802	66802	66802	66802	66802	66802	66802	0.25				
	5	RTM001003E-006	0	4.00	4.09	32.49	300	60	180.4	72612	0.86	580.3	547.8	547.8	547.8	66108	64569	64569	64569	64569	64569	64569	64569	64569	64569	0.25				
	6	RTM001003E-007	0	3.99	4.09	32.56	300	60	180.25	72446	0.78	587.6	543.9	543.9	543.9	71424	69765	69765	69765	69765	69765	69765	69765	69765	69765	0.25				
	7																													
	8																													
textile batch X																														

A.14: RTM6 HTS Biax Open Hole Tensile.

material short name:		Bidirectional-Carbon-Fabric+48° HTS		nominal fibre volume content: 60,0%		Plane Compression																													
Pre-registration / full designation:		Saertex S32C100K4634-Q1270-264000 (PES 74d)ex Saertex/Waagner GmbH		test place:		PCC, Leiden																													
(including exact F/W, construction, ...)		+ symmetric counter-tensile S32C100K4635-Q1270-264000 (PES 74d)ex Saertex/Waagner GmbH		date of test:		April 05, 2016																													
fibre:		fibre/tensile batches:		operator:		Kiz Müller/Voltbank																													
kinder:		kinder batches:		test standard:		ATM 1.00084-issue3																													
restr:		restr. batches:		sheet reference:		Kiz Müller/Voltbank																													
50065		MS28704-1		completed by:		August 21, 2016																													
laminated mass ratio:		fastener, washer, nut,		date:		© Airbus Deutschland GmbH 2016																													
detached stacking seq.:		collar reference:																																	
aging:		attachments																																	
fatigue:		(core cycles, NDT marks, micrographs, photos, ...)																																	
test conditions:		23°C, dry																																	
only white heads to be filled in																																			
batch ID	of specimen	individual specimen name	specimen dimensions						modulus			modulus			modulus			remarks	specimen photo attached?	attachments															
			off-axis	thickness	thickness	width	length	length	width				length	width	length	width	length																		
0	deg.	t _{max}	t _{min}	t _{nom}	W _{max}	W _{min}	l _{max}	l _{min}	l _{nom}	l _{max}	l _{min}	l _{nom}	l _{max}	l _{min}	l _{nom}	l _{max}	l _{min}	l _{nom}	l _{max}	l _{min}	l _{nom}	l _{max}	l _{min}	l _{nom}	l _{max}	l _{min}	l _{nom}	l _{max}	l _{min}	l _{nom}	l _{max}	l _{min}	l _{nom}		
1		RTM001003B-002	0	4,30	4,09	32,11	150	60	32,51	-80296	1,1	-592,3	-611,4	54040	58749	58749	54040	58749	58749	54040	58749	58749	54040	58749	58749	54040	58749	58749	54040	58749	58749	54040	58749		
2		RTM001003B-003	0	4,33	4,09	31,97	150	60	32,59	-73368	1,02	-599,0	-591,6	62166	65739	65739	62166	65739	65739	62166	65739	65739	62166	65739	65739	62166	65739	65739	62166	65739	65739	62166	65739		
3		RTM001003B-004	0	4,31	4,09	32,04	150	60	32,59	-80090	1,05	-590,7	-611,0	61448	64678	64678	61448	64678	64678	61448	64678	64678	61448	64678	64678	61448	64678	64678	61448	64678	64678	61448	64678		
4		RTM001003B-005	0	4,29	4,09	32,35	150	60	32,59	-72996	0,94	-521,7	-547,0	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	62459	
5		RTM001003B-006	0	4,26	4,09	32,02	150	60	32,55	-86664	1,04	-692,1	-615,9	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	63166	
6		RTM001003B-007	0	4,30	4,09	31,95	150	60	32,66	-81920	1,06	-599,3	-626,1	63013	66277	66277	63013	66277	66277	63013	66277	66277	63013	66277	66277	63013	66277	66277	63013	66277	66277	63013	66277		
7																																			
8																																			

A.17: RTM6 HTS Biax Plain Compression.

7.1.5 003002 – EPS600 HTS Quasi-isotrop

material short name:		Bilateral Carbon Fabric 45° HTS		normal fibre volume content: 60.0%		Plane Tensile													
Prepreg fabric/CF full designation:		Saelex 332C00K0304-01270-26400 [FES 7Adex] [Saelex Wägener GmbH] + symmetric counterweave 332C00K0305-01270-26400 [FES 7Adex] [Saelex Wägener GmbH]		test place:		POCL Leoben													
(including exact FAW construction...)		TENAX HTS 5631 12K		date of test operator:		Kizimuller Wolfmann													
fibre:		binder/babbies:		test standard:		ATM 1.0007A:Issue3													
resin:		resin/babbies:		sheet reference:		Wolfmann Kizimuller													
laminate mass ratio:		resin/babbies:		compiled by:		31.04.06													
detailed stacking seq.:		resin/babbies:		date:		©Alpius Deutschland GmbH 2006													
aging:		resin/babbies:																	
fatigue:		resin/babbies:																	
test conditions:		resin/babbies:																	
only white fields to be filled in		resin/babbies:																	
batch ID	of specimens	individual specimen name	specimen dimensions						rupture free length	rupture load	ultimate strain	tensile strength		modulus		poissons ratio		valid failure? (Needs to be activated for statistical remarks)	specimen photo attached?
			off-axis	width	length	length	length	width				rupture	strength	strength	E-modulus in longitudinal direction	E-modulus in transverse direction	ν		
			mm	mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
			deg.	mm	mm	mm	mm	mm	F	ε	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	ν	ν			
				mm	mm	mm	mm	mm	N	%	σ _{max} / MPa	σ _{max} / MPa	related to l _{max} / MPa	related to l _{max} / MP					

material short name:		Billogram-Carbon-Fabrics/-45° HTS		nominal fibre volume content:		80,0%		Open Hole Tensile																												
Peperofabrics/ICF full designation:		Saetex 5320X(DK<0534-0170-26400 [PE5 74dex] [Saetex/Wagener GmbH] +symmetric counter-tensile 5320X(DK<0535-0170-26400 [PE5 74dex] [Saetex/Wagener GmbH])		test place:		PCC Leoben																														
(including exact FAW construction, ...)		TENAX HTS 6631 12K		date of test:		06. Okt.06																														
fibre:		fibre/batch: k. A. in LOS		operator:		Kitzmüller/Wolfrum																														
binder:		binder/batches:		test standard:		ATM 1.0007 A issue3																														
resin:		resin/batches:		sheet reference:		n.a.																														
laminate mass ratio:		Z5/50/25 (0)		collar reference:		73-663-HD, EZ-Nr.0278000																														
detailed stacking seq.:		(45/135/0/90/45/135/0/90/2		attachments:		Kleber, washer, nut, n.a.																														
aging:		as received		(core cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)		completed by:		Wolfrum/Kitzmüller																												
fatigue:		none				date:		30. Okt.06																												
test conditions:		23°C, dry						©Alsius-Deutschland GmbH 2006																												
only white fields to be filled in																																				
batch ID	# of specimen	specimen dimensions										rupture				modulus				poissons ratio				specimen photo attached?	remarks	valid failure? (needed for statistics)										
		off axis	thickness	nominal thickness	width	specimen length	grip length	free length	rupture length	ultimate strain	strength related to l_{max}	strength related to l_{min}	σ_{max} /MPa	σ_r /MPa	σ_{max} /MPa	σ_r /MPa	E_{max} /MPa	E_r /MPa	E_{max} /MPa	E_r /MPa	ν_{max}	ν_r	ν_{max}				ν_r	s v%	v v%	v_{min}						
		0 deg.	l_{max} mm	l_{nom} mm	l_{min} mm	l mm	l mm	l mm	ϵ %	F N	F N	σ_{max} /MPa	σ_r /MPa	σ_{max} /MPa	σ_r /MPa	E_{max} /MPa	E_r /MPa	E_{max} /MPa	E_r /MPa	E_{max} /MPa	E_r /MPa	ν_{max}	ν_r	ν_{max}	ν_r	s v%	v v%	v_{min}								
		textile batch X										cal. method:				secant modulus 10%/50% of failure stress																				
1		EP800-003002a+001	0	385	4,09	31,95	300	60	180,75	0,99	480,5	451,7	451,7	451,7	451,7	51336	46280	46280	46280	46280	46280															
2		EP800-003002a+002	0	387	4,09	31,91	300	60	180,75	0,94	465,9	440,2	440,2	440,2	53248	50413	50413	50413	50413	50413	50413															
3		EP800-003002a+003	0	385	4,09	31,90	300	60	180,75	0,95	461,0	433,4	433,4	433,4	49336	46945	46945	46945	46945	46945	46945															
4		EP800-003002a+004	0	383	4,09	31,89	300	60	181	0,94	468,8	466,5	466,5	466,5	50917	47618	47618	47618	47618	47618	47618															
5		EP800-003002a+006	0	375	4,09	31,81	300	60	180,75	1,16	546,8	31,4	501,3	24,2	52924	471	4624	4624	4624	4624	4624															
6		EP800-003002a+007	0	377	4,09	31,90	300	60	180,25	1,07	501,8	64%	462,0	53%	51687	25%	47561	25%	47561	47561	47561															
7												492,5	461,0	461,0	461,0	51688	48220	48220	48220	48220	48220															
8												461,0	433,4	433,4	433,4	49336	46945	46945	46945	46945	46945															

A.26: EPS 600 HTS QI Open Hole Tensile.

material short name:		Bilateral Carbon-Fabric+45° HTS																							
Prepreg/fabric/NCF full designation:		Saertex 532C/DK/0534-01/270-264000 [PE5 74dex] Saertex Vagener GmbH																							
(including exact FAW construction,...)		+symmetric counter-textile 532C/DK/0535-01/270-264000 [PE5 74dex] Saertex Vagener GmbH																							
fiber:		TENAX HTS 5631 12K																							
binder:		binder batches:																							
resin:		resin batches: 73-653-HD, Erz Nr. 0276000																							
laminate mass ratio:		Z550Z5 (Q)																							
detailed stacking seq.:		(45/135/0/0/45/135/0/90)2																							
aging:		as received																							
fatigue:		none																							
test conditions:		23°C, dry																							
nominal fibre volume content:		80,0%																							
Plane Compression		test place: POC Leoben date of test: 9. Oktober 2016 operator: Kitzmüller-Weißharnig test standard: ATM 1.0009A issue3 sheet reference: SW 06000123 compiled by: Kitzmüller-Weißharnig date: 30. Okt 06 ©Alvius-Deutschmann GmbH 2006																							
batch ID	# of specimen	specimen dimensions										rupture				modulus				poissons ratio		specimen photo attached?	remarks	attachments	
		off axis	thickness	nominal thickness	width	specimen length	grip length	free length	rupture length	rupture load	ultimate strain	strength related to L_{max}	strength related to L_{max}	E_{10} MPa	E_{50} MPa	E_{90} MPa	ν_{10}	ν_{50}	ν_{90}						
		α deg.	t_{max} mm	t_{nom} mm	w_{max} mm	l mm	l_0 mm	l_f mm	F N	ϵ %	σ_{max} MPa	σ_{max} MPa	σ_{max} MPa	E_{10} MPa	E_{50} MPa	E_{90} MPa	ν_{10}	ν_{50}	ν_{90}						
		calc. method:										secant modulus 10%/50% of failure stress													
												47847				44386									
												-507,8				4386									
												-492,1				4326									
												-477,1				3869									
												-422,6				41405									
												-477,4				44989									
												-465,2				4676									
												477,0				4604									
												-576,1				41405									
textile batch X																									
1																									
2																									
3																									
4																									
5																									
6																									
7																									
8																									

A.29: EPS 600 HTS QI Plain Compression.

7.1.6 001002 – Cycom 977-2 HTS Quasi-isotrop

material short name:		Bidipalnal-Carbon-Fabric-48° HTS		nominal fibre volume content:		80.0%		Plane Tensile																									
Prepreg fabric full designation:		Sartex 632C100K4334-01270-26400 [PES 740ex] [Sartex Wägener GmbH]		test place:		FOCL-Leiden																											
(including exact FAY construction...)		+symmetric counter-tensile 632C100K4335-01270-26400 [PES 740ex] [Sartex Wägener GmbH]		date of test:		12. Okt 06																											
fibre:		TENAHTS 663T 12K		operator:		Kiz Müller/Wolfgang																											
binder:		-		test standard:		ATM 1.007A issue3																											
resin:		977-2 film		shear reference:		-																											
laminare mass ratio:		2560/25 (0)		collar reference:		-																											
detailed stacking seq.:		(45 135 090 45 135 0 90 2		attachments:		-																											
aging:		as received		(cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)		-		Wolfgang Kiz Müller																									
fatigue:		none		-		-		31. Okt 06																									
test conditions:		23°C, dry		-		-		© Airbus Deutschland GmbH 2006																									
only white fields to be filled in																																	
batch ID	# of specimens	specimen dimensions						rupture				modulus				poissons ratio		valid failure? (needs to be activated for statistics)	specimen photo attached?														
		off-axis	measure thickness	nominal thickness	specimen width	specimen length	free length	rupture load	ultimate strain	strength related to σ_{max}	strength related to σ_{max}	Es modulus in longitudinal direction related to σ_{max}	Es modulus in transverse direction related to σ_{max}	Es modulus in longitudinal direction related to σ_{max}	Es modulus in transverse direction related to σ_{max}	ν	ν_{min}																
		θ	t_{max}	t_{nom}	w_{max}	l	l_f	F	ϵ	σ_{max}	σ_{max}	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	
textile batch X		1	977-2-01002A-001	0	4.03	4.09	31.80	300	60	181.25	81815	1.45	6381	628.0	4933	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	46840	
		2	977-2-01002A-002	0	3.94	4.09	31.94	300	60	181.00	77250	1.42	6303	591.4	46841	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809	46809
		3	977-2-01002A-003	0	3.78	4.09	31.97	300	60	181.00	77095	1.34	6389	597.7	5266	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551	49551
		4	977-2-01002A-004	0	3.78	4.09	31.95	300	60	181.25	78087	1.29	6298	592.1	5417	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015	5015
		5	977-2-01002A-005	0	3.89	4.09	31.96	300	60	181.25	73007	1.28	5880	19.5	5020	2196	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883	46883
		6	977-2-01002A-006	0	3.85	4.09	31.98	300	60	181.00	75592	1.33	6132	31%	5080	4.3%	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832	47832
		7																															
		8																															

A.31: 977-2 HTS QI Plain Tensile.

material short name: Bidirectional-Carbon-Fabrics/45° HTS										Open Hole Compression																			
Prepreg/fabric/CF full designation: Saertex 832CX00K-0334-01270-264000 [FES 74dex] [Saertex/Waegner GmbH] (including exact FAW construction,...)										nominal fibre volume content: 60.0%																			
+ symmetric counter textile 832CX00K-0335-01270-264000 [FES 74dex] [Saertex/Waegner GmbH]																													
fibre: TENAX HTS 5631 12K																													
binder: resin: 977-2 firm																													
laminar mass ratio: 25:50:25 (G)										fastener/washer/nut, n.a.																			
detailed stacking seq.: (45/135/0/0/45/135/0/90)2										collar reference: attachments																			
aging: as received										(cure cycles, NOT maps, micrographs, photos,...)																			
fatigue: none																													
test conditions: 23°C, dry																													
only white flecks to be filled in										©Alibus Deutschland GmbH 2006																			
batch ID	# of specimens	individual specimen name	specimen dimensions						rupture			strength			modulus						poissons ratio	valid failure? (needed for statistics)	remarks	specimen photo attached?	attachments				
			nominal thickness	max thickness	specimen width	specimen length	free length	rupture length	rupture load	ultimate strain	strength related to L_{max}	strength related to L_{nom}	strength related to L_{max}	strength related to L_{nom}	E-modulus in longitudinal direction related to L_{max}	E-modulus in longitudinal direction related to L_{nom}	E-modulus in transverse direction related to L_{max}	E-modulus in transverse direction related to L_{nom}	ν_{long}	ν_{trans}						ν_{long}	ν_{trans}		
			t_{nom}	t_{max}	$w_{specimen}$	$l_{specimen}$	l_{free}	F	ϵ	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}	σ_{max}	E_{long}	E_{long}	E_{trans}	E_{trans}	ν_{long}	ν_{trans}	ν_{long}	ν_{trans}								
	1	977-2-010025-001	3,89	4,09	32,11	150	60	32,19	-35293		-282,6	-289,8	-289,8																
	2	977-2-010025-002	3,81	4,09	32,05	150	60	32,15	-33796		-276,8	-257,8	-257,8																
	3	977-2-010025-003	3,70	4,09	32,03	150	60	32,22	-33725		-285,0	-257,5	-257,5																
	4	977-2-010025-004	3,70	4,09	31,93	150	60	32,27	-36804		-311,6	-281,9	-281,9																
	5	977-2-010025-005	3,73	4,09	31,99	150	60	32,25	-35541		-297,9	-271,7	-271,7																
	6	977-2-010025-006	3,78	4,09	31,98	150	60	32,40	-33343		-276,0	-255,1	-255,1																
	7											-288,3	-288,3																
	8											-311,6	-311,6																
textile batch X			calc. method: secant modulus 10% / 50% of failure stress																										
			n=6																										
			n=6																										
			10,5																										
			-3,9%																										
			-265,5																										
			-281,9																										

A.36: 977-2 HTS QI Open Hole Compression.

7.2 Airbus Tabellen - Dynamische Versuche

7.2.1 001001 – RTM6 HTA Quasi-isotrop

material short name: Bidiagonal-Carbon-Fabric+45° HTA		normal fibre volume content: 60,0%																		
Prepregnations/CF full designation: (including exact FAX, construction, ...)		Saeitex S32CX00K-0530-01270-264000 [PES,74dtxex] [Saeitex,Waegener GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0631-01270-264000 [PES,74dtxex] [Saeitex,Waegener GmbH] TENAX HTA 6K Lot 30911																		
fibre: binder: resin:		fibre/textile batches: textile batch: S32CX000 binder batches: M610502 resin batches: n.a.																		
laminar mass ratio: 25/50/25 (Q)		fastener, washer, nut, collar reference: n.a.																		
detailed stacking seq.: (45/135/0/90/45/135/0/90/2)		sheet reference: attachments (cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)																		
applied: as received		test standard: ATM 1.0007																		
fatigue: yes		sheet reference: compiled by: Kitzmüller Wolfgang																		
test conditions: 23°C, dry		date: 20. Okt 06																		
only white fields to be filled in		© Airbus Deutschland GmbH 2006																		
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions				rupture				strength related to t_{max} S/MPa	strength related to t_{max} v/%	strength related to t_{max} σ_{m}/MPa	strength related to t_{max} $\sigma_{m}/min/MPa$	remarks	specimen photo attached?	attachments		
				thickness nominal	thickness t_{max}	width	specimen length	grip length	free length	max. static load	% of max. load								number of cycles	residual load
				d	t_{max}	w_{max}	l	g	f	F	N	%	n	F	N					
textile batch X	1	RTM 001001E-0071 30-Aug		0	4,26	4,09	32,03	150	60	32,59	82227,3	50	758							
	2	RTM 001001E-008 30-Aug		0	4,25	4,09	32,03	150	60	32,54	82227,3	40	6069							
	3	RTM 001001E-009 30-Aug		0	4,28	4,09	32,06	150	60	32,48	82227,3	30	66178							
	4																			
	5																			
	6																			

material short name: Bidiagonal-Carbon-Fabric+45° HTA		normal fibre volume content: 60,0%																		
Prepregnations/CF full designation: (including exact FAX, construction, ...)		Saeitex S32CX00K-0530-01270-264000 [PES,74dtxex] [Saeitex,Waegener GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0631-01270-264000 [PES,74dtxex] [Saeitex,Waegener GmbH] TENAX HTA 6K Lot 30911																		
fibre: binder: resin:		fibre/textile batches: textile batch: S32CX000 binder batches: M610502 resin batches: n.a.																		
laminar mass ratio: 25/50/25 (Q)		fastener, washer, nut, collar reference: n.a.																		
detailed stacking seq.: (45/135/0/90/45/135/0/90/2)		sheet reference: attachments (cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)																		
applied: as received		test standard: ATM 1.0007																		
fatigue: yes		sheet reference: compiled by: Kitzmüller Wolfgang																		
test conditions: 23°C, dry		date: 20. Okt 06																		
only white fields to be filled in		© Airbus Deutschland GmbH 2006																		
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions				rupture				strength related to t_{max} S/MPa	strength related to t_{max} v/%	strength related to t_{max} σ_{m}/MPa	strength related to t_{max} $\sigma_{m}/min/MPa$	remarks	specimen photo attached?	attachments		
				thickness nominal	thickness t_{max}	width	specimen length	grip length	free length	max. static load	% of max. load								number of cycles	residual load
				d	t_{max}	w_{max}	l	g	f	F	N	%	n	F	N					
textile batch X	1	RTM001001C-008 24-Aug		0	4,16	4,09	32,10	150	60	32,12	46814	50	13600							
	2	RTM001001C-009 24-Aug		0	4,17	4,09	32,07	150	60	32,56	46814	40	220000	344,1	45949					
	3	RTM001001C-010 23-Aug		0	4,18	4,09	32,02	150	60	32,26	46814	30	220000	349,6	46621					
	4	RTM001001C-011 25-Aug		0	4,20	4,09	31,93	150	60	32,32	46814	60	3096							
	5																			
	6																			

A.37: RTM6 HTA QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric-45° HTA		nominal fibre volume content:		60,0%		Plane Compression	
Prepreg/fabric/CF full designation: (including exact FAV, construction, ...)		Saertex S32CX00K-0530-01270-264000 [PES,74dex] [Saertex Wegener GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0531-01270-264000 [PES,74dex] [Saertex Wegener GmbH]		fibre: resin:		RTM6		last place: date of test: operator:	
TENA X HTA, BK Lot. 30911		Saertex S32CX00K-0530-01270-264000 [PES,74dex] [Saertex Wegener GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0531-01270-264000 [PES,74dex] [Saertex Wegener GmbH]		textile batch:		S32CX000		Polymerie Competence Center Leoben 25. Aug 06 Kitzmüller Wolfgang	
laminar mass ratio:		2,95/0,25 (Q1) (45/135/0/90/45/135/0/90/2)		fastener, washer, nut, collar reference:		n.a.		test standard: sheet reference: compiled by: date:	
detailed stacking seq.:		as received		attachments (cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)				ATM 1.0008 Kitzmüller Wolfgang 26. Okt 06	
ageing:		yes		specimen dimensions				© Airbus Deutschland GmbH 2006	
fatigue:		yes		nominal thickness				Valid failure? (needs to be activated for statistics)	
test conditions:		23°C, dry		width				remarks	
only white fields to be filled in				height				specimen photo attached?	
				specimen thickness				attachments	
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					
				width					
				height					

7.2.2001002 – RTM6 HTS Quasi-isotrop

material short name: Bidirectional-Carbon-Fabric-46° HTS												Short Plane Tensile						
Prepreg/fabric/MCF full designation: (including exact FAW, construction, ...)												test place: date of test operator:						
Saeertex S92CX00K-0534-01270-264000 [PES, 74dtx] [Saeertex Wagener GmbH] + symmetric counter-textile S92CX00K-0635-01270-264000 [PES, 74dtx] [Saeertex Wagener GmbH]												nominal fibre volume content: 60.0%						
TEHAX HTS 5631 12K												fibre/textile batches: textile batch: S117609						
RTM6												binder batches: M528704-1						
laminar mass ratio: 25/50/25 (QI) (45/135/0/90/45/135/0/90)2												fastener, washer, nut, collar reference: n.a.						
detailed stacking seq.: as received												test standard: ATM 1.0007						
aging: yes												sheet reference: Kitzmüller Wolfgang						
fatigue: yes												compiled by: 05. Okt 06						
test conditions: 23°C, dry												date:						
only white heads to be filled in												© Airbus Deutschland GmbH 2006						
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions						rupture			strength related to σ_{max} S/MPa V/%	strength related to σ_{max} m/mMPa	remarks	specimen photo attached?	attachments	
				measure d thickness	nominal thickness	specime n width	specime n length	grp length	free length	max static load	% of max load	number of cycles						residual load
textile batch X	1	RTM 001002B-012	07. Juli	0	4.20	4.09	32.00	150	60	32.25	90181	30	20282					
	2	RTM 001002B-013	13. Juli	0	4.34	4.09	32.09	150	60	32.46	90181	30	26621					
	3	RTM 001002B-016	14. Juli	0	4.32	4.09	32.21	150	60	32.28	90181	40	1592					
	4	RTM 001002B-017	14. Juli	0	4.32	4.09	32.23	150	60	32.36	90181	50	278					
	5																	
	6																	
	7																	
	8																	

material short name: Bidirectional-Carbon-Fabric-46° HTS												Short Open Hole Tensile						
Prepreg/fabric/MCF full designation: (including exact FAW, construction, ...)												test place: date of test operator:						
Saeertex S92CX00K-0534-01270-264000 [PES, 74dtx] [Saeertex Wagener GmbH] + symmetric counter-textile S92CX00K-0635-01270-264000 [PES, 74dtx] [Saeertex Wagener GmbH]												nominal fibre volume content: 60.0%						
TEHAX HTS 5631 12K												fibre/textile batches: textile batch: S117609						
RTM6												binder batches: M528704-1						
laminar mass ratio: 25/50/25 (QI) (45/135/0/90/45/135/0/90)2												fastener, washer, nut, collar reference: n.a.						
detailed stacking seq.: as received												test standard: ATM 1.0007						
aging: yes												sheet reference: Kitzmüller Wolfgang						
fatigue: yes												compiled by: 03. Okt 06						
test conditions: 23°C, dry												date:						
only white heads to be filled in												© Airbus Deutschland GmbH 2006						
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions						rupture			strength related to σ_{max} S/MPa V/%	strength related to σ_{max} m/mMPa	remarks	specimen photo attached?	attachments	
				measure d thickness	nominal thickness	specime n width	specime n length	grp length	free length	max static load	% of max load	number of cycles						residual load
textile batch X	1	RTM 001002C-007	30. Juni	0	4.20	4.09	32.00	150	60	32.60	50226	50	5017					
	2	RTM 001002C-008	01. Juli	0	4.20	4.09	31.97	150	60	32.45	50226	40	73256					
	3	RTM 001002C-009	02. Juli	0	4.21	4.09	31.96	150	60	32.75	50226	30	220000					
	4	RTM 001002C-010	10. Juli	0	4.22	4.09	31.91	150	60	32.66	50226	50	4080					
	5	RTM 001002C-011	10. Juli	0	4.23	4.09	31.92	150	60	32.75	50226	40	64283					
	6	RTM 001002C-012	11. Juli	0	4.21	4.09	31.95	150	60	32.70	50226	30	220000					
	7																	
	8																	

A.39: RTM6 HTS QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric+45° HTS										Plane Compression													
Prepreg/fabric/CF full designation: (including exact FAW, construction, ...)		Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 [PES, 74dtex] Saertex Wapener GmbH + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 [PES, 74dtex] Saertex Wapener GmbH										nominal fibre volume content: 60,0%													
laminare mass ratio:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:									
detailed stacking seq.:		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6									
appling:		as received		as received		as received		as received		as received		as received		as received		as received									
fatigue:		yes		yes		yes		yes		yes		yes		yes		yes									
test conditions:		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry									
only white fields to be filled in																									
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions										rupture		strength related to t_{max} S/MPa	strength related to t_{max} V/%	strength related to t_{max} σ_r /MPa	strength related to t_{max} $\sigma_{r,max}$ /MPa	remarks	specimen photo attached?	attachments			
				measure d thickness	nominal thickness	specime width	specime length	grip length	free length	max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load	rupture	rupture										
				t_{max}	t_{nom}	W_{max}	l	g	f	F	N	n	F	N	F	N	σ_r	$\sigma_{r,max}$	σ_r	$\sigma_{r,max}$					
textile batch X	1	RTM 001002C-016	11. Jul	0	4,25	4,09	32,12	150	60	32,75	-64859,8	50	4590	-58513	-418,9	-444,9	n = 1	-444,9	-444,9	-444,9	-444,9				
	2	RTM 001002C-017	11. Jul	0	4,28	4,09	32,10	150	60	32,65	-64859,8	40	24480	-58513	-418,9	-444,9	n = 1	-444,9	-444,9	-444,9	-444,9				
	3	RTM 001002C-018	12. Jul	0	4,35	4,09	32,15	150	60	32,6	-64859,8	30	220000	-58513	-418,9	-444,9	n = 1	-444,9	-444,9	-444,9	-444,9				
	4																								
	5																								
	6																								
	7																								
	8																								

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric+45° HTS										Open Hole Compression													
Prepreg/fabric/CF full designation: (including exact FAW, construction, ...)		Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 [PES, 74dtex] Saertex Wapener GmbH + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 [PES, 74dtex] Saertex Wapener GmbH										nominal fibre volume content: 60,0%													
laminare mass ratio:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:		fibre:			
detailed stacking seq.:		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6		RTM6			
appling:		as received		as received		as received		as received		as received		as received		as received		as received		as received		as received		as received			
fatigue:		yes		yes		yes		yes		yes		yes		yes		yes		yes		yes		yes			
test conditions:		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry		23°C, dry			
only white fields to be filled in																									
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions										rupture		strength related to t_{max} S/MPa	strength related to t_{max} V/%	strength related to t_{max} σ_r /MPa	strength related to t_{max} $\sigma_{r,max}$ /MPa	remarks	specimen photo attached?	attachments			
				measure d thickness	nominal thickness	specime width	specime length	grip length	free length	max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load	rupture	rupture										
				t_{max}	t_{nom}	W_{max}	l	g	f	F	N	n	F	N	F	N	σ_r	$\sigma_{r,max}$	σ_r	$\sigma_{r,max}$					
textile batch X	1	RTM 001002C-007	03. Jul	0	3,91	4,08	32,18	150	60	32,54	-37243	50	25311	-39483	-314,2	-300,3	n = 2	-300,3	-300,3	-300,3	-300,3				
	2	RTM 001002C-008	04. Jul	0	3,91	4,08	32,14	150	60	32,54	-37243	40	220000	-39483	-314,2	-300,3	n = 2	-300,3	-300,3	-300,3	-300,3				
	3	RTM 001002C-009	05. Jul	0	3,93	4,08	32,08	150	60	32,44	-37243	50	15191	-39483	-314,2	-300,3	n = 2	-300,3	-300,3	-300,3	-300,3				
	4	RTM 001002C-010	05. Jul	0	3,92	4,08	32,00	150	60	32,50	-37243	60	5065	-39483	-314,2	-300,3	n = 2	-300,3	-300,3	-300,3	-300,3				
	5	RTM 001002C-011	12. Jul	0	3,94	4,08	32,18	150	60	32,35	-37243	60	4081	-39483	-314,2	-300,3	n = 2	-300,3	-300,3	-300,3	-300,3				
	6	RTM 001002C-012	13. Jul	0	3,99	4,08	31,99	150	60	32,40	-37243	40	220000	-39483	-314,2	-300,3	n = 2	-300,3	-300,3	-300,3	-300,3				
	7																								
	8																								

A.40: RTM6 HTS QI Plain Compression/ Open Hole Compression.

7.2.3 001003 – RTM6 HTS Biaxial

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric+45° HTS		nominal fibre volume content:		60,0%																			
Prepreg/fabric/NCF full designation:		Saertex S32CX00K0534-01270-264000 [PES 74dteX] [Saertex Wägener GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K0535-01270-264000 [PES 74dteX] [Saertex Wägener GmbH]		fibre/textile batches:		textile batch: S1176/09																			
(including exact FAW, construction, ...)		TENAX HTS 6631 12K		resin batches:		M528704-1																			
fibre:		RTM6		fastener, washer, nut, collar reference:		n.a.																			
resin:				attachments		(cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)																			
laminate mass ratio:		500/50		specimen dimensions																					
detailed stacking seq.:		(0/90/0/90/0/0/0/90)2		length		l																			
aging:		as received		width		b																			
fatigue:		yes		thickness		t																			
test conditions:		23°C, dry		specimen width		w																			
only white fields to be filled in				V _{max}		mm																			
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	off-axis	measure d thickness	nominal thickness	specime thickness	specime width	specime length	grp length	tree length	max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load	strength related to load			strength related to load	remarks	specimen photo attached?	attachments			
																σ _{max} /MPa	σ _r /MPa	ε _{max} /mm					σ _r /MPa	ε _r /mm	σ _r /MPa
textile batch X	1	RTM001003B-007	05. Sept.	0	4,35	4,09	32,05	150	60	32,42	133735	50	108												
	2	RTM001003B-008	05. Sept.	0	4,41	4,09	32,05	150	60	32,45	133735	40	608												
	3	RTM001003B-009	05. Sept.	0	4,31	4,09	32,05	150	60	32,26	133735	30	92081												
	4																								
	5																								
	6																								
	7																								
	8																								

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric+45° HTS		nominal fibre volume content:		60,0%																				
Prepreg/fabric/NCF full designation:		Saertex S32CX00K0534-01270-264000 [PES 74dteX] [Saertex Wägener GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K0535-01270-264000 [PES 74dteX] [Saertex Wägener GmbH]		fibre/textile batches:		textile batch: S1176/09																				
(including exact FAW, construction, ...)		TENAX HTS 6631 12K		resin batches:		M607539-1																				
fibre:		RTM6		fastener, washer, nut, collar reference:		n.a.																				
resin:				attachments		(cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)																				
laminate mass ratio:		500/50		specimen dimensions																						
detailed stacking seq.:		(0/90/0/90/0/0/0/90)2		length		l																				
aging:		as received		width		b																				
fatigue:		yes		thickness		t																				
test conditions:		23°C, dry		specimen width		w																				
only white fields to be filled in				V _{max}		mm																				
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	off-axis	measure d thickness	nominal thickness	specime thickness	specime width	specime length	grp length	tree length	max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load	strength related to load			strength related to load	remarks	specimen photo attached?	attachments				
																σ _{max} /MPa	σ _r /MPa	ε _{max} /mm					σ _r /MPa	ε _r /mm	σ _r /MPa	ε _r /mm
textile batch X	1	RTM001003C-007	03. Aug.	0	4,23	4,09	32,08	150	60	32,27	73422	50	1021													
	2	RTM001003C-008	03. Aug.	0	4,33	4,09	32,05	150	60	32,32	73422	40	15295													
	3	RTM001003C-009	04. Aug.	0	4,25	4,09	32,23	150	60	32,52	73422	30	220000	71081	519,0											
	4																									
	5																									
	6																									
	7																									
	8																									

A.41: RTM6 HTS Biax Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric+45° HTS										Plane Compression									
Prepreg/fabric/NCF full designation: (including exact FAWI, construction, ...)		Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 IPES,74dtex Saertex Waegener GmbH + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 IPES,74dtex Saertex Waegener GmbH										nominal fibre volume content: 60,0%									
fibre: binder: resin:		TEINAX HTS 5631 12K RTM6										fibre/textile batches textile batch: S1176 binder batches: M528704-1 resin batches: n.a. fastener, washer, nut: collar reference: attachments (cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)									
laminare mass ratio:		50/0/50										test place: date of test: operator:									
detailed stacking seq.:		as received										test standard: sheet reference: compiled by: date:									
fatigue:		yes										Valid failure? (needs to be activated for statistics)									
test conditions:		23°C, dry										remarks									
only white fields to be filled in												specimen photo attached?									
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	measure d thickness	specimen dimensions										rupture residual load	strength related to t_{nom} S/MPa v/%	strength related to t_{max} S/MPa v/%	remarks	specimen photo attached?		
					t_{max} mm	t_{nom} mm	t_{min} mm	width mm	specime n length mm	grip length mm	free length mm	max. static load F N	% of max. load %	number of cycles n						residual load F N	σ_{max} MPa
textile batch X	1	RTM001003B-008	10. Aug.	4.33	4.09	32.02	150	60	32,465	-78770	50	58930									
	2	RTM001003B-009	11. Aug.	4.34	4.09	32.02	150	60	32,465	-78770	40	220000									
	3	RTM001003B-010	11. Aug.	4.32	4.09	32.00	150	60	32,475	-78770	60	529									
	4																				
	5																				
	6																				
	7																				
	8																				

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric+45° HTS										Open Hole Compression									
Prepreg/fabric/NCF full designation: (including exact FAWI, construction, ...)		Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 IPES,74dtex Saertex Waegener GmbH + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 IPES,74dtex Saertex Waegener GmbH										nominal fibre volume content: 60,0%									
fibre: binder: resin:		TEINAX HTS 5631 12K RTM6										fibre/textile batches textile batch: S1176/09 binder batches: M607539-1 resin batches: n.a. fastener, washer, nut: collar reference: attachments (cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)									
laminare mass ratio:		50/0/50										test place: date of test: operator:									
detailed stacking seq.:		as received										test standard: sheet reference: compiled by: date:									
fatigue:		yes										Valid failure? (needs to be activated for statistics)									
test conditions:		23°C, dry										remarks									
only white fields to be filled in												specimen photo attached?									
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	measure d thickness	specimen dimensions										rupture residual load	strength related to t_{nom} S/MPa v/%	strength related to t_{max} S/MPa v/%	remarks	specimen photo attached?		
					t_{max} mm	t_{nom} mm	t_{min} mm	width mm	specime n length mm	grip length mm	free length mm	max. static load F N	% of max. load %	number of cycles n						residual load F N	σ_{max} MPa
textile batch X	1	RTM001003D-007	19. Juli	4.13	4.09	32.26	150	60	35,00	-45163	50	220000									
	2	RTM001003D-008	19. Juli	4.16	4.09	32.27	150	60	34,15	-45163	60	30764									
	3	RTM001003D-009	20. Juli	4.17	4.09	32.58	150	60	34,30	-45163	40	220000									
	4																				
	5																				
	6																				
	7																				
	8																				

A.42: RTM6 HTS Biax Plain Compression/ Open Hole Compression.

7.2.4 002002 – EPS601 HTS Quasi-isotrop

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric+46° HTS															
Prepriefabric/CF full designation: (including exact FAW, construction, ...)		Saertex: S32CX00K-0634-01270-264000 IPES, 74dtxx Saertex: Waegener GmbH + symmetric counter-textile S32CX00K-0635-01270-264000 IPES, 74dtxx Saertex: Waegener GmbH															
nominal fibre volume content:		60,0%															
Short Plane Tensile		Short Plane Tensile															
test place: date of test: operator:		Polymer: Competence Center Leoben 26. Sept 06 Kitzmüller Wolfgang															
test standard:		AITM 1.0007															
sheet reference: compiled by: date:		Kitzmüller Wolfgang 26. Okt 06															
© Airbus Deutschland GmbH 2006		© Airbus Deutschland GmbH 2006															
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	off-axis α deg	specimen dimensions				rupture				remarks	specimen photo attached?	attachments		
					measure d	s	width	length	grip length	free length	max. static load	% of max. load				number of cycles	residual load
					t _{max} mm	t _{nom} mm	V _{max} mm	l mm	g mm	f mm	F N	N %	n	F N	σ _r /MPa	σ _r /MPa	
textile batch X	1	EPS601-002002C-007	25. Sept	0	3,98	4,09	31,80	150	60	32,24	89258,67	50	108				
	2	EPS601-002002C-008	25. Sept	0	3,95	4,09	31,76	150	60	32,37	89258,67	40	1340				
	3	EPS601-002002C-009	25. Sept	0	3,92	4,09	31,72	150	60	32,48	89258,67	30	7101				
	4																
	5																
	6																
	7																
	8																

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric+46° HTS															
Prepriefabric/CF full designation: (including exact FAW, construction, ...)		Saertex: S32CX00K-0634-01270-264000 IPES, 74dtxx Saertex: Waegener GmbH + symmetric counter-textile S32CX00K-0635-01270-264000 IPES, 74dtxx Saertex: Waegener GmbH															
nominal fibre volume content:		60,0%															
Short Open Hole Tensile		Short Open Hole Tensile															
test place: date of test: operator:		Polymer: Competence Center Leoben 19. Sept 06 Kitzmüller Wolfgang															
test standard:		AITM 1.0007															
sheet reference: compiled by: date:		Kitzmüller Wolfgang 26. Okt 06															
© Airbus Deutschland GmbH 2006		© Airbus Deutschland GmbH 2006															
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	off-axis α deg	specimen dimensions				rupture				remarks	specimen photo attached?	attachments		
					measure d	s	width	length	grip length	free length	max. static load	% of max. load				number of cycles	residual load
					t _{max} mm	t _{nom} mm	V _{max} mm	l mm	g mm	f mm	F N	N %	n	F N	σ _r /MPa	σ _r /MPa	
textile batch X	1	EPS601-002002C-012	19. Sept	0	3,97	4,09	31,91	150	60	32,21	56510,33	50	182				
	2	EPS601-002002C-013	19. Sept	0	3,94	4,09	31,90	150	60	32,16	56510,33	40	1816				
	3	EPS601-002002C-014	19. Sept	0	3,94	4,09	31,92	150	60	32,2	56510,33	30	81248				
	4																
	5																
	6																
	7																
	8																

A.43: EPS601 HTS QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.

material short name: Bidiagonal-Carbon-Fabric-45° HTS																									
Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 IPES,74dteX Saertex Wägener,GrnbH + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 IPES,74dteX Saertex Wägener,GrnbH TENAX HTS 5631 12K																									
nominal fibre volume content: 60,0%																									
fibre/textile batches: k. A. in LDS binder batches: 2011633101 resin batches: n.a. fastener, washer, nut, collar reference: n.a. attachments (cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)																									
test place: Polymere Competence Center Leoben date of test: 25. Aug 06 operator: Kitzmüller-Wolfgang test standard: AITM 1.0008 sheet reference: Kitzmüller-Wolfgang compiled by: 26. Okt.06 date: ©Airbus Deutschland GmbH 2006																									
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	off-axis		specimen dimensions						rupture				strength related to σ_{max} MPa	strength related to σ_{min} MPa	strength related to σ_{max} v/%	strength related to σ_{min} v/%	remarks	specimen photo attached?	attachments			
				α deg.	β deg.	measure d	nominal thickness	specimen width	specimen length	grip length	tree length	max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load								F	N	F
textile batch X	1	EPS801-002002C-007	20. Sept	0	0	3,95	4,09	37,89	150	60	32,22	-59128,67	50	3640	-	-	-	-							
	2	EPS801-002002C-008	20. Sept	0	0	3,91	4,09	31,88	150	60	32,165	-59128,67	40	27556	-	-	-	-							
	3	EPS801-002002C-009	20. Sept	0	0	3,90	4,09	31,88	150	60	32,19	-59128,67	30	220000	-40948	-329,3	n = 1	-314,0	n = 1						
	4																								
	5																								
	6																								
	7																								
	8																								

material short name: Bidiagonal-Carbon-Fabric-45° HTS																										
Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 IPES,74dteX Saertex Wägener,GrnbH + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 IPES,74dteX Saertex Wägener,GrnbH TENAX HTS 5631 12K																										
nominal fibre volume content: 60,0%																										
fibre/textile batches: k. A. in LDS binder batches: 2011633101 fastener, washer, nut, collar reference: n.a. attachments (cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)																										
test place: Polymere Competence Center Leoben date of test: 28.-30. August 2006 operator: Kitzmüller-Wolfgang test standard: AITM 1.0008 sheet reference: Kitzmüller-Wolfgang compiled by: 27. Aug 06 date: ©Airbus Deutschland GmbH 2006																										
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	off-axis		specimen dimensions						rupture				strength related to σ_{max} MPa	strength related to σ_{min} MPa	strength related to σ_{max} v/%	strength related to σ_{min} v/%	remarks	specimen photo attached?	attachments				
				α deg.	β deg.	measure d	nominal thickness	specimen width	specimen length	grip length	tree length	max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load								F	N	F	N
textile batch X	1	EPS801-002002D-007	18. Sept	0	0	3,89	4,09	31,89	150	60	32,19	-31501,5	50	110767	-	-	-	-								
	2	EPS801-002002D-008	15. Sept	0	0	3,86	4,09	32,00	150	60	32,07	-31501,5	40	220000	-26028	-205,4	n = 1	-198,8	n = 1							
	3	EPS801-002002D-009	18. Sept	0	0	3,92	4,09	32,06	150	60	32,15	-31501,5	30	9338	-	-	-	-								
	4																									
	5																									
	6																									
	7																									
	8																									

A.44: EPS601 HTS QI Plain Compression/ Open Hole Compression.

7.2.5 003002 – EPS600 HTS Quasi-isotrop

material short name: Bidiagonal-Carbon-Fabric/45° HTS		nominal fibre volume content: 60,0%		Short Plane Tensile																		
Prepreg/impregnated full designation: (including exact FAW, construction, ...)		Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 IPES, 74dtext Saertex Waepener GmbH + symmetric counter-tekile S32CX00K-0535-01270-264000 IPES, 74dtext Saertex Waepener GmbH TENAX HTS 5631 12K		test place: date of test: operator: Polymere Competence Center Leoben 04. Okt 06 Kitzmüller/Wolfgang																		
fibre: binder: resin:		fibre/tekile batches: resin batches: fastener, washer, nut, collar reference: attachments (cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)		test standard: sheet reference: compiled by: date: AITM 1.0007 Kitzmüller/Wolfgang 30. Okt 06																		
laminare mass ratio: 25/50/25 (Q)		EPS600		© Airbus Deutschland GmbH 2006																		
detailed stacking seq.: (45/135/0/90/45/135/0/90)2																						
as received																						
fatigue: yes																						
best conditions: 23°C, dry																						
only white fields to be filled in																						
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions						max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load	rupture			strength related to L _{max}	strength related to L _{max}	remarks	specimen photo attached?	attachments	
				measure d thickness	nominal thickness	specimen width	specimen length	grip length	tree length					F	N	%						F
X	1	EPS600-003002a8-007 11_Okt		3,80	4,09	31,96	150	60	32,33	85149,50	50	130										
	2	EPS600-003002a8-008 11_Okt		3,82	4,09	32,02	150	60	32,31	85149,50	40	1654										
	3	EPS600-003002a8-009 11_Okt		3,80	4,09	32,39	150	60	32,36	85149,50	30	16259										
	4																					
	5																					
	6																					
	7																					
	8																					
		textile batch X																				

material short name: Bidiagonal-Carbon-Fabric/45° HTS		nominal fibre volume content: 60,0%		Short Open Hole Tensile																			
Prepreg/impregnated full designation: (including exact FAW, construction, ...)		Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 IPES, 74dtext Saertex Waepener GmbH + symmetric counter-tekile S32CX00K-0535-01270-264000 IPES, 74dtext Saertex Waepener GmbH TENAX HTS 5631 12K		test place: date of test: operator: Polymere Competence Center Leoben 04. Okt 06 Kitzmüller/Wolfgang																			
fibre: binder: resin:		fibre/tekile batches: resin batches: fastener, washer, nut, collar reference: attachments (cure cycles, NDT maps, micrographs, photos, ...)		test standard: sheet reference: compiled by: date: AITM 1.0007 Kitzmüller/Wolfgang 30. Okt 06																			
laminare mass ratio: 25/50/25 (Q)		EPS600		© Airbus Deutschland GmbH 2006																			
detailed stacking seq.: (45/135/0/90/45/135/0/90)2																							
as received																							
fatigue: yes																							
best conditions: 23°C, dry																							
only white fields to be filled in																							
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions						max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load	rupture			strength related to L _{max}	strength related to L _{max}	remarks	specimen photo attached?	attachments		
				measure d thickness	nominal thickness	specimen width	specimen length	grip length	tree length					F	N	%						F	N
X	1	EPS600-003002a8-008 04_Okt		3,78	4,09	32,30	150	60	32,425	57303,17	50	130											
	2	EPS600-003002a8-009 04_Okt		3,79	4,09	32,05	150	60	32,44	57303,17	40	2022											
	3	EPS600-003002a8-010 04_Okt		3,80	4,09	31,87	150	60	32,19	57303,17	30	52751											
	4																						
	5																						
	6																						
	7																						
	8																						
		textile batch X																					

A.45: EPS600 HTS QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.

7.2.6001002 – Cycom 977-2 HTS Quasi-isotrop

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric-45° HTS																	
Prepreg/impregnation/CF full designation:		Saertex S32CX00K-0594-01270-264000 [PES,74dtx] [Saertex Wäger GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 [PES,74dtx] TENAX HTS 5631 12K																	
(including exact FAW, construction, ...)		Saertex S32CX00K-0594-01270-264000 [PES,74dtx] [Saertex Wäger GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 [PES,74dtx] TENAX HTS 5631 12K																	
fibre:		k.a. in LDS																	
binder:		resin batches: 870200333																	
resin:		n.a.																	
laminare mass ratio:		977-2 film																	
detailed stacking seq.:		(45/135/0/90/45/135/0/90/2)																	
aging:		as received																	
fatigue:		none																	
test conditions:		23°C, dry																	
only white fields to be filled in																			
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions				rupture				strength related to t_{max} MPa	strength related to t_{max} %	remarks	specimen photo attached?	attachments			
				measured thickness	nominal thickness	specimen width	specimen length	grip length	free length	max. static load	% of max. load						number of cycles	residual load	rupture
textile batch X	1	977-2-001002A-007	19. Okt	0	3,77	4,09	31,79	150	60	32,16	82337,3	50	468						
	2	977-2-001002A-008	19. Okt	0	3,78	4,09	31,82	150	60	32,19	82337,3	40	1059						
	3	977-2-001002A-009	19. Okt	0	3,80	4,09	31,79	150	60	32,14	82337,3	30	6486						
	4																		
	5																		
	6																		
	7																		
	8																		

material short name:		Bidiagonal-Carbon-Fabric-45° HTS																	
Prepreg/impregnation/CF full designation:		Saertex S32CX00K-0594-01270-264000 [PES,74dtx] [Saertex Wäger GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 [PES,74dtx] TENAX HTS 5631 12K																	
(including exact FAW, construction, ...)		Saertex S32CX00K-0594-01270-264000 [PES,74dtx] [Saertex Wäger GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 [PES,74dtx] TENAX HTS 5631 12K																	
fibre:		k.a. in LDS																	
binder:		resin batches: 870200333																	
resin:		n.a.																	
laminare mass ratio:		977-2 film																	
detailed stacking seq.:		(45/135/0/90/45/135/0/90/2)																	
aging:		as received																	
fatigue:		none																	
test conditions:		23°C, dry																	
only white fields to be filled in																			
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	specimen dimensions				rupture				strength related to t_{max} MPa	strength related to t_{max} %	remarks	specimen photo attached?	attachments			
				measured thickness	nominal thickness	specimen width	specimen length	grip length	free length	max. static load	% of max. load						number of cycles	residual load	rupture
textile batch X	1	977-2-001002B-007	16. Okt	0	3,77	4,09	32,12	150	60	32,295	52489,50	50	1509						
	2	977-2-001002B-008	16. Okt	0	3,78	4,09	32,10	150	60	32,28	52489,50	40	25388						
	3	977-2-001002B-009	17. Okt	0	3,78	4,09	32,10	150	60	32,245	52489,50	50	866						
	4	977-2-001002B-010	18. Okt	0	3,70	4,09	32,07	150	60	32,42	52489,50	30	220000						
	5																		
	6																		
	7																		
	8																		

A.47: 977-2 HTS QI Short Plain Tensile/ Short Open Hole Tensile.

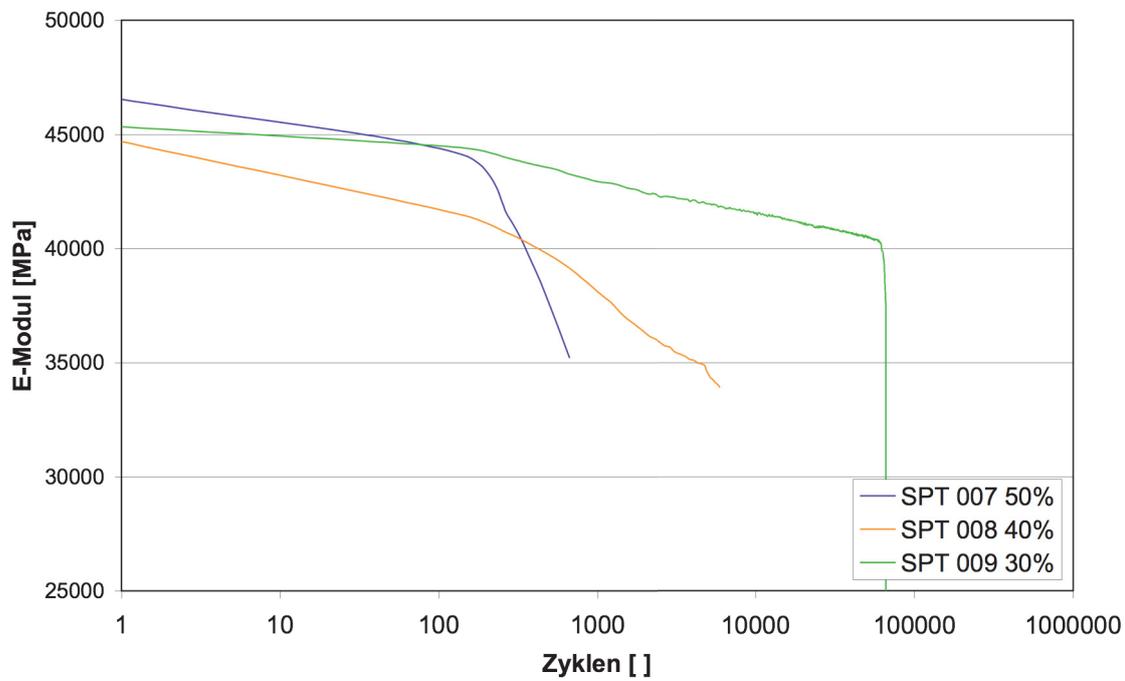
material short name: Bidiagonal-Carbon-Fabric+I45° HTS																					
Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 [PES,74dtx] [Saertex Wägener GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 [PES,74dtx] [Saertex Wägener GmbH] (including exact FAW, const) TENAX HTS 5631 12K																					
nominal fibre volume content: 57,0%																					
Plane Compression																					
test place: Polymer Competence Center Leoben date of test: 18./19. Oktober 2006 operator: Kitzmüller Wolfgang																					
test standard: ASTM 1.0008 sheet reference: Kitzmüller Wolfgang compiled by: 31. Okt.06 date: © Airbus Deutschland GmbH 2006																					
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	off-axis	specimen dimensions						rupture				remarks	specimen photo attached?	attachments				
					measured thickness	nominal thickness	specimen width	specimen length	grip length	free length	max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load				strength related to t_{max}	strength related to t_{nom}		
				deg.	t_{max} mm	t_{nom} mm	W_{spec} mm	l_{spec} mm	g mm	f mm	F	N	%	n	F	N	MPa	MPa	MPa	MPa	
textile batch X	1	977-2-001002B-007	18. Okt	0	4,04	4,09	32,06	150	60	31,955	-64803,00	40	66841	40	57556	-440,1	-440,1	440,5	440,1	440,1	440,1
	2	977-2-001002B-008	18. Okt	0	4,05	4,09	31,98	150	60	31,85	-64803,00	30	220000	30	57556	-444,5	-444,5	444,5	444,5	444,5	444,5
	3	977-2-001002B-009	19. Okt	0	4,03	4,09	31,96	150	60	31,92	-64803,00	50	4753	50							
	4																				
	5																				
	6																				
7																					
8																					

material short name: Bidiagonal-Carbon-Fabric+I45° HTS																					
Saertex S32CX00K-0534-01270-264000 [PES,74dtx] [Saertex Wägener GmbH] + symmetric counter-textile S32CX00K-0535-01270-264000 [PES,74dtx] [Saertex Wägener GmbH] (including exact FAW, const) TENAX HTS 5631 12K																					
nominal fibre volume content: 80,2%																					
Open Hole Compression																					
test place: Polymer Competence Center Leoben date of test: 5./6. Oktober 2006 operator: Kitzmüller Wolfgang																					
test standard: ASTM 1.0008 sheet reference: Kitzmüller Wolfgang compiled by: 31. Okt.06 date: © Airbus Deutschland GmbH 2006																					
batch ID	# of specimens	individual specimen name	test date	off-axis	specimen dimensions						rupture				remarks	specimen photo attached?	attachments				
					measured thickness	nominal thickness	specimen width	specimen length	grip length	free length	max. static load	% of max. load	number of cycles	residual load				strength related to t_{max}	strength related to t_{nom}		
				deg.	t_{max} mm	t_{nom} mm	W_{spec} mm	l_{spec} mm	g mm	f mm	F	N	%	n	F	N	MPa	MPa	MPa	MPa	
textile batch X	1	977-2-001002B-007	05. Okt	0	3,79	4,08	31,98	150	60	32,48	-34750	50	220000	50	-30764	-254,2	-254,2	254,2	254,2	254,2	254,2
	2	977-2-001002B-008	06. Okt	0	3,79	4,09	31,98	150	60	32,37	-34750	60	17872	60							
	3	977-2-001002B-009	06. Okt	0	3,81	4,09	31,92	150	60	32,37	-34750	40	220000	40	-32001	-263,5	-263,5	263,5	263,5	263,5	263,5
	4																				
	5																				
	6																				
7																					
8																					

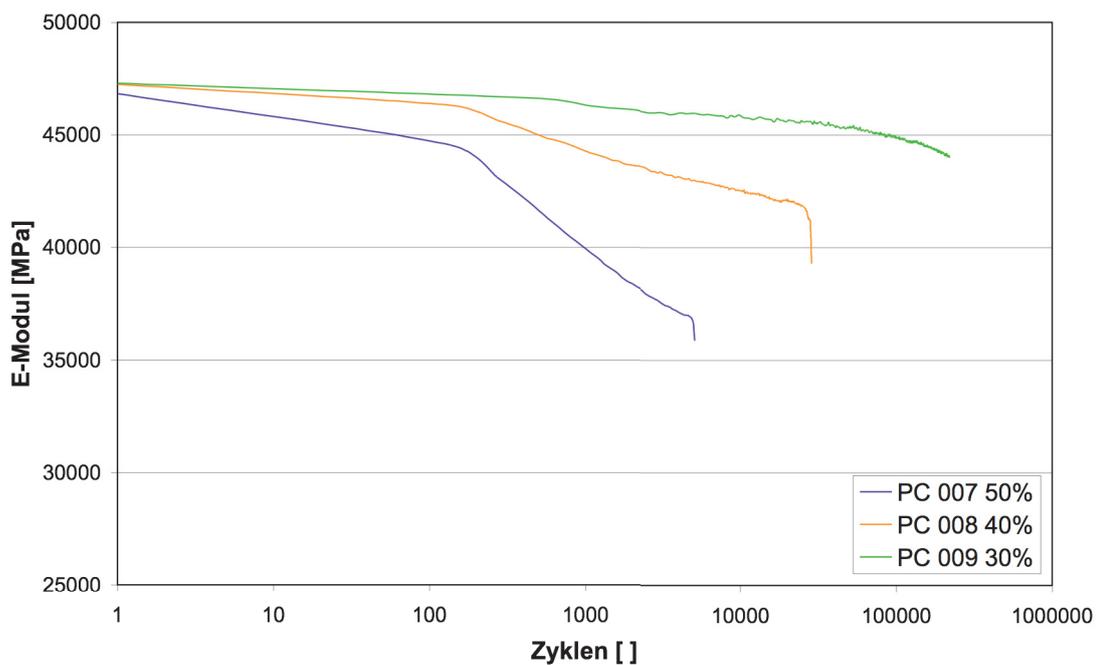
A.48: 977-2 HTS QI Plain Compression/ Open Hole Compression.

7.3 Dynamische Versuche - Einzelergebnisse

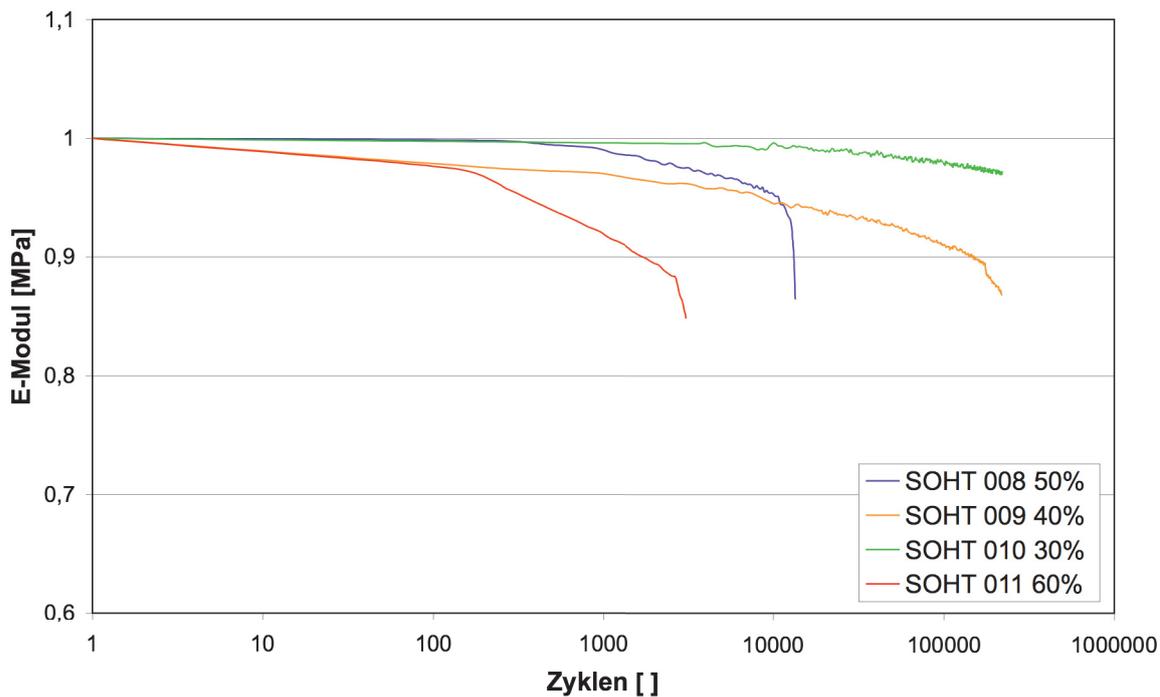
7.3.1 001001 – RTM6 HTA Quasi-isotrop



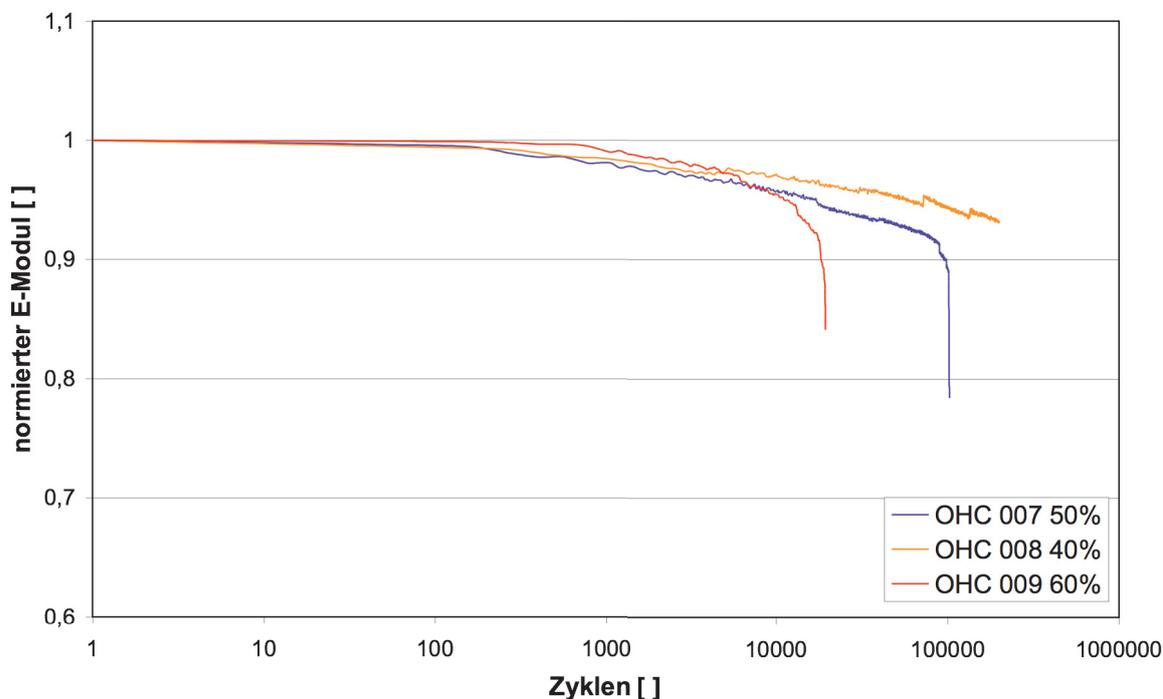
A.49: RTM6 HTA QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.



A.50: RTM6 HTA QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.

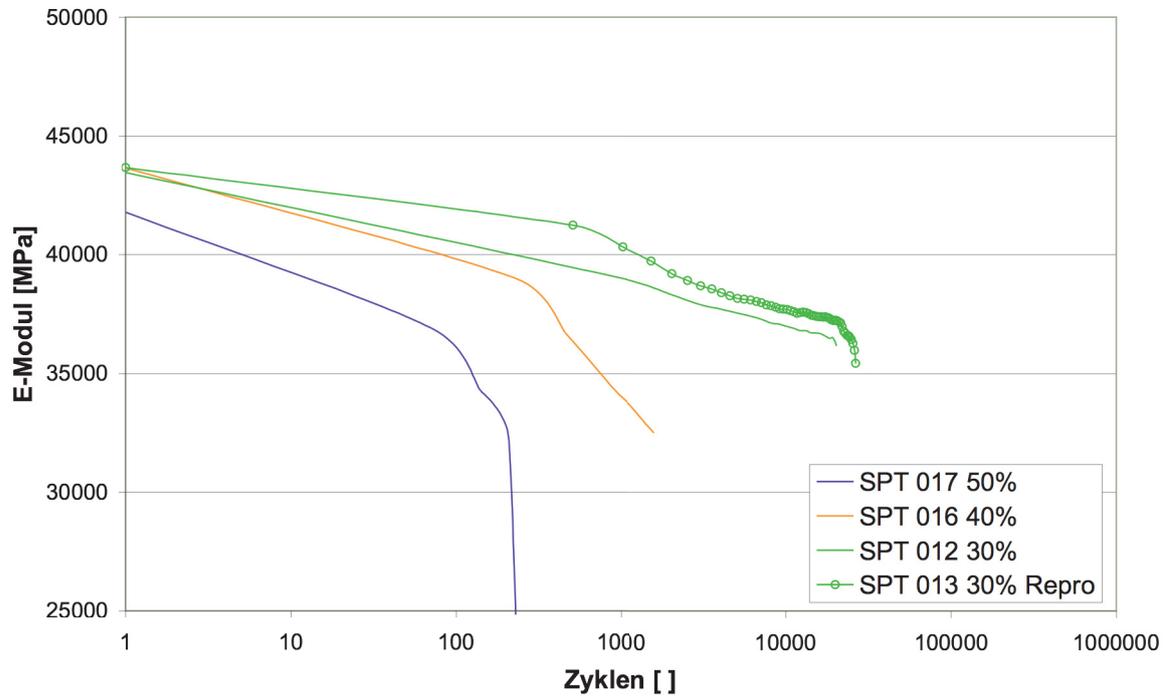


A.51: RTM6 HTA QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.

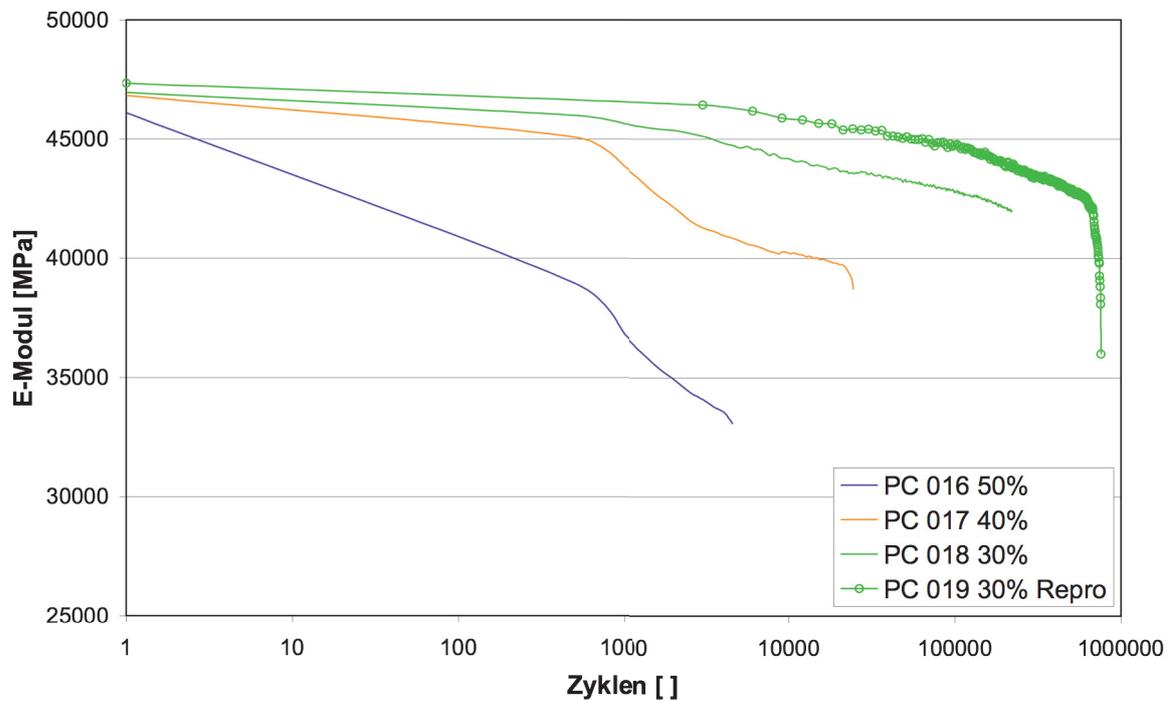


A.52: RTM6 HTA QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.

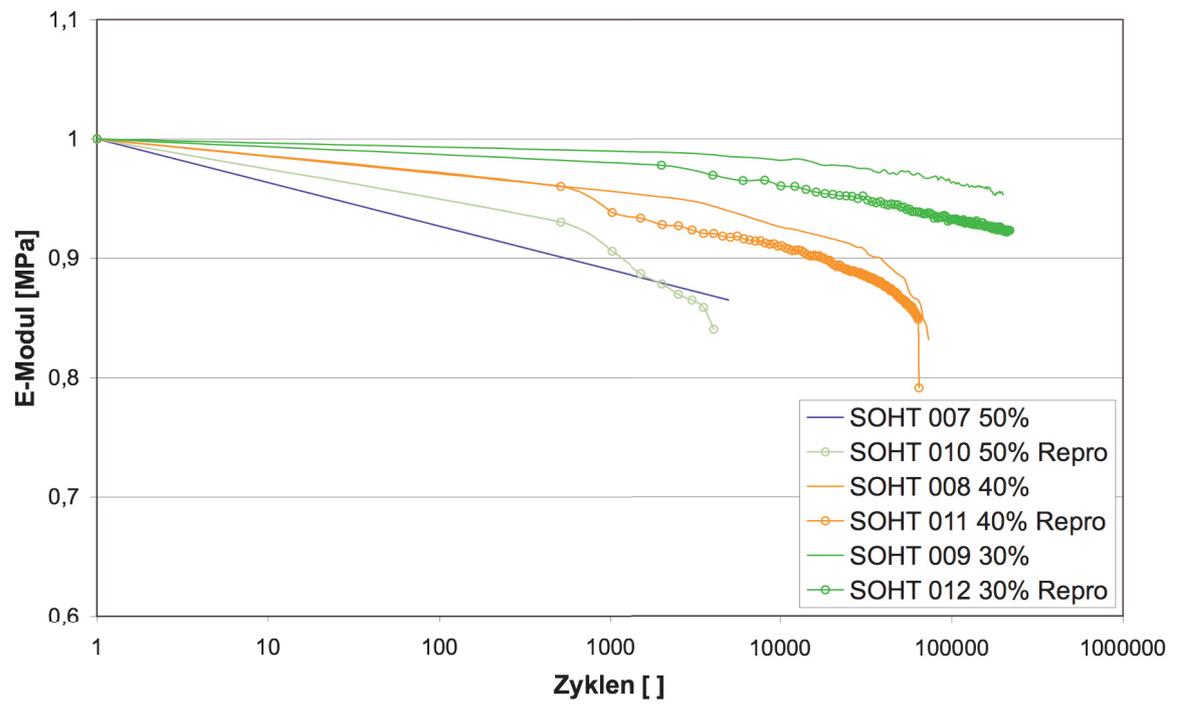
7.3.2001002 – RTM6 HTS Quasi-isotrop



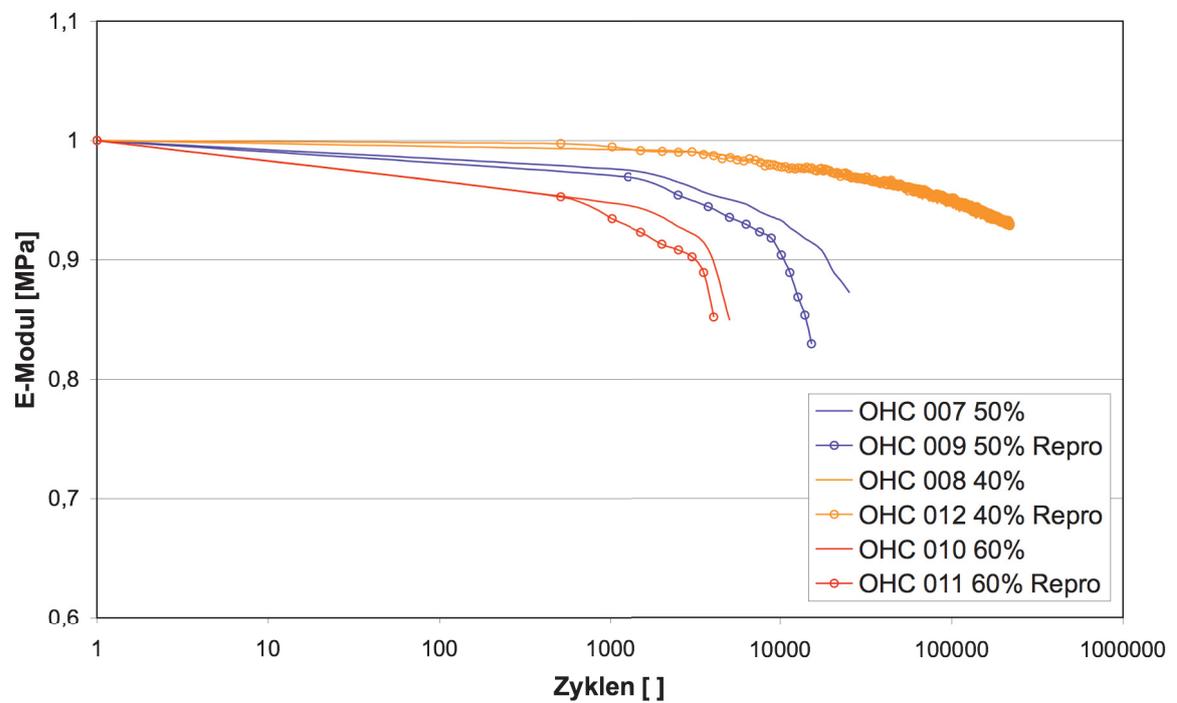
A.53: RTM6 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.



A.54: RTM6 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.

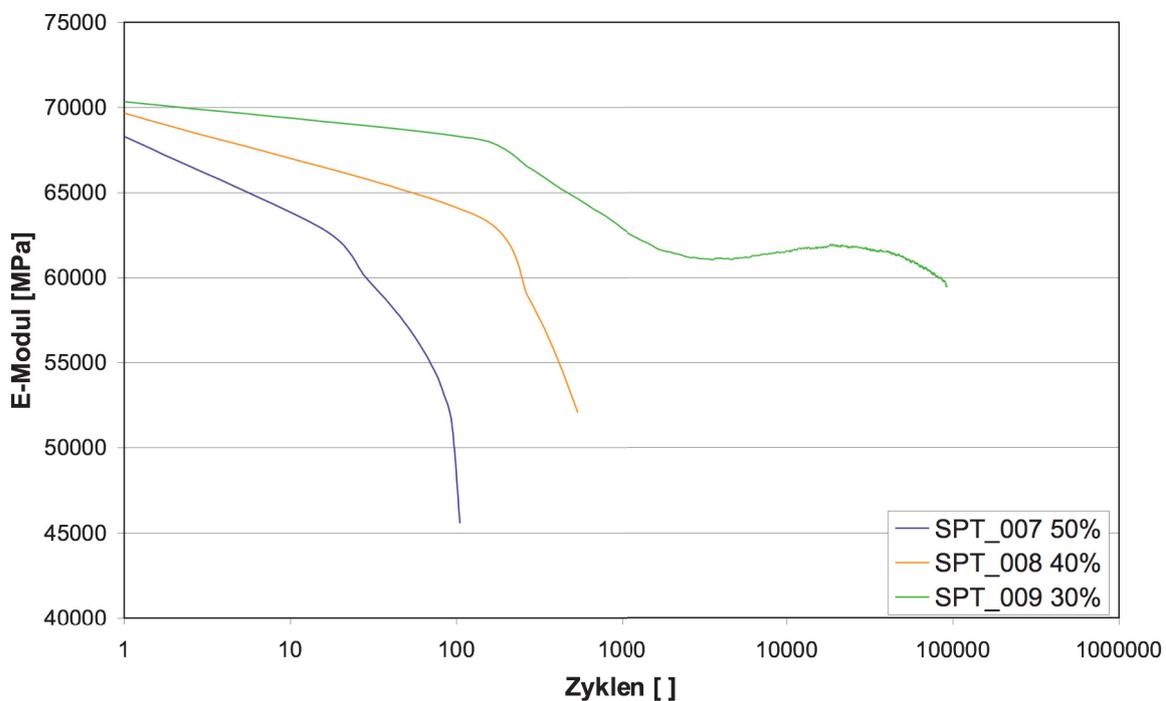


A.55: RTM6 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.

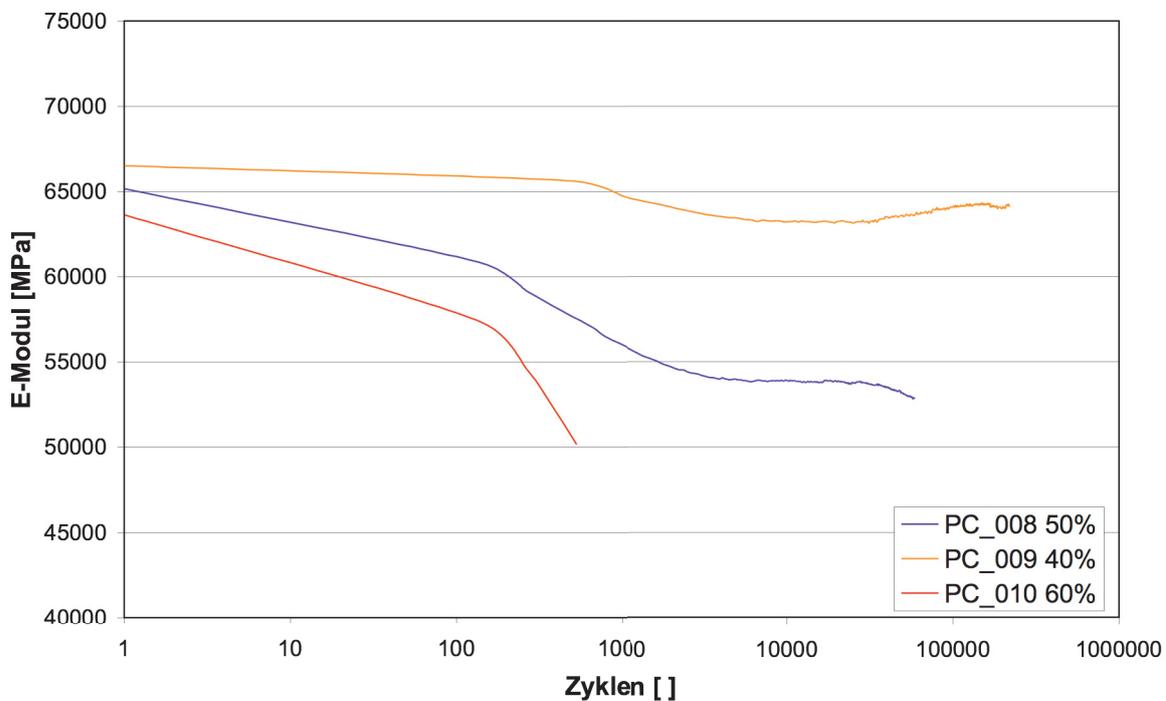


A.56: RTM6 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.

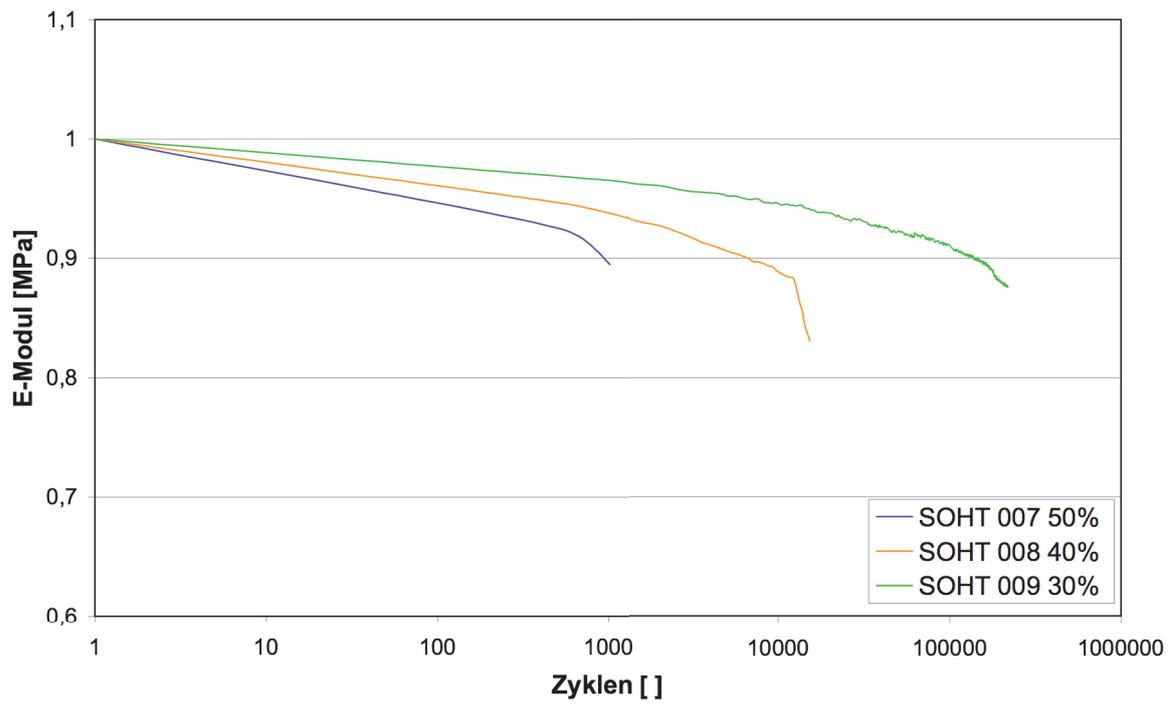
7.3.3 001003 – RTM6 HTS Biaxial (0°/90°)



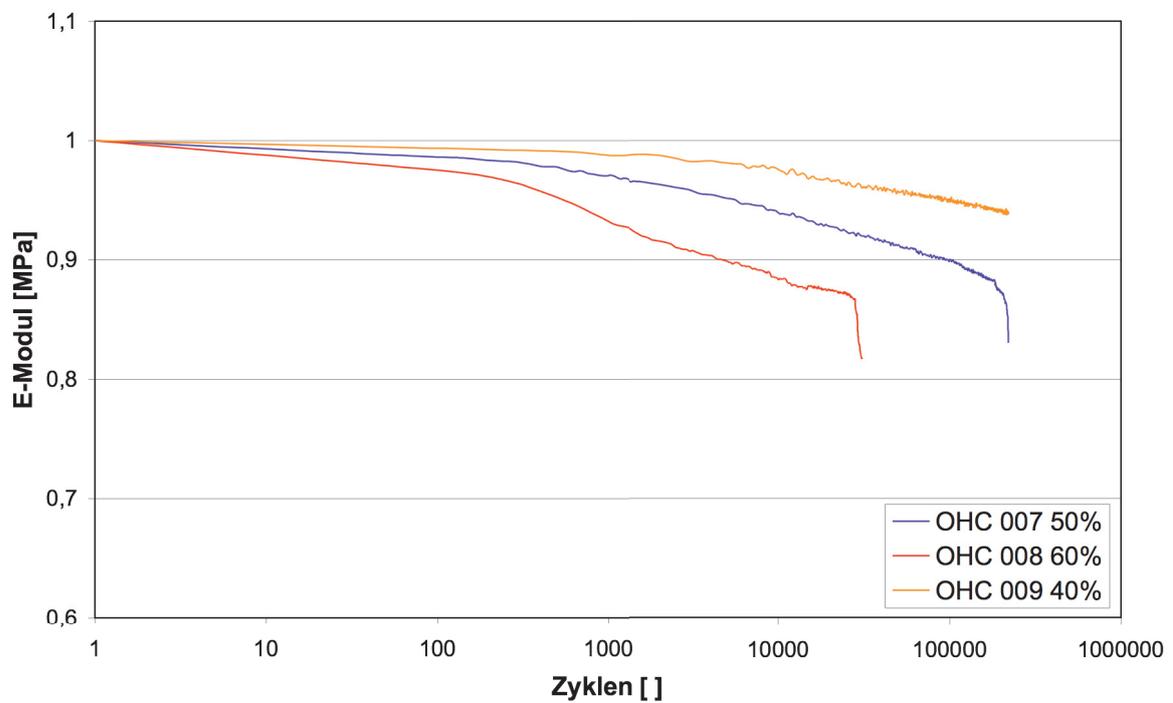
A.57: RTM6 HTS biax - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.



A.58: RTM6 HTS biax - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.

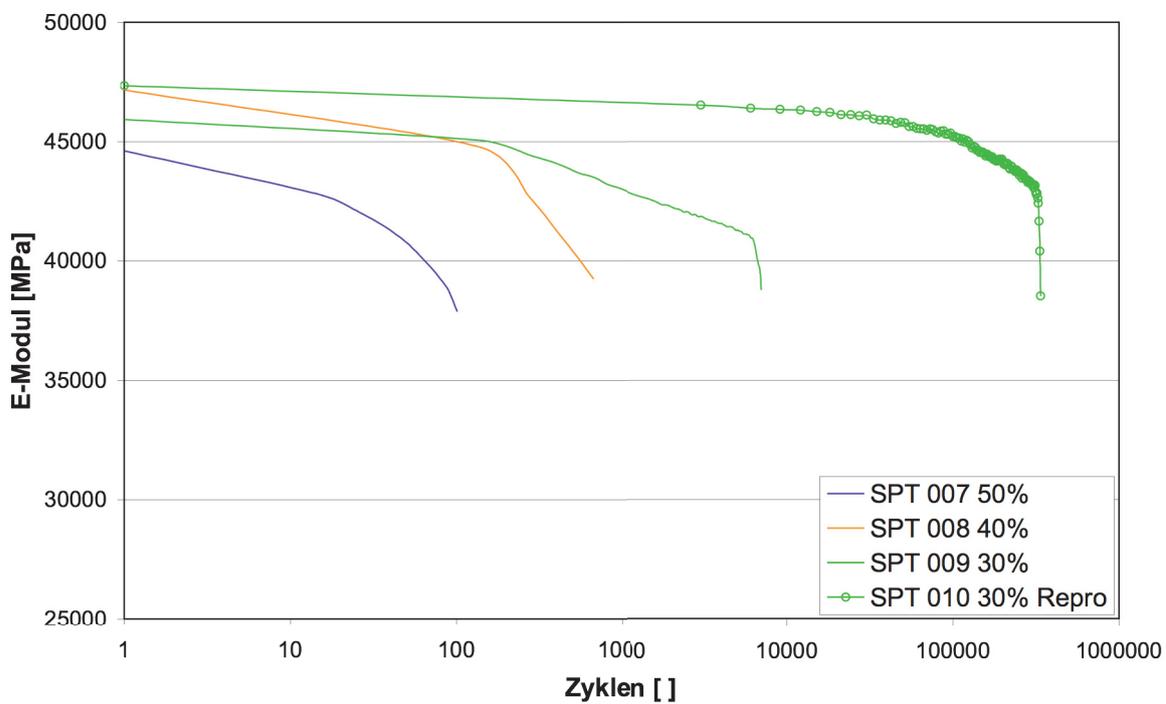


A.59: RTM6 HTS biax - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.

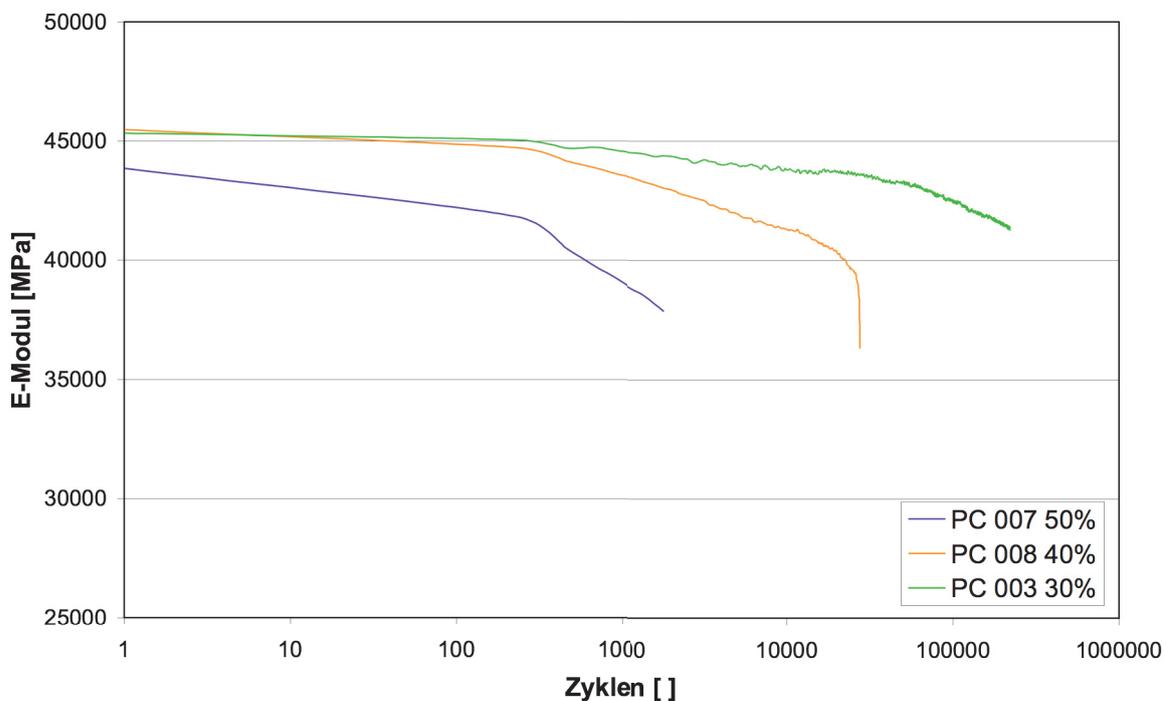


A.60: RTM6 HTS biax - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.

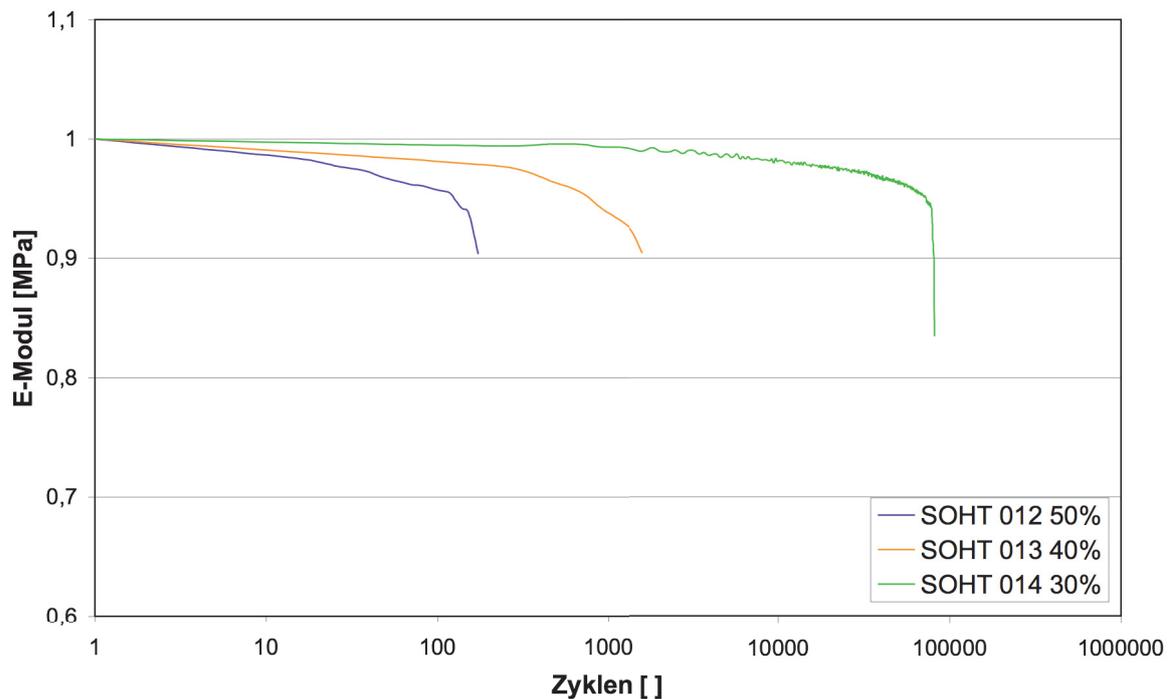
7.3.4 002002 – EPS 601 HTS Quasi-isotrop



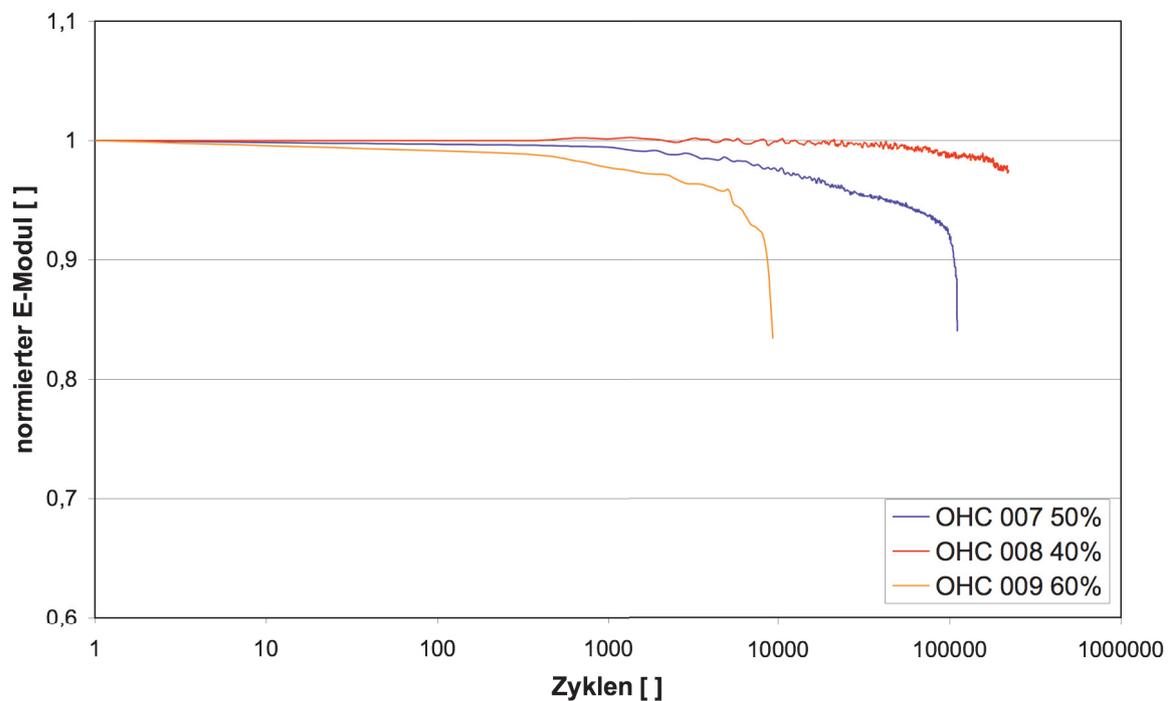
A.61: EPS601 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.



A.62: EPS601 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.

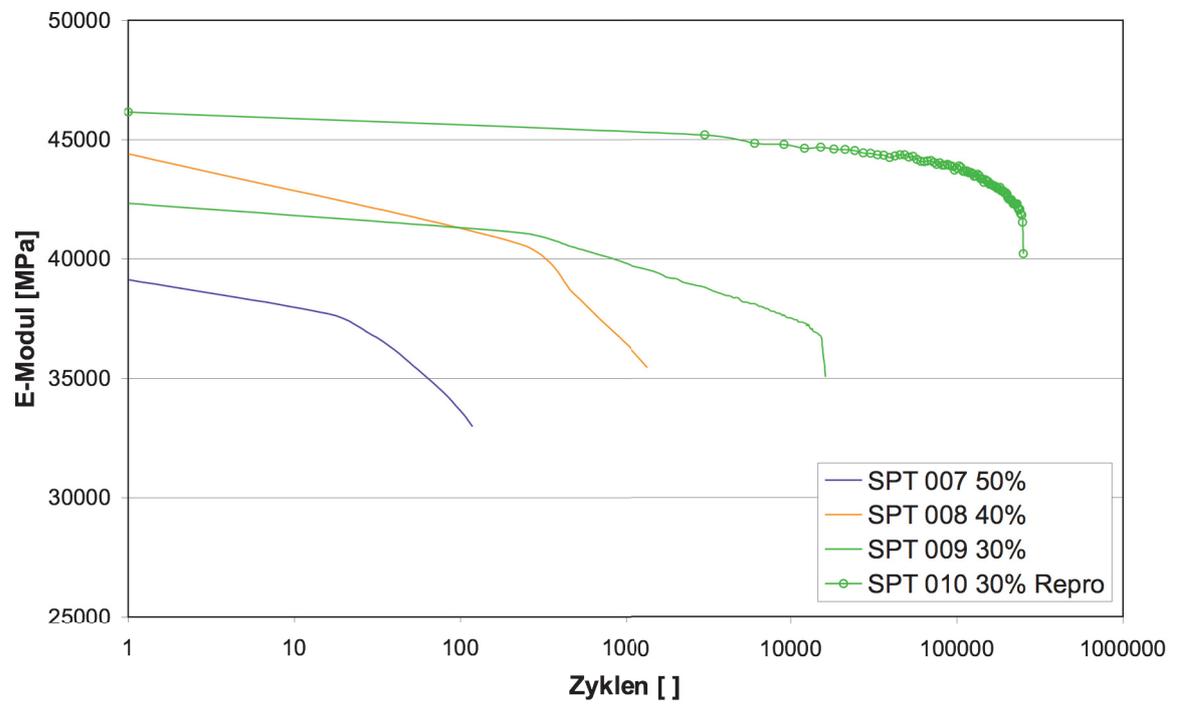


A.63: EPS601 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.

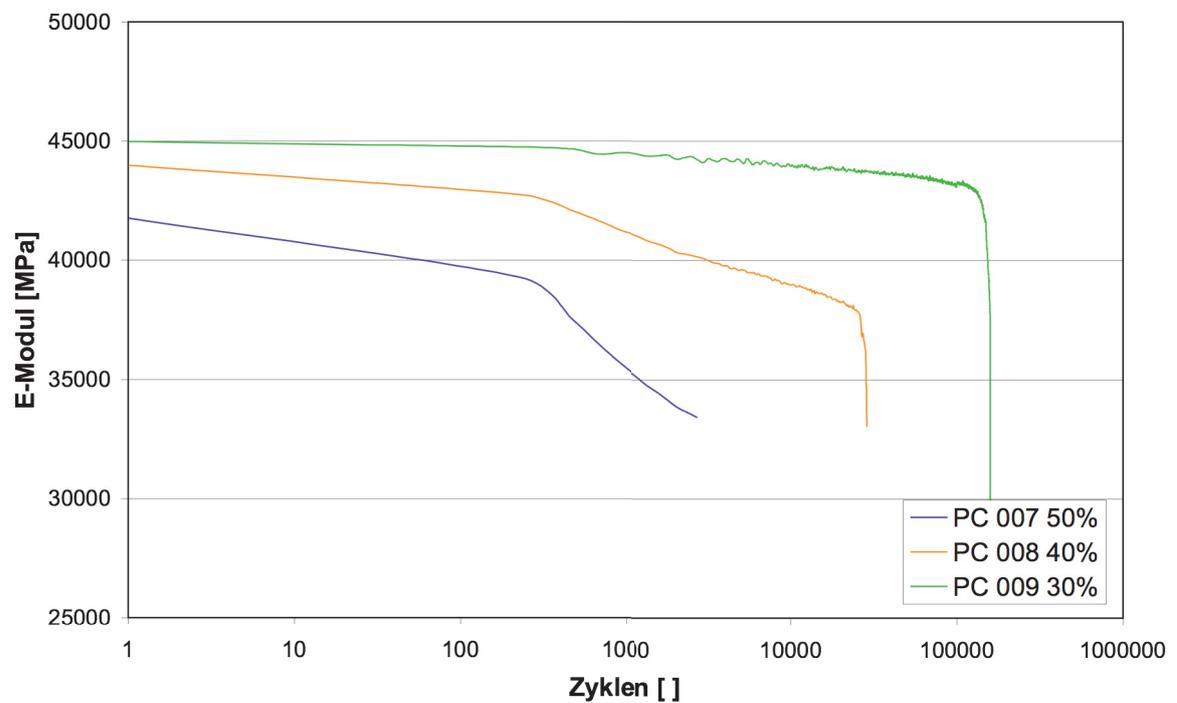


A.64: EPS601 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.

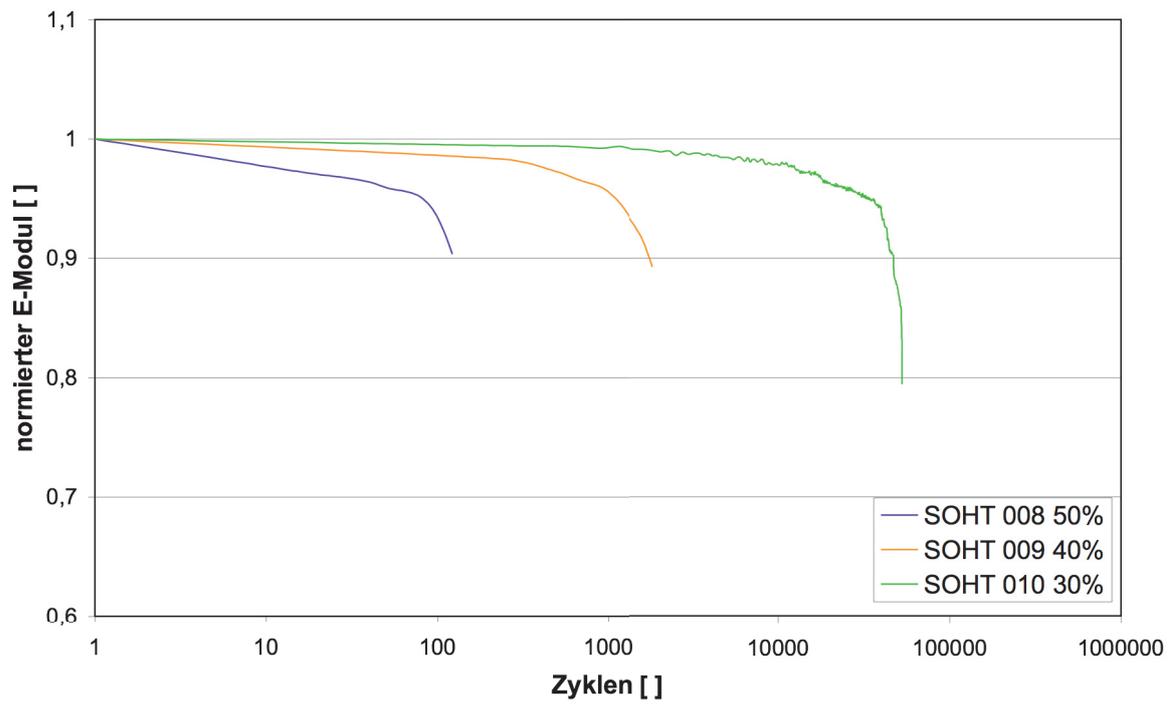
7.3.5 003002 – EPS 600 HTS Quasi-isotrop



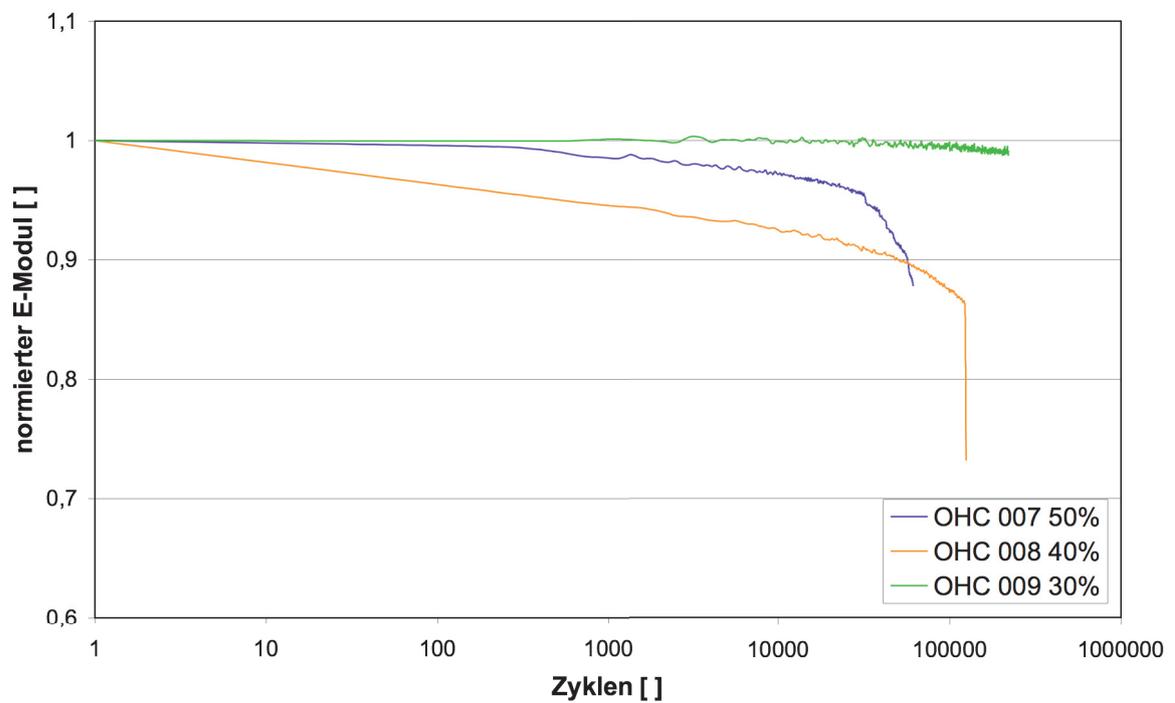
A.65: EPS600 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.



A.66: EPS600 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.

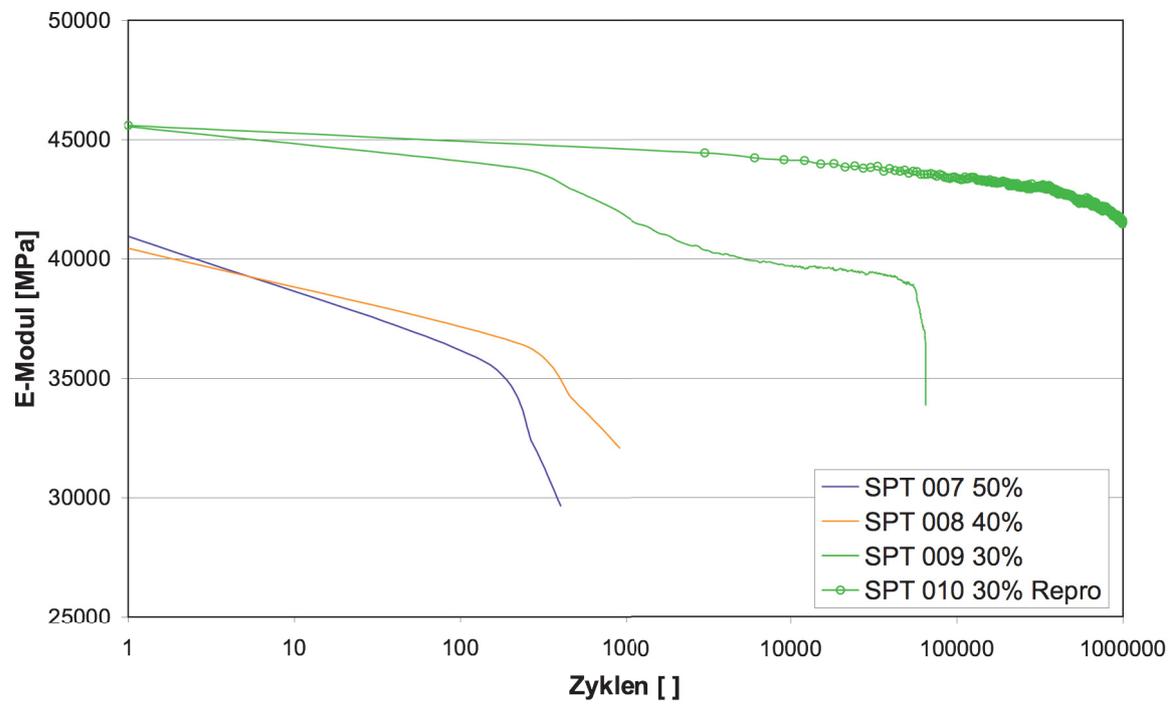


A.67: EPS600 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.

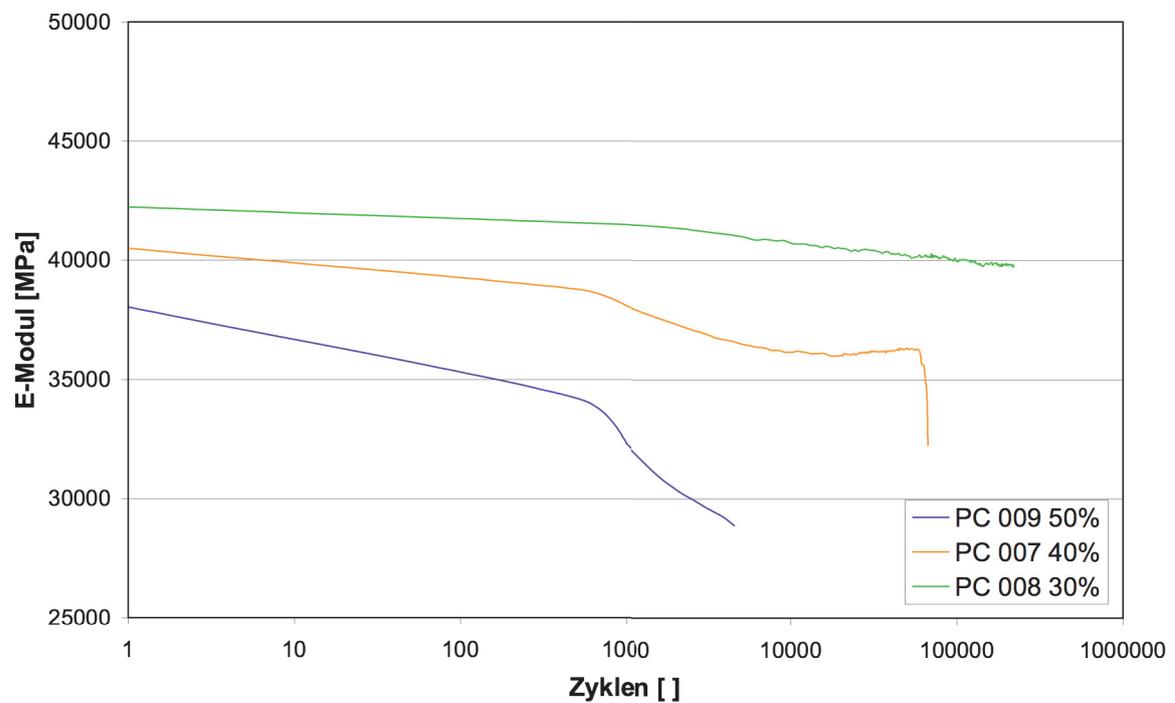


A.68: EPS600 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.

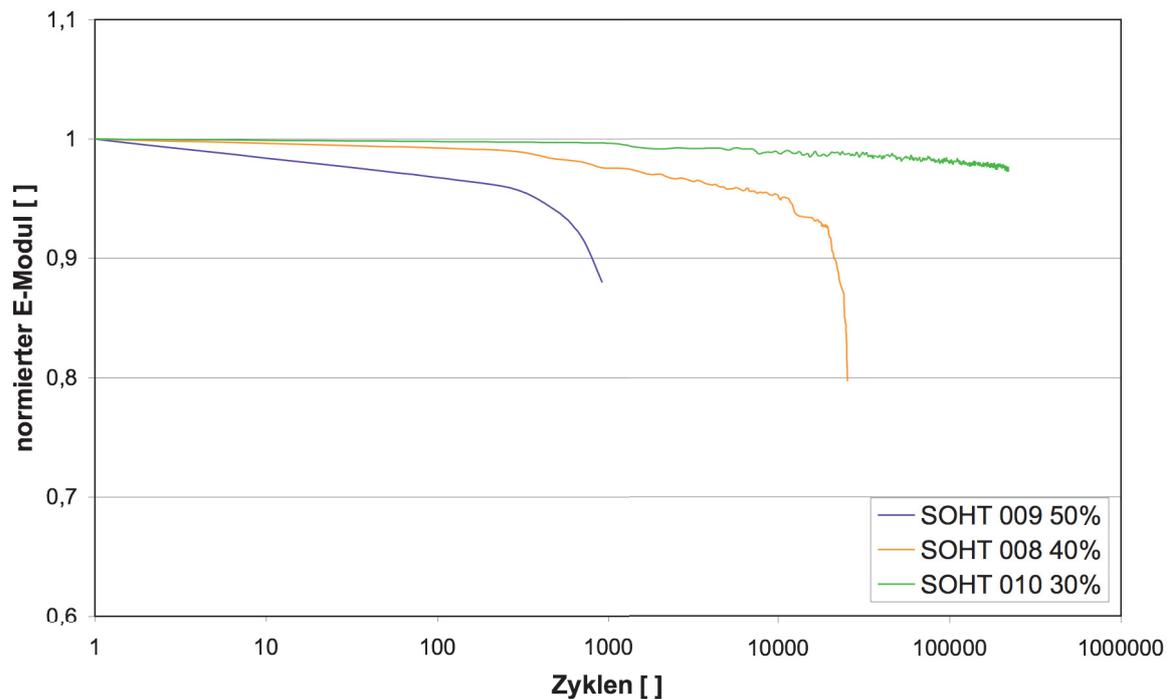
7.3.6001002 – Cycom 977-2 HTS Quasi-isotrop



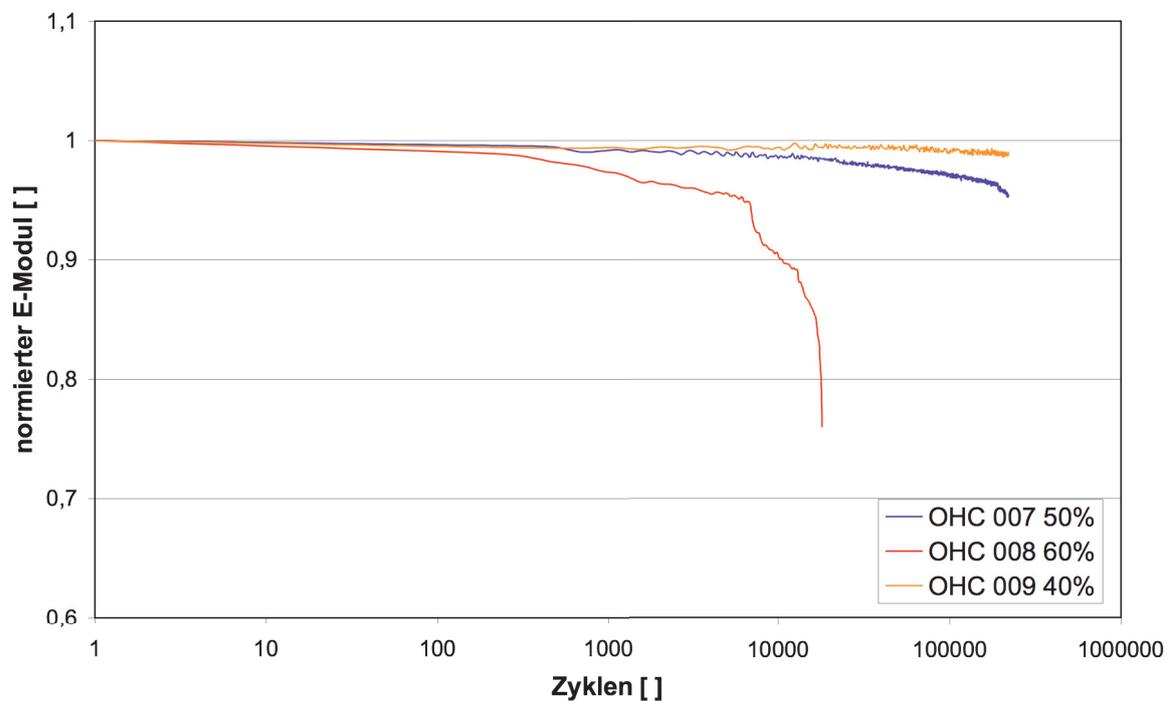
A.69: 977-2 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Plain Tensile Proben.



A.70: 977-2 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Plain Compression Proben.



A.71: 977-2 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Short Open Hole Tensile Proben.



A.72: 977-2 HTS QI - Ermüdungsverläufe für Open Hole Compression Proben.