

Diplomarbeit

*Identifizierung von Fehlstellen in
Karbonfaser – Epoxidharz – Laminaten
und Vergleich zweier Harzsysteme,
sowie deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften.*

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer
Diplom-Ingenieurin unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans-Peter Degischer
und

Mag. rer. nat. Marta Rodríguez-Hortalá

E308

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Judith Hatzmann

0026716

Plätzgasse 19e, 2700 Wiener Neustadt

Wiener Neustadt, am 11. Mai 2011

Danksagung

Ich bedanke mich bei folgenden Personen für ihre Unterstützung und Motivation

- O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Hans-Peter Degischer
- Mag. Marta Rodriguez-Hortalá
- Dipl. Ing. Thomas Krassnitzer und Dipl. Ing. Martin Volk
- Thomas Bornschlegel
- Isabella Holzer
- Maria Wageneder

Kurzzusammenfassung

Die Herstellung von Endlosfaser verstärkten Karbonfaser-Kunststoff-Verbunden erfolgt im Kleinserienbereich hauptsächlich mit dem Handlaminierverfahren. Hierfür kommen als Matrixmaterial meist Epoxidharze zum Einsatz. Die mechanischen Eigenschaften werden sehr stark von Aufbau, dem Faservolumengehalt und dem Porengehalt bestimmt. Auch die Interfaceeigenschaften zwischen Faser und Harz spielen eine große Rolle. Die Temperaturfestigkeit solcher Materialien wird genauer beleuchtet. Da der Einfluss von Fehlstellen, insbesondere von Poren, welche bei dieser Herstellungsmethode besonders oft ein Problem darstellen, in CFK Materialien noch nicht hinreichend untersucht ist, wurde auch auf diesen Aspekt der Materialien eingegangen.

Für die Untersuchung und Charakterisierung der CFK- Materialien kamen zehn verschiedenen Untersuchungsmethoden zum Einsatz. Bildgebende, beschreibende Verfahren (Lichtmikroskopie, REM-Mikrofraktografie) um den Materialaufbau zu untersuchen und Fehlstellen zu identifizieren. Dichtebestimmung und TGA für die Ermittlung des Faservolumenanteil und des Porengehalts. Weitere thermische Verfahren (DSC, TMA and DMA) wurden zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf die mechanische Eigenschaften eingesetzt, und last, but not least mechanische Prüfmethoden (Biegeversuch unterstützt durch Akustische Emissionsmessung, Kurzbiegeversuch) zur Ermittlung von Festigkeit und Steifigkeit. Die Auswahl der Prüfmethoden und die Auswertung der Versuche erfolgt vor allem im Hinblick auf einen qualitativen Vergleich der Materialien untereinander.

Eines der Ergebnisse ist eine Beschreibung des Materialaufbaues mit lichtmikroskopischen Ansichten von allen drei Hauptebenen. Als Fehlstellen wurden große Poren zwischen den Faserbündeln, kleine Poren innerhalb der Faserbündel, Abschlusskanten der verarbeiteten Gewebe, ein menschliches Haar und Faserwelligkeit gefunden. Es werden die Dichte, die Glasübergangstemperatur, der Temperatureausdehnungskoeffizient, der Dreipunktbiegemodul, der Vierpunktbiegemodul, die Biegefestigkeit, die interlaminare Scherfestigkeit und die Anteile von Faser, Harz und Poren im Material bestimmt. Der Einfluss des Faservolumengehaltes und des Porengehaltes auf die mechanischen Eigenschaften wird ermittelt. Die Versagensarten bei den mechanischen Prüfmethoden werden mit Fraktografie und Mikrofraktografie ermittelt und diskutiert. Die beiden in den Proben eingesetzten Epoxidharze werden miteinander hinsichtlich der Güte es Verbundmaterials verglichen.

Abstract

Carbon fiber reinforced polymer composites are manufactured mainly by hand lay up. Epoxy resin is very often used as matrix material. The mechanical properties are directly influenced by the constitution, the fiber volume fraction and the porosity of the material. The interface properties between fiber and matrix material are also very important. One of the interesting questions is the strength properties in relation to the temperature. The influence of material defects and voids is not yet fully analyzed and is investigated. For the investigation and characterisation of the CFRP-material ten different methods are performed. Optical methods such as light optical microscopy and SEM-microfractographie for the analysis of the morphology and for the identification of failures and voids. Density measuring and thermogravimetric analysis are conducted to estimate the materials fiber volume fraction and porosity. To analyse the influence of the temperature on mechanical properties thermal methods (DSC, TMA and DMA) are performed. Last but not least mechanical test methods (bending tests supported by acoustic emission measurements and short beam shear) for determination of strength and stiffness values. The methods have mainly been chosen to compare the investigated materials with each other and relate results with each other. One of the results is the description of the material using light optical microscope pictures, of all three main principal planes. Some defects are found in the material. There are two sorts of voids, big pores between the fibre bundles and small voids beneath the bundles. There are also human hair, fibre undulation, and the seam fibre bundles of the fabric used. The density, the glass transition temperature, the thermal expansion coefficient, the three point bending modulus, the four point bending modulus, the bending strength, the interlaminar shear strength and the volume fraction of the fibres, the matrix material and the voids are determined. The failure modes occurring during material testing are investigated by fractography and microfractography. The two different epoxy resins used in the investigated materials are compared regarding quality of the composite material.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzzusammenfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Tabellenübersicht	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Epoxidharze im Flugzeugbau	3
2.2 Mechanische Eigenschaften von CFK Materialien	4
2.3 Fehlstellen und Poren	4
3 Ziel der Arbeit	5
4 Methodenbeschreibung	6
4.1 Materialien	7
4.1.1 Fasermaterialien	8
4.1.2 Epoxidharz Matrix	10
4.1.3 Verbundmaterialien	10
4.2 Experimentelle Prüf- und Untersuchungsmethoden	15
4.3 Bildgebende Untersuchungen	16
4.3.1 Lichtmikroskopie	16
4.3.2 REM-Mikrofraktografie	16
4.4 Physikalische und thermische Prüfung	17
4.4.1 Dichtebestimmung	17
4.4.2 Thermogravimetrische Analyse (TGA)	18
4.4.3 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	19
4.4.4 Thermomechanische Analyse (TMA)	21
4.4.5 Dynamisch Mechanische Analyse (DMA)	22
4.5 Ermittlung mechanischer Kennwerte und Eigenschaften	23
4.5.1 Biegeversuche	23
4.5.2 Akustische Emissionsmessung	25
4.5.3 Kurzbiegeversuch	25
5 Ergebnisse	27
5.1 Bildgebende Untersuchungen	28
5.1.1 Lichtmikroskopie	28
5.1.2 Mikrofraktografie	37
5.2 Physikalische und thermische Eigenschaften	43
5.2.1 Dichtebestimmung	43
5.2.2 Thermogravimetrische Analyse	44
5.2.3 Dynamische Differenzkalorimetrie	46
5.2.4 Thermomechanische Analyse	48
5.2.5 Dynamisch Mechanische Analyse	50
5.3 Mechanische Eigenschaften	51
5.3.1 Biegeversuche	51

5.3.2	Biegeprüfung mit Wechselbeanspruchung und akustischer Emissionsmessung	54
5.3.3	Ergebnisse der Kurzbiegeprüfung	59
5.3.4	Rechnerischer E-Modul und Zugfestigkeit	62
6	Diskussion der Ergebnisse	63
6.1	Mikroskopischer Materialaufbau, Fehlstellen und Festigkeit	64
6.1.1	Volumengehalt von Faser, Matrix und Poren	65
6.1.2	Zusammenhang zwischen Faservolumengehalt und mechanischen Kennwerten und Vergleich mit Werten aus der Literatur und Herstellerangaben	67
6.1.3	Versagensmechanismen	71
6.1.4	Zusammenhang zwischen Fehlstellen und mechanischen Kennwerten	76
6.2	Einfluss des Harzes und der Temperatur auf mechanische Eigenschaften	79
6.2.1	Glasübergang und Steifigkeit	79
6.2.2	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	81
6.3	Vergleich der Harze	81
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	82
7.1	Erreichte Ziele	82
7.2	Ideen für weitere Untersuchungen des Fehlstelleneinflusses	83
	Literaturverzeichnis	84
A.	Lichtmikroskopische Aufnahmen	I
	Lichtmikroskopische Aufnahmen der untersuchten Materialien in allen drei Hauptebenen	I
	Material Nr. 1 Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar	I
	Material Nr. 2 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	III
	Material Nr. 3 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	IV
	Material Nr. 4 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	VI
	Material Nr. 5 Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar	VII
	Material Nr. 6 Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	IX
	Material Nr. 7 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	X
	Material Nr. 8 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	XII
B.	DSC Ergebnisse	XIV
C.	Ergebnisse der Biegeprüfung	XVI
D.	Ergebnisse der Kurzbiegeversuche	XVIII

Tabellenübersicht

Tabelle 2.1 Laminierharz L258	3
Tabelle 4.1 Materialübersicht	7
Tabelle 4.2 Fasereigenschaften Carbon FT300B	8
Tabelle 4.3 Fasereigenschaften Carbon FT300B	9
Tabelle 4.4 Fasereigenschaften Carbon FT300B	9
Tabelle 4.5 Matrixmaterialien	10
Tabelle 4.6 Probenherstellung	14
Tabelle 4.7 Prüfmethoden	15
Tabelle 4.8 Polierprogramm	16
Tabelle 4.9 Probenanzahl DSC Messungen	20
Tabelle 4.10 Probenabmessungen DMA	22
Tabelle 4.11 Probengeometrie und Versuchsaufbau	24
Tabelle 4.12 Probengeometrie und Einspannlänge SBS	26
Tabelle 5.1 Volumenanteile von Faser und Poren mit Kontrastmethode	35
Tabelle 5.2 Volumenanteile von Faser und Harz	36
Tabelle 5.3 Dichtewerte	43
Tabelle 5.4 berechnete Massen- und Volumenanteile	43
Tabelle 5.5 Massen- und Volumenanteile TGA-Ergebnis	45
Tabelle 5.6 Mittelwerte der DSC Ergebnisse	47
Tabelle 5.7 Längsausdehnungskoeffizienten und Glasübergangswerte	49
Tabelle 5.8 Speichermodul und Glasübergang	50
Tabelle 5.9 Prüfmethode ausgewertete Biegeversuche	51
Tabelle 5.10 Biegeprüfung Ergebnisse im Mittel	53
Tabelle 5.11 Biegemodul [MPa] der Proben unter Wechsellast	55
Tabelle 5.12 Scherfestigkeit	60
Tabelle 5.13 rechnerische Steifigkeit und Festigkeit	62
Tabelle 6.1 Volumenanteile im Methodenvergleich	66
Tabelle 6.2 gemessene Steifigkeit und Festigkeit	67
Tabelle 6.3 auf 60 % normierte Steifigkeit und Festigkeit	69
Tabelle 6.4 auf 43 % normierte Steifigkeit und Festigkeit	70
Tabelle 6.5 Glasübergangswerte in °C im Vergleich der Messmethoden	80
Tabelle B.1 Glasübergangswerte Biresin CR132 und Hexion L418	XV
Tabelle C.1 Biegeversuche Biresin CR132	XVI
Tabelle C.2 Biegeversuche Hexion L418	XVII
Tabelle D.1 Kurzbiegeversuche Biresin CR132	XVIII
Tabelle D.2 Kurzbiegeversuche Hexion L418	XIX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Projekt HyFish DLR Stuttgart aus [1]	1
Abbildung 1.2 1 Liter Auto von VW	2
Abbildung 4.1: 98141	8
Abbildung 4.2: CCC796	9
Abbildung 4.3: KDU 1034	9
Abbildung 4.4 Materialien Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar, Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar	11
Abbildung 4.5 Materialien Ep-Sik/C-HTA40/UD/1 bar, Ep-Hex C-HTA40/UD/1 bar	11
Abbildung 4.6 Materialien Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar, Ep-Hex/C-HTS5631/UD/1 bar	12
Abbildung 4.7 Materialien Ep-Sik/C-HTS5631/UD/3 bar, Ep-Hex/C-HTS5631/UD/3 bar	12
Abbildung 4.8 Schema des Handlaminierens aus [8]	13
Abbildung 4.9 Probenplatte unter Vakuum	14
Abbildung 4.10 TGA Gerät mit Probe	18
Abbildung 4.11 Wärmestrom Differenz Kalorimeter aus [13]	19
Abbildung 4.12 Nachhärtereaktion und Glasübergang eines EP-Harzes in der TMDSC [13]	20
Abbildung 4.13 Messaufbau TMA	21
Abbildung 4.14 Messaufbau DMA	22
Abbildung 4.15 4-Punktverfahren nach [14]	23
Abbildung 4.16 4-Punkt-Biegeversuch	24
Abbildung 4.17 Aufbau SBS nach [16]	25
Abbildung 4.18 Aufbau SBS mit Probe	26
Abbildung 5.1 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 1	28
Abbildung 5.2 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 2	29
Abbildung 5.3 Ep-Sik/ C- HTS5631/UD / 1 bar, Seite 3	30
Abbildung 5.4 trockene Stelle	31
Abbildung 5.5 Gewebeabschluss	31
Abbildung 5.6 Poren in Bündelmitte	32
Abbildung 5.7 Pore	32
Abbildung 5.8 Haar	33
Abbildung 5.9 ursprüngliches Bild und Binärbild des Materials Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	34
Abbildung 5.10 ursprüngliches Bild und Binärbilder des Materials Ep-Sik/ C-HTA40/ UD/ 1 bar	35
Abbildung 5.11 Faservolumengehalt	36
Abbildung 5.12 Pore und Hilfsfaser auf Bruchfläche	37
Abbildung 5.13 Rissausbreitung aus [7]	38
Abbildung 5.14 Poren in Bruchfläche Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	38
Abbildung 5.15 flache Poren zwischen Lagen	39
Abbildung 5.16 tiefe Poren	39
Abbildung 5.17 Knickband	40

Abbildung 5.18 Pore und Hilfsfaser auf Bruchfläche	40
Abbildung 5.19 SBS Probe Übersicht	41
Abbildung 5.20 Verlauf der Delaminationen im UD	42
Abbildung 5.21 TGA Reinharz und Reinfaser	44
Abbildung 5.22 Messkurven TGA Sika Biresin CR132	45
Abbildung 5.23 Ergebniskurven DSC Messung Probe Si_HTS_3bar_3	46
Abbildung 5.24 TMA Auswertung	48
Abbildung 5.25 Speichermoduli	50
Abbildung 5.26 Spannungs-Dehnungs-Diagramm Biegeproben Biresin CR132	52
Abbildung 5.27 Spannungs-Dehnungs-Diagramm Biegeproben Laminierharz L418	52
Abbildung 5.28 Biegeprobe des Materials	53
Abbildung 5.29 Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit zyklischer Last	54
Abbildung 5.30 Akustische Emission Probe 1.04	55
Abbildung 5.31 Akustische Emission Probe 1.05	56
Abbildung 5.32 Akustische Emission Probe 2.04	56
Abbildung 5.33 Akustische Emission Probe 2.05	57
Abbildung 5.34 Akustische Emission Probe 3.04	57
Abbildung 5.35 Akustische Emission Probe 3.05	58
Abbildung 5.36 Akustische Emission Probe 3.06	58
Abbildung 5.37 Kraft Weg Diagramm der Kurzbiegeversuche BiresinCR132 Harz	59
Abbildung 5.38 Kraft Weg Diagramm der Kurzbiegeversuche Laminierharz L418	60
Abbildung 5.39 Kurzbiegeproben unter Last	61
Abbildung 6.1 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1	64
Abbildung 6.2 Methodenvergleich der Volumenanteilsbestimmung	65
Abbildung 6.3 Übersicht der Steifigkeitskennwerte	67
Abbildung 6.4 Diagramm Steifigkeit über Faservolumengehalt	68
Abbildung 6.5 Diagramm Festigkeit über Faservolumengehalt	68
Abbildung 6.6 Eigenschaften von CFK Laminaten mit Epoxi Matrix [1]	70
Abbildung 6.7 Knickband und Harznest einer Biegeprobenbruchfläche	71
Abbildung 6.8 abgelöste Lagen einer Kurzbiegeprobe	71
Abbildung 6.9 Dicke der Lagen einer Kurzbiegeprobe	72
Abbildung 6.10 freigelegte Bruchfläche einer Kurzbiegeprobe	72
Abbildung 6.11 freigelegte Bruchfläche einer Biegeprobe	73
Abbildung 6.12 akustische Emission und Spannungs Dehnungs Diagramm Probe 1.04	74
Abbildung 6.13 akustische Emission und Spannungs Dehnungs Diagramm 3.06	75
Abbildung 6.14 Zusammenhang zwischen Festigkeit und Porengehalt	76
Abbildung 6.15 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1	77
Abbildung 6.16 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 1	77
Abbildung 6.17 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1	78
Abbildung 6.18 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 1	78
Abbildung A.1 Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 1	I
Abbildung A.2 Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 2	II
Abbildung A.3 Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 3	II
Abbildung A.4 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 1	III
Abbildung A.5 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 2	III
Abbildung A.6 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 3	IV
Abbildung A.7 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1	IV

Abbildung A.8 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 2	V
Abbildung A.9 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 3	V
Abbildung A.10 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 1	VI
Abbildung A.11 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 2	VI
Abbildung A.12 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 3	VII
Abbildung A.13 Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 1	VII
Abbildung A.14 Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 2	VIII
Abbildung A.15 Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 3	VIII
Abbildung A.16 Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 1	IX
Abbildung A.17 Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 2	IX
Abbildung A.18 Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 3	X
Abbildung A.19 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1	X
Abbildung A.20 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 2	XI
Abbildung A.21 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 3	XI
Abbildung A.22 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 1	XII
Abbildung A.23 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 2	XII
Abbildung A.24 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 3	XIII

1 Einleitung

Diese Arbeit behandelt die Untersuchung und Charakterisierung von CFK Bauteilen mit Epoxidharzmatrix. Sie ist die wissenschaftliche Begleitung eines Projektes zur Einführung von neuen Harzsystemen bei einem namhaften, hier anonym bleiben wollenden Kleinflugzeughersteller. Da in der Produktion von Kleinflugzeugen und von Produkten mit ähnlich niedriger Stückzahl die Herstellung von Faserverbund Bauteilen nach wie vor größtenteils mit dem Handlaminierverfahren erfolgt, werden auch die Materialproben für diese Untersuchungen handlaminiert. Das Handlaminieren ist im Kleinflugzeugbau die gängige Herstellungsmethode für Strukturbauteile. Ein typisches Beispiel eines mit diesem Verfahren hergestellten Flugzeugs zeigt Abbildung 1.1. Es handelt sich dabei um ein Projekt des DLR Stuttgart.



HyFish



- Spannweite 1,5 m
- V_{cruise} : 200 -300 km/h
- Flughöhe: bis 7000 m
- Anwendung: UAV, Atmosphärenforschung

Abbildung 1.1 Projekt HyFish DLR Stuttgart aus [1]

Es ist zu erwarten, dass auch im Automobilbau der Anteil an CFK Bauteilen weiter zunimmt. Dies wird besonders im Kleinserienbereich der Fall sein. Ein typisches Beispiel hierfür ist die L1 Konzeptstudie von Volkswagen, zu sehen in Abbildung 1.2. Dieses Fahrzeug wiegt nur 290 kg und ist mit einer Carbonkarosserie ausgeführt.

Für einen wirtschaftlichen und technisch sinnvollen Einsatz von Carbonfaser verstärkten Kunststoffen ist es notwendig, das Materialverhalten gut zu kennen. Für die Dimensionierung und Verbesserung des Materials ist besonders die Untersuchung des Materialversagens von Interesse. Ein Teil dieser Arbeit widmet sich darum der Untersuchung von Fehlstellen und besonders von Poren und ihrem Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Epoxidharze sind das für das Handlaminieren beliebteste Matrixmaterial. Da Epoxidharze bei höheren Temperaturen eine signifikante Verringerung der Steifigkeit und Festigkeit aufweisen, ist der Einsatzbereich von Bauteilen aus diesem Material durch die Glasübergangstemperatur des Harzes beschränkt. Die Ausweitung des Einsatzbereiches ist für den Einsatz in Bauteilen von großem Interesse. Für die Materialproben dieser Arbeit werden aus diesem Grund zwei Harzsysteme gewählt welche eine höhere Glasübergangstemperatur aufweisen, aber dennoch für das Handlaminieren geeignet sind.

Es werden Materialproben mit Harzen von zwei Herstellern untersucht und zwar das Epoxidharz Biresin CR132 der Firma Sika und das Laminierharz L418 der Firma Hexion. Durch die Kombination von drei Carbonfasergewebearten mit zwei Harzsorten kommt man auf sechs verschiedenen Materialien, welche im Vakuumsack ausgehärtet werden. Da auch die Aushärtung im Autoklaven im Kleinflugzeugbau sehr verbreitet ist, werden zum Vergleich und um die Auswirkung dieser Aushärtemethode zu erfassen mit der dritten Gewebeart noch zusätzlich Materialproben im Autoklav Verfahren hergestellt.



Abbildung 1.2 1 Liter Auto von VW

2 Stand der Technik

2.1 Epoxidharze im Flugzeugbau

Im Flugzeugbau sind Epoxidharze ein sehr beliebtes Matrixmaterial. Dies hat mehrere Gründe. Sie sind direkt nach dem Mischen von Harz und Härter gut von Hand verarbeitbar und die Verarbeitungszeit ist einstellbar durch die Wahl eines geeigneten Härters. Die Viskosität ist niedrig genug um das Gewebe ausreichend zu durchtränken. Epoxidharz ist so einfach zu verarbeiten, dass es sogar im Haushaltsbereich als Zweikomponentenklebstoff zum Einsatz kommt. Epoxidharze sind sehr günstig in der Herstellung. Die wirtschaftliche Herstellung von Kleinserien aus FVK Bauteilen ist mit Epoxidharz möglich. Im Vergleich zu FVK Bauteilen mit anderen Matrixmaterialien ist der Aufwand für Werkzeuge sehr gering, die Formen sind relativ einfach herzustellen. Die Härtungstemperatur ist moderat, und die Härtungszeit der Harze dauert nicht zu lange, und die Schrumpfung ist gering. Durch Temperung sind ausreichend hohe Glasübergangstemperaturen erreichbar.

Bisher werden in jenem Unternehmen, welches dankenswerterweise die Proben für diese Arbeit zur Verfügung gestellt hat, sehr viele Bauteile mit dem Handlaminierharz L285 der Firma Hexion hergestellt. In Tabelle 2.1 werden die wichtigsten Materialeigenschaften dieses Harzes präsentiert. Sie wurden aus dem Datenblatt des Herstellers [2] entnommen.

Harzeigenschaft	Laminierharz L285
Zugfestigkeit	70-80 MPa
E-Modul	3,3-3,6 GPa
Bruchdehnung	5-6 %
Dichte	1,15 g/cm ³
Glasübergangstemperatur	Max 105 °C

Tabelle 2.1 Laminierharz L258

Betreffend der Verarbeitung und der mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur ist dieses Harz sehr gut für seinen Einsatzzweck geeignet. Leider hat es eine Glasübergangstemperatur von nur 105 °C, daher dürfen FVK Bauteile mit diesem Harz im Betrieb nicht wärmer als 75 °C werden. Im Bereich des Glasübergangs nimmt die Steifigkeit des Harzes rapide ab, dies führt zur Verringerung der Festigkeit des Verbundmaterials.

2.2 Mechanische Eigenschaften von CFK Materialien

Allgemeine Angaben über die Festigkeit und Steifigkeit von CFK Materialien sind in der Literatur kaum vorhanden. Die mechanischen Eigenschaften lassen sich nicht so wie bei Metallen angeben. In [1] werden zwar Kennwerte aufgelistet, es ist aber klar, dass die Kennwerte im Einzelfall von so vielen Parametern abhängig sind, dass sie für jede Harz-Faser Kombination und Belastungsrichtung neu bestimmt werden müssen. Die meisten Untersuchungen und Kennwerte beziehen sich auf die Zugfestigkeit, auch die vorhandenen Berechnungsmethoden sind leider oft auf Zugbelastung in Faserrichtung.

2.3 Fehlstellen und Poren

Leider ist es nicht möglich einen gänzlich porenfreien FVK Bauteil herzustellen, die Auswirkung der Poren auf die Festigkeit und Steifigkeit ist aber noch nicht hinreichend untersucht. Die Verringerung der Steifigkeit und Festigkeit von Faserverbundmaterialien durch Poren und ein direkter Zusammenhang zwischen Aushärtungsdruck und Porenvolumengehalt wird in [3] für Glasfaserverbundmaterialien unter Zugbelastung nachgewiesen. Die Auswirkung von erhöhten Porenvolumenanteilen in Handlaminaten mit Glasfaser sowie Kohlefaser kombiniert mit Epoxidharz auf die Druckfestigkeit wird in [4] beschrieben. Die Druckversuche wurden auch von AE Messung begleitet. Andere Ansätze versuchen die Auswirkung der Poren durch mikromechanische Modelle vorherzusagen. Ein solches Verfahren speziell für Handlaminat unter Zugbelastung wird in [5] beschrieben.

Die Missorientierung und Welligkeit der Faser kann, wie in [6] ausgeführt, zu einer Verringerung des E-Moduls von bis zu 50 % führen. Diese Studie wurde an einer Einheitszelle mit FE Methoden durchgeführt. Sie vergleicht Verbundmaterialien in Gewebeanordnung mit Materialien aus denselben Komponenten, aber ohne Faserwelligkeit.

Ausgiebige mikrofraktografische Untersuchungen zum Ermüdungsversagen von CFK Werkstoffen mit EP Matrix werden in [7] beschrieben. Als Schädigungsbeginn werden hier meist Harznester identifiziert.

3 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Charakterisierung und der Vergleich der acht zu untersuchenden Materialien, welche mit zwei verschiedenen Harzsystemen gebaut wurden. Ein wichtiger Teil ist die Ermittlung der vorhandenen Faser-, Harz- und Porenvolumengehalte. Mittels Lichtmikroskopie wird der Aufbau untersucht und eventuell vorhandene Fehlstellen identifiziert. Der Einfluss der Fehlstellen auf die mechanischen Eigenschaften soll untersucht werden. Die in den Materialien vorhandenen Poren sollen quantitativ und qualitativ untersucht und beschrieben werden. Ihr Einfluss auf die Festigkeit und Steifigkeit ist sicher vorhanden und wird genauer untersucht. Auch der Vergleich von zwei verschiedenen Aushärtungsmethoden geht in diese Arbeit ein, da ein Teil der Proben im Vakuumsack und ein Teil im Autoklaven ausgehärtet werden. Nach bisherigen Erkenntnissen müssten die im Autoklaven ausgehärteten Proben eine höhere Festigkeit und Steifigkeit besitzen, da ihr Porenvolumengehalt niedriger ist und dies in bisherigen Untersuchungen von CFK der Fall war.

Da sich die beiden Matrixmaterialien neu am Markt befinden, soll ihre Eignung als Handlaminierharze in Kombination mit den Verstärkungsfasern aus Karbon erforscht werden. Laut Herstellerangaben besitzen sie einen höheren Glasübergang als das Laminierharz L285. Die tatsächlich erreichten Glasübergangstemperaturen in den Bauteilen können aber durchaus von den Herstellerangaben für das Harz abweichen, da diese nicht unter Laborbedingungen hergestellt wurden. Die tatsächliche Glasübergangstemperatur, und die Auswirkung des Glasüberganges auf die Steifigkeit und Festigkeit bei erhöhter Temperatur zu ermitteln ist auch ein Ziel dieser Arbeit.

Zum Vergleich der Steifigkeit und der Festigkeit der Materialien wird eine mechanische Prüfung in Form des Vier Punkt Biegeversuchs durchgeführt. Da jedes Harz mit jeder Faser unterschiedliche Interfaceeigenschaften aufweist, wird die interlaminaire Scherfestigkeit der Verbundmaterialien überprüft. Durch Mikrofraktografie nach der mechanischen Prüfung soll das Bruchverhalten weiter untersucht werden.

4 Methodenbeschreibung

In diesem Kapitel werden in 4.1 die untersuchten Verbundmaterialien, ihre Einzelkomponenten und Herstellung beschrieben. Eine genaue Beschreibung von Komponenten und Herstellungsverfahren würde den Umfang dieser Arbeit sprengen, es sei hier aber auf [8] verwiesen. In 4.2 wird auf alle Untersuchungs- und Prüfmethode, welche im Rahmen dieser Arbeit angewandt wurden, eingegangen. Da es sich insgesamt um zehn Methoden handelt, wird größtenteils auf eine theoretische Betrachtung verzichtet, aber entsprechende ergänzende Literatur angegeben. Der Fokus liegt vor allem auf der Beschreibung des tatsächlichen Prüfaufbaus und Ablaufs, um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

4.1 Materialien

Im Rahmen dieser Arbeit wurden langfaserverstärkte CFK mit Epoxidharzmatrix untersucht. Da es sich um Verbundmaterialien handelt, werden im Folgenden die einzelnen Komponenten getrennt beschrieben und dann genauer auf den Werkstoffverbund eingegangen. In dieser Arbeit wird Wert darauf gelegt, dass die Ergebnisse mit vorausgehenden Untersuchungen vergleichbar bleiben. Darum werden als Fasermaterialien Carbongewebe ausgewählt, welche sich durch langjährigen Einsatz bereits bewährt haben und deren Eigenschaften in Kombination mit L285 Harz bekannt sind. Es wurden zwei Arten Epoxidharz mit drei Arten Karbonfasern kombiniert. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der Materialien mit im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kurzzeichen. Von der Gewebeanordnung kann zwischen den Materialien 1 und 5 (0/90) und den anderen Materialien (UD) unterschieden werden. Materialien 1-3 und 5-7 wurden im Vakuumsack unter 1 bar ausgehärtet, Materialien 4 und 8 unter 3 bar in einer Druckkammer. Die Materialien wurden passend zum Harzsystem getempert.

No.	Kurzzeichen	Matrix	Hersteller	Fasern	Hersteller	Gewebeanordnung	Aushärtemethode	Temperung
1	Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	Epoxi Biresin CR132	Sika	Carbon FT 300 B	Torayca	Gewebe CF 0°/90° Köper2/2	Vakuumsack 1 bar	8 h bei 120 °C
2	Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	Epoxi Biresin CR132	Sika	Carbon HTA 40	Toho Tenax	UD Gewebe 95 % CF 0° 5 % GF 90°	Vakuumsack 1 bar	8 h bei 120 °C
3	Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	Epoxi Biresin CR132	Sika	Carbon HTS 5631	Toho Tenax	UD Band mit PES Hilfsfaser	Vakuumsack 1 bar	8 h bei 120 °C
4	Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	Epoxi Biresin CR132	Sika	Carbon HTS 5631	Toho Tenax	UD Band mit PES Hilfsfaser	Druckkammer 3 bar	8 h bei 120 °C
5	Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	Epoxi L 418	Hexion	Carbon FT 300B	Torayca	Gewebe CF 0°/90° Köper2/2	Vakuumsack 1 bar	15 h bei 140 °C
6	Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	Epoxi L 418	Hexion	Carbon HTA 40	Toho Tenax	UD Gewebe 95 % CF 0° 5 % GF 90°	Vakuumsack 1 bar	15 h bei 140 °C
7	Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	Epoxi L 418	Hexion	Carbon HTS 5631	Toho Tenax	UD Band mit PES Hilfsfaser	Vakuumsack 1 bar	15 h bei 140 °C
8	Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	Epoxi L 418	Hexion	Carbon HTS 5631	Toho Tenax	UD Band mit PES Hilfsfaser	Druckkammer 3 bar	15 h bei 140 °C

Tabelle 4.1 Materialübersicht

4.1.1 Fasermaterialien

In den untersuchten Materialien sind drei verschiedene Kohlenstofffaserarten enthalten. Sie sind als Gewebe verarbeitet. Kohlenstofffasern weisen bei relativ niedrigem Gewicht hohe Steifigkeit und Festigkeit auf. Im Folgenden werden in Tabelle 4.2, Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 die wichtigsten Faser- und Gewebeeigenschaften laut Herstellerdatenblättern aufgelistet. Die Abbildungen 4.1 bis 4.3 zeigen die Gewebe. Gut zu erkennen sind die Carbonfaserbündel und ihre Webart. Bei den UD-Geweben heben sich die weißen Hilfskettfäden aus Glas und PES deutlich von den Kohlefasern ab.

4.1.1.1 Carbon FT300B

Faserbezeichnung	FT300B-3000-40B
Produzent	Torayca
Zugfestigkeit	3811 MPa
E-Modul	235 GPa
Bruchdehnung	1,62 %
Dichte	1,75 g/cm ³
Filamentdurchmesser	7µm
Gewebebezeichnung	98141
Gewebehersteller	Porcher Industries
Flächengewicht	204 g/m ²
Bindung	Köper 2/2
Kette	Carbonfaser
Schuss	Carbonfaser
Nominale Dicke pro Lage	0,295 mm
In Materialien	1 und 5

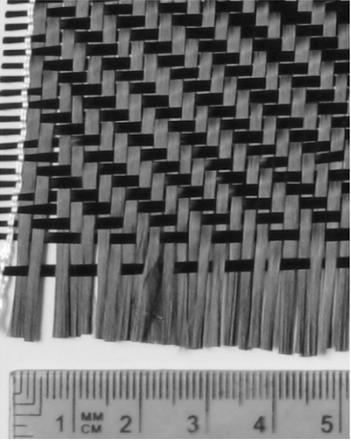


Abbildung 4.1: 98141

Tabelle 4.2 Fasereigenschaften Carbon FT300B

4.1.1.2 Carbon HTA 40

Faserbezeichnung	Tenax-E HTA40 E13
Produzent	Toho Tenax
Zugfestigkeit	3813 MPa
E-Modul	236 GPa
Bruchdehnung	1,53 %
Dichte	1,76 g/cm ³
Filamentdurchmesser	7µm
Gewebebezeichnung	CCC 796
Gewebehersteller	C. Cramer & Co
Flächengewicht	280 g/m ²
Bindung	UD Leinwand
Kette	Carbon
Schuss	Glas
Nominale Dicke pro Lage	0,28 mm
In Materialien	2 und 6

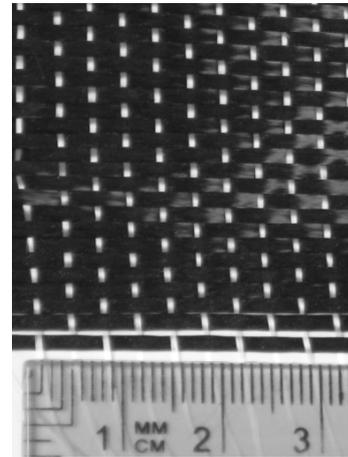


Abbildung 4.2: CCC796

Tabelle 4.3 Fasereigenschaften Carbon FT300B

4.1.1.3 Carbon HTS 5631

Faserbezeichnung	Tenax-E HTS 5631
Produzent	Toho Tenax
Zugfestigkeit	4627 MPa
E-Modul	239 GPa
Bruchdehnung	1,79 %
Dichte	1,77 g/cm ³
Filamentdurchmesser	7µm
Gewebebezeichnung	KDU 1034
Gewebehersteller	vom Baur
Flächengewicht	382 g/m ²
Bindung	UD Leinwand
Kette	Carbon
Schuss	PES
Nominale Dicke pro Lage	0,4 mm
In Materialien	3, 4, 7 und 8

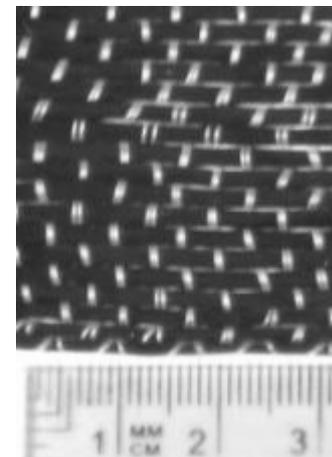


Abbildung 4.3: KDU 1034

Tabelle 4.4 Fasereigenschaften Carbon FT300B

4.1.2 Epoxidharz Matrix

Als Matrixmaterialien werden zwei Epoxidharzsysteme ausgewählt, welche sich besonders zum Handlaminierten eignen und eine hohe Temperaturbeständigkeit aufweisen. Tabelle 4.5 zeigt die wichtigsten Eigenschaften der Matrixmaterialien im Überblick. Die Daten wurden aus den Herstellerdatenblättern [9] und [10] entnommen, die Dichte des Harzes Biresin CR132 war nicht angegeben, sie wird im Laufe dieser Arbeit bestimmt. Das Ergebnis ist in 5.2.1.1 angegeben. Die für das Biresin CR 132 Harz angegebene Glasübergangstemperatur ergibt sich nach einer 12-stündigen Temperung bei 125 °C. Die für das Laminierharz L418 angegebene Glasübergangstemperatur ergibt sich laut Datenblatt nach einer Temperung von 24 h bei 20-25 °C und 10 h bei 100 C.

Harzeigenschaft	Biresin CR 132	Laminierharz L418
Produzent	Sika	Hexion
Zugfestigkeit	78 MPa	75-90 MPa
E-Modul	2,7 GPa	3,3-3,6 GPa
Bruchdehnung	5,7 %	5-6 %
Dichte	k. A.	1,15 g/cm ³
Glasübergangstemperatur	bis 135 °C	120-125 °C

Tabelle 4.5 Matrixmaterialien

4.1.3 Verbundmaterialien

Die Materialien wurden alle als Platten handlaminiert. Dabei wurden alle Gewebelagen in gleicher Richtung aufgelegt. Die Platten Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar und Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar haben also über die gesamte Höhe gleich viele Fasern in 0° und in 90° Richtung. Bei den anderen sechs Materialien liegen alle Karbonfasern in 0°. Sie sind also unidirektionale Faserverbundwerkstoffe.

4.1.3.1 Aufbau der Materialien

Abbildungen 4.4 bis 4.8 zeigen den Aufbau der geprüften Materialien. Die 3-D Ansichten wurden aus lichtmikroskopischen Aufnahmen gleicher Vergrößerung zusammengestellt. Die Bilder repräsentieren Würfel mit ca. 3 mm Kantenlänge. Während die Seite Ⓜ quer zu den Fasern geschliffen wurde, und die Front Ⓝ bei den UD-Laminaten einen Schliff entlang der Faser zeigt, erscheinen Front und Seite bei den Materialien in 0/90 Grad Richtung gleich. Die Übersicht Ⓟ zeigt einen Schliff entlang der Gewebelagen. Da bei den acht untersuchten Materialien jeweils zwei aus denselben Geweben und mit gleichem Aushärtedruck hergestellt wurden und sich diese nur durch das Harz unterscheiden, werden sie in dieser Darstellung zusammengefasst. In 5.1.1 wird noch genauer auf den Materialaufbau und die Ergebnisse der Lichtmikroskopie eingegangen.

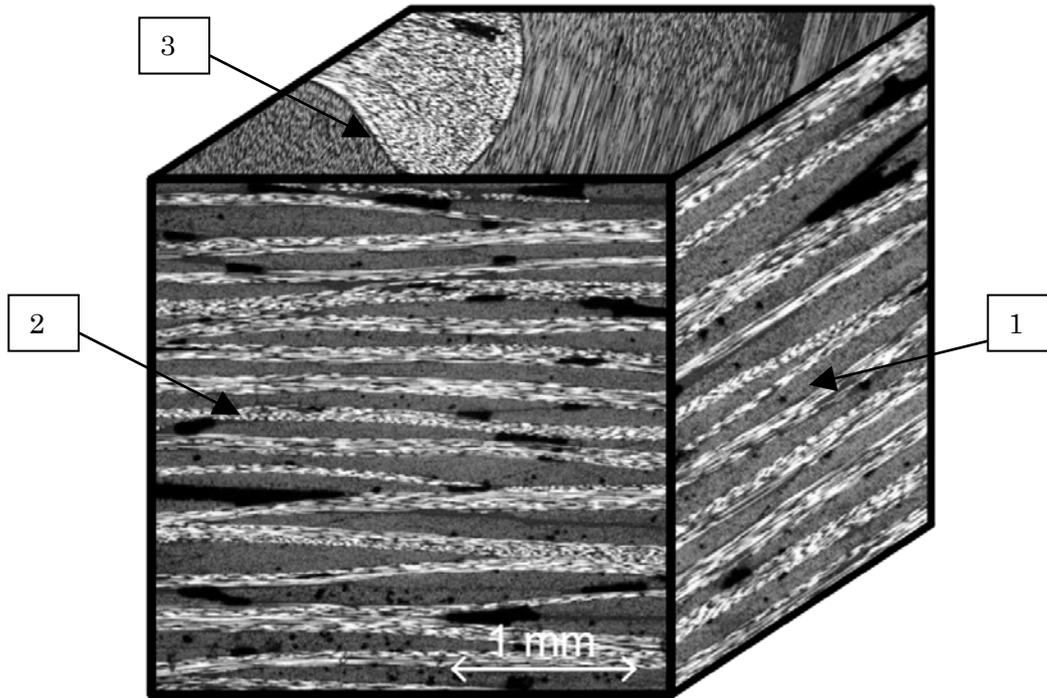


Abbildung 4.4 Materialien
Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar,
Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar

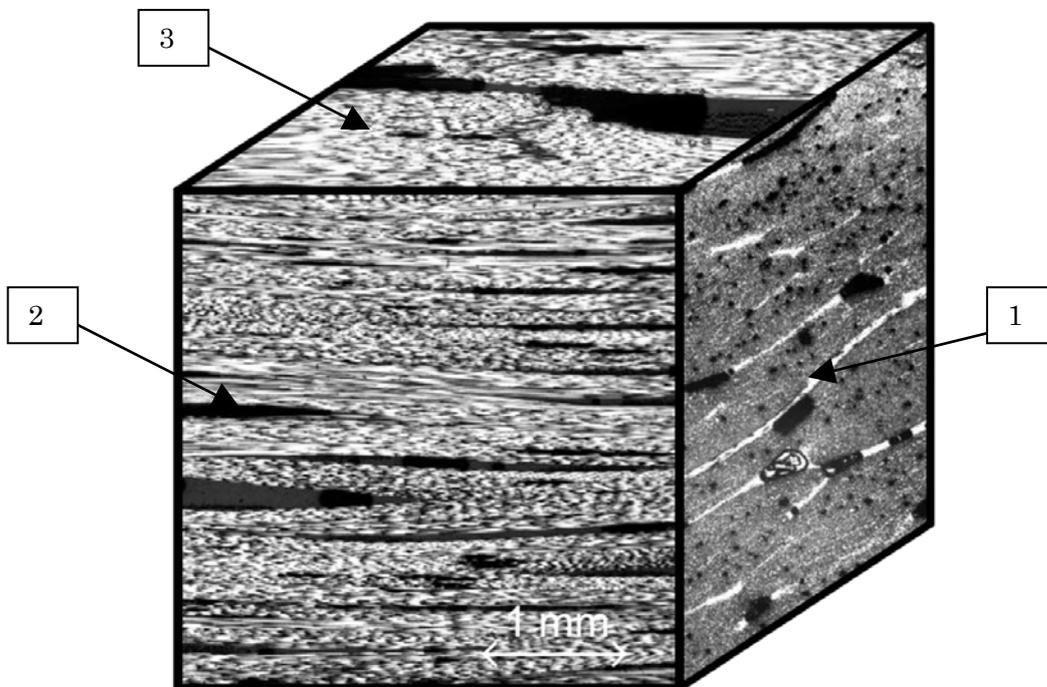


Abbildung 4.5 Materialien
Ep-Sik/C-HTA40/UD/1 bar,
Ep-Hex C-HTA40/UD/1 bar

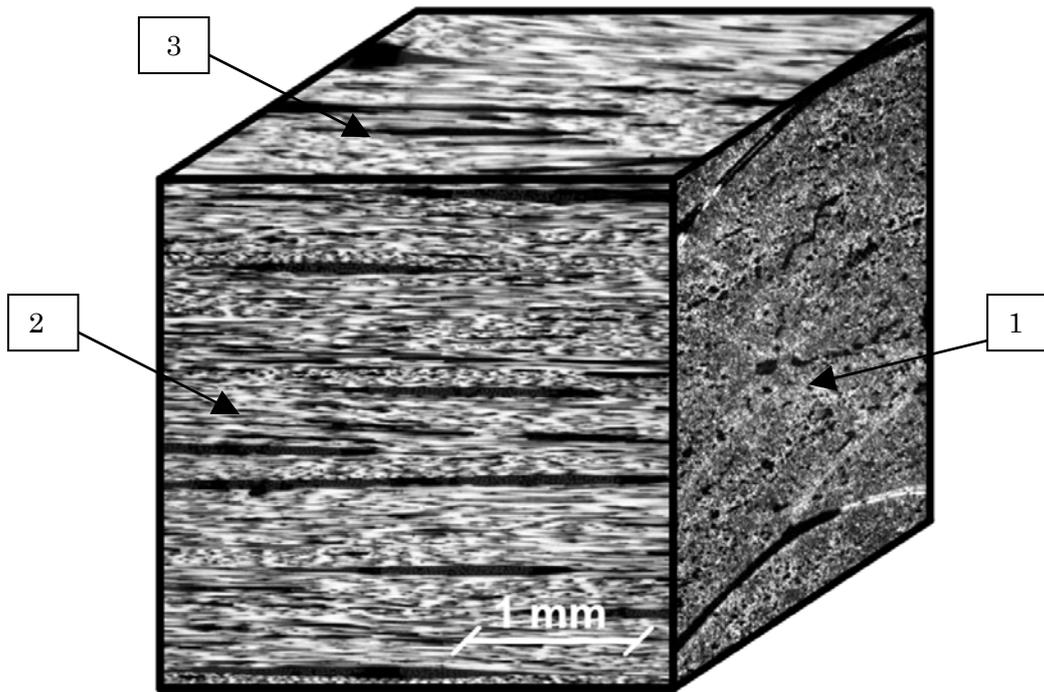


Abbildung 4.6 Materialien
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar,
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/1 bar

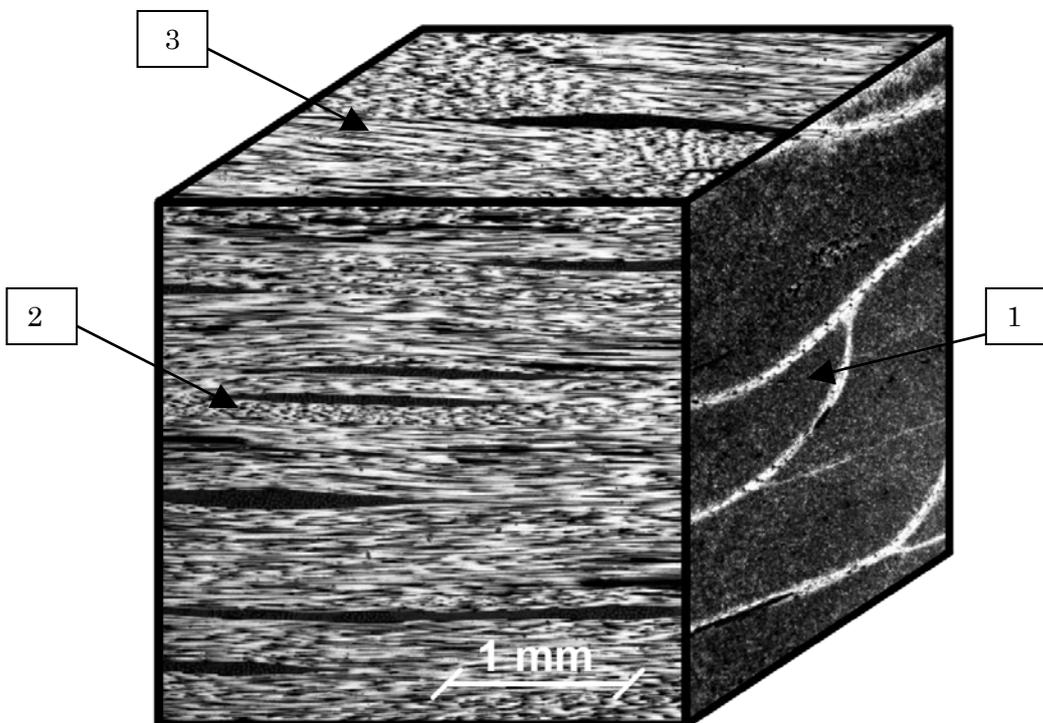


Abbildung 4.7 Materialien
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/3 bar,
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/3 bar

4.1.3.2 Probenherstellung

Die Probenplatten aller acht geprüften Materialverbunde wurden mittels Handlaminierverfahren hergestellt. Dieses Verfahren eignet sich besonders für die Herstellung von Kleinserien und ist insbesondere im Segel- und Kleinflugzeugbau sowie im Bootsbau sehr verbreitet. Jede Gewebelage wird mit genau definierter, frisch angesetzter Harzmenge getränkt. Das Laminat wird auf einer Glasplatte Lage für Lage von Hand aufgebaut. In Tabelle 4.11 ist die Lagenanzahl der Platten angegeben. Mit Walzen werden die Lagen soweit als möglich von Poren befreit und glatt aufgelegt.

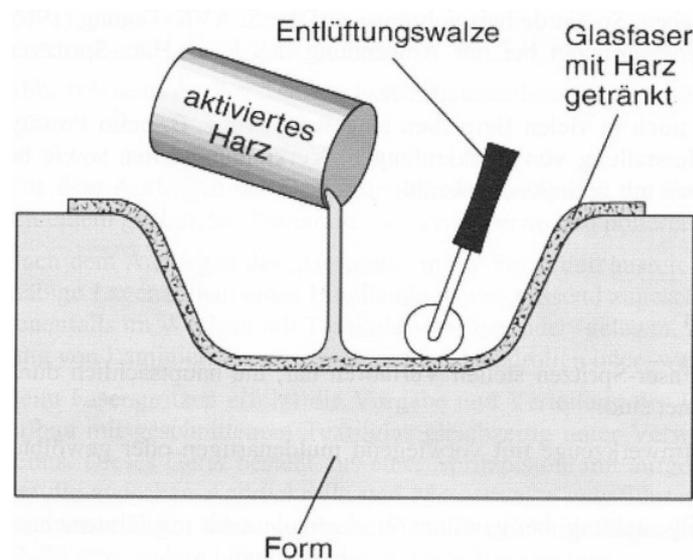


Abbildung 4.8 Schema des Handlaminierens aus [8]

Wenn das Gelege fertig abgelegt ist, wird ein Absaugvlies aufgelegt und anschließend der Aufbau mittels Vakuumfolie luftdicht verpackt. Dann erfolgt das Absaugen der Luft. Während der gesamten Aushärtungszeit bleibt das Laminat unter Vakuum, es steht dadurch unter 1 bar Atmosphärendruck. Die Materialien Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar und Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar wurden zusätzlich noch in einer Druckkammer mit 3 bar Druck beaufschlagt. Alle Proben wurden im Wärmerraum bei 40°C einige Tage zum Härten ausgelagert.

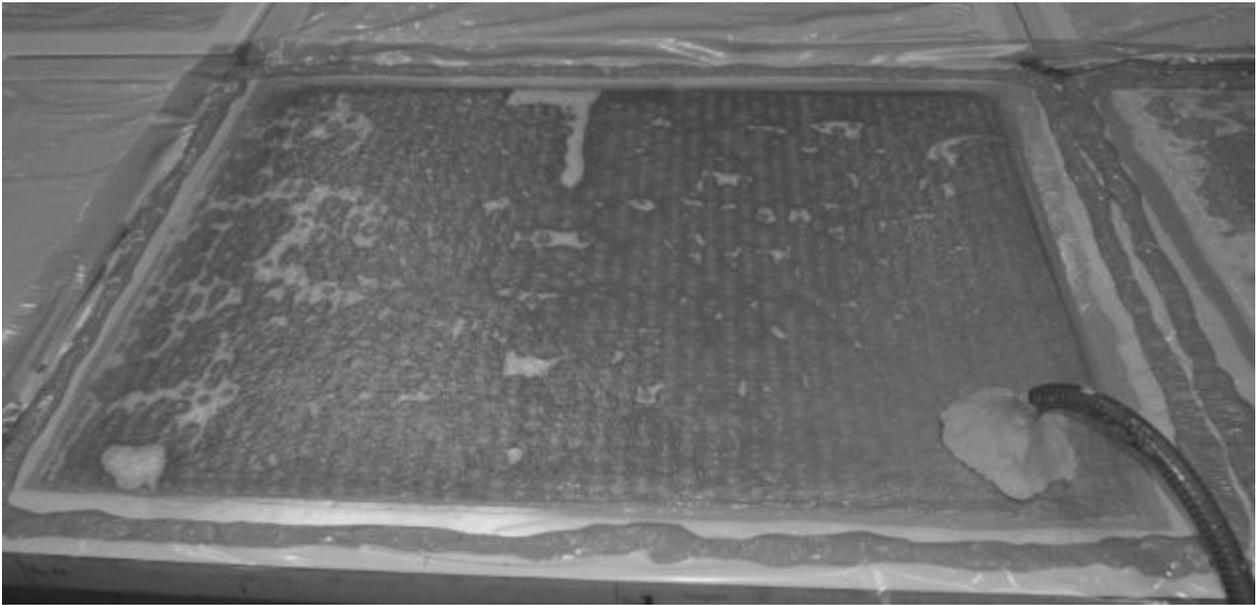


Abbildung 4.9 Probenplatte unter Vakuum

Nach der Härtung wurden die Proben zusätzlich in einer Temperkammer einer Wärmebehandlung unterzogen, dies ist für die vollständige Vernetzung des Harzes und zum Erreichen der gewünschten Warmfestigkeit notwendig. Alle Proben mit Biresin CR132 der Firma Sika wurden 8 Stunden bei 120 °C getempert, die Proben mit Laminierharz L418 der Firma Hexion wurden 15 Stunden bei 140 °C getempert.

No.	Kurzzeichen	Lagen	Aushärtung	Temperung
1	Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	23	1 bar	8 h bei 120 °C
2	Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	19	1 bar	8 h bei 120 °C
3	Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	13	1 bar	8 h bei 120 °C
4	Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	13	3 bar	8 h bei 120 °C
5	Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	23	1 bar	15 h bei 140 °C
6	Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	19	1 bar	15 h bei 140 °C
7	Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	13	1 bar	15 h bei 140 °C
8	Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	13	3 bar	15 h bei 140 °C

Tabelle 4.6 Probenherstellung

4.2 Experimentelle Prüf- und Untersuchungsmethoden

Für die Gefügecharakterisierung und die Ermittlung von Fehlstellen wird das materialografische Verfahren Lichtmikroskopie (LM) ausgewählt.

Zur Bestimmung des Faservolumenanteils und des Porengehaltes dienen die Ermittlung der Dichte (DB), die thermogravimetrische Analyse (TGA) und die Analyse der lichtmikroskopischen Aufnahmen.

Die gewählten mechanischen Prüfverfahren dienen der vergleichenden Messung der mechanischen Eigenschaften. Die Bestimmung der Biegeeigenschaften erfolgt mittels Vier-Punkt-Verfahren (4P-Bieg). Der Biegeversuch wird bei einigen Proben ergänzt durch akustische Emissionsmessungen (AE). Mit der Kurzbiegeprüfung oder short beam shear test (SBS) wird die Interlaminare Scherfestigkeit geprüft. Die Bruchflächen ausgewählter Proben werden im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht.

Da die Warmfestigkeit des Harzes eine besonders wichtige Eigenschaft darstellt, wird der Glasübergang mit allen drei gebräuchlichen Methoden wie in [1] beschrieben ermittelt. Die Hauptmethode stellt die dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) dar. Der Steifigkeitsabfall bei erhöhter Temperatur wird auch über eine dynamisch mechanische Analyse (DMA) bestimmt. Ergänzend wird eine thermomechanische Analyse (TMA) zur Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten und des Glasübergangs durchgeführt.

Die untersuchten Materialeigenschaften und die zugehörigen Methoden sind übersichtlich in Tabelle 4.7 dargestellt.

Materialeigenschaft	Prüfmethode									
Morphologie	LM									
Porengehalt	LM			TGA						
Faservolumengehalt	LM		DB	TGA						
Fehlstellen	LM									
Faserdurchmesser	LM									
Bruchbild		REM								
Dichte			DB							
Glasübergang					DSC	TMA	DMA			
Wärmeausdehnungskoeffizient						TMA				
Steifigkeit							DMA			
Biegefestigkeit								4P-Biege		
Biegemodul								4P-Biege		
Versagensart								4P-Biege		
Schädigungsbeginn									AE	
Interlaminare Scherfestigkeit										SBS

Tabelle 4.7 Prüfmethoden

4.3 Bildgebende Untersuchungen

4.3.1 Lichtmikroskopie

Zur Charakterisierung und Beschreibung des Gefüges werden lichtmikroskopische Aufnahmen gemacht. Mit der Lichtmikroskopie wird auch nach Fehlstellen gesucht. Die Poren, ihre Form, Verteilung und der Porengehalt werden untersucht. Auch der Faservolumengehalt und der Faserdurchmesser sowie die Verteilung der Fasern sind von Interesse.

Für jedes Material werden drei quaderförmige Probenkörper aus den Platten geschnitten. Wobei darauf geachtet wird, dass eine Schnittebene normal zu den Fasern liegt, die zweite entlang der Fasern verläuft aber die Gewebelagen schneidet und die Dritte parallel zu der Oberfläche der Probenplatten liegt. Siehe dazu auch die Abbildungen im Kapitel 4.1.3.1.

Aus den Platten herausgeschnitten werden die Proben mit einem wassergekühlten Diskotom der Firma STRUERS um eine Veränderung des Materials durch Wärmeeinfluss oder zu große Schnittkräfte zu vermeiden. Diese Probenkörper werden dann in Araldit Harz eingebettet und nach dem Aushärten auf der Poliermaschine STRUERS Tegrapol-31 geschliffen und poliert. Die fünf Schritte sind in Tabelle 4.8 ersichtlich.

Schritt	Polierscheibe	Schmiermittel	Suspension	Zeit [min]	Kraft [N]	Drehzahl [U/min]
1	SiC 320	Wasser	-	2	10/30	300
2	MD-largo	Struers blue	DP-9 μ m	8	30/180	150
3	MD-dur	Struers blue	DP-3 μ m	8	30/180	150
4	MD-nap	Struers blue	DP-1 μ m	10	30/180	150
5	MD-chem	Wasser	-	2	10/30	150

Tabelle 4.8 Polierprogramm

Nach jedem Schritt, werden die Proben mit Wasser und im Ultraschallbad gereinigt. Danach werden die Proben in einem Zeiss Axioplan Lichtmikroskop untersucht und vermessen. Die Proben werden mit einfachem Hellfeld beleuchtet und aufgenommen.

4.3.2 REM-Mikrofraktografie

Die Mikrofraktografie wird an den Bruchflächen bereits geprüfter, ausgewählter Proben des vier Punkt Biegeversuches und der Short Beam Shear Tests durchgeführt. Sie dient der genauen Analyse des Bruchverhaltens und auch der Suche von Fehlstellen, welche bruchauslösend gewesen sein könnten.

4.3.2.1 Rasterelektronenmikroskopie

Nach sorgfältiger Freilegung der Bruchfläche wird diese mit einer dünnen Goldschicht besputtert, um ausreichende elektrische Leitfähigkeit herzustellen. Danach werden sie mit einem Rasterelektronenmikroskop Modell Philips XL30SE untersucht. Es werden die durch den Primärelektronenstrahl im Material ausgelösten Sekundärelektronen herangezogen, die aufgrund ihrer geringen Entstehungstiefe eine gute Darstellung der Oberfläche zulassen.

4.4 Physikalische und thermische Prüfung

4.4.1 Dichtebestimmung

Laut [11] kann der Faservolumenanteil auch aus der Dichte der Verbundmaterialien berechnet werden, wenn die Dichte der Einzelkomponenten bekannt ist. Darum werden die Dichtewerte aller Verbundmaterialien und des Biresin CR123 Harzes bestimmt. Die Dichte der Fasermaterialien sowie des Laminierharzes L418 der Firma Hexion ist aus den Datenblättern (siehe Kapitel 0) bekannt.

Aus dem Material werden exakte Quader geschnitten und mittels dreimaligen Messens der Länge, Breite und Höhe mit einem Messschieber das Volumen ermittelt. Dann werden die Probenkörper auf einer Analysewaage gewogen und die Dichte aus dem Verhältnis Masse pro Volumen berechnet. Um ausreichende Genauigkeit zu erzielen, werden mindestens fünf Proben pro Material gemessen. Aus den ermittelten Dichtewerten lassen sich, unter Annahme der Porenfreiheit, nach Formeln 4.1 und 4.2 ein Faser- und Matrixvolumenanteil berechnen.

$$\text{-----} \quad 4.1$$

$$\text{-----} \quad 4.2$$

$$4.3$$

W_f...Fasermassenanteil;
ρ_M...Matrixdichte;

ρ_F...Faserdichte;
V_f...Faservolumenanteil;

ρ_V...Verbunddichte;
V_m...Matrixvolumenanteil

4.4.2 Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Auch die thermogravimetrische Analyse dient der Ermittlung des Faservolumengehalts, hier kann aber zusätzlich der Porengehalt bestimmt und berücksichtigt werden. Die Ergebnisse werden also wesentlich genauer. In einem Ofen wird unter Schutzatmosphäre und ständigem Wiegen der Probe das Harz ausgedampft, während die Fasern im Probentiegel zurückbleiben.

Nach dem Trieren der Prüfwage wurde ein Probenkörper von maximal 6x6mm Grundfläche in den Messtiegel gegeben, dieser an die Waage gehängt und der Ofen geschlossen. Der Probenkörper wird mit 10 K pro Minute auf 800 °C erhitzt. Als Spülgas dient Stickstoff. Das Gewicht der Probe wird während des Aufheizvorganges ständig gemessen.

Laut [12] werden die gemessenen Massenanteile mit Formeln 4.4 und 4.5 in Volumenanteile umgerechnet. Da der Massenanteil der Poren unabhängig vom Porengehalt null beträgt, lässt sich jetzt der Porenvolumenanteil nach Formel 4.6 ermitteln.

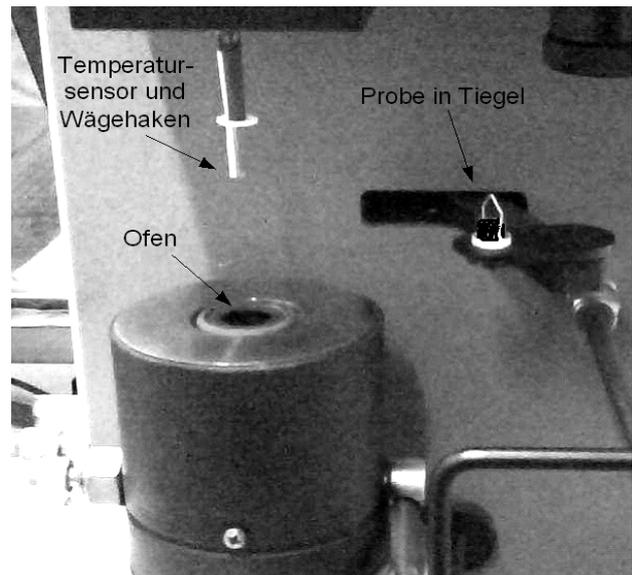


Abbildung 4.10 TGA Gerät mit Probe

— 4.4

— 4.5

4.6

W_f ...Fasermassenanteil;

ρ_V ...Verbunddicke;

W_m ...Matrixmassenanteil;

V_f ...Faservolumenanteil;

V_m ...Matrixvolumenanteil;

V_p ...Porenvolumenanteil.

ρ_F ...Faserdichte;

ρ_M ...Matrixdicke;

4.4.3 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Um die beiden Harzsysteme vergleichen zu können, ist neben den mechanischen Kennwerten der Verbundmaterialien die Warmfestigkeit von besonderem Interesse. Diese wird durch den Glasübergang der Epoxidharze beschränkt. Zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur werden dynamische Differenzkalorimetrie Messungen durchgeführt. Nach [13] wird mithilfe der Kalorimetrie die Wärmemenge bestimmt, die bei einer physikalischen oder chemischen Umwandlung eines Stoffes aufgebracht werden muss oder entsteht.

4.4.3.1 Messprinzip der DWDK

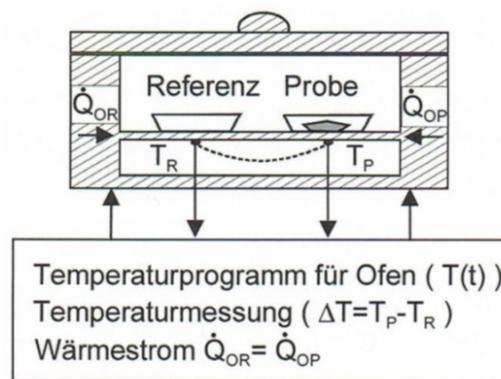


Abbildung 4.11 Wärmestrom Differenz Kalorimeter aus [13]

Bei der Dynamischen Wärmestrom Differenzkalorimetrie (DWDK) besteht die Messzelle aus einem Ofen, in dem Probe und Referenz zusammen nach einem vorgegebenen Temperaturprogramm aufgeheizt werden. Die Temperatur beider Messstellen wird kontinuierlich gemessen. Bei physikochemischen Vorgängen in der Probe tritt eine Temperaturdifferenz zwischen Probe und Referenz auf. Aus dieser lässt sich die Wärmestromänderung berechnen.

4.4.3.2 Temperaturmodulierte DSC (TMDSC)

Im Bereich der Glasübergangstemperatur treten bei Epoxidharzen auch Nachhärtungsreaktionen auf. Während der Glasübergang ein endothermer, reversibler Vorgang ist, ist das Nachhärten ein exothermer, irreversibler Vorgang. Durch die Überlagerung der beiden Vorgänge in der Ergebniskurve der DSC ist der Glasübergang nicht genau zu erkennen. Abhilfe schafft hier die temperaturmodulierte DSC, mit ihr ist es möglich reversible Vorgänge und irreversible Vorgänge getrennt darzustellen. Abbildung 4.12 zeigt typische Ergebniskurven einer TMDSC von Epoxidharz. Für die Messung des Glasübergangs ist die reversible Wärmestromkurve von Interesse.

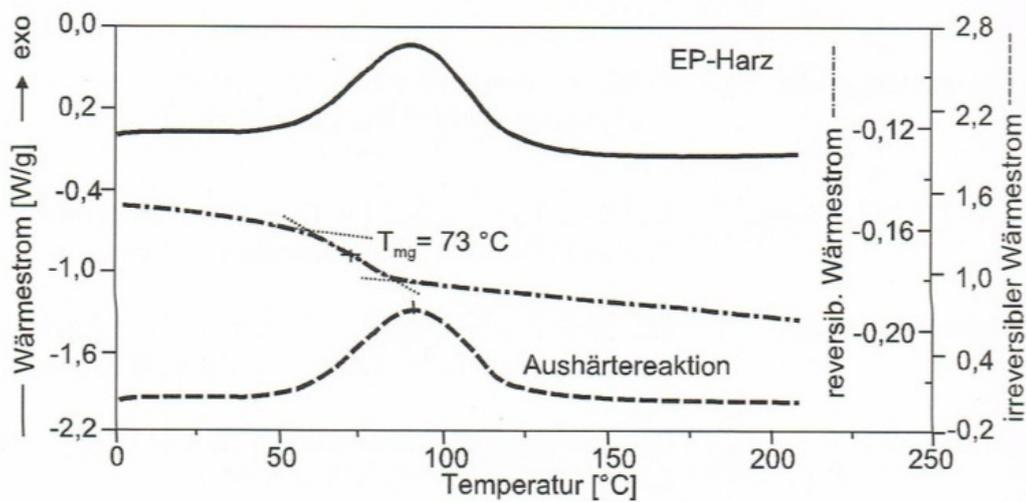


Abbildung 4.12 Nachhärtereaktion und Glasübergang eines EP-Harzes in der TMDSC [13]

4.4.3.3 Probenauswahl und Präparation

Es werden 33 Proben des Harzes Biresin CR132 der Firma Sika und 12 Proben des Harzes Laminierharz L418 der Firma Hexion gemessen. Von den Biresin CR132 Proben entfallen 11 auf Reinharzwürfel und 12 auf Harz, welches aus dem Rand der Faserverbundplatten entnommen wird. Bei diesen Proben sind die Einwaagemengen zwischen 7 mg und 10 mg, sie werden mit leeren Referenzproben Tiegel gemessen. Vom Laminierharz L418 stehen keine Reinharzproben zur Verfügung, es werden deshalb Proben des gesamten Verbundmaterials hergestellt, jeweils drei pro Material. Diese sind ca. 30 mg schwer, was einem Harzgewicht von 6 mg bis 10 mg und einem Fasergewicht von 18 mg bis 34 mg, je nach Faservolumenanteil entspricht. Da der Glasübergang des Harzes gesucht ist, aber keine Eigenschaften der Faser, ist zu befürchten, dass die in den Proben enthaltenen Fasern das Ergebnis verfälschen. Da in diesem Verfahren immer eine Wärmestromdifferenz zwischen Proben Tiegel und Referenz Tiegel gemessen wird, ist es naheliegend zur Eliminierung der Fehlerquelle, einen Referenz Tiegel herzustellen, welcher die gleiche Faser Masse enthält wie die Proben. Der Faserreferenz Tiegel ist mit 18 mg Carbonfaser FT300B-3000-40B der Firma Torayca gefüllt. Tabelle 4.1 zeigt für jedes Material wie viele Proben mit leerem, und wie viele mit Faserreferenz Tiegel gemessen werden.

No.	Material	Leerer Ref. Tiegel	Ref Tiegel mit Faser
	Sika Biresin CR132 Reinharzwürfel	11	
1	Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	2	
2	Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	2	
3	Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	2	
4	Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	6	
5	Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	1	2
6	Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	1	2
7	Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	1	2
8	Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	1	2

Tabelle 4.9 Probenanzahl DSC Messungen

Die Messungen werden mit einem Gerät der Firma TA Instruments Modell Q2000 durchgeführt. Als Spülgas dient Stickstoff.

4.4.3.4 Messbereich und Heizrate

Es wird ein Glasübergang von ca. 130 °C erwartet. Der Messbereich wird deshalb von 30°C bis 250°C gewählt. Vorerst wird eine Probe des Epoxidharzes Biresin CR 132 mit nicht modulierter DSC mit einer Heizrate von 10 K pro Minute gemessen. Da durch die überlagerte Nachhärtreaktion der Glasübergang schlecht sichtbar ist, werden die restlichen Messungen mit TMDSC durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit der Messungen mit dem Datenblatt und untereinander sicherzustellen, wird die Messmethode des Harzherstellers übernommen. Die Heizrate beträgt 3 K/min, die Modulationsamplitude 1 °C mit einer Modulationsperiode von 60 sec.

4.4.4 Thermomechanische Analyse (TMA)



Abbildung 4.13 Messaufbau TMA

Zur Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten in alle drei Richtungen wird eine thermomechanische Analyse durchgeführt. Dabei wird die Längenänderung des Materials in eine Richtung gemessen, während es in einem Ofen aufgeheizt wird.

Aus den Probeplatten wurden mit dem Diskotom quaderförmige Proben so herausgeschnitten, dass die drei Messrichtungen sich an der Faserrichtung orientieren. Bei den unidirektionalen Materialien misst die erste Richtung den Ausdehnungskoeffizienten in Faserlängsrichtung, steht also im rechten Winkel auf die sogenannte Ebene 3 aus Kapitel 4.1.3.1, die Zweite misst quer zur Faser und zu Ebene 2 und die Dritte misst in Dickenrichtung der Platte also im Rechten

Winkel auf die Gewebelagen und Ebene 1. Analog gilt die für die Materialien mit dem 0/90 Gewebe, nur dass Richtung eins und zwei jeweils auf eine Faserrichtung quer stehen und parallel zur anderen sind. Die Proben werden mit einer Heizrate von 3 K/min von 0 °C bis 200 °C aufgeheizt, danach auf 0 °C abgekühlt und abermals mit 3 K/min bis 200 °C aufgeheizt. Die Last war konstant entweder 0,05 N oder 0,1 N. Der Messaufbau im Inneren des Ofens mit einer Probe und Messstempel ist in Abbildung 4.13 ersichtlich. Von den vorhandenen Materialien werden jene Vier mit dem Harz Biresin CR132 der Firma Sika in alle drei Richtungen gemessen, sowie eine Reinharzprobe der Firma Sika.

4.4.5 Dynamisch Mechanische Analyse (DMA)

Nach [13] liefert die Dynamisch Mechanische Analyse (DMA) Informationen über den Verlauf mechanischer Eigenschaften unter geringer, meist sinusförmiger dynamischer Belastung als Funktion der Temperatur, Zeit und/oder der Frequenz. Der bei dieser Methode neben anderen Größen ermittelte Speichermodul E' stellt die Steifigkeit eines viskoelastischen Werkstoffs dar. Bei Erhöhung der Temperatur durchläuft das Material, wie bereits erwähnt, den Glasübergang. In diesem Temperaturbereich fällt der Speichermodul der Matrix sehr stark ab. Damit sinkt die Steifigkeit des gesamten Verbundmaterials. Wie in [13] für faserverstärkte Kunststoffe empfohlen, werden die Proben mit einer 3-Punkt-Biege Anordnung wie in Abbildung 4.14 gemessen.

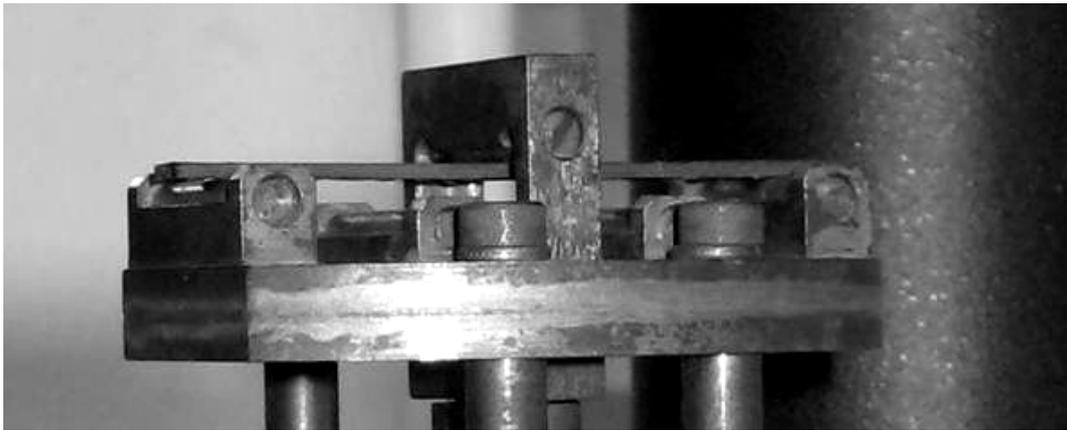


Abbildung 4.14 Messaufbau DMA

Aus den Probepplatten werden balkenförmige Proben mit rechteckigem Querschnitt herausgearbeitet. Die Verstärkungsfasern liegen parallel zur Balkenlängsachse. Die Länge der Proben beträgt 60 mm, der Auflagerabstand 50 mm. Die Breite und Höhe der Proben werden so gewählt, dass die Maximalkraft 15 N nicht übersteigt. Sie sind in Tabelle 4.10 angeführt. Die Auslenkungsamplitude beträgt 70 μm und die Frequenz 1 Hz.

Material	Breite [mm]	Höhe [mm]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	6,5	2,0
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	4,1	1,8
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	4,1	1,4
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	4,1	1,6
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	8,5	1,8
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	4,8	2,1
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	3,6	1,8
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	4,0	1,8

Tabelle 4.10 Probenabmessungen DMA

Die Proben wurden im mit Stickstoff gespülten Ofen von Raumtemperatur mit einer Heizrate von 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ auf 200 $^{\circ}\text{C}$ aufgeheizt. Es werden 2 Proben pro Material vermessen und der Speichermodul bei Raumtemperatur, sowie die Glasübergangstemperatur bestimmt.

4.5 Ermittlung mechanischer Kennwerte und Eigenschaften

4.5.1 Biegeversuche

Da die mechanische Prüfung im Rahmen dieser Arbeit eher dem Vergleich der Materialien untereinander und mit Materialien mit bereits etablierten Harzsystemen (z. B. Laminierharz L285) dient, wurde der einfach durchzuführende Biegeversuch gewählt. Nach EN ISO 14125 [14] kann der Biegeversuch mit einer 3- oder 4-Punkt-Auflage durchgeführt werden.

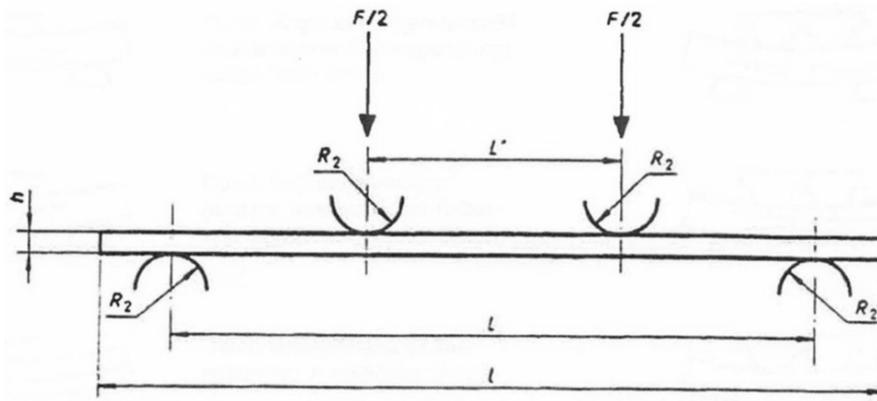


Abbildung 4.15 4-Punktverfahren nach [14]

F ...Prüfkraft	L' ...mittlere Stützweite	L ...Stützweite
l ...Probenlänge	R_2 ...Auflagerradius	h ...Probendicke

Der Vorteil der 4-Punkt-Biegeprüfung darin, dass das Biegemoment zwischen den oberen Auflagern längs der mittleren Stützweite L' konstant bleibt, und in diesem Bereich fast keine Schubkräfte auftreten. Dies ist zur Bestimmung des gesuchten Biegemoduls und der Biegefestigkeit besonders günstig.

Der Biegeversuch wird in Anlehnung an EN ISO 14125 [14] durchgeführt. Die Probenabmessungen und Einspannlängen werden aber gleich gewählt wie beim Probenhersteller bereits früher durchgeführten Prüfungen mit den gleichen Fasern und Geweben, aber anderen Harzen. Tabelle 4.11 zeigt die Lagenanzahl der Proben, die Mittelwerte der Probendicke, -breite und -länge und die Abmessungen des Versuchsaufbaus. Diese unterscheiden sich bei jedem Material, da vor der Produktion der laminierten Platten, aus denen die Proben dann ausgeschnitten wurden die Lagenanzahl festgelegt wurde und sich die Dicke daraus ergeben hat. Die mittlere Stützweite L' betrug immer 50 mm und die Auflagerradien R_2 waren 5 mm. Die Auflagern hatten bewegliche Rollen.

Material	Lagen	h [mm]	b [mm]	l [mm]	L [mm]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	23	5,9	20,2	180	150
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	19	5,3	20,1	220	190
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	13	4,7	20,2	220	190
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	13	4,5	20,2	220	190
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/1 bar	23	5,3	20,3	180	150
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	19	5,1	20,1	220	190
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/1 bar	13	4,3	20,4	220	190
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/3 bar	13	4,2	20,4	220	190

Tabelle 4.11 Probengeometrie und Versuchsaufbau

Passend zu den Probenabmessungen wird die Traversengeschwindigkeit mit 10 mm/min gewählt. Nach einigen Vorversuchen zur Absicherung des Aufbaus und der Probengeometrie werden mindestens 6 Proben pro Material mit einmaliger Belastung bis zum Versagen der Probe geprüft und dabei der Biegemodul und die Biegefestigkeit ermittelt. Bei den Materialien mit dem Biresin CR132 Harz werden zusätzlich einige Proben mehreren Lastzyklen unterworfen, um eine etwaige Steifigkeitsänderung unter wechselnder Last zu erkennen.

Da bei faserverstärkten Materialien im Gegensatz zu Metallen verschiedene Versagensarten auftreten können, ist auch wie in [14] die Beobachtung und Dokumentation der Versagensart erfolgt. Die Biegeprüfung wird auf einer Universal Prüfmaschine der Firma Zwick Roell mit einer maximalen Kraft von 50 kN bei Raumtemperatur durchgeführt. Der genaue Aufbau ist in Abbildung 4.16 zu sehen.

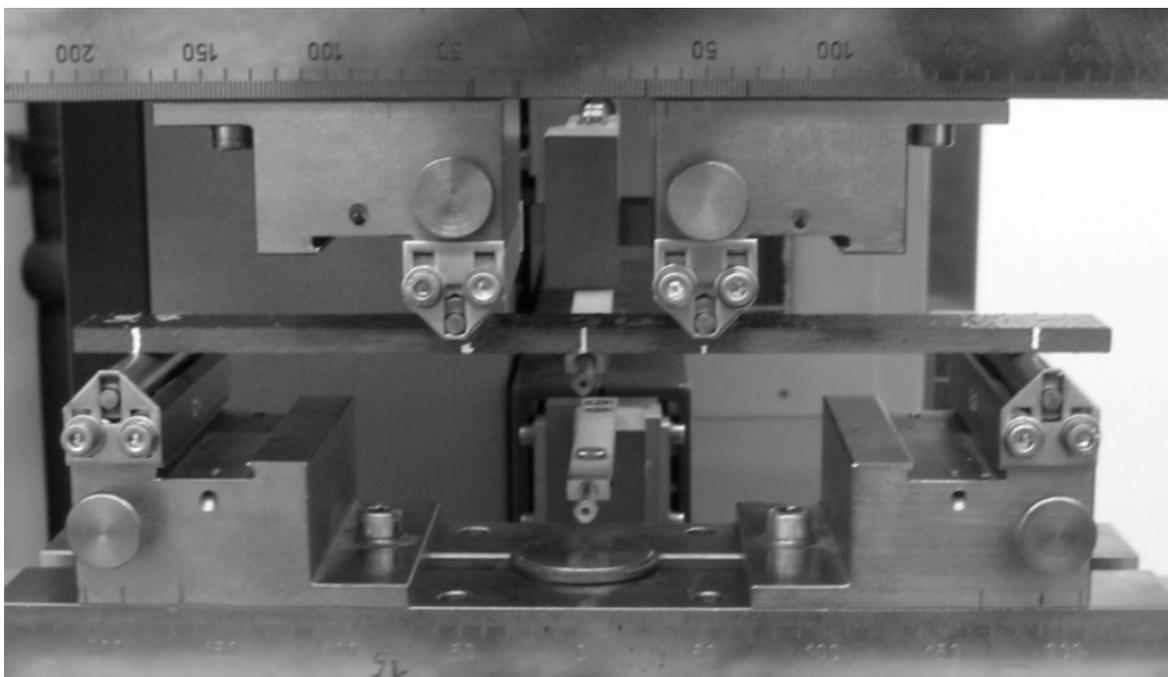


Abbildung 4.16 4-Punkt-Biegeversuch

4.5.2 Akustische Emissionsmessung

Ergänzend zu den Biegeversuchen mit wechselnder Last wird während der Prüfung einiger Proben mit Biresin CR132 Harz eine Akustische Emissions Messung durchgeführt. Jedes Mikromaterialversagen löst eine Schallwelle im Material aus. So lässt sich damit Identifizieren ab welcher Last Mikrorisse im Harz, erste Faserrisse oder kleine Delaminationen auftreten. Damit ist es möglich den Schädigungsbeginn schon vor Auftreten von makroskopisch hör- und sichtbaren Schäden, und vor einem Kraftabfall aufgrund von Schädigung festzustellen und den Schädigungsfortschritt zu beobachten.

Zur Aufnahme und Auswertung der Schallwellen wurde das DAKEL-XEDO-3 AE System mit einem verkleinerten MST8S piezoelektrischen Sensor eingesetzt. Als schallübertragendes Medium zwischen Probe und Sensor dient Silikonpaste. Die Messfrequenz beträgt 4 MHz, die Bandbreite des Messsystems 100 bis 600 kHz, die Gesamtempfindlichkeit des Messsystems 87 dB. Die Anzahl der detektierten AE Ereignisse pro Sekunde wird im Verhältnis zur anliegenden Last bestimmt und ausgewertet.

4.5.3 Kurzbiegeversuch

In sehr kurzen und dicken Biegeproben treten starke Scherspannungen auf. Darum kann mit dem Kurzbiegeversuch nach [15] die Interlaminare Scherfestigkeit (ILS) bestimmt werden. Diese ist eine Werkstoffeigenschaft, die besonders stark von der Festigkeit des Harzes und der Interfaceigenschaften zwischen Harz und Faser beeinflusst wird. Darum ist ihre Größe eine qualitative Aussage über die Harzqualität und die Kompatibilität der Harz und Fasermaterialien. Der Kurzbiegeversuch wird in Anlehnung an ASTM D2344 [16] und DIN EN 2563 durchgeführt.

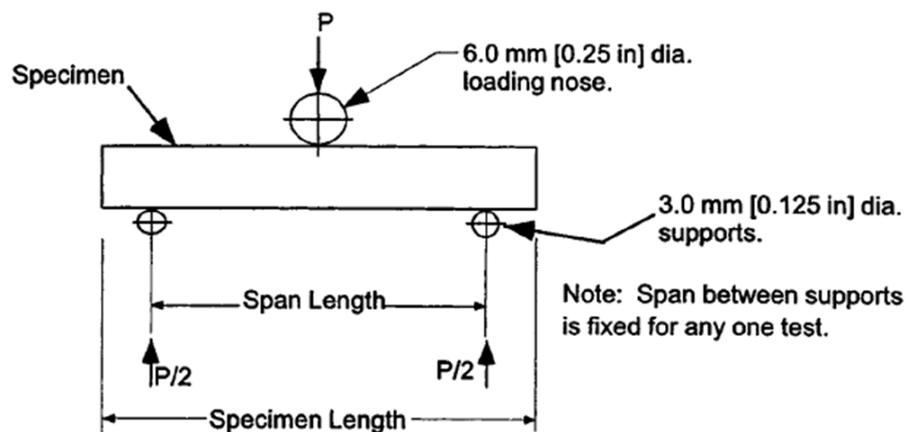


Abbildung 4.17 Aufbau SBS nach [16]

Er ist im Prinzip aufgebaut wie ein 3-Punkt-Biege Test, aber die Einspannlänge ist im Verhältnis zur Probendicke wesentlich kleiner, siehe Abbildung 4.18. In Tabelle 4.12 werden die Probendicke h , die Probenbreite b und die Einspannlänge L für alle Materialien angeführt. Die Auflagerradien betragen unten 1 mm und am Biegestempel 3 mm.

Material	h [mm]	b [mm]	L [mm]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/1 bar	5,9	11,9	24
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/1 bar	5,3	10,0	21
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar	4,7	9,9	19
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/3 bar	4,3	8,9	17
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/1 bar	4,8	12,3	20
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/1 bar	4,9	11,2	20
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/1 bar	4,3	10,3	18
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/3 bar	4,1	8,9	16

Tabelle 4.12 Probengeometrie und Einspannlänge SBS

Die Traversengeschwindigkeit beträgt 1 mm/min. Es wird bei Raumtemperatur, auf derselben Prüfmaschine wie auch im 4-Punkt-Biegeversuch geprüft. Pro Material wurden 6 Proben vorbereitet.

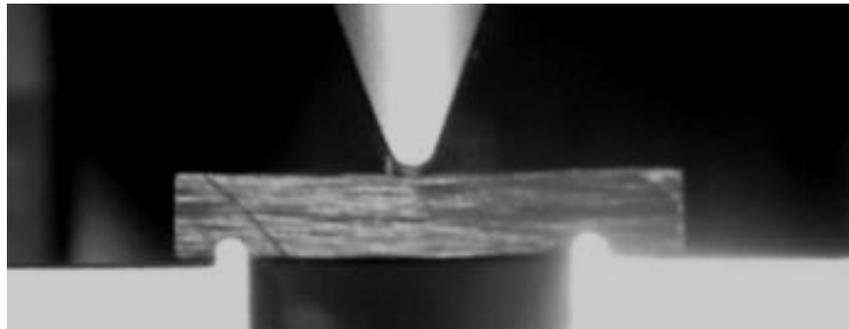


Abbildung 4.18 Aufbau SBS mit Probe

Nach der Prüfung wird aus der ermittelten Maximalkraft die Short Beam Shear Strength nach Formel 4.7 und Interlaminare Scherfestigkeit nach DIN EN 2563 mit Formel 4.8 berechnet.

$$\text{---} \quad 4.7$$

$$\text{-- ---} \quad 4.8$$

F^{sbs} ...Short Beam Shear Strength nach [16];

F_{ILS} ...Interlaminare Scherfestigkeit nach [15];

F_{max} ...maximale Kraft

b ...Probenbreite

h ...Probenhöhe

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen präsentiert. Es sei hier erwähnt, dass die Streuung von Messwerten bei Faserverbund immer größer sein wird als bei homogenen Werkstoffen und darauf im Normalfall auch beim Ermitteln von Dimensionierungskennwerten und Festlegen von notwendigen Sicherheiten eingegangen wird. Darum wird im Rahmen dieser Arbeit auch versucht, mit einer ausreichend großen Anzahl an Materialien und Proben repräsentative Durchschnittswerte zu ermitteln. Darum wird hier nicht jedes einzelne Messergebnis präsentiert, es werden die Durchschnittswerte angeführt und falls es notwendig erscheint eventuell auftretende Abweichungen von diesen. Bei den bildgebenden Untersuchungsmethoden werden vor allem besondere und bemerkenswerte Ausschnitte der Materialien gezeigt.

5.1 Bildgebende Untersuchungen

5.1.1 Lichtmikroskopie

Die Aufnahmen geben Aufschluss über die Verteilung der Fasern und des Harzes, über Größe und Form sowie Verteilung der Poren. Eventuelle Einschlüsse, eine Fasermisorientierung oder andere Fehlstellen können auch identifiziert werden. Die in den Beschriftungen der Abbildungen angegebenen Seiten der Probenkörper entsprechen den in Kapitel 4.1.3 beschriebenen. In diesem Kapitel werden nur wenige ausgewählte Abbildungen bei verschiedenen Auflösungen mit Interpretation gezeigt und dabei auf den Materialaufbau sowie besonders auf die gefundenen Fehlstellen und Poren eingegangen. Ergänzend werden im Anhang A von allen Materialien jeweils 1 Bild jeder Hauptseite gezeigt. Da es wegen Porenform und Schattenwurf nicht möglich ist verlässliche Porengehalte aus den Aufnahmen zu ermitteln wird hier nur die Qualität der Poren beschrieben. Die Quantität der Poren als Porenvolumengehalt wird mittels TGA, siehe Kapitel 4, bestimmt.

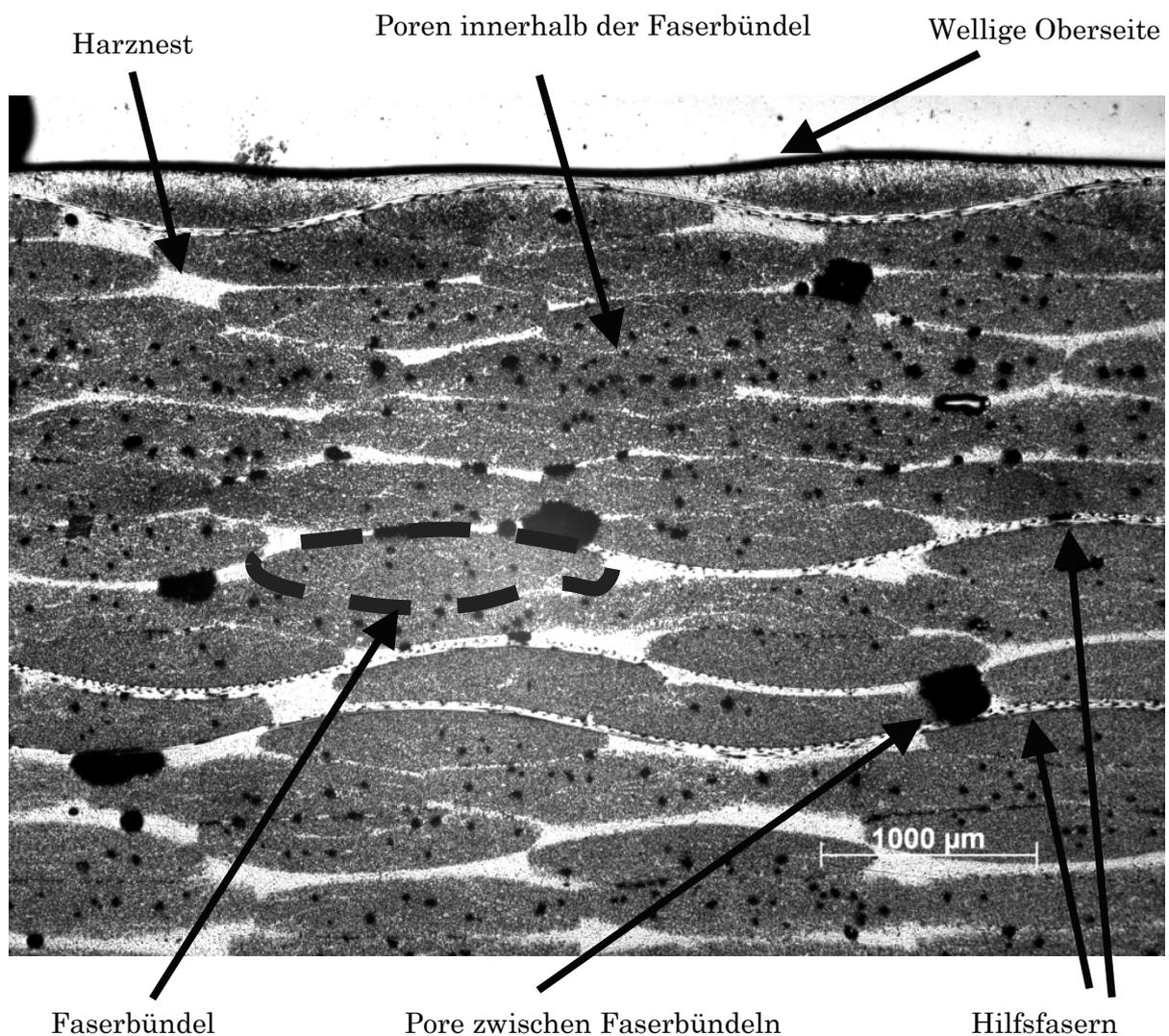


Abbildung 5.1 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 1

Abbildung 5.1 zeigt einen Schliff normal zur Hauptfaserrichtung des Materials Ep-Sik/ C-HTA40/ UD/ 1 bar. Schon bei dieser geringen Auflösung kann man die grauen Faserbündel deutlich voneinander abgrenzen, auch die Welligkeit der Oberfläche ist klar erkennbar. Zwischen den Bündeln sammelt sich das hell erscheinende Harz in größeren Harznestern und Harzbahnen. Wenn die Hohlräume zwischen den Bündeln nicht gut ausgefüllt werden, dann bilden sich hier besonders große Poren. Innerhalb der Faserbündel treten auch Poren auf, sie sind aber wesentlich kleiner. Auch die querliegenden Hilfsfasern aus Glas sind gut erkennbar.

Einen Schliff entlang der Hauptfaserrichtung des Materials Sik/ C-HTA40/ UD/ 1 bar sieht man in Abbildung 5.2. Die Karbonfasern erscheinen sehr hell, die Matrix grau und die Poren schwarz. Klar erkennbar ist die Welligkeit der Hauptfasern. Nach Betrachtung der Seite zwei wird klar, dass die Poren in den Harznestern und zwischen den Faserbündeln, welche bei Seite eins annähernd kreisförmig erscheinen teilweise kugelförmige und teilweise ellipsoidische Form haben. Die Poren innerhalb der Faserbündel sind wesentlich länger als ihr Durchmesser. Auch die Hilfsfasern aus Glas sind schwach erkennbar.

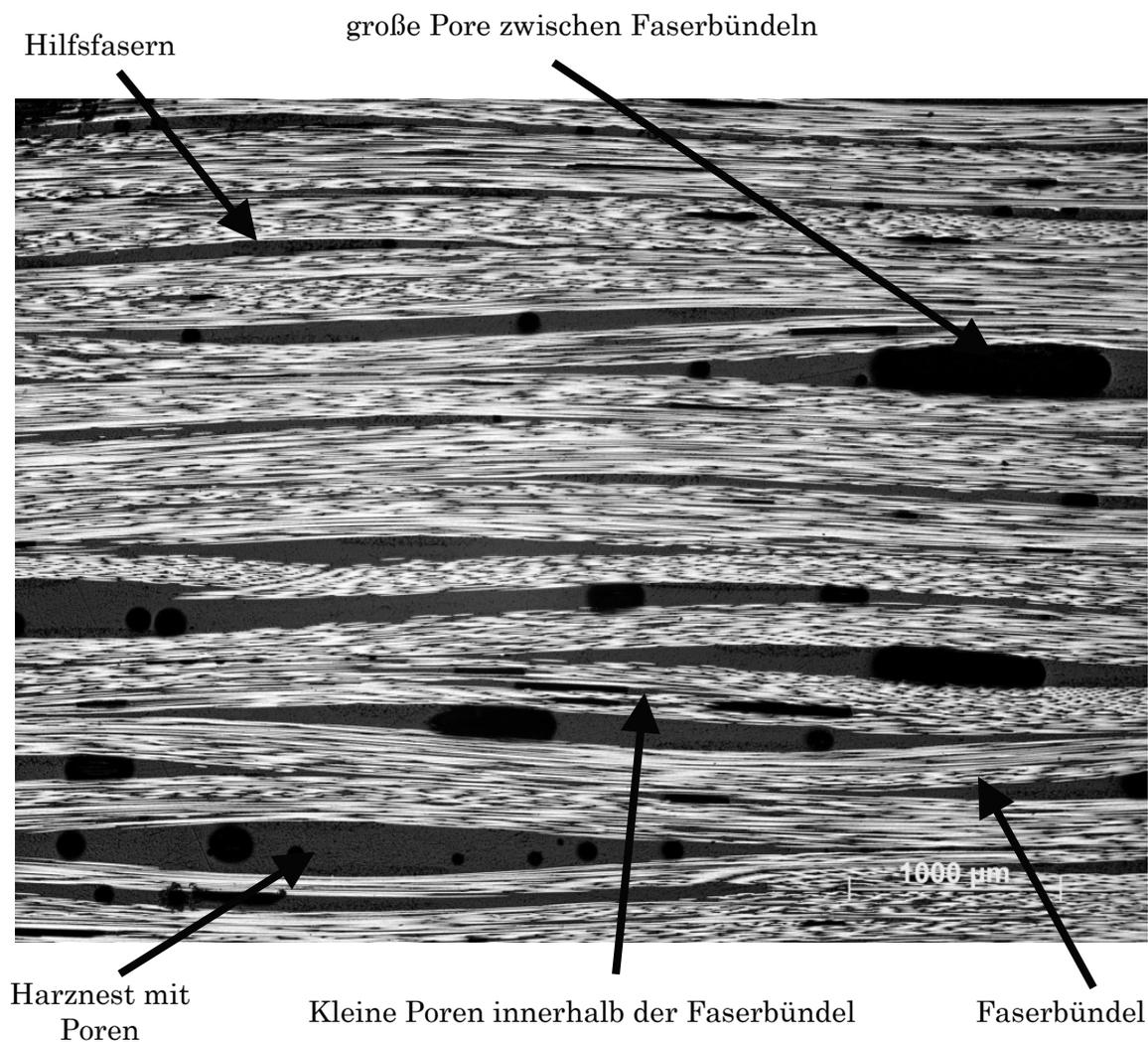


Abbildung 5.2 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 2

Bei höherer Auflösung treten weitere Details zutage. Abbildung 5.3 zeigt das Material Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar, genauer gesagt einen Bereich, in dem drei Faserbündel aneinanderliegen. Der gezeigte Bereich enthält eine große Pore zwischen den Faserbündeln. Innerhalb der Faserbündel wird die Verteilung von Fasern und Harz sichtbar. Sie ist nicht ganz gleichmäßig, ein paar kleine Poren finden sich auch hier. Auch die Hilfsfasern und die schon vorher erwähnten Harznester sind gut zu sehen. Da die Fasern quer geschnitten sind, erscheinen sie kreisförmig.

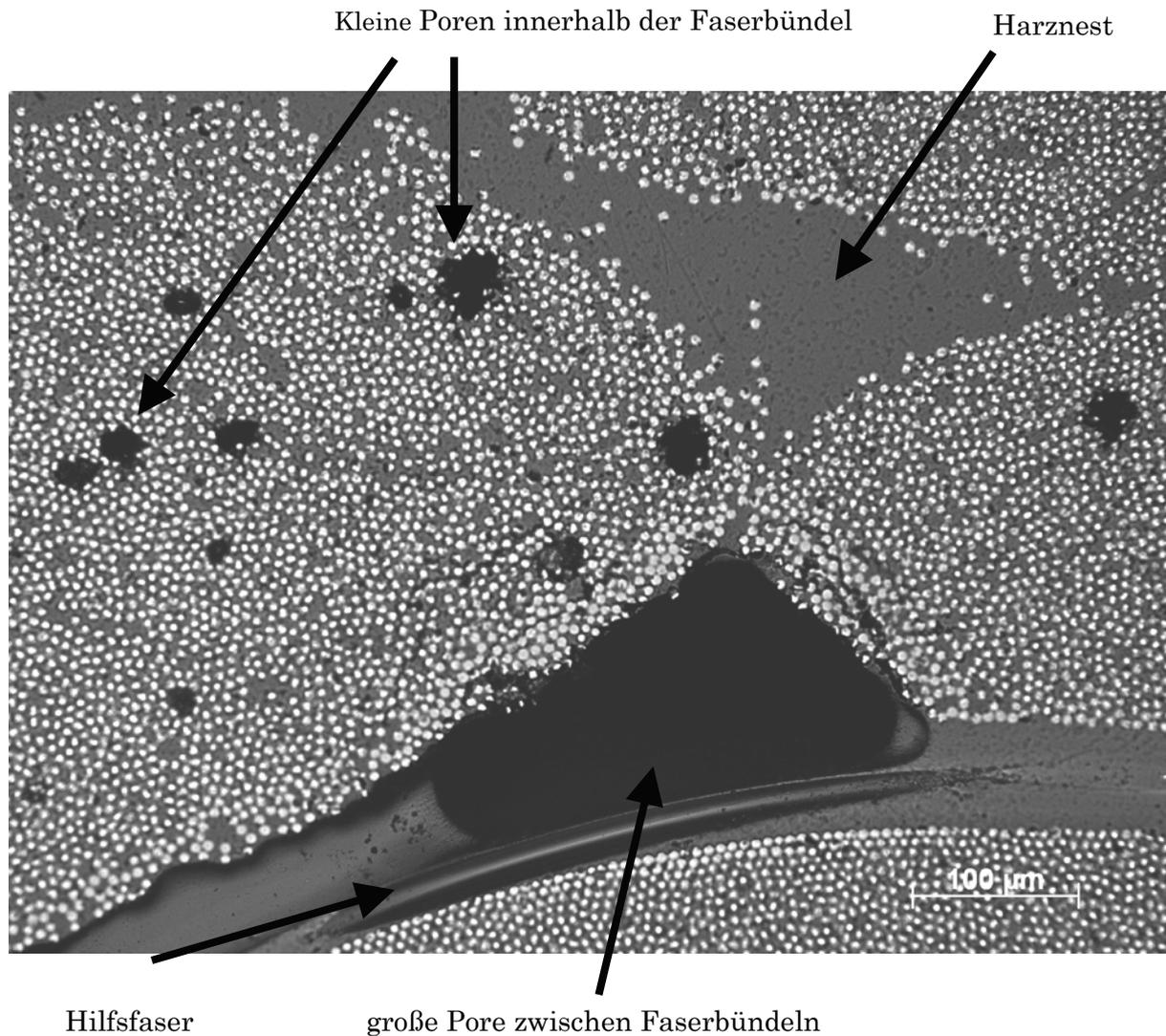


Abbildung 5.3 Ep-Sik/ C- HTS5631/UD / 1 bar, Seite 3

5.1.1.1 Fehlstellen

In den untersuchten Materialien wurden folgende Fehlstellen gefunden:

- Trockene Bereiche

Teilweise sind im Material Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar die Fasern über große Bereiche nicht benetzt, was zu trockenen Bereichen führt. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 5.4 im Detail. Bei geringerer Auflösung sind diese trockenen Bereiche an ihrer dunklen Färbung zu erkennen. In Abbildung A.1 sieht man rechts unten ein sehr dunkles Faserbündel und auch in Abbildung A.2 links auf 2/3 Höhe sind trockene Bereiche zu sehen.

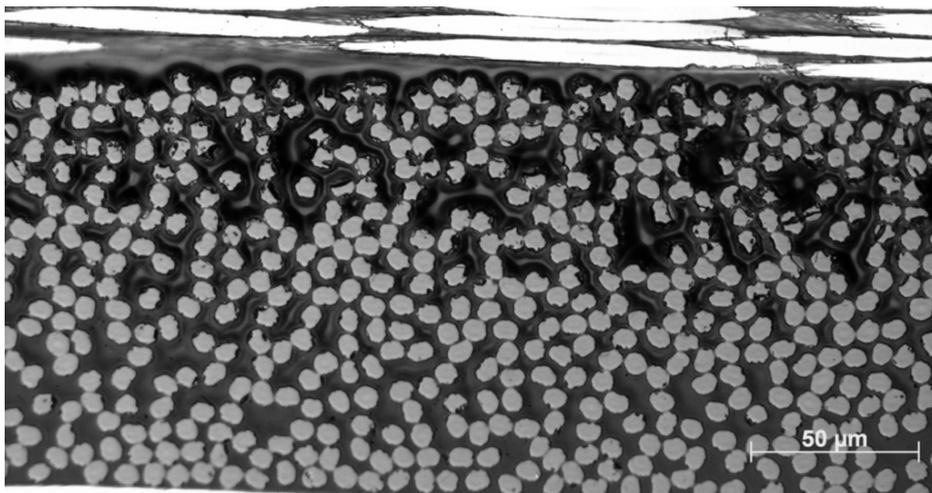


Abbildung 5.4 trockene Stelle

- Seitliche Gewebeabschlüsse

Die Gewebe müssen seitlich durch Hilfsfasern abgeschlossen werden. Da diese Seitenränder vor dem Laminieren nicht entfernt werden sind sie auch in den Laminaten vorhanden. Besonders oft kann man sie in den Proben finden, welche mit den als 10 cm breites Band verwebten Fasern Tenax-E HTS 5631 hergestellt wurden. Einen solchen seitlichen Gewebeabschluss des Gewebes aus den Fasern FT300B-3000-40B zeigt Abbildung 5.5

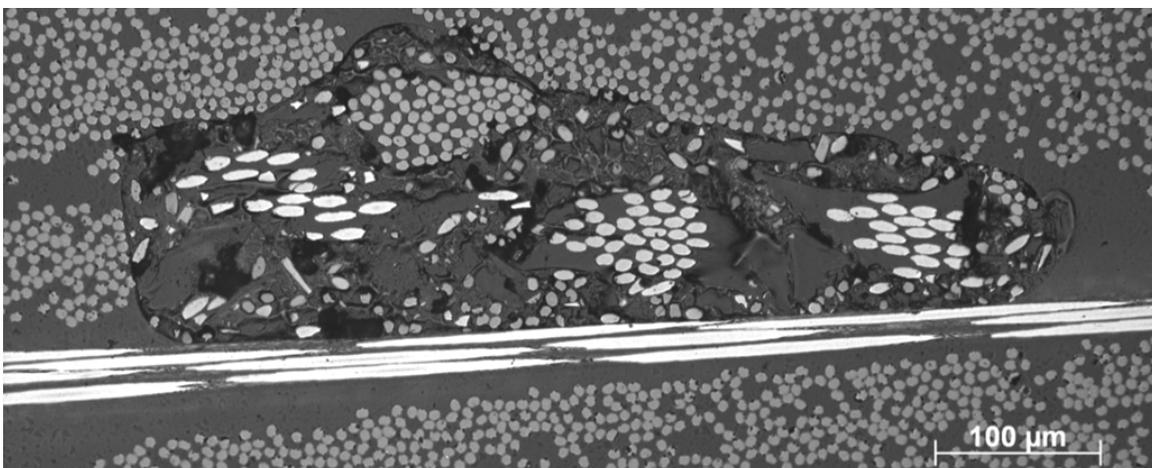


Abbildung 5.5 Gewebeabschluss

- Poren innerhalb der Faserbündel

Bei allen Materialien, welche nur mit Atmosphärendruck von 1 bar ausgehärtet wurden, sind Poren innerhalb der Faserbündel zu sehen. Diese haben einen sehr kleinen Durchmesser und schmiegen sich länglich entlang der Fasern. Als Beispiel ist hier ein Detail aus dem Material Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar in Anhang A und aus Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar in Abbildung 5.6 gezeigt. Diese Poren gruppieren sich oft entlang der Bündelmitte.

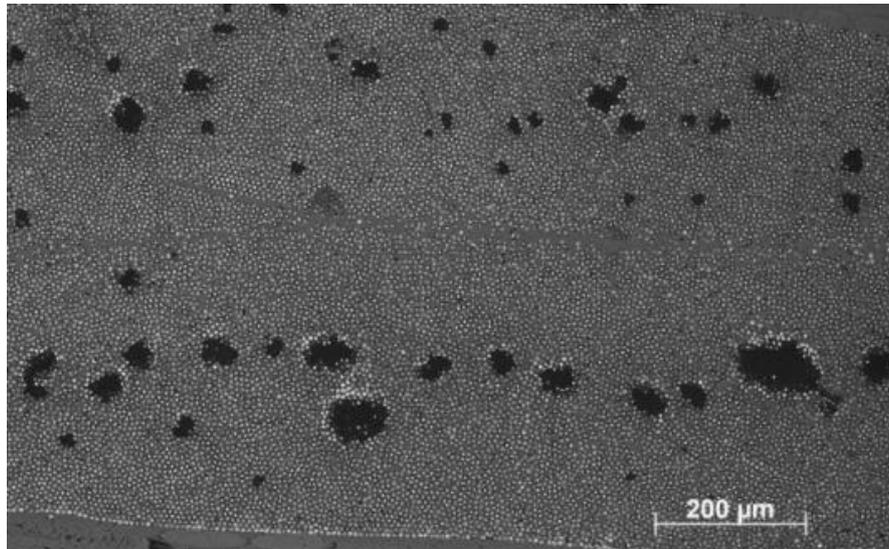


Abbildung 5.6 Poren in Bündelmitte

- Poren zwischen den Faserbündeln

Wie bereits erwähnt sind die Poren im Bereich zwischen den Faserbündeln besonders groß. In Abbildung 5.7 ist eine Pore von 1,9 mm Länge aus dem Material Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 zu sehen. Wie in den Abbildungen des Anhang A zu sehen, enden diese Poren meist an den Grenzen der Faserbündel. Manchmal gehen sie aber auch in die angrenzenden, schlecht benetzten Faserbündel hinein.

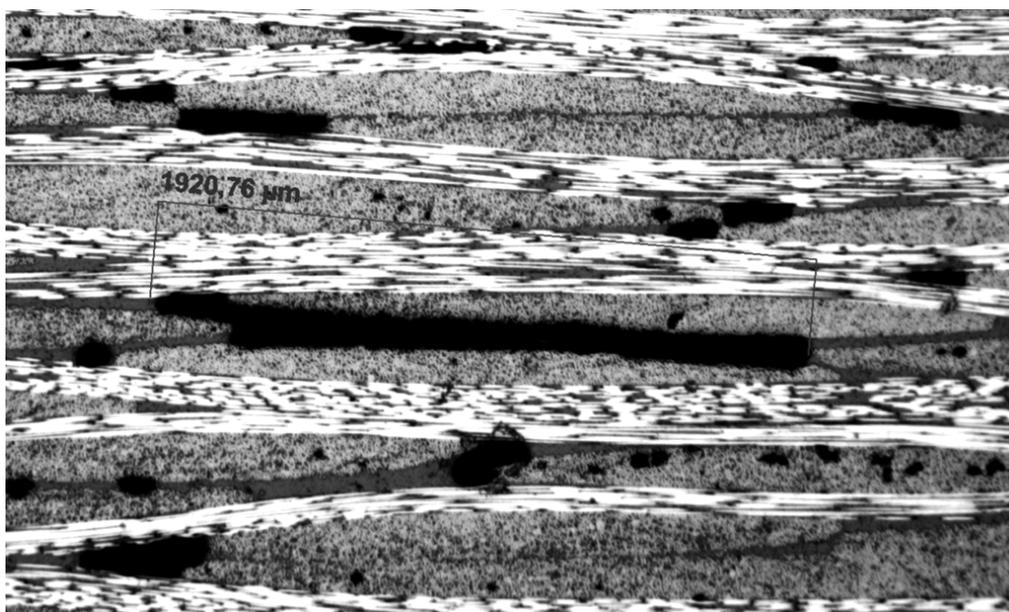


Abbildung 5.7 Pore

- Welligkeit der lasttragenden Fasern

Durch die Verarbeitung zu Geweben werden die lasttragenden Fasern gebogen. Diese Welligkeit ist auch klar in den lichtmikroskopischen Schlifffbildern erkennbar.

- Menschliches Haupthaar

Im Material Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar wurde eine Faser mit einem Durchmesser von 120 μm gefunden, es könnte sich dabei um ein menschliches Haar handeln. Dies ist wahrscheinlich, da die Proben nicht unter Reinraumbedingungen hergestellt wurden. In Abbildung 5.8 ist das gefundene Haar zu sehen, daneben erscheinen die Carbonfasern mit 7 μm Durchmesser nur als kleine weiße Punkte. Man sieht in diesem Bild auch die Harzstraßen zwischen den Lamineinzelschichten und die kleinen Poren in Bündelmitte.

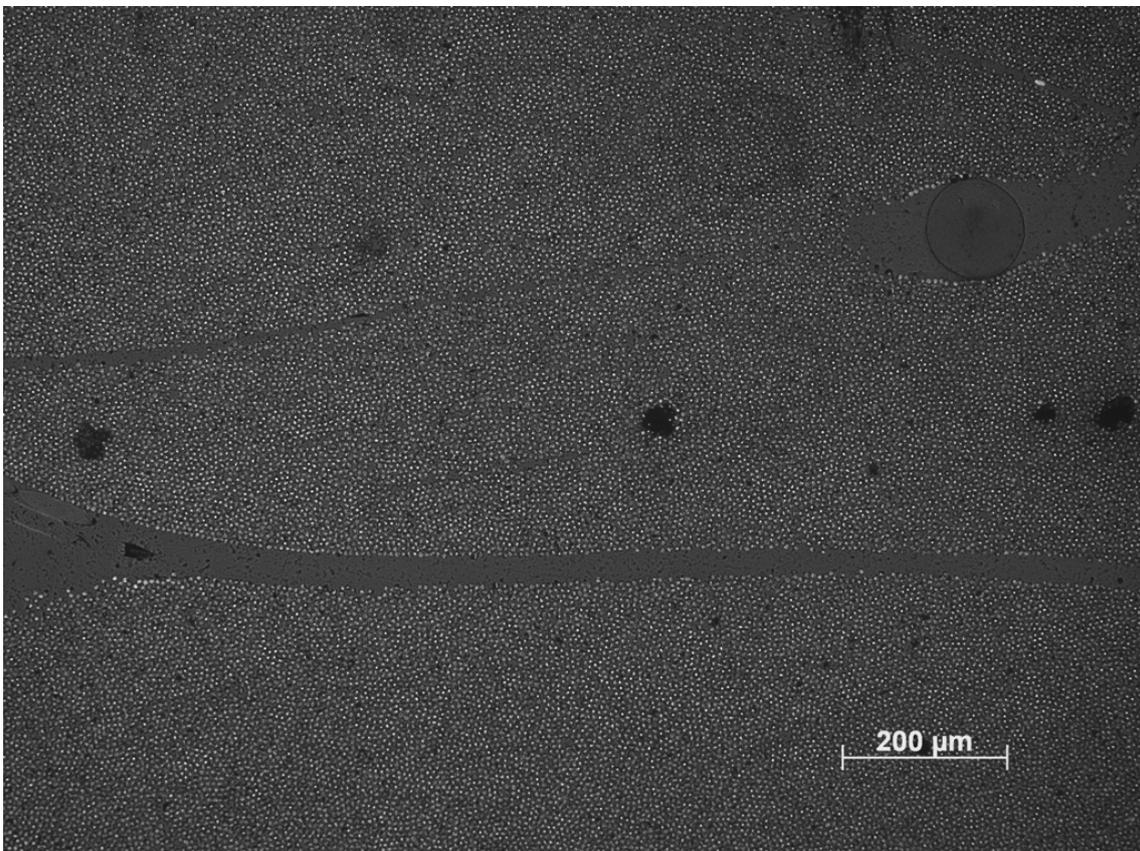


Abbildung 5.8 Haar

5.1.1.2 Bestimmung des Faservolumens, Harz- und Porengehalts

Es wurde aus den Mikroskopiebildern auch der Faservolumengehalt und der Porengehalt der Verbundmaterialien bestimmt. Nach [17] kann der Faservolumengehalt mit der sog. Flächenmethode nach Formel 5.1 bestimmt werden. Zur Ermittlung der Faser-, Harz- bzw. Porenfläche wurden zwei verschiedene Methoden versucht. Zuerst wurde für einzelne Bilder versucht durch die Erstellung und Analyse von Binärbildern der Faser-, Harz- und Porenvolumengehalt bestimmt. Da diese Methode aus unten genannten Gründen, eher ungenau erschien, wurde der Faservolumengehalt im weiteren durch Zählen der Fasern bestimmt. Auf eine Ermittlung des Porengehalts aus den Mikroskopiebildern für alle Materialien wurde verzichtet.

5.1

Vf...Faservolumenanteil; Af...Gesamtfaserfläche; Ag...Gesamtbildfläche

- Faservolumen und Porengehalt durch Erstellung eines Binärbildes

Während die Fasern in den Bildern sehr hell sind und das Harz grau erscheint, sind die Poren schwarz. Diese Helligkeitsunterschiede werden ausgenutzt, um nach einer Erhöhung des Kontrastes die Fasern und das restliche Material in weiße und schwarze Bereiche zu trennen. Aus diesem Binärbild können mit dem Programm ImageJ die Faserfläche und die Restfläche berechnet werden. Mit Formel 5.1 wird dann der Faservolumengehalt bestimmt. Ein Beispiel für das ursprüngliche Bild und das Binärbild eines Ausschnittes des Materials Ep-Sik/ FT300/ 0-90°/ 1 bar zeigt die Abbildung 5.9. Man sieht, dass dieser Teilbereich des Materials porenfrei ist.

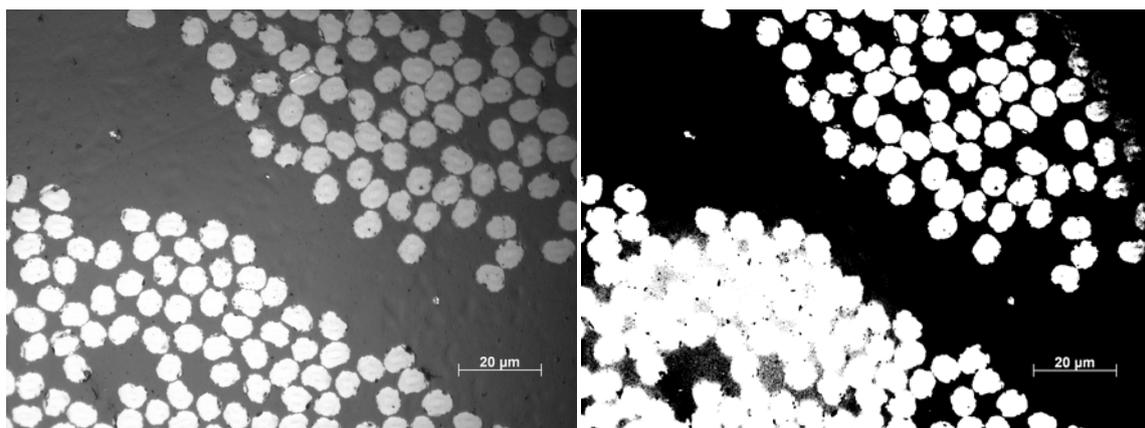


Abbildung 5.9 ursprüngliches Bild und Binärbild des Materials Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar

Nach der Auswertung erhält man einen Faservolumenanteil von 40 % und einen Harzanteil von 60 %. Durch die ungleichmäßige Ausleuchtung wird im helleren Bereich des Bildes ein Teil des Harzes im Binärbild weiß und im dunkleren Bereich ein Teil der Fasern schwarz. Dies beeinträchtigt das Ergebnis.

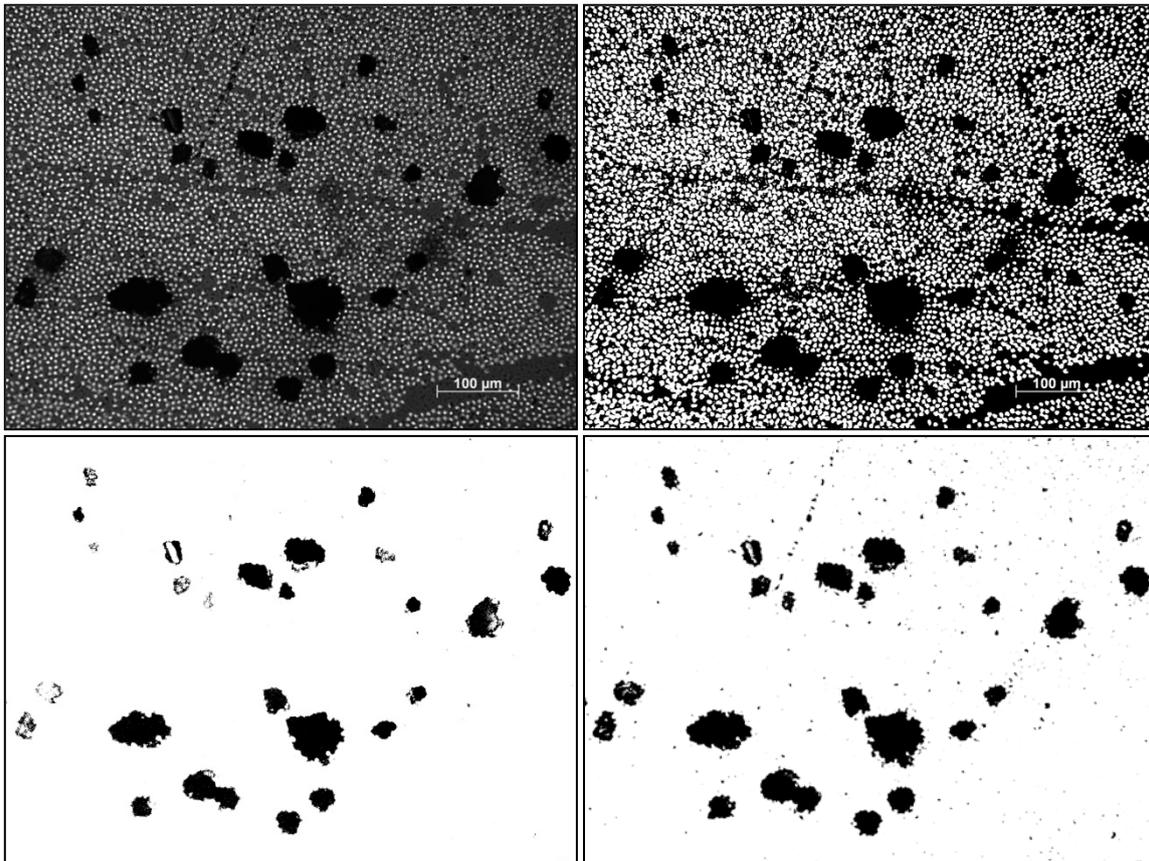


Abbildung 5.10 ursprüngliches Bild und Binärbilder des Materials Ep-Sik/ C-HTA40/ UD/ 1 bar

Für das Material Ep-Sik/ C-HTA40/ UD/ 1 bar wurde aus dem Lichtmikroskopiebild nicht nur der Faservolumengehalt sondern auch der Porengehalt bestimmt. Die hier in Abbildung 5.10 gezeigten Binärbilder, zeigen, dass die Auswertung nicht ganz eindeutig ist. Aus dem Bild rechts oben erhält man einen Faservolumsgehalt von 41 %, aus dem Bild links unten einen Porengehalt von 5 % und aus dem Bildrechts unten einen Porengehalt von 7 %. Die Ergebnisse sind von der Bildbearbeitung und von der Graustufe, bei der die Grenze zwischen den einzelnen Phasen des Materials gelegt wird abhängig. Außerdem ist bei der Bestimmung des Porenanteils eine Betrachtung in nur einer Schnitteben eventuell sehr ungenau, da die Poren nicht kugelförmig sondern sehr langgezogen sind. Die mit dieser Methode bestimmten Minimal,- und Maximalwerte des Faser- und des Porenvolumenanteils für die Materialien mit dem Biresin CR132 Harz sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Da die untersuchten Materialien sehr inhomogen sind ist das Ergebnis auch sehr stark von dem im Bild abgebildeten Ausschnitt abhängig.

Material	Vf _{min} [%]	Vf _{max} [%]	Vp _{min} [%]	Vp _{max} [%]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	40	54	6	7
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	41	65	5	13
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	54	59	6	-
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	66	72	1	3

Tabelle 5.1 Volumenanteile von Faser und Poren mit Kontrastmethode

- Faservolumengehalt durch Zählen der Fasern

In den Aufnahmen mit hundertfacher Vergrößerung ist jede einzelne Faser deutlich sichtbar. Nach [17] kann der Faservolumengehalt mit der sog. Flächenmethode nach Formel 5.1 bestimmt werden. Durch Vermessen des Faserdurchmessers und Bestimmung der Faseranzahl im Bild wird die Gesamtfaserfläche bestimmt. Diese wird dann ins Verhältnis zur gemessenen Gesamtbildfläche gesetzt.

Es wurden hierfür Bereiche innerhalb der Faserbündel untersucht. Als Beispiel für die Auswertung wird hier Abbildung 5.11 aus dem Material Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar gezeigt. Der Ausschnitt ist ca. 0,1 mm hoch und 0,14 mm breit und stellt somit einen sehr kleinen Ausschnitt des Materials dar.

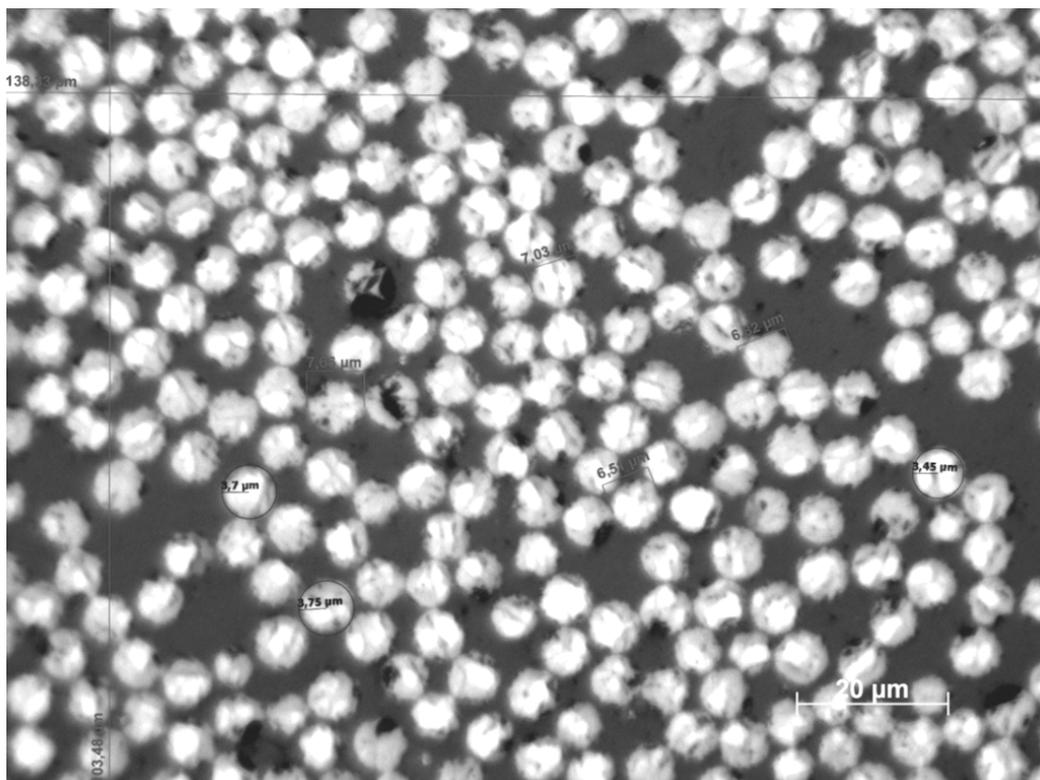


Abbildung 5.11 Faservolumengehalt

Pro Material wurden ein bis zwei Aufnahmen ausgewertet. Die Poren wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt, da die untersuchten Bereiche so klein waren und die Streuung der Porengehalte zu groß war. Tabelle 5.2 zeigt die ermittelten Faservolumenanteile.

Material	Vf _{Probe 1} [%]	Vf _{Probe 2} [%]	Vf [%]	Vm [%]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	42	50	46 ±4	54
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	65	-	65	35
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	61	-	61	39
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	68	-	68	32
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	48	59	54 ±6	46
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	67	70	69 ±2	31
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	72	73	73 ±1	27
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	69	68	69 ±1	31

Tabelle 5.2 Volumenanteile von Faser und Harz

Man sieht, dass die Streuung der Ergebnisse relativ groß ist. Dies liegt auch daran, dass die Fasern im Material sehr unterschiedlich verteilt sind und die Wahl des Ausschnittes das Ergebnis stark beeinflusst. Da die Auswertung der lichtmikroskopischen Bilder sehr zeitaufwendig ist, und sehr ungenau erscheint wurde auf weitere Untersuchungen dieser Art verzichtet, der Faservolumenanteil wird wie in Tabelle 4.7 zu sehen noch mit zwei anderen Methoden bestimmt, der Porenanteil mit der TGA-Methode.

5.1.2 Mikrofraktografie

Die Mikrofraktografie wurde an ausgewählten Biege- und SBS Proben durchgeführt. Nach einem kurzen Überblick über mögliche Bruchformen werden hier besonders die gefundenen Poren im Bruchbereich präsentiert.

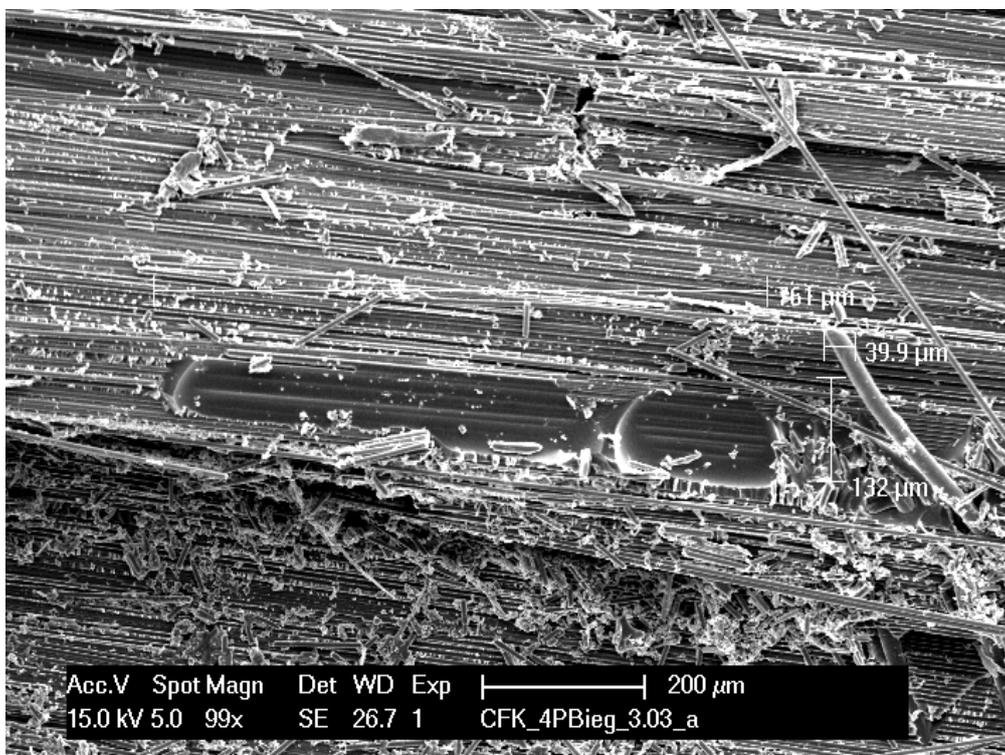


Abbildung 5.12 Pore und Hilfsfaser auf Bruchfläche

5.1.2.1 Bruchmorphologien

In [7] wird eine gute Übersicht über auftretende Bruchmorphologien gegeben. Hier sollen in Anlehnung daran nur die wichtigsten erwähnt werden. Wie in Abbildung 5.13 zu sehen ist, lässt sich nach Art der Bruchausbreitung in intralaminare (A), interlaminare (B) und translaminare (C) Brüche einteilen. Interlaminare Brüche verlaufen zwischen zwei Lagenebenen, intralaminare Brüche innerhalb einer Faserlage und translaminare Brüche quer zu den Faserlagen.

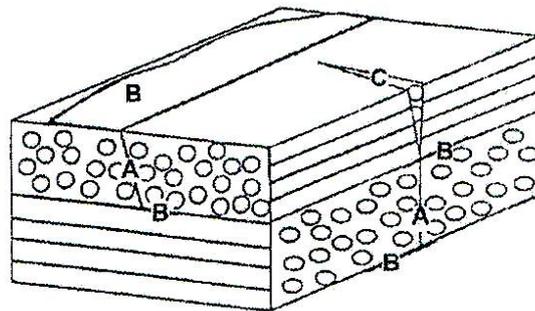


Abbildung 5.13 Rissausbreitung aus [7]

In dieser Arbeit werden ausschließlich statische Brüche behandelt. Erwähnt seien hier Delaminationen, Faser-/ Matrixablösung und Faserbruch durch Druck oder Zugbelastung. Wobei es sich bei der Delamination um eine Ablösung der Gewebelagen voneinander handelt.

5.1.2.2 REM Aufnahmen der Biegeproben

- Material Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar

Die Probe brach in einer Kombination von interlaminarer Delamination und translaminarem Zugbruch. Abbildung 5.14 zeigt eine REM-Aufnahme der Delamination. Die dunkleren Stellen sind Poren. Besonders auffällig ist die große Pore im oberen Bild rechts oben, sie wurde auch auf der Gegenbruchfläche gefunden und, im unteren Bild vergrößert zu sehen, vermessen. Ihre Gesamtlänge beträgt ca. 3 mm.

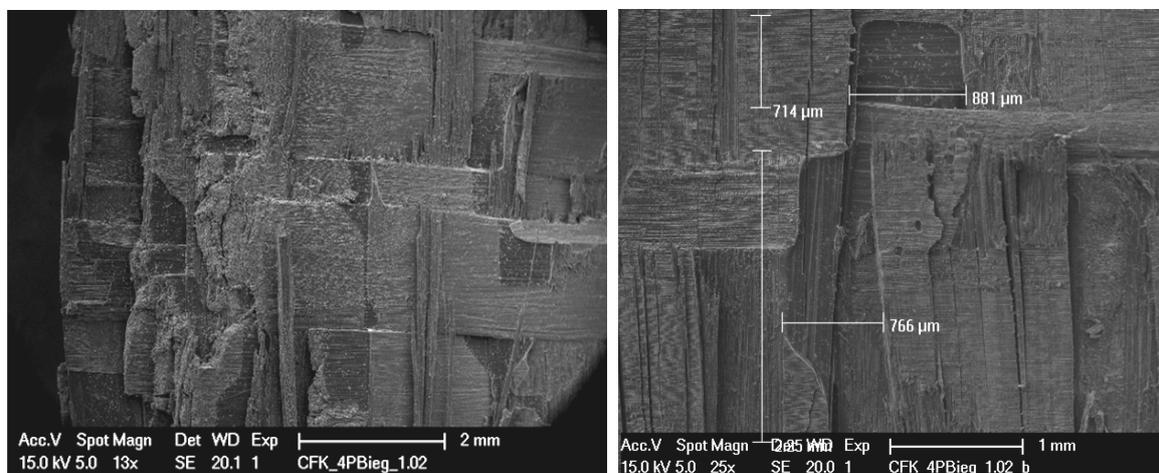


Abbildung 5.14 Poren in Bruchfläche Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar

- Material Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar

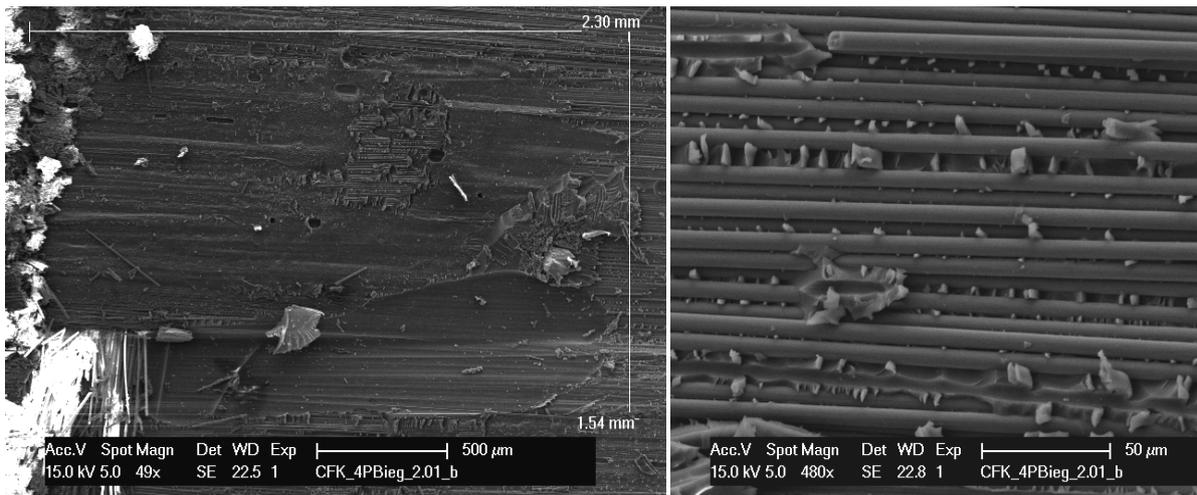


Abbildung 5.15 flache Poren zwischen Lagen

Die Probe ist durch Delamination und Druckversagen gebrochen. Sie hatte offensichtlich einige Poren im Bereich des Bruchs. Diese sind in Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 zu sehen. In Abbildung 5.15 rechts ist eine Vergrößerung der Delamination zu sehen, die Fasern und der Harzbruch dazwischen sind gut erkennbar. Interessant ist, dass die Poren in Abbildung 5.16 in einem regelmäßigen Muster entlang der Hilfsfaser entstanden sind. Das Bild rechts zeigt eine solche Pore im Detail. Abbildung 5.17 zeigt ein Knickband aus dem Bereich des Druckversagens der Fasern.

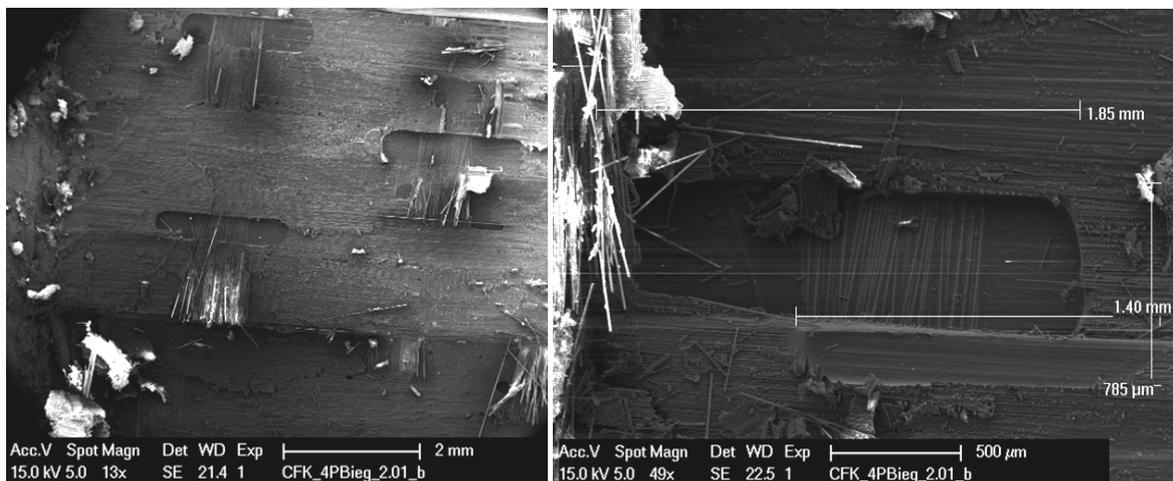


Abbildung 5.16 tiefe Poren

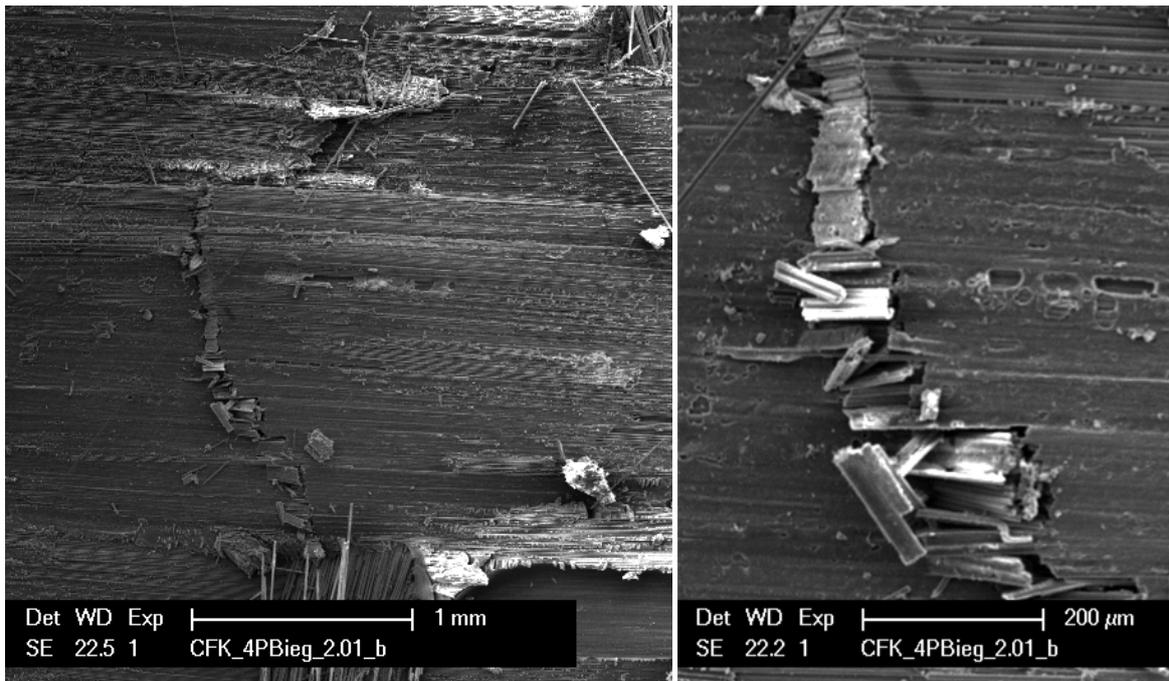


Abbildung 5.17 Knickband

- Material Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar

Auch Abbildung 5.18 zeigt die Bruchfläche einer Delamination mit einer Pore. Rechts im Bild ragt eine Hilfsfaser aus der Bruchfläche. Oben im Bild sieht man gebrochene Fasern.

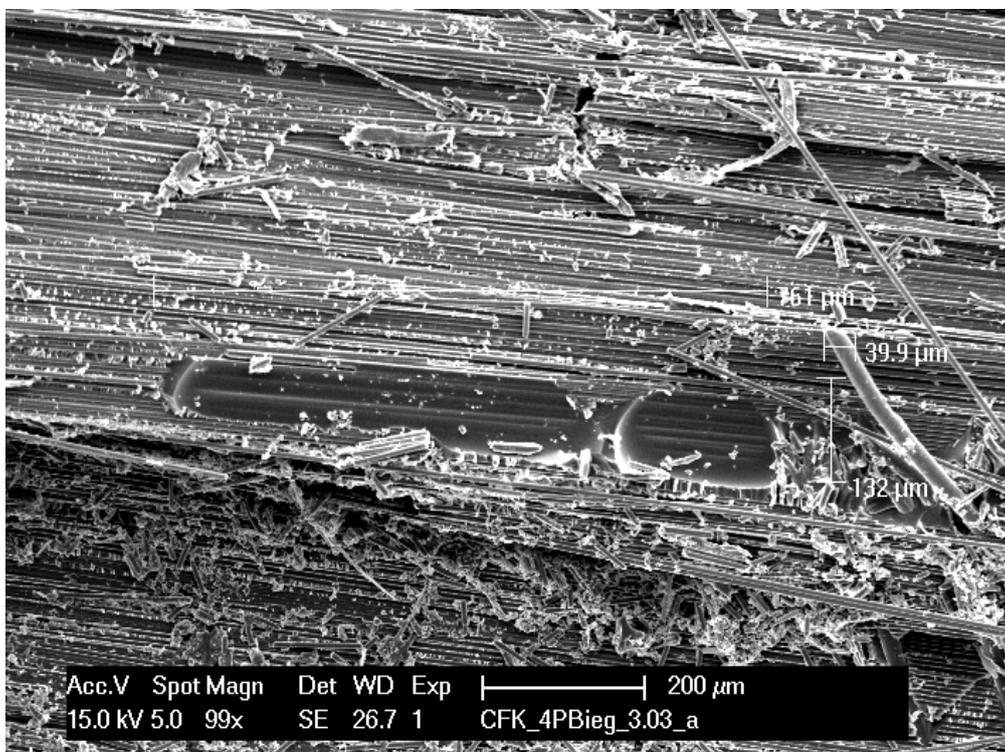


Abbildung 5.18 Pore und Hilfsfaser auf Bruchfläche

5.1.2.3 REM Aufnahmen der SBS-Proben

Im SBS-Versuch dominieren in der Probe Scherspannungen, darum versagen alle Proben zuerst durch Delamination, erst bei weiterer Belastung der Probe wird die Durchbiegung so groß, dass auch die Fasern aus Druck und Zug brechen.

Eine Übersicht über den Bruch direkt unter dem Druckstempel zeigt Abbildung 5.19. Die dunklen Bereiche sind die Faserbündel, die Harzbereiche sind hell. Die Delamination und der Scherbruch der Probe waren in diesem Fall auf der rechten Seite. Links zeigt sich die Probe darum völlig unversehrt. Die obere Hälfte der Fasern in Probenmitte ist auf Druck gebrochen, während das untere Drittel auf Zug versagt hat. Dazwischen liegt der neutrale Bereich. Rechts im Bild sind auch Scherbrüche der Faserbündel quer durch die Faserbündel an dem treppenförmigen Verlauf im 45°-Winkel erkennbar.

- Material Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar

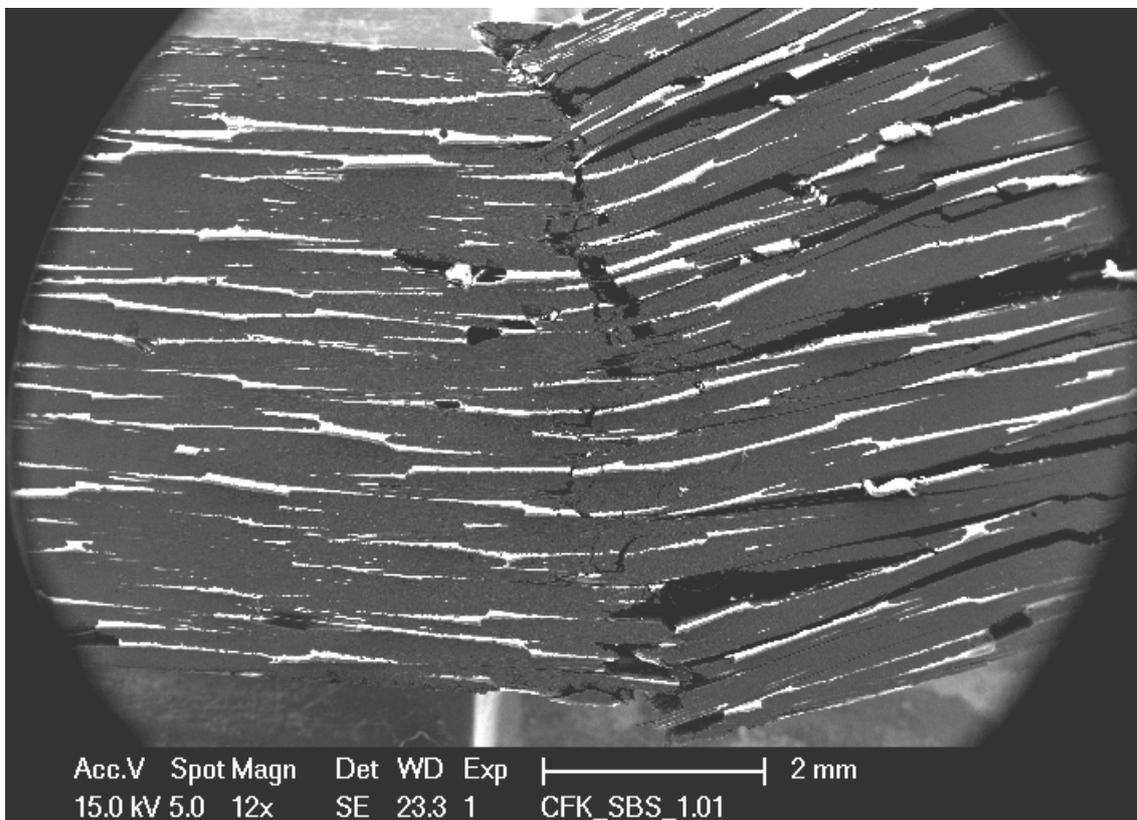


Abbildung 5.19 SBS Probe Übersicht

- Material Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar

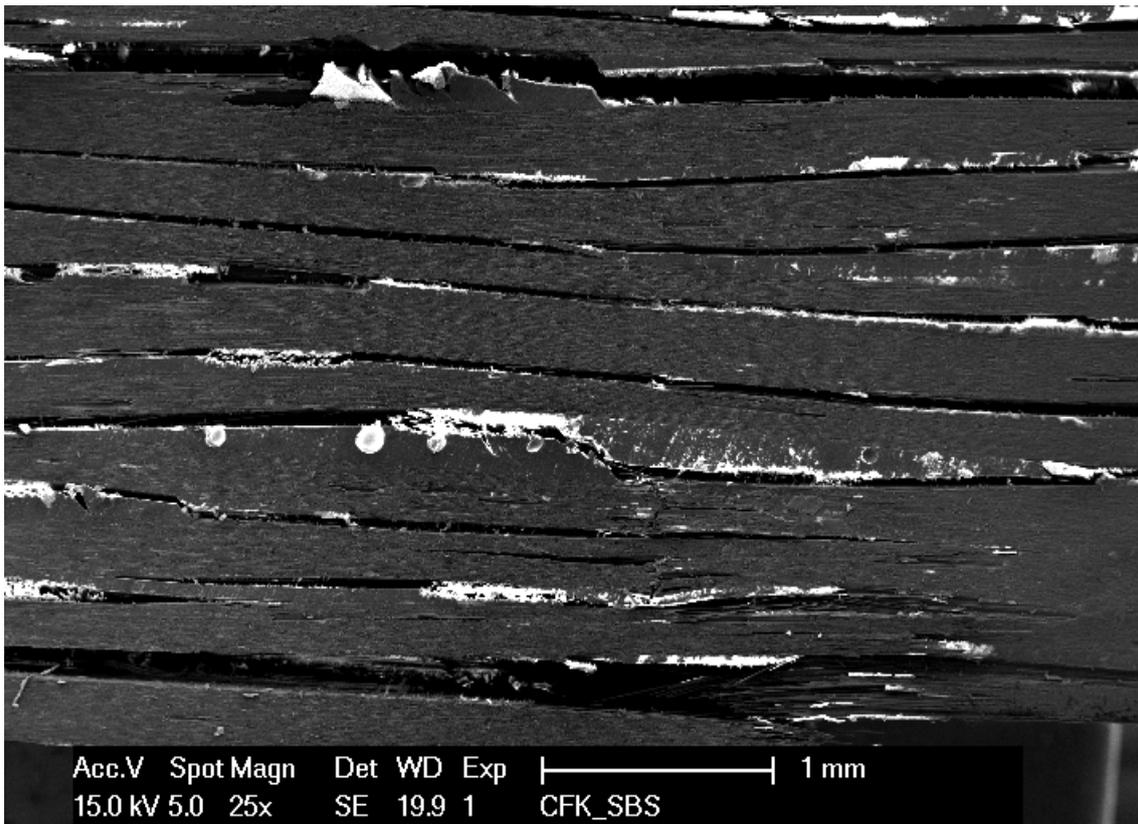


Abbildung 5.20 Verlauf der Delaminationen im UD

Den Verlauf der Delaminationen in der SBS-Probe sieht man sehr gut in Abbildung 5.20. Offensichtlich stellen die Harznester, Poren und Hilfsfasern Schwachstellen im Material dar, da die Bruchlinien durch sie hindurchgehen. Meist verlaufen sie auch entlang der Gewebelagen. Der interlaminare Scherbruch ist also tatsächlich ein Versagen der Harzschichten zwischen den Lagen und der Harz-Faser-Anbindung.

5.2 Physikalische und thermische Eigenschaften

5.2.1 Dichtebestimmung

5.2.1.1 Ermittelte Dichtewerte

Die Ergebnisse der Dichtebestimmung des Harzes Biresin CR132 und der Verbundmaterialien sind in Tabelle 5.3 aufgelistet. Diese Werte sind ein Mittelwert aus jeweils 6 Quadern pro Material. Man sieht an der geringen Streuung, dass sie das Material gut repräsentieren. Wie erwartet haben bei gleichem Harz und Fasern die Materialien, welche mit 3 bar ausgehärtet wurden, eine höhere Dichte als jene mit 1 bar Aushärtedruck.

Material	Mittelwert g/cm ³
Biresin CR 132	1,14 ±0,04
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	1,37 ±0,02
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	1,44 ±0,01
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	1,47 ±0,02
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	1,54 ±0,01
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	1,41 ±0,01
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	1,42 ±0,01
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	1,43 ±0,01
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	1,53 ±0,01

Tabelle 5.3 Dichtewerte

5.2.1.2 Berechnete Massen- und Volumenanteile

Aus den oben angegebenen Dichtewerten wurden nach den Formeln aus 4.4 Faser- und Harzmassenanteile (W_f , W_m) und Faser- und Harzvolumenanteile (V_f , V_m) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.4 angeführt. Die Materialien mit den Fasern in 0/90° Richtung haben den niedrigsten Faservolumenanteil von ca. 40 %. Jene mit UD Fasern und Aushärtung im Vakuumsack liegen zwischen 45 und 50 %. Die UD Proben, die im Autoklave ausgehärtet wurden, haben wie zu erwarten den höchsten Faservolumenanteil mit durchschnittlich 63 %.

Material	Wf %	Wm %	Vf %	Vm %
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	48 ±4	52	38 ±6	62
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	60 ±4	40	49 ±4	51
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	64 ±5	36	53 ±4	47
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	74 ±5	26	64 ±3	36
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	54 ±2	46	43 ±2	57
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	55 ±1	45	44 ±1	56
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	55 ±2	45	45 ±2	55
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	71 ±2	29	62 ±2	38

Tabelle 5.4 berechnete Massen- und Volumenanteile

5.2.2 Thermogravimetrische Analyse

Mit der TGA wurden auch die Faser und Harzvolumenanteile bestimmt, zusätzlich war unter Zuhilfenahme der Ergebnisse der Dichtemessung aber auch die Bestimmung des Porenanteils nach Formel 4.6 möglich. Alle Messkurven wurden mit dem Programm Universal Analysis ausgewertet.

5.2.2.1 Vorversuche mit Reinmaterial

Als Vorversuch werden eine Reinharz- und eine Reinfaserprobe gemessen, dadurch konnte festgestellt werden, dass bei 600 °C bereits 96 % des Harzes aber erst 2 % der Faser verdampft waren. Die entsprechenden Messkurven mit den Ergebnissen sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Es ist auch ersichtlich, dass der Großteil des Harzes bei ca. 400 °C verdampft. Es wurde eine Auswertetemperatur von 600 °C gewählt.

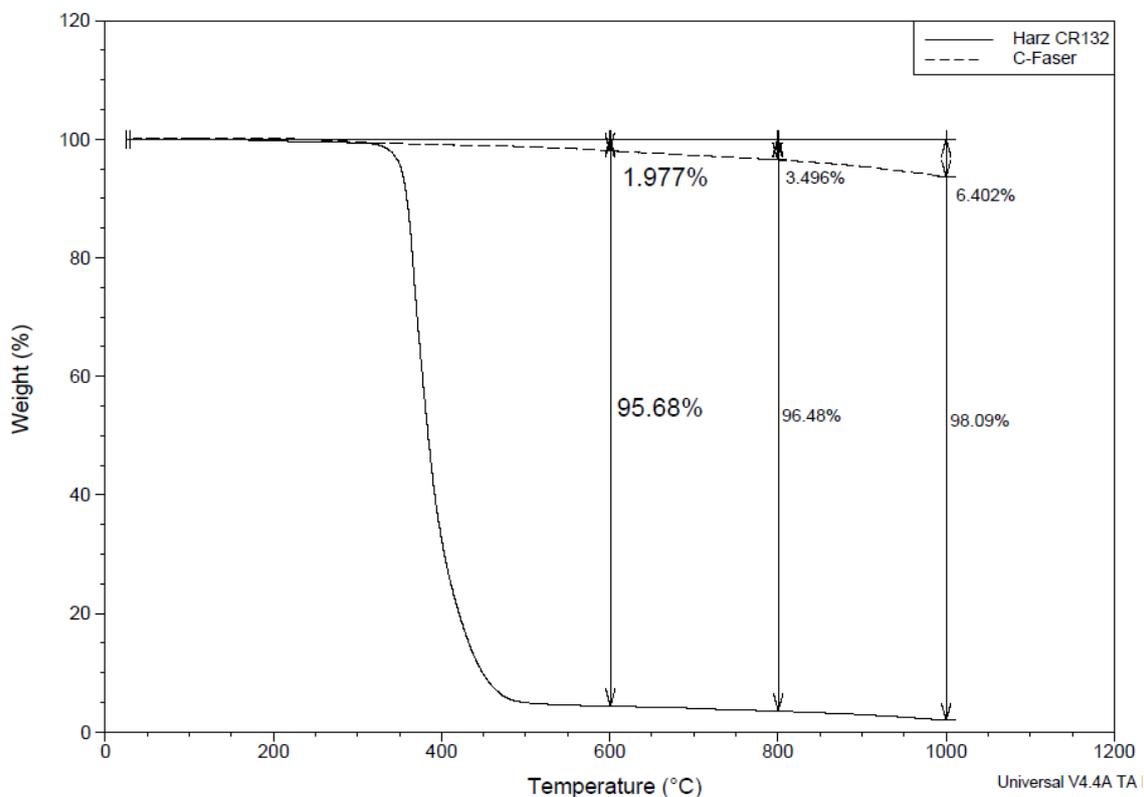


Abbildung 5.21 TGA Reinharz und Reinfaser

5.2.2.2 Bestimmung der Massenanteile

Die Ergebniskurven der Materialien mit dem Harz Biresin CR132 sind in Abbildung 5.22 im Vergleich zu Reinharz und Reinfaser dargestellt. Die in der Abbildung ausgewerteten Prozentsätze stellen den bei 600 °C ausgedampften Massenanteil dar, es handelt sich dabei um den Harzmassenanteil der Verbundmaterialien.

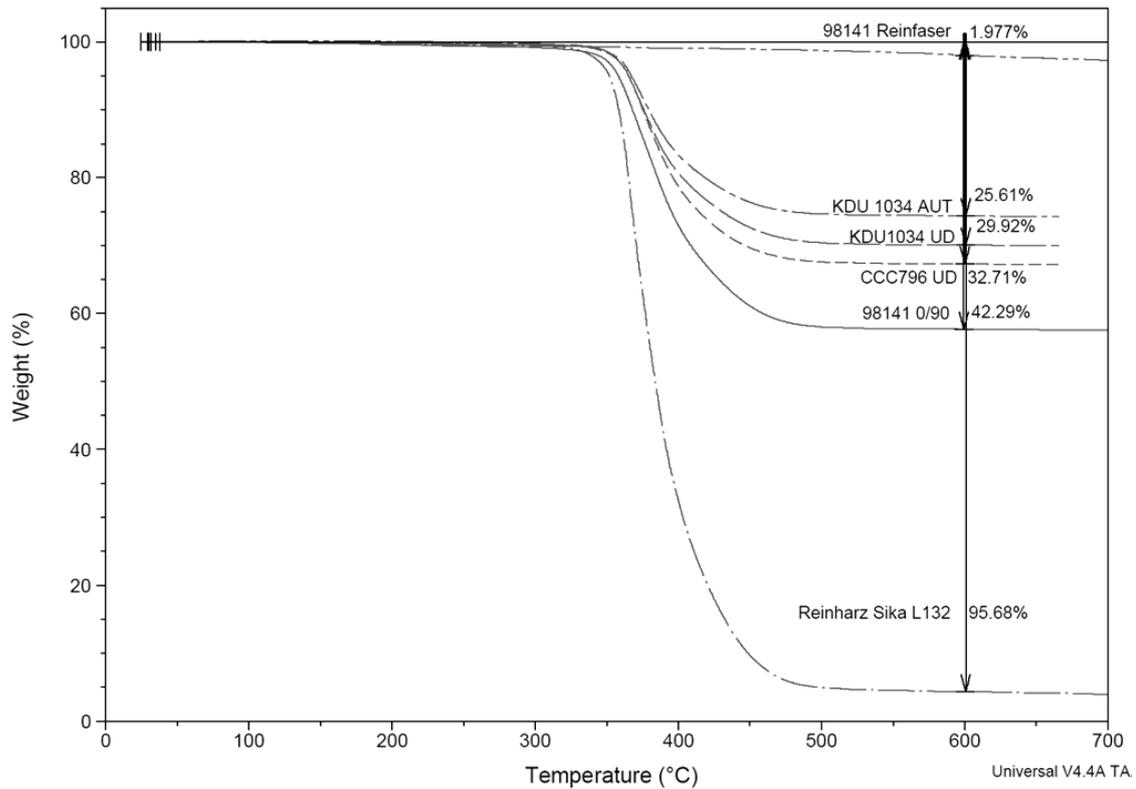


Abbildung 5.22 Messkurven TGA Sika Biresin CR132

Die ermittelten Werte sind ähnlich wie jene, die mit der Dichtemessung erhalten wurden. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 5.5 aufgelistet. Die in der Tabelle angegebenen Volumenanteile für Fasern, Matrix und Poren wurden mit den Formeln aus Abschnitt 4.4.2 ermittelt.

Material	Wf %	Wm %	Vf %	Vm %	Vp %
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	58	42	45	52	4
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	67	33	55	42	3
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	70	30	58	39	3
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	74	26	65	34	1
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	67	33	54	41	5
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	72	28	58	35	7
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	76	24	62	29	9
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	76	24	66	32	2

Tabelle 5.5 Massen- und Volumenanteile TGA-Ergebnis

Vom Material Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar wurden drei Proben gemessen. Da sich die Ergebnisse für den gemessenen Fasermassenanteil (66,51 %, 66,48 % und 66,71 %) um nur 0,23 % unterscheiden, und der Faservolumenanteil auch noch mit zwei anderen Methoden bestimmt wird, wurde bei den anderen Materialien jeweils eine Probe gemessen und ausgewertet.

5.2.3 Dynamische Differenzkalorimetrie

5.2.3.1 Auswertung der DSC-Messungen

Aus der reversiblen Wärmestromkurve der TMDSC-Messungen wurde der Glasübergang mit der Wendepunktmethode bestimmt. Die Ergebniskurven einer DSC-Messung des Harzes Sika Biresin CR132 mit dem Glasübergangswert von 129,72 °C zeigt Abbildung 5.23. Die Auswertung wurde mit der Software Universal Analysis durchgeführt.

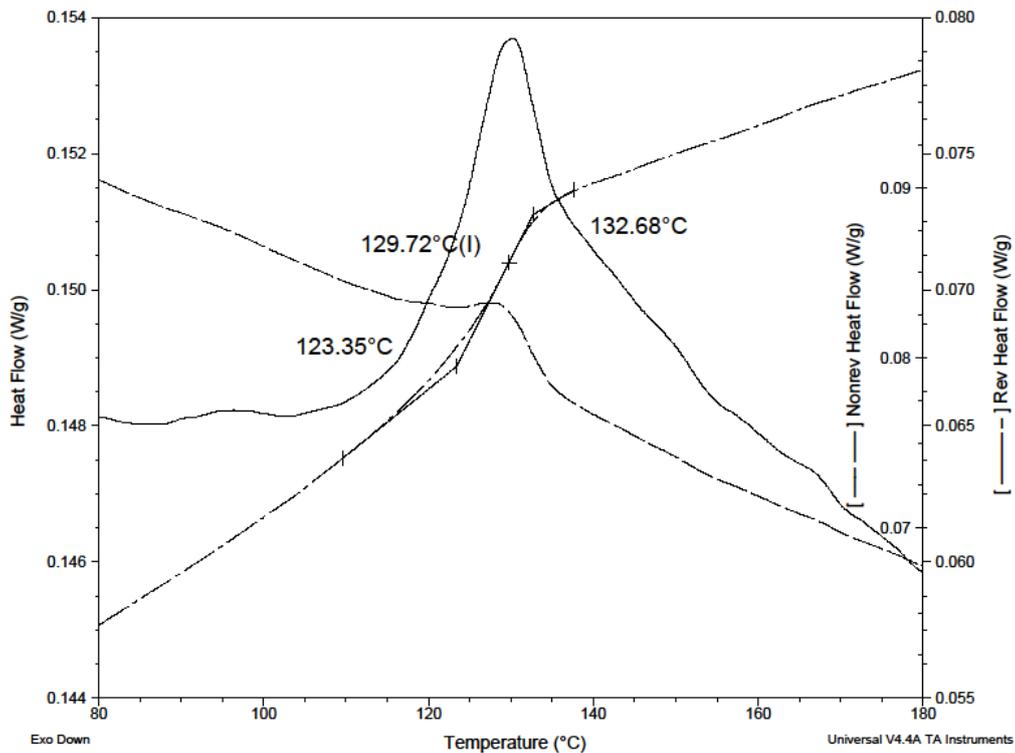


Abbildung 5.23 Ergebniskurven DSC Messung Probe Si_HTS_3bar_3

Nach [13] ist es ausreichend genau das Ergebnis auf 1 °C zu runden. Es wurden für diese Probe die Anfangtemperatur mit 123 °C, die Glasübergangstemperatur mit 130 °C und die Endtemperatur mit 133 °C bestimmt. Die Auswertung wurde für alle Proben gleich durchgeführt.

5.2.3.2 Ergebnisse der DSC-Messungen

Die Ergebnisse von allen 26 durchgeführten DSC-Messungen werden in Anhang B aufgelistet. Die Werte weisen eine große Streuung auf, dies bestätigt auch die Notwendigkeit einer großen Probenanzahl um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten. Die ermittelten Durchschnittswerte der beiden Harze werden in Tabelle 5.6. präsentiert. Der Glasübergangsbereich des Sika Harzes Biresin CR132 liegt im Mittel zwischen 118 °C und 131 °C. Der Glaspunkt wurde mit 127 °C bestimmt. Jener des Laminierharzes L418 von Hexion fängt bei 105 °C an, der Glaspunkt liegt bei 111 °C und der Glasübergang endet bei 117 °C. Der Glaspunkt des Hexion Harzes liegt also um 16 °C niedriger. Bei den Sika Harzproben wurde noch zwischen Reinharzproben und Verbundmaterial unterschieden, die Reinharzproben haben ihren Glasübergang um 3 °C niedriger.

Material	T _{gA} [°C]	T _g [°C]	T _{gE} [°C]
Sika Harzwürfel	116	124 ±3,0	130
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	116	125 ±4,0	129
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	105	117 ±0,0	126
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	122	129 ±0,4	136
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	124	129 ±1,2	133
Mittelwert Sika Verbund	118	127 ±5,2	131
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	112	119 ±1,7	124
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	108	115 ±0,5	121
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	98	105 ±2,9	110
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	100	107 ±1,7	113
Mittelwert Hexion	105	111 ±5,9	127

Tabelle 5.6 Mittelwerte der DSC Ergebnisse

5.2.4 Thermomechanische Analyse

5.2.4.1 Auswertung der TMA-Messkurven

Aus den Messkurven werden die Temperatureausdehnungskoeffizienten in den linearen Bereichen von 20 °C bis 100 °C (α_U) und von 150 °C bis 190 °C (α_O) bestimmt. Der Knick in der Messkurve von Reinharz und Verbundproben in Dicken und Querrichtung ist auf den Glasübergang zurückzuführen. Der Temperatureausdehnungskoeffizient von Epoxidharz steigt beim Glasübergang signifikant an. Darum werden die Messkurven, in denen die Ausdehnung des Harzes nicht von Längskarbonsfasern blockiert wird, auch zur Ermittlung des Glasübergangs herangezogen. Beide Heizzyklen werden ausgewertet. Als Beispiel für die Auswertung mit dem Programm Universal Analysis sind in Abbildung 5.24 die Messkurven und ihre Auswertung des 1. Heizzyklus der Reinharzprobe und der Probe des Materials Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar dargestellt.

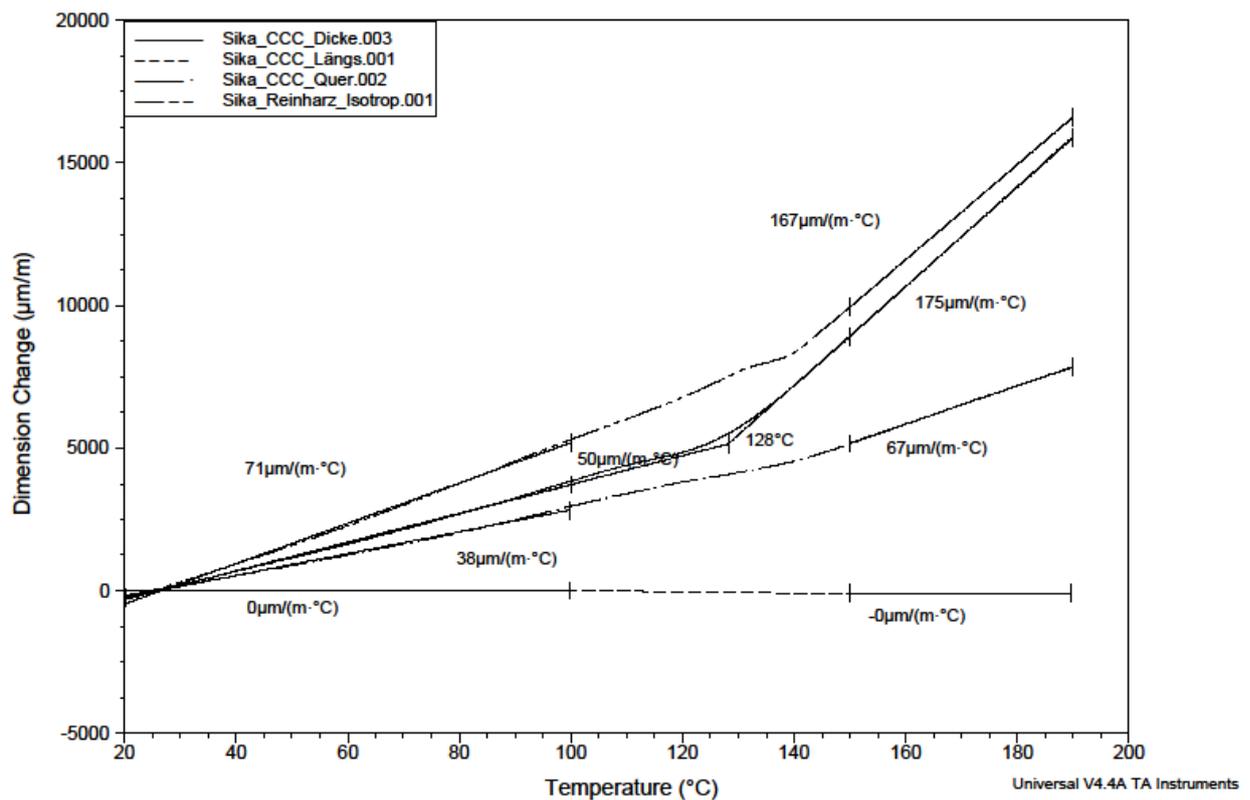


Abbildung 5.24 TMA Auswertung

5.2.4.2 TMA Messergebnisse

Alle ermittelten Messergebnisse sind in Tabelle 5.7 aufgelistet. Die Werte der linken Spalte sind die Ergebnisse des ersten Heizzyklus, die Rechten des Zweiten. Die Ausdehnungskoeffizienten in Längsrichtung des Materials Ep-Sik/C-HTS5631/UD/3 bar konnten im ersten Heizzyklus nicht gemessen werden, da Störeinflüsse den Messschrieb verfälscht haben. Wie erwartet dehnt sich das Compositematerial in Längsrichtung fast nicht. In Dickenrichtung ist die Ausdehnung des 0°/90° Materials besonders hoch. Auch der Anstieg des Ausdehnungskoeffizienten im Bereich des Glasübergangs ist bei allen Materialien deutlich zu erkennen. Die Ausdehnungskoeffizienten des zweiten Heizzyklus sind meist geringfügig höher als die des ersten. Die ermittelte Glasübergangstemperatur sinkt leicht ab, sie liegt im Mittel bei 127 °C beziehungsweise 119 °C.

Material	Richtung	T _g [°C]	α_U^1	α_O^2	T _g [°C]	α_U	α_O
Biresin CR132 Reinharz		131	71	167	126	71	137
Ep-Sik/ C-FT300/0-90°/1 bar	Längs	-	3	2	-	5	2
	Quer	-	5	3	-	5	4
	Dick	117	80	254	119	78	255
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/1 bar	Längs	-	0	0	-	1	0
	Quer	122	39	67	112	37	68
	Dick	128	51	175	117	51	177
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar	Längs	-	-1	1	-	0	1
	Quer	130	15	32	122	17	40
	Dick	134	39	103	122	44	114
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/3 bar	Längs	-	-	0	-	0	1
	Quer	124	28	83	119	34	90
	Dick	131	34	91	117	40	105
Mittelwert Tg Sika	123±6	125±5			119±4		
Niedrigster Tg Sika	112	117			112		
Höchster Tg Sika	134	134			126		

¹Temperaturausdehnungskoeffizient unter dem Glasübergang α_U von 20 °C bis 100 °C

²Temperaturausdehnungskoeffizient über dem Glasübergang α_O von 150 °C bis 190 °C

Tabelle 5.7 Längsausdehnungskoeffizienten und Glasübergangswerte

5.2.5 Dynamisch Mechanische Analyse

Mit der DMA wurden sowohl der Speichermodul bei Raumtemperatur als Kennwert für die Steifigkeit als auch der Glasübergang bestimmt. Letztgenannter wurde mit der Wendepunktmethode bestimmt. Wie in [11] empfohlen ist der Speichermodul für die Auswertung linear über der Temperatur aufgetragen. Dies ist in Abbildung 5.25 exemplarisch für jeweils eine Probe der 4 Materialien mit dem Laminierharz L418 dargestellt. Der signifikante Abfall der Steifigkeit ca. 15 °C vor dem Glasüberganswert ist bei allen Proben deutlich sichtbar. Der Glasübergansbereich beginnt bei ca. 100 °C und endet bei ca. 150 °C. Davor und danach ist die Steifigkeit nahezu konstant.

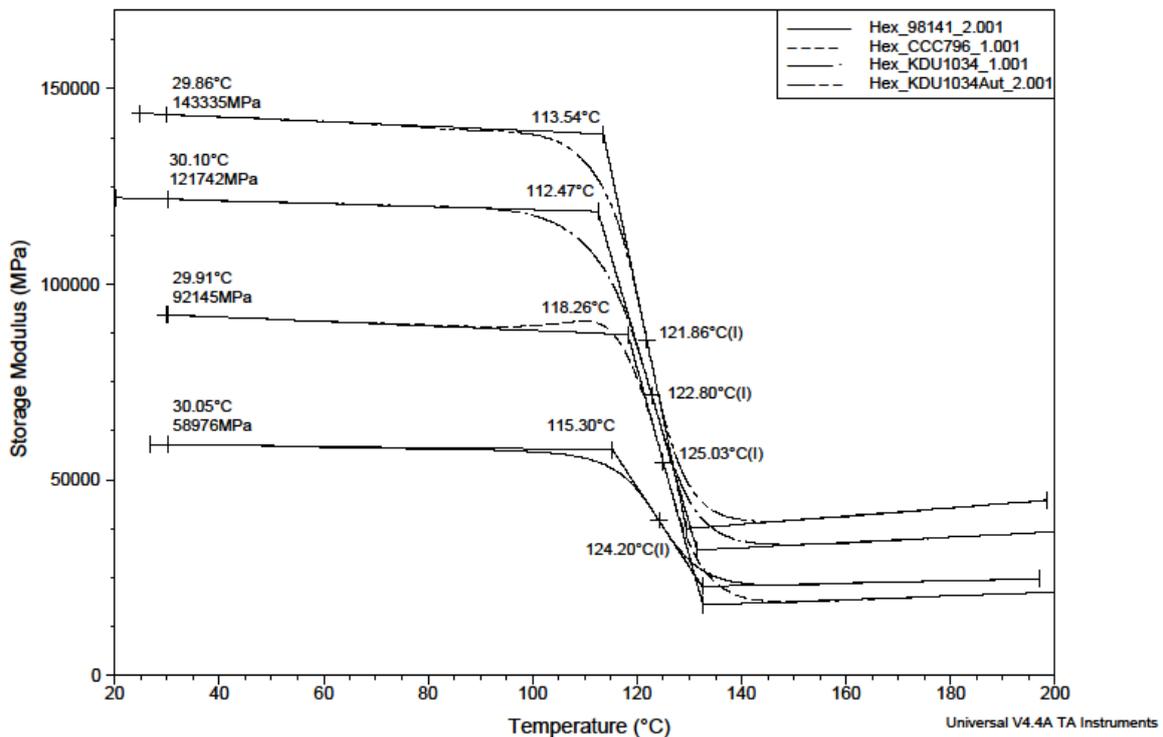


Abbildung 5.25 Speichermoduli

Von allen Materialien wurden auf diese Weise jeweils zwei Messkurven ausgewertet und dann die Durchschnittswerte bestimmt. Den ermittelten Biegespeichermodul E' und den Glasübergang T_g zeigt Tabelle 5.8. Die mittlere Glasübergangstemperatur aller Biresin CR132 Proben beträgt 122 °C, jene der Laminierharz L418 Proben 124 °C.

Material	E' [GPa]	T_g [°C]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	34,8	119 ±3
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	91,2	121 ±1
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	100,8	124 ±2
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	106,5	124 ±2
Mittelwert Sika		122 ±3
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	52,2	125 ±1
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	88,3	125 ±0
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	113,6	123 ±1
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	116,8	122 ±0
Mittelwert Hexion		124 ±1

Tabelle 5.8 Speichermodul und Glasübergang

5.3 Mechanische Eigenschaften

Um die Materialien hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit miteinander vergleichen zu können, wurden der Biegemodul, die Biegefestigkeit, die Bruchdehnung und die scheinbare Interlaminare Scherfestigkeit bestimmt.

5.3.1 Biegeversuche

5.3.1.1 Probenanzahl und Art der Versuche

Insgesamt wurden von den Proben mit dem Harz Biresin CR132 pro Material 12 Stück (Ausnahme Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar 16 Stück) und von jenen mit dem Laminierharz L418 6 Stück pro Material geprüft. Die ersten Versuche waren Vorversuche. Diese wurden nicht ausgewertet, sie dienten der Absicherung der Prüfmethode und des Aufbaues. Es wurden einige wenige Prüfungen mit Wechsellast und AE ausgewertet. Die restlichen Versuche wurden unter einmaliger Belastung durchgeführt. Die Probenbezeichnungen der gültigen Prüfungen sind in Tabelle 5.9 aufgelistet.

Material	Zyklische Last mit AE	einmalige Last
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/1 bar	1.04-1.05	1.07-1.12
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/1 bar	2.04-2.05	2.07-2.12
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar	3.04-3.06	3.07-3.16
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/3 bar	-	4.07-4.12
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/1 bar	-	5.01-5.06
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/1 bar	-	6.01-6.06
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/1 bar	-	7.01-7.06
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/3 bar	-	8.01-8.06

Tabelle 5.9 Prüfort ausgewertete Biegeversuche

5.3.1.2 Proben mit einmaliger Last bis Bruch

Alle Biegeversuche wurden mit der Software Test Expert ausgewertet. In Abbildung 5.26 ist das Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Biegeproben mit dem Harz Biresin CR132 dargestellt. Den niedrigsten Biegemodul hat das Material Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/1 bar, dieses hat auch die niedrigste Bruchspannung und die höchste Bruchdehnung. Der Biegemodul der Proben mit Fasern in unidirektionaler Richtung ist für alle drei Materialien fast gleich. Die Modulbereiche dieser drei Materialien überschneiden einander. Insgesamt ist die Streuung der Biegemoduli aber nicht besonders groß. Wie in Abbildung 5.27 verhalten sich die Proben mit dem Hexion Harz sehr ähnlich, allerdings zeigt hier das Material mit der C-HTA40 Faser einen deutlich geringeren Biegemodul als jene mit der C-HTS5631 Faser.

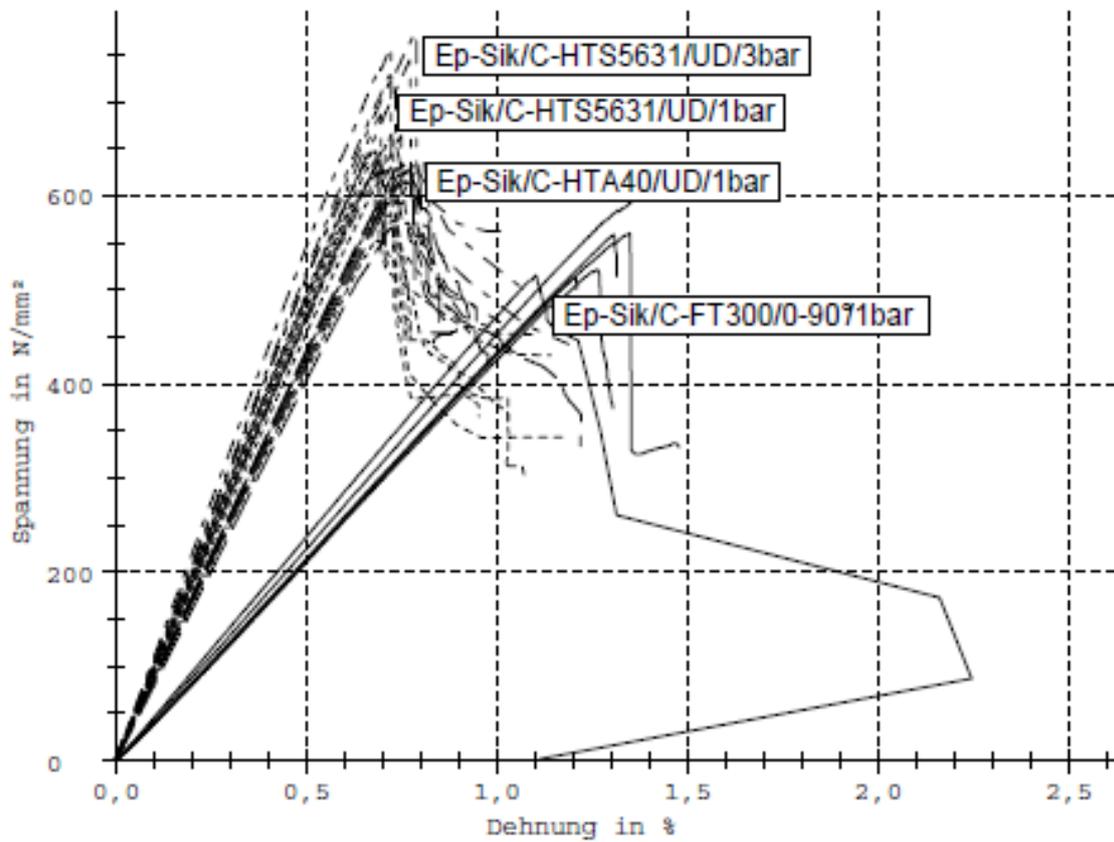


Abbildung 5.26 Spannungs-Dehnungs-Diagramm Biegeproben Biresin CR132

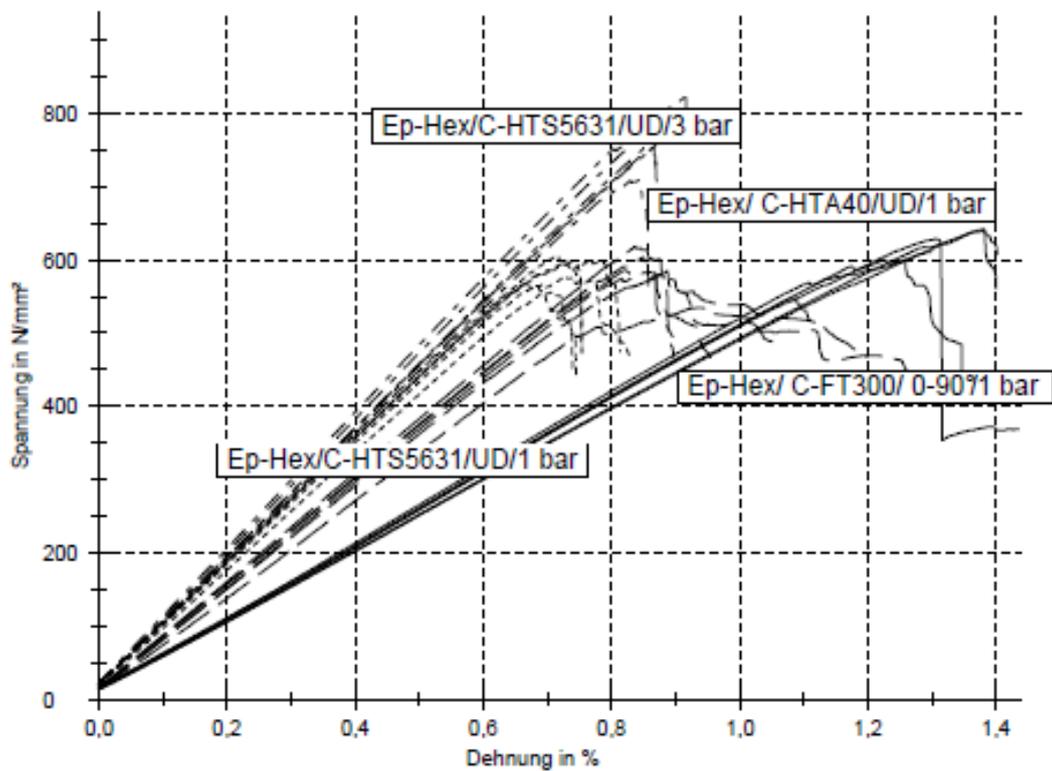


Abbildung 5.27 Spannungs-Dehnungs-Diagramm Biegeproben Laminierharz L418

Die Prüfergebnisse Biegemodul, Biegefestigkeit und Bruchdehnung wurden nach den Formeln aus [14] bestimmt. Die arithmetischen Mittelwerte der Ergebnisse sind in Tabelle 5.10 dargestellt. Die Kennwerte sämtlicher Proben finden sich in Anhang C.

Material	E_b [GPa]	σ_b [MPa]	ε_b [%]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/1 bar	43 ±3	544 ±33	1,27 ±0,10
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/1 bar	84,6 ±2	616 ±23	0,76 ±0,02
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar	93 ±3	628 ±13	0,69 ±0,03
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/3 bar	102 ±6	725 ±42	0,74 ±0,03
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/1 bar	48 ±1	544 ±93	1,32 ±0,12
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/1 bar	70 ±3	468 ±23	1,05 ±0,17
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/1 bar	83 ±2	461 ±15	0,77 ±0,04
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/3 bar	88 ±3	725 ±94	0,88 ±0,02

Tabelle 5.10 Biegeprüfung Ergebnisse im Mittel

5.3.1.3 Versagensart der Biegeproben

Faserverbundmaterialien können im Biegeversuch nicht nur auf Zug oder Druck versagen, sondern auch delaminieren. Es ist sehr wichtig die Art des Versagens zu dokumentieren, da sich nur daraus schließen lässt, ob die Materialien im Verbund optimal zusammenspielen. Die Abmessungen der Proben wurden so gewählt, dass Faser und Harz möglichst gleichzeitig versagen. Würden die Proben vorzeitiges Harzversagen aufweisen, dann wäre das Harz entweder zu schwach, oder das Interface zwischen Faser und Harz nicht stark genug. Der Biegeversuch ist nur gültig, wenn Zug oder Druckversagen der Faser auftritt. Dies war bei allen Proben der Fall. Die Materialien mit den C-FT300 Fasern haben immer Zugversagen kombiniert mit Delamination und Druckversagen aufgewiesen, eine bereits versagte Probe in der Prüfmaschine zeigt Abbildung 5.28. Bei den UD-Proben war Druckversagen der Faser meist kombiniert mit Delamination zu beobachten.



Abbildung 5.28 Biegeprobe des Materials

5.3.2 Biegeprüfung mit Wechselbeanspruchung und akustischer Emissionsmessung

Es wurden einige Proben auch unter Wechsellast geprüft. Die Frage hierbei war ob, schon vor Eintreten eines Faserbruches, die Steifigkeit des Materials abnimmt. Gleichzeitig wurde die Schallemission der Proben aufgezeichnet. Von den drei Materialien wurde jeweils eine Probe mit in jedem Lastzyklus steigender Durchbiegung und eine mit gleichbleibender maximaler Durchbiegung belastet. Da beim Material Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar die zweite Probe (3.05) frühzeitig versagte, wurde noch eine Dritte bei niedrigerer Durchbiegung geprüft.

5.3.2.1 Steifigkeit unter zyklischer Beanspruchung

In Abbildung 5.29 sind im Überblick die Spannungs-Dehnungs-Verläufe dieser Versuche zu sehen. Wie in den Versuchen mit einmaliger Belastung ist der Biegemodul der UD Proben sehr ähnlich und wesentlich höher als jener der 0/90° Proben.

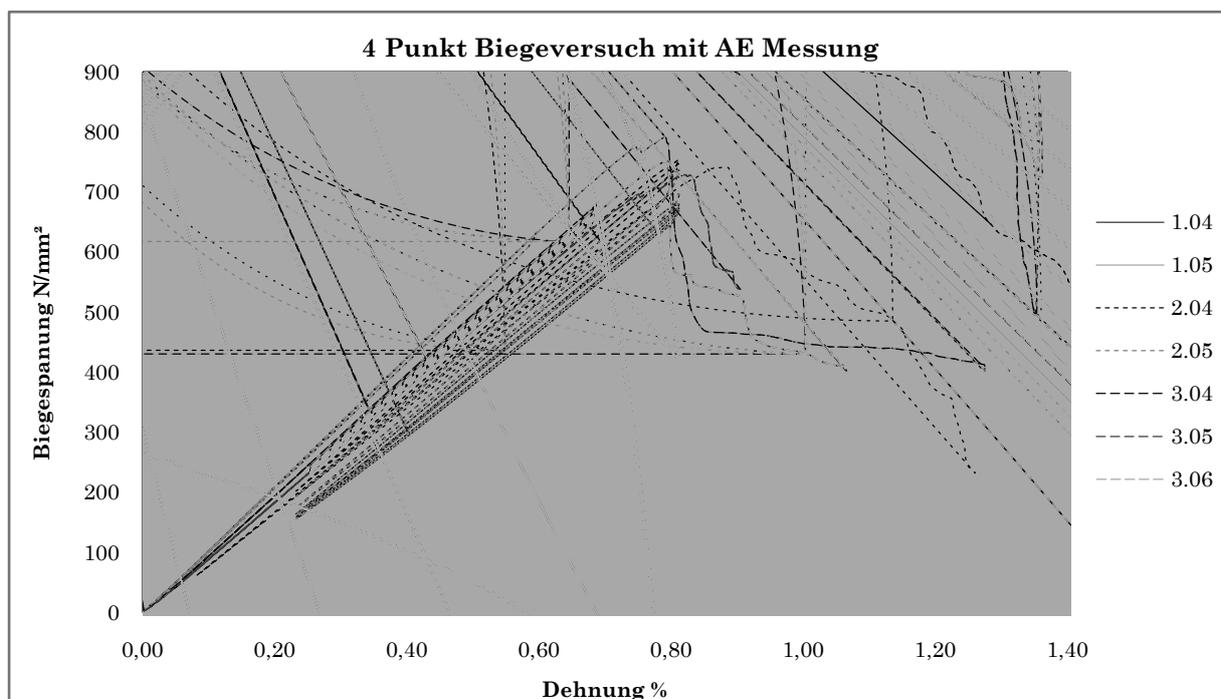


Abbildung 5.29 Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit zyklischer Last

In Tabelle 5.11 sind die in jedem Lastzyklus ermittelten Biegemodule aufgelistet. Solange die Proben in ausreichend Entfernung zur Bruchspannung zyklisch belastet werden, nimmt der Modul nicht signifikant ab. Dies zeigt zum Beispiel Probe 3.06. Wenn hingegen die Last so groß wird, dass einige Fasern brechen, ohne dass die Tragfähigkeit völlig verloren geht, dann sinkt der Biegemodul rapide.

Material	Ep-Sik/C- FT300/0-90°/1 bar		Ep-Sik/C- HTA40/UD/1 bar		Ep-Sik/C- HTS5631/UD/1 bar		
	1.04	1.05	2.04	2.05	3.04	3.05	3.06
Probe	1.04	1.05	2.04	2.05	3.04	3.05	3.06
Modul 1	43,1	47,2	87,3	93,3	105,4	92,9	99,6
Modul 2	48,1	47,5	88,6	93,5	106,2	93,9	99,5
Modul 3	48,4	48,0	89,2	109,3	104,7		100,1
Modul 4	48,3	48,1	88,8	93,7			98,9
Modul 5	48,1	48,1	88,5	90,3			99,6
Modul 6	48,1	48,2		89,1			99,7
Modul 7		48,2		88,7			99,7
Modul 8		48,2		88,5			99,2
Modul 9		47,2		88,4			99,3
Modul 10		46,0		87,9			99,4
Modul 11							96,7

Tabelle 5.11 Biegemodul [MPa] der Proben unter Wechsellast

5.3.2.2 Akustische Emission

Die Ergebnisse der Akustischen Emission werden in Abbildungen 5.27 bis 5.31 dargestellt. Während in den linken Abbildungen die graue durchgezogene Linie die Spannung über der Zeit darstellt, zeigen die schwarzen senkrechten Linien die Zählrate der Akustischen Events pro Sekunde. Die Abbildung rechts zeigen zum Vergleich das Spannungs-Dehnungs-Diagramm derselben Probe. Immer wenn in der Probe die AE Zählraten ansteigen, findet eine Schädigung des Materials statt. Signale unter 300 AE Events pro Sekunde wie im ersten und zweiten Lastzyklus von Probe 1.04 deuten eher auf Reibung zwischen Faser und Matrix oder kleine Matrixrisse hin. Dies sieht man auch an den Spannungs Dehnungs-Diagrammen und an den Modulwerten. Erst wenn eine AE-Zählrate von 400 überschritten wird, findet eine Schädigung statt, die die Steifigkeit verringert, vermutlich handelt es sich dabei um große Delaminationen und Faserbrüche.

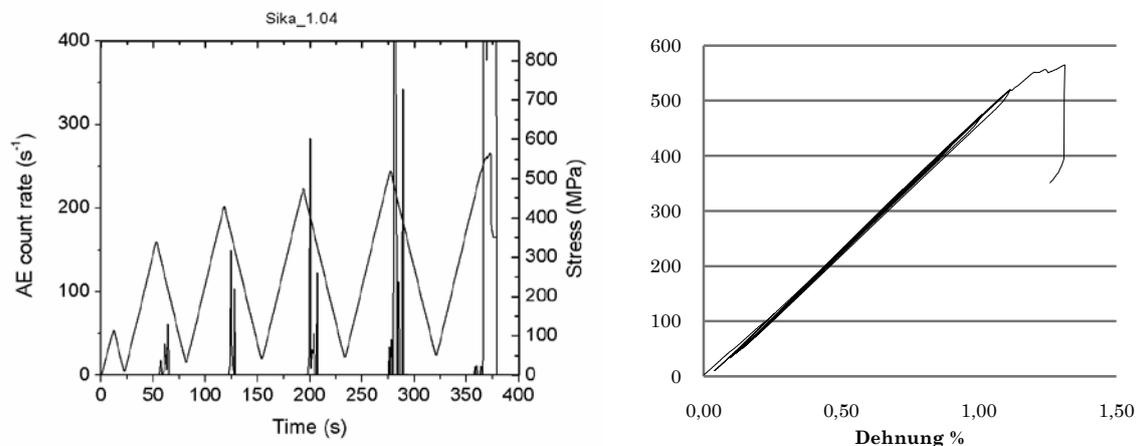


Abbildung 5.30 Akustische Emission Probe 1.04

Die AE Events bei Probe 1.04 treten immer in derselben Zyklusphase kurz nach der Entlastung auf. Sie Steigen mit der Belastungshöhe an.

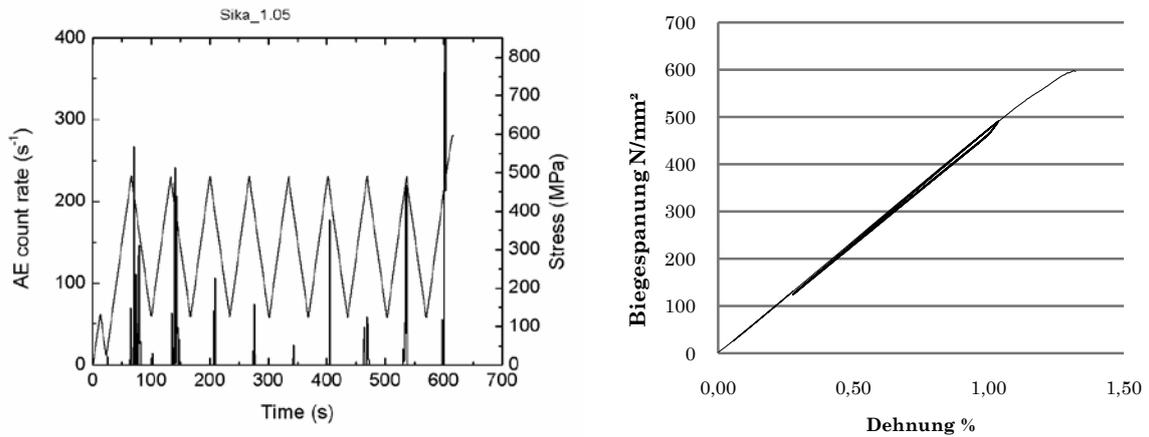


Abbildung 5.31 Akustische Emission Probe 1.05

Bei Probe 1.05 sind immer in der Belastungsspitze AE Events zu beobachten. Der Modul sinkt aber erst in den letzten zwei Zyklen.

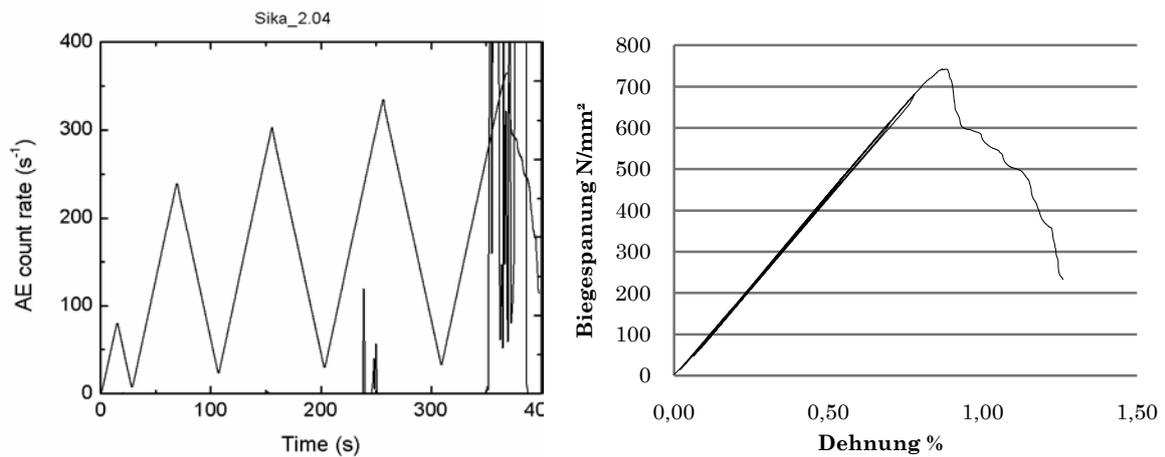


Abbildung 5.32 Akustische Emission Probe 2.04

Bei Probe 2.04 treten messbare AE Events erstmals bei 240 sec und ca. 500 MPa auf. Im nächsten Zyklus treten wieder ab 600 MPa massive AE Events auf, und bei 704 MPa versagt die Probe.

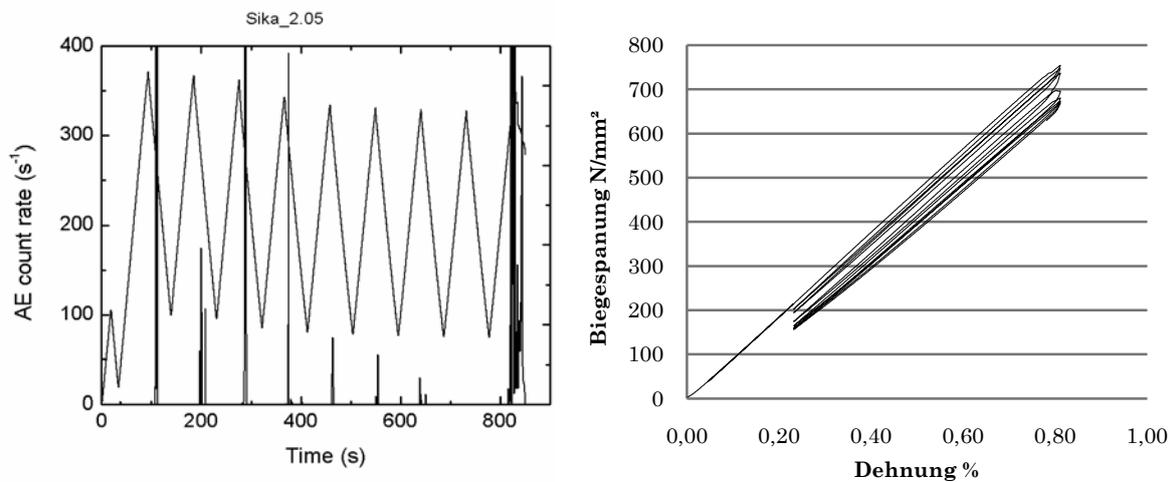


Abbildung 5.33 Akustische Emission Probe 2.05

Probe 2.05 wird bereits im ersten Zyklus mit 750 MPa belastet, dies führt zu Schädigungen mit Faserbruch, welche klar sichtbar sind und aufgrund von Steifigkeitsverlust bei gleicher Durchbiegung in den weiteren Zyklen zu niedrigerer Spannung führt. Bei 800 sec in Lastzyklus 10 versagt die Probe endgültig.

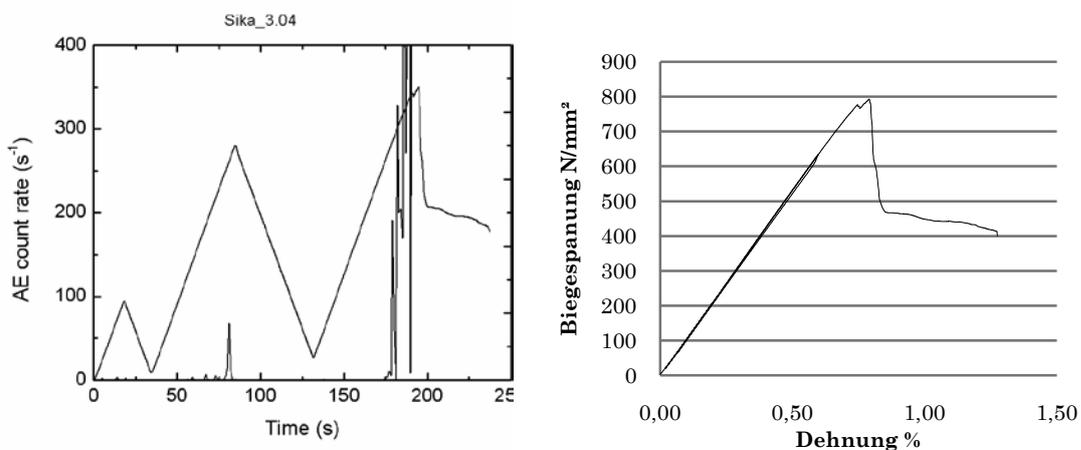


Abbildung 5.34 Akustische Emission Probe 3.04

Auch bei Probe 3.04 ist der sogenannte Kaiser Effekt zu beobachten. Die Probe zeigt bei 550 MPa erstmals AE Signale, im nächsten Zyklus beginnen die Signale bei etwas höherer Spannung, woraufhin die Probe bei 790 MPa versagt.

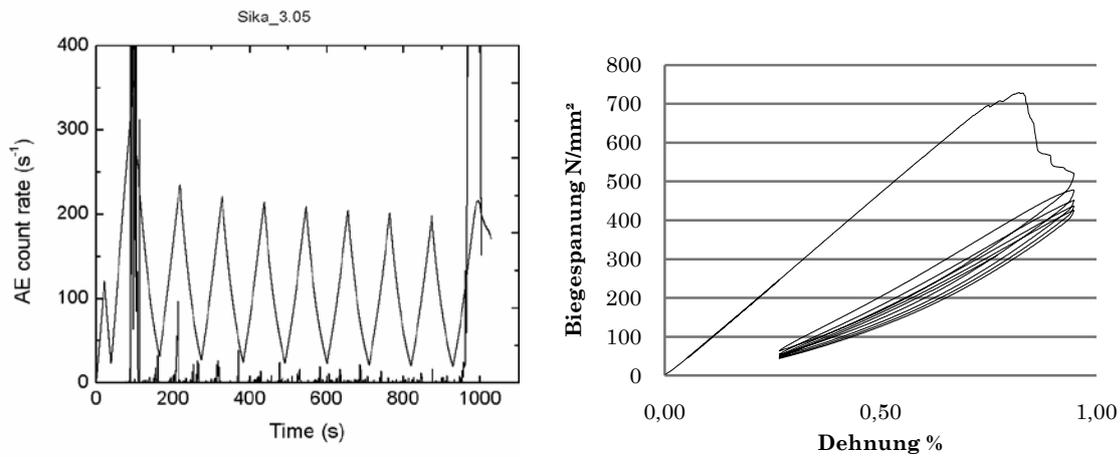


Abbildung 5.35 Akustische Emission Probe 3.05

Probe 3.05 hat eigentlich bereits im ersten höheren Zyklus versagt, dies ist auch klar an den AE-Events erkennbar. Die noch nicht gebrochenen Fasern haben aber bei gleicher Durchbiegung noch einige Lastzyklen getragen.

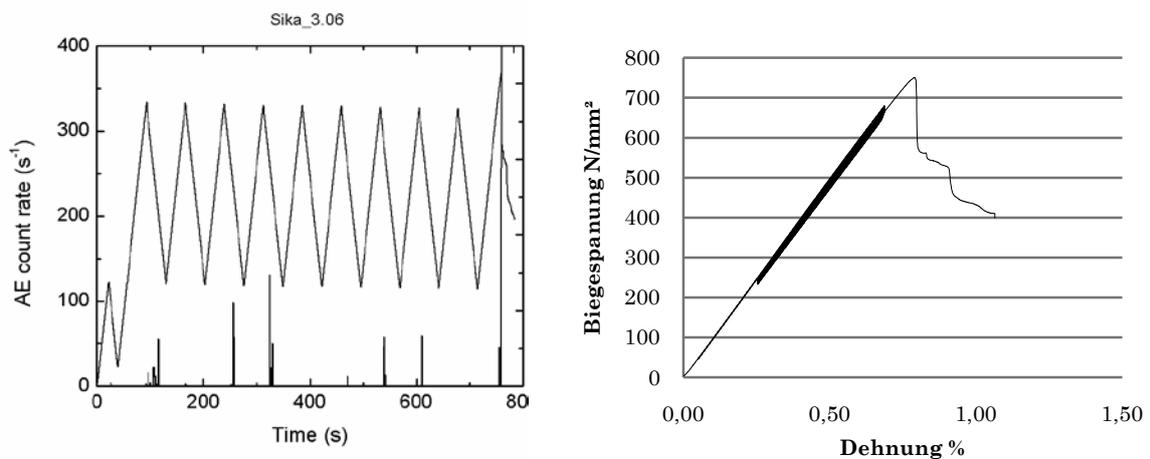


Abbildung 5.36 Akustische Emission Probe 3.06

Bei Probe 3.06 wurde eine geringere maximale Durchbiegung gewählt, sie hat die zehn Lastzyklen bei fast gleichbleibendem Biegemodul von 99 GPa mit ganz niedrigen AE Signalen überstanden. Sie versagte schlagartig bei 750 MPa Biegespannung.

5.3.3 Ergebnisse der Kurzbiegeprüfung

Der Kurzbiegeversuch wurde wie in 4.5.3 beschrieben durchgeführt. Aus der gemessenen Maximalkraft wurden dann die Short Beam Strength nach Formel 4.7 und die Interlaminare Scherfestigkeit nach Formel 4.9 ermittelt. Die Ergebnisse aller Proben sind in Anhang D aufgelistet, hier werden die ermittelten Mittelwerte besprochen.

5.3.3.1 Kraft Weg Verlauf der Kurzbiegeprüfung

Leider ist es mit dem Programm Test Expert nicht möglich die Interlaminare Scherspannung im Diagramm darzustellen, es werden darum Kraft Weg Diagramme gezeigt. In diesen sieht man, dass die Kraft solange anstieg, bis die Proben interlaminar versagten. Dann sank die Tragfähigkeit der Proben rapide, erst danach trat bei steigender Durchbiegung auch ein Versagen der Fasern unter Zug und Druck auf. Da hier keine Steifigkeit ermittelt wird, sondern allein die maximale Prüfkraft das Ergebnis darstellt, wurden die Diagramme nicht weiter ausgewertet. Man sieht in Abbildung 5.37 alle vier Materialien mit dem Biresin CR132 Harz und in Abbildung 5.38 den Kraft Weg Verlauf der Proben mit dem Laminierharz L418. Die Materialien gleichen Harzes unterscheiden sich nicht besonders hinsichtlich der Steifigkeit, die Unterschiede in der interlaminaren Scherfestigkeit sind aber beträchtlich. Sie ist also nicht nur eine Funktion des Harzes, sondern ganz klar auch noch von anderen Faktoren beeinflusst.

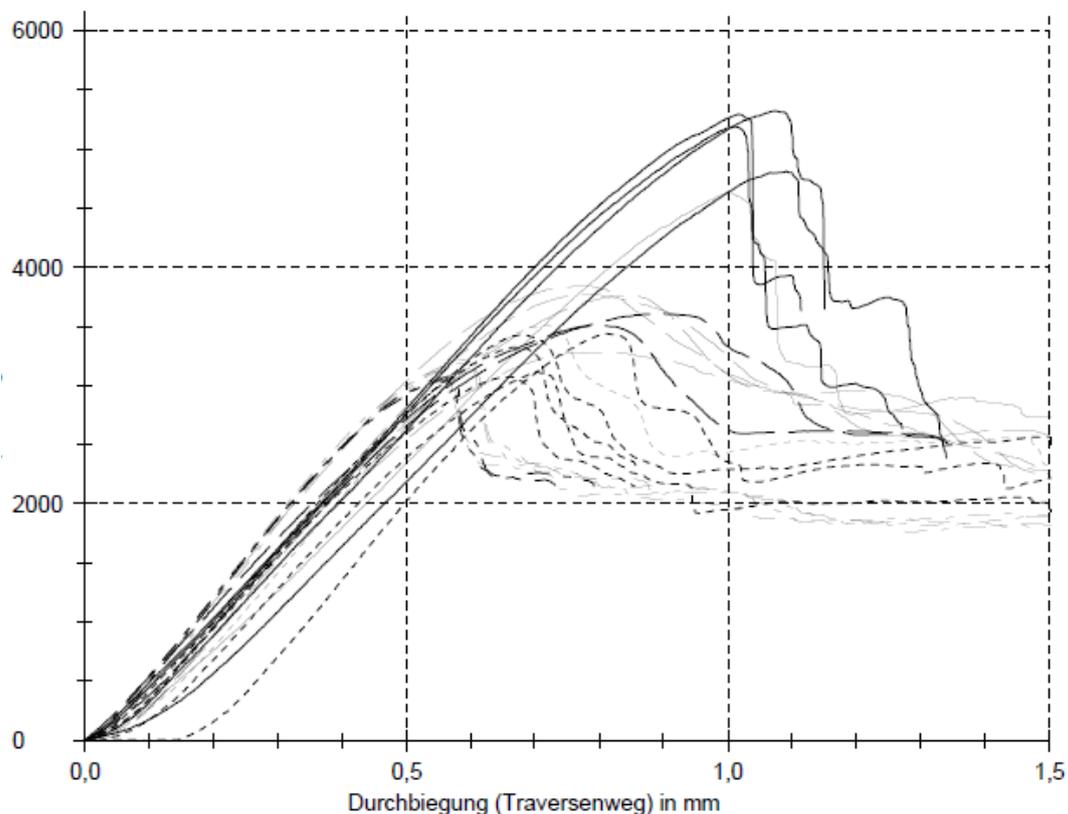


Abbildung 5.37 Kraft Weg Diagramm der Kurzbiegeversuche BiresinCR132 Harz

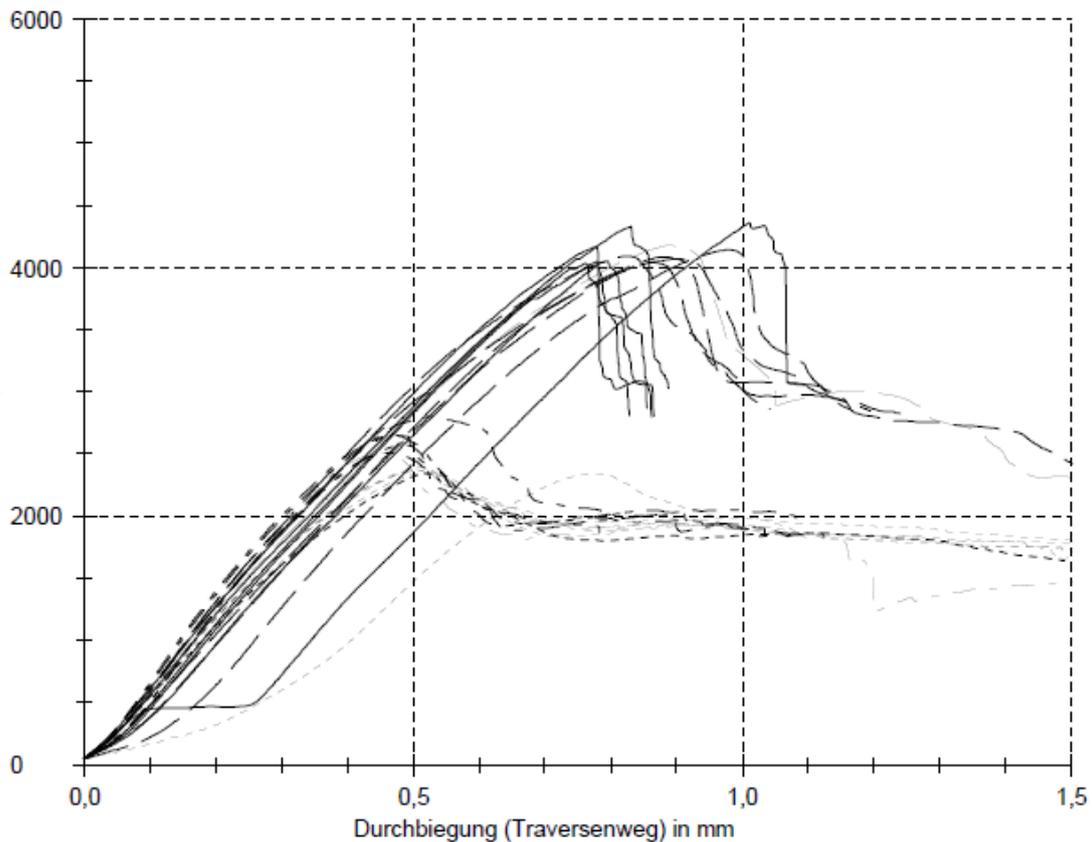


Abbildung 5.38 Kraft Weg Diagramm der Kurzbiegeversuche Laminierharz L418

5.3.3.2 Interlaminare Scherfestigkeit

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Maximalkraft, der Short Beam Strength und der interlaminaren Scherfestigkeit sind in Tabelle 5.12 aufgelistet. Die Interlaminare Scherfestigkeit liegt für die Proben mit dem Biresin CR132 Harz zwischen 102 und 123 MPa, für jene mit dem Laminierharz L418 zwischen 79 und 111 MPa. Wie weit Fasern, Poren und Aushärtungsgrad dies beeinflussen soll in 6.1 besprochen werden

Material /Probe	F_{max} [N]	F_{sbs} [MPa]	F_{ILS} [MPa]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/1 bar	5045 ±311	54,4 ±3,3	109 ±7
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/1 bar	3625 ±208	51,1 ±1,4	102 ±3
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar	3312 ±181	53,1 ±0,9	106 ±2
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/3 bar	3118 ±74	61,7 ±1,4	123 ±3
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/1 bar	4161 ±153	53,0 ±1,1	106 ±2
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/1 bar	4103 ±51	55,9 ±1,1	112 ±2
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/1 bar	2361 ±18	39,6 ±0,5	79 ±1
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/3 bar	2617 ±111	53,0 ±2,2	106 ±4

Tabelle 5.12 Scherfestigkeit

5.3.3.3 Versagensart der Kurzbiegeproben

Dieser Versuch liefert nur dann ein gültiges Ergebnis, wenn die Proben tatsächlich an interlaminarer Scherung versagen und nicht an Zug- oder Druckversagen der Fasern. Während der Versuchsdurchführung wurde das Versagensverhalten jeder Probe genau beobachtet. Sie versagten alle einseitig durch die Scherbelastung. Die für einen dicken Balken typische Verformung zeigt Abbildung 5.39 oberes Bild. Sie lässt auf eine Belastung durch Scherung schließen. Im Bild links unten sieht man, dass sich die Lagen bereits voneinander ablösen. Rechts unten ist eine Probe bei weiterer Durchbiegung, man sieht am gestuften Probenrand, dass die Probelagen bereits voneinander abgelöst waren, bevor das Zugversagen der Faser eintrat.

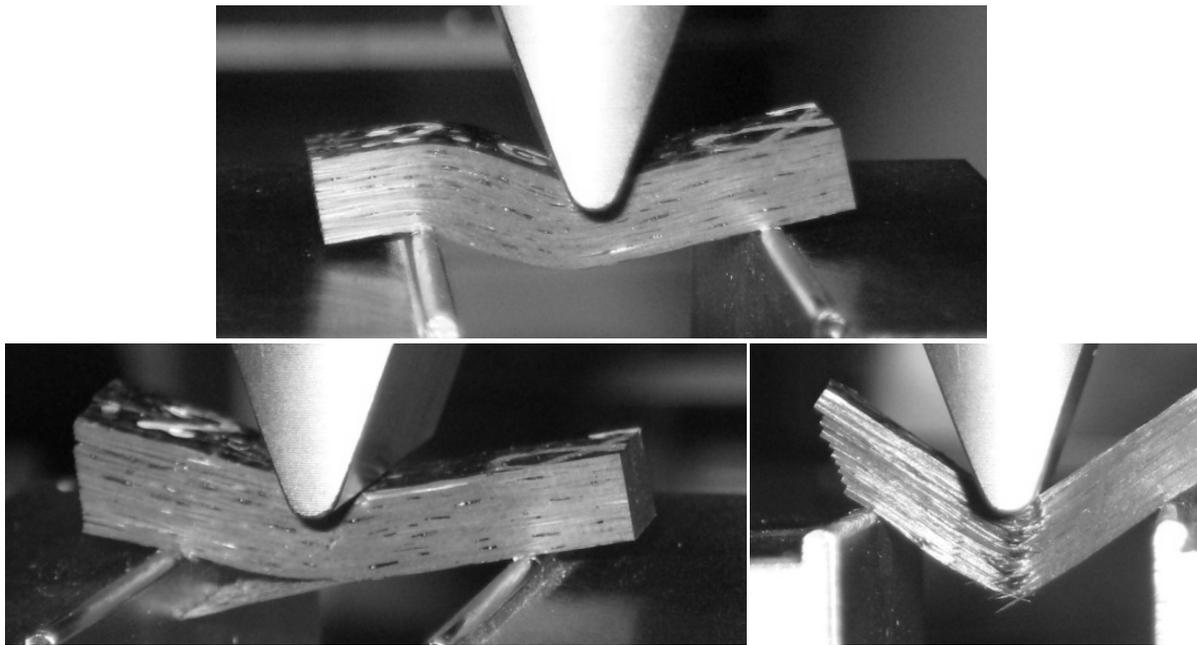


Abbildung 5.39 Kurzbiegeproben unter Last

5.3.4 Rechnerischer E-Modul und Zugfestigkeit

Aus den in Kapitel 4.1 angegebenen Materialkennwerten der Einzelmaterialien kann für die UD Materialien ein rechnerischer E-Modul und eine Zugfestigkeit ermittelt werden. Hierfür werden der gemessene Faservolumenanteil und die Mischungsregel aus [18] (Formeln 5.2 und 5.3) verwendet. Sie ist für unser Material gültig, da der Faservolumenanteil hoch genug ist.

5.2

5.3

<i>E_v</i> ... E-Modul Verbund;	<i>E_f</i> ... E-Modul der Faser;
<i>E_m</i> ... E-Modul der Matrix;	<i>V_f</i> ... Faservolumenanteil;
<i>V_m</i> ... Matrixvolumenanteil;	<i>V</i> ... Zugfestigkeit des Verbundes;
<i>F</i> ... Zugfestigkeit der Faser;	<i>M</i> ... Zugfestigkeit der Matrix

Der ermittelte Zugmodul und die Zugfestigkeit sind nicht direkt mit den in den Versuchen ermittelten Werten vergleichbar, sie lassen aber eine Reihung der Materialien untereinander zu und können, da die Volumengehalte von Poren, Matrix und Fasern in ihnen berücksichtigt sind, dabei helfen, andere Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften zu identifizieren.

	No	E _v [GPa]	σ _V [MPa]
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	2	131	1484
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	3	140	2713
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	4	156	3034
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	6	138	1562
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	7	149	2016
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	8	159	2147

Tabelle 5.13 rechnerische Steifigkeit und Festigkeit

6 Diskussion der Ergebnisse

Um zu verstehen wie der Aufbau der Verbundmaterialien, die Fehlstellen und die mechanischen Eigenschaften der geprüften Materialien zusammenhängen, werden die gemessenen Kennwerten miteinander verknüpft und verglichen. Es werden auch noch aus den Kennwerten der Fasern und der Matrixmaterialien rechnerische Materialkennwerte des Verbundes ermittelt und die gemessenen mit ihnen und mit Angaben der Hersteller verglichen.

6.1 Mikroskopischer Materialaufbau, Fehlstellen und Festigkeit

Da die Fasern als Gewebe verarbeitet werden sind auch im Aufbau der Materialien die Gewebelagen immer noch sichtbar. In Abbildung 6.1 sieht man sehr gut dass zwischen den Lagen breite Harzbereiche sind. Diese wirken sich auch auf die Festigkeit aus. Sie bilden besonders in den interlaminaren Scherversuchen Gleitlagen beziehungsweise Risspfade.

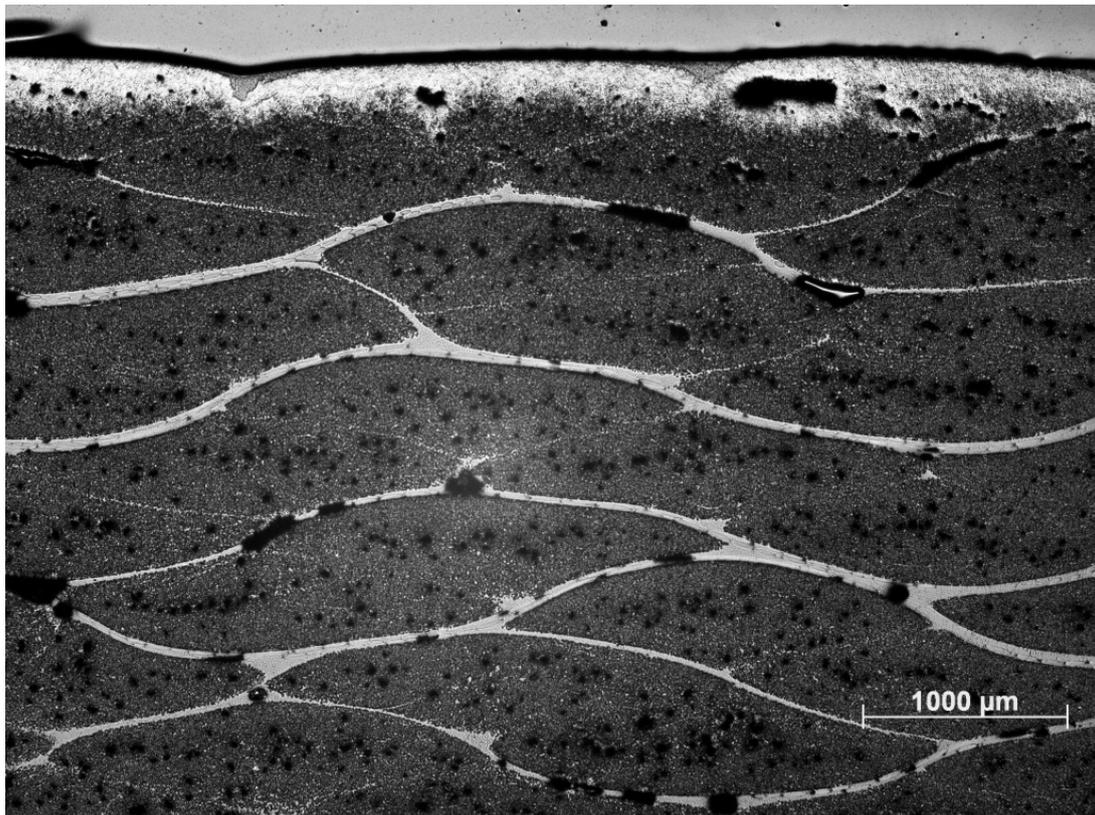


Abbildung 6.1 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1

Auch die Welligkeit der Fasern resultiert aus dem Produktionsprozess, sie wird auch durch die Hilfsfasern verstärkt und reduziert die Steifigkeit und die Festigkeit. Auch die Poren reduzieren die Festigkeit im Vergleich zu rechnerischen Werten, da sie Mikroschäden darstellen, welche zu Spannungskonzentrationen führen und somit die Risseinleitung beschleunigen. In [19] ist auch beschrieben, dass sie zu schnellerer Rissausbreitung im Laminat führen.

6.1.1 Volumengehalt von Faser, Matrix und Poren

Die mit den verschiedenen Methoden bestimmten Volumengehalte werden in Tabelle 6.1 miteinander verglichen. Es fällt auf, dass die Ergebnisse der thermogravimetrischen Methode sowohl für den Faseranteil, als auch für den Harzanteil zwischen denen der anderen beiden Methoden liegen. Weiters ist diese Methode, der lichtmikroskopischen insofern überlegen, als dass der untersuchte Bereich wesentlich größer ist und der Methode der alleinigen Dichtemessung insofern, dass der Anteil der Poren im Ergebnis berücksichtigt werden kann.

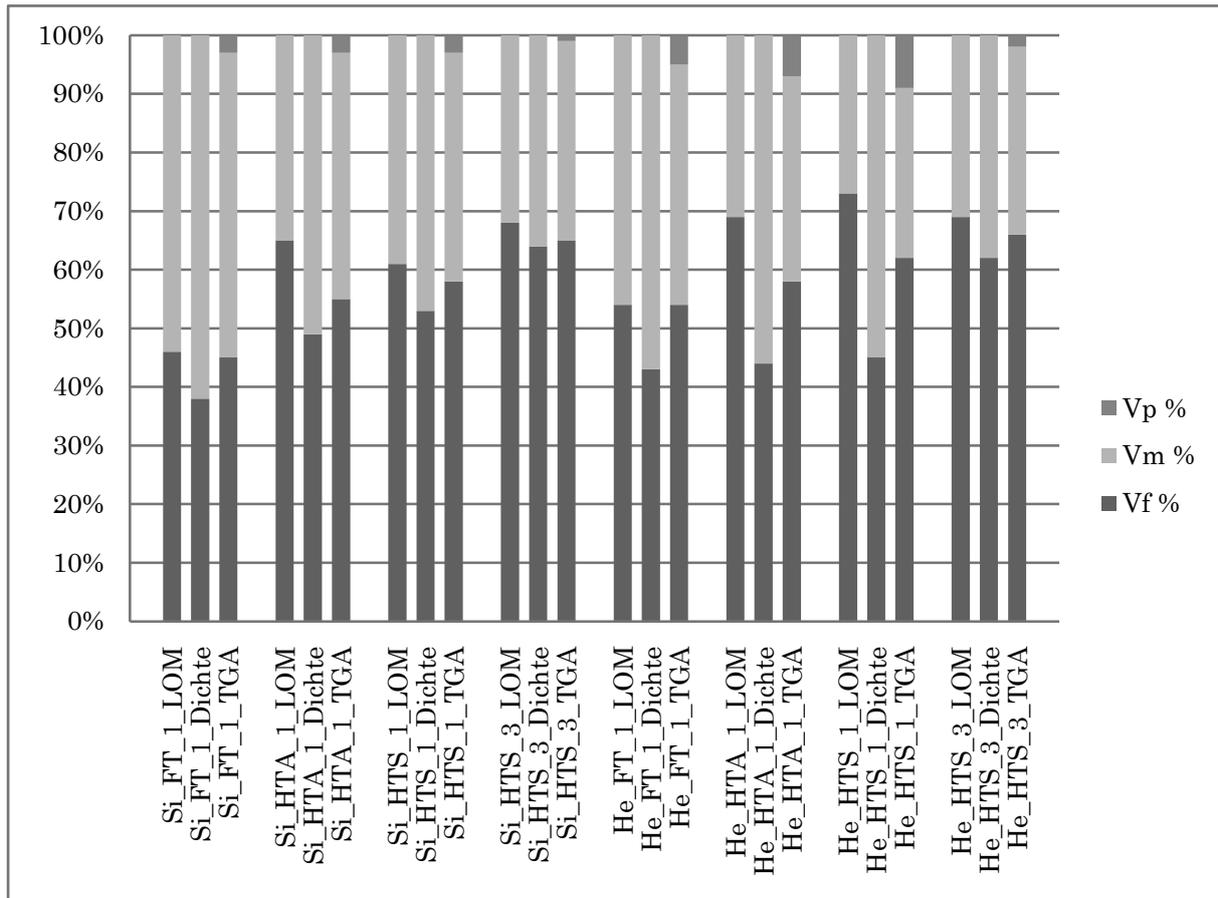


Abbildung 6.2 Methodenvergleich der Volumenanteilsbestimmung

Interessant ist auch, dass der Unterschied zwischen den Methoden bei den nahezu porenfreien Materialien sehr gering ist, während er bei den Materialien mit Poren wesentlich größer ausfällt. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass für die Auswertung lichtmikroskopische Aufnahmen aus porenfreien Faserbündeln herangezogen wurden. Bei der Berechnung der Volumenanteile aus der Dichtemessung wird bei hohem Porenanteil der Matrixanteil zu hoch berechnet und der Faseranteil zu niedrig. Mehr zur Genauigkeit der einzelnen Methoden wurde bereits in den entsprechenden Abschnitten von Kapitel 5 gesagt.

Material	Lichtmikroskopie		Dichtemessung		Thermogravimetrie		
	Vf %	Vm %	Vf %	Vm %	Vf %	Vm %	Vp %
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	46	54	38	62	45	52	4
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	65	35	49	51	55	42	3
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	61	39	53	47	58	39	3
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	68	32	64	36	65	34	1
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	54	46	43	57	54	41	5
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	69	31	44	56	58	35	7
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	73	27	45	55	62	29	9
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	69	31	62	38	66	32	2

Tabelle 6.1 Volumenanteile im Methodenvergleich

Im weiteren werden die TGA-Ergebnisse als die Ergebnisse für den Faser-, Harz-, und Porenanteil gesehen. Diese Festlegung ist auch wichtig für die Korrelation zwischen Zusammensetzung und makromechanischen Eigenschaften, sowie eventuelle Betrachtungen inwieweit die mechanischen Kennwerte vom Porenanteil beeinflusst werden.

Normalerweise gilt für ein Handlaminat, welches im Vakuumsack ausgehärtet wurde nach [12] ein Porengehalt zwischen 1 % und 5 % als normal, darüberliegende Porengehalte gelten als problematisch. Die Porengehalte der Materialien Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar und Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar sind eindeutig zu hoch. Dies ist auch in Abbildung A.16 bis Abbildung A.21. eindeutig erkennbar. Die Faservolumenanteile dieser Materialien sind höher als jene mit gleichen Fasern, aber Biresin CR132 Harz. Der Anteil der Matrix ist entsprechend niedriger.

6.1.2 Zusammenhang zwischen Faservolumengehalt und mechanischen Kennwerten und Vergleich mit Werten aus der Literatur und Herstellerangaben

Zum Vergleich werden in Tabelle 6.2 noch einmal alle experimentell ermittelten Steifigkeits- und Festigkeitskennwerte aufgelistet. Diese erscheinen im ersten Moment als sehr gering im Vergleich zu den berechneten E-Moduli und zur Zugfestigkeit. Die Biege Kennwerte sollten, wie in Abbildung 6.6 zu sehen ist, in einem ähnlichen Bereich wie die Zugkennwerte gelagert sein.

Kennwert	Biegeprüfung		DMA	Kurzbiege	
	E _b [GPa]	σ _b [MPa]	E' [GPa]	F ^{SBS} [MPa]	F ^{ILS} [MPa]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	43	544	35	54	109
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	85	616	91	51	102
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	93	628	101	53	106
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	102	725	106	62	123
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	48	544	52	53	106
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	70	468	88	56	112
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	83	461	114	40	79
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	88	725	117	53	106

Tabelle 6.2 gemessene Steifigkeit und Festigkeit

Anschaulicher lassen sind die gemessenen Moduln im Diagramm in Abbildung 6.3 vergleichen. Die gemessenen Werte sind zwar wesentlich niedriger sind als die berechneten, die Materialien sind aber bei allen Steifigkeitswerten zueinander gleich positioniert. Der DMA-Speichermodul ist immer etwas höher als der Biegemodul, dies ergibt sich aus der unterschiedlichen Messmethode. Lediglich das Material Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar stellt hier eine Ausnahme dar.

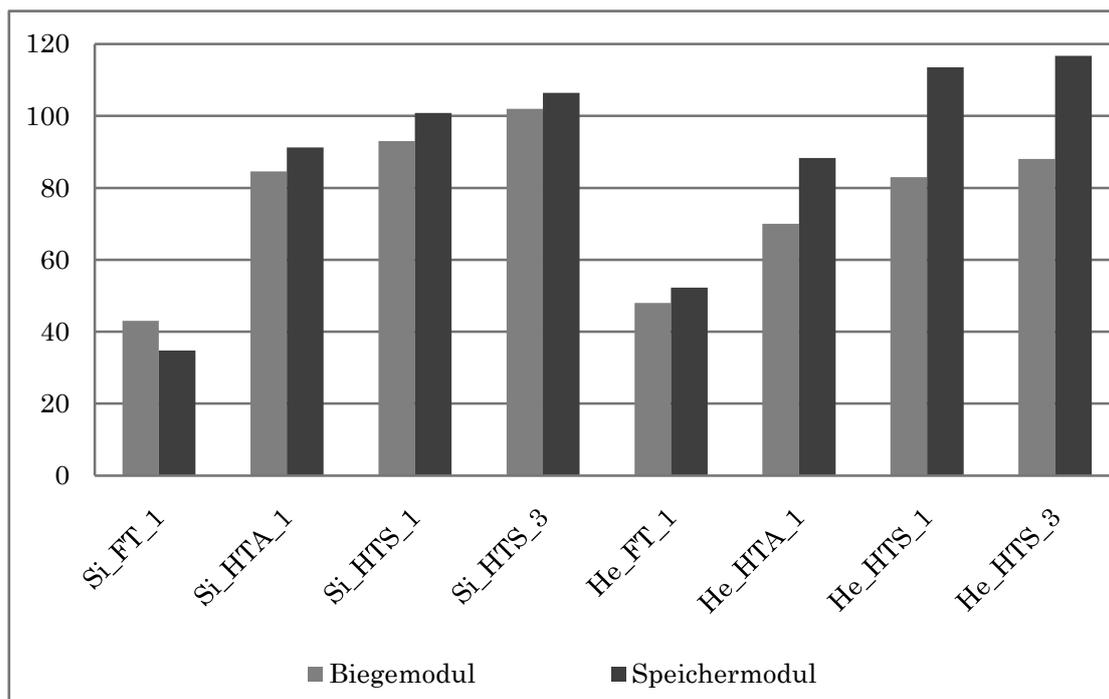


Abbildung 6.3 Übersicht der Steifigkeitskennwerte

6.1.2.1 Zusammenhang zwischen Faservolumengehalt und mechanischen Eigenschaften

Da die Steifigkeit und die Festigkeit der Faser jene des Harzes bei Weitem übersteigt, hängen die meisten mechanischen Eigenschaften in erster Näherung nur vom Faservolumengehalt ab. Abbildung 6.4 zeigt, die gemessenen Steifigkeitswerte der UD-Proben über dem Faservolumengehalt, die Biegefestigkeit über Selbigem ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Der lineare Zusammenhang ist tendenziell sichtbar. Für die Interlaminare Scherfestigkeit lässt sich dieser Zusammenhang nicht herstellen.

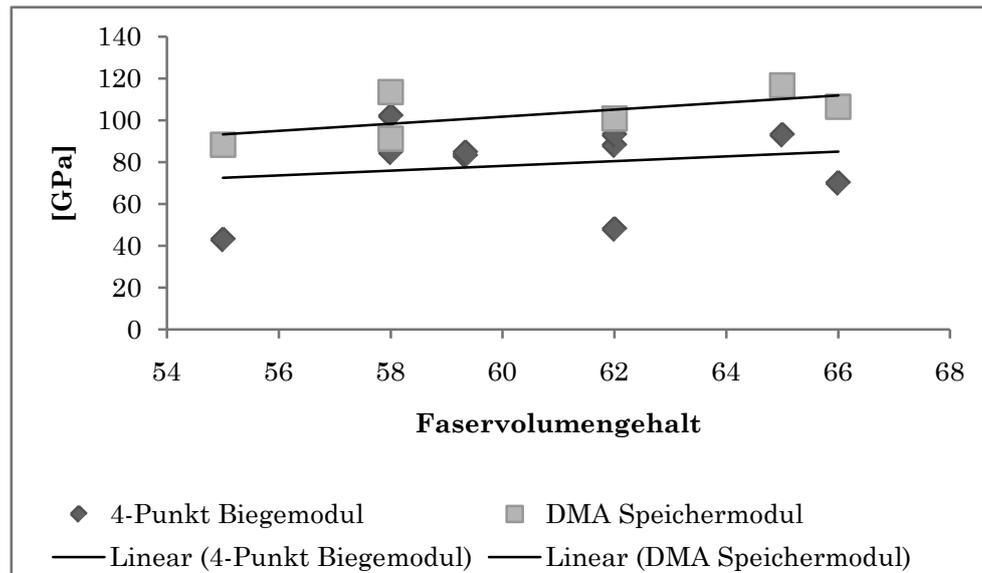


Abbildung 6.4 Diagramm Steifigkeit über Faservolumengehalt

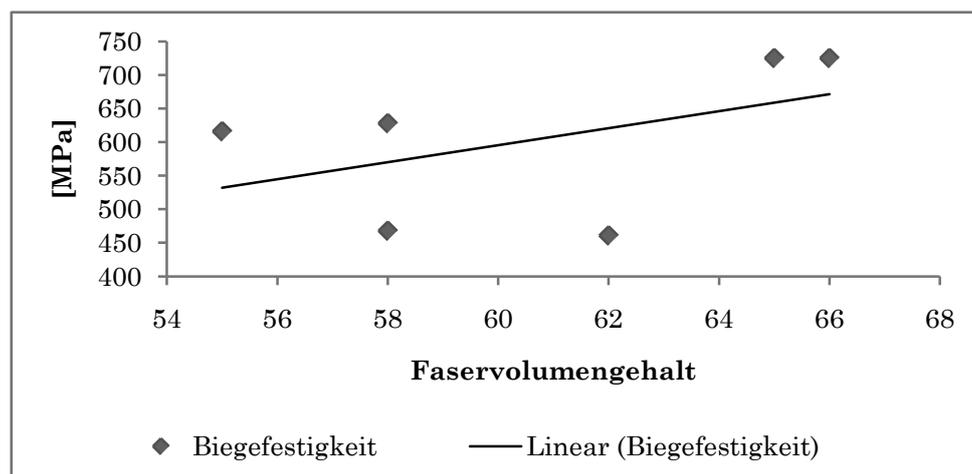


Abbildung 6.5 Diagramm Festigkeit über Faservolumengehalt

6.1.2.2 Normierung der gemessenen Daten auf Standardvolumengehalte zum Vergleich

Der lineare Zusammenhang zwischen Faservolumengehalt und mechanischen Eigenschaften wird zur Ermittlung von normierten Kennwerten zu Vergleichszwecken genutzt.

6.1

6.2

En...normierter Modul; *Eg...gemessener Modul;*
Vfn...normierter Faservolumenanteil;
VfTGA...mit TGA Methode gemessener Faservolumenanteil
bn...normierte Biegefestigkeit; *bn... gemessene Biegefestigkeit*

Mit den Formeln 6.1 und 6.1 werden die gemessenen Kennwerte auf 60 % Faservolumenanteil normiert. Damit sollte es möglich sein die Werte miteinander und mit den Werten in Abbildung 6.6 zu vergleichen.

Kennwert	Biegeprüfung		DMA
	E _{bn} [GPa]	σ _{bn} [MPa]	E' [GPa]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	57	725	46
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	92	672	99
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	96	650	104
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	94	669	98
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	53	604	58
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	72	484	91
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	80	446	110
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	80	659	106

Tabelle 6.3 auf 60 % normierte Steifigkeit und Festigkeit

Nach der Normierung sieht man, dass der Unterschied zwischen den Materialien geringer ist, als er auf den ersten Blick erscheint. Auffällig ist aber, dass jene Materialien bei denen der Porengehalt niedrig ist, mit beiden Harzsystemen fast identische Festigkeitskennwerte aufweisen, während sie sich bei jenen mit unterschiedlichen Porengehalten stark unterscheiden.

Aus einem Vorlesungsskript [1] ist die Abbildung 6.6 entnommen. Die Werte in Spalte drei für 0° Laminate sollten den gemessenen UD Werten entsprechen, jene in Spalte fünf denen der 0/90° Proben. Bei Vergleich der Werte stellt man fest, dass die untersuchten Materialien wesentlich geringere Biegemodule und Biegefestigkeiten aufweisen. Dies verwundert allerdings bei näherem Hinsehen nicht, da die Literaturquelle eine sehr allgemeine Angabe von Werkstoffwerten darstellt. Es wird nicht auf genauere Produktionsbedingungen, den Porengehalt und ander Einflüsse eingegangen. Allein die Interlaminare Scherfestigkeit nach DIN EN 2563 (F^{ILS}) würde den angegebenen Werten entsprechen, vermutlich ist auch diese gemeint, da es sich um eine deutsche Literaturstelle handelt.

Eigenschaften von CFK-Laminaten mit Epoxi-Matrix

Eigenschaften	Einheit	Harzsystem BSL 914	Laminat			
			0°	90°	0/90°	± 45°
Faservolumenanteil	Vol %	0	60	60	60	60
Dichte	g/cm ³	1,2 – 1,3	1,5	1,5	1,5	1,5
Zugfestigkeit	N/mm ²	60 – 80	1600	60	700	180
Elastizitätsmodul (Zug)	kN/mm ²	3,5	130	9	70	23
Biegefestigkeit	N/mm ²	80 – 120	1700	100	600	-
Elastizitätsmodul (Biegung)	kN/mm ²	3,5	120	9,5	60	-
Interlaminare Schubfestigkeit	N/mm ²	-	90	10	40	-
Druckfestigkeit	N/mm ²	90	1200	220	700	180
Elastizitätsmodul (Druck)	kN/mm ²	3,5	130	9	70	23
Schubfestigkeit	N/mm ²	35	90	90	-	-
Schubmodul	kN/mm ²	1,3	5 – 6	5 – 6	5 – 6	30 – 35
Bruchdehnung	%	-	1,1	0,6	1,0	5 – 6
Wärmedehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ /K	40 – 60	-0,5 – 0	30 – 50	0,8 – 2,0	3 – 5

Abbildung 6.6 Eigenschaften von CFK Laminaten mit Epoxi Matrix [1]

Entgegen der zitierten Literatur gibt der Hersteller für das Laminierharz L418 für unidirektionales CFK Material mit einem Faservolumenanteil von 43 % eine Biegefestigkeit von nur 720-770 N/mm² eine interlaminare Scherfestigkeit von 47-55 N/mm² und einen E-Modul aus Biegeversuch von 40-45 kN/mm² an. Zum Vergleich werden die ermittelten Werte nun auf 43 % Faservolumenanteil normiert und in Tabelle 6.4 angegeben. Die untersuchten Materialien schneiden in puncto Biegefestigkeit geringfügig schlechter ab. Der gemessene Biegemodul ist ungefähr doppelt so hoch. Die Messergebnisse werden diesmal auf 43 % Fasern, 54 % Harz und 3 % Poren normiert. Da die Festigkeit der beiden Harze fast gleich ist, sind diese Vergleichswerte also auch für das Biresin CR132 Harz passend.

Kennwert	Biegeprüfung		DMA
	E _{bn} [GPa]	σ _{bn} [MPa]	E' n [GPa]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	41	520	33
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	66	482	71
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	69	466	75
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	67	480	70
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	38	433	42
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	52	347	65
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	58	320	79
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	57	472	76

Tabelle 6.4 auf 43 % normierte Steifigkeit und Festigkeit

6.1.3 Versagensmechanismen

Die Versagensmechanismen der mechanischen Prüfung wurden teilweise schon in Kapitel 5 besprochen. Bei den Biegeproben mit Fasern in 0/90° Richtung trat ein Zugversagen der unteren Randfaser in Kombination mit Delamination auf. Bei den UD-Proben war Druckversagen der oberen Randfaser, meist kombiniert mit Delamination zu beobachten. Vermutlich sind größere Poren im Material oft der Beginn eines Bruches, die untersuchten Mikrofraktografieproben wiesen immer im Übergang zwischen Delamination und Zug,- beziehungsweise Druckbruch große Poren zwischen den Lagen auf.

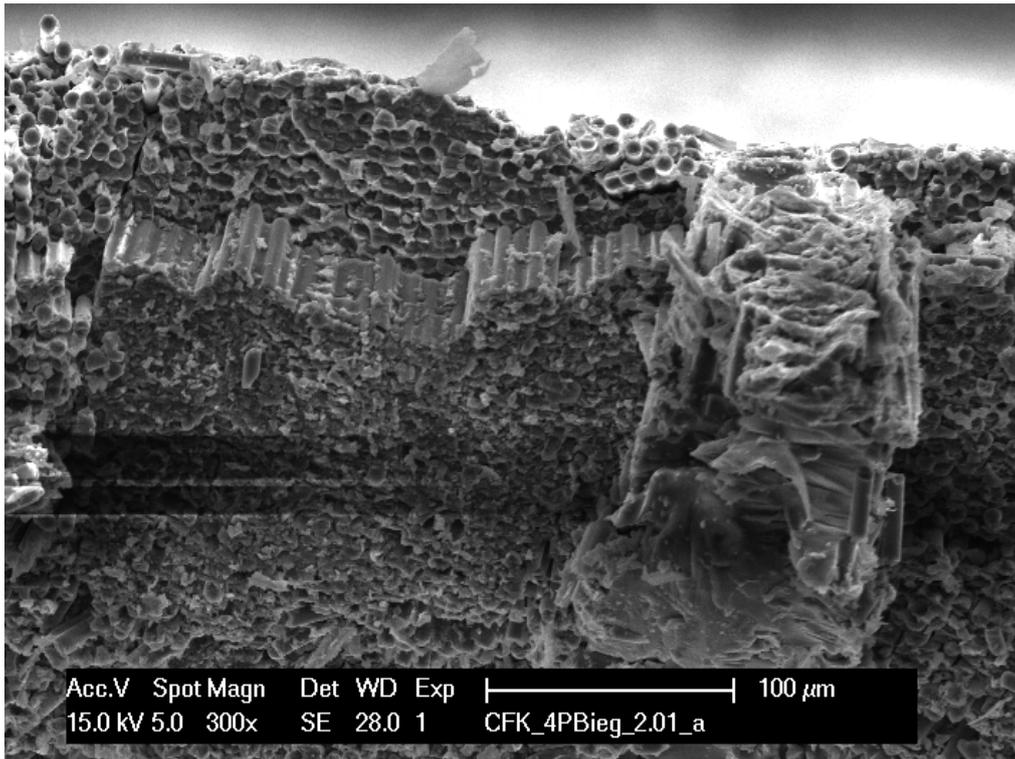


Abbildung 6.7 Knickband und Harznest einer Biegeprobenbruchfläche

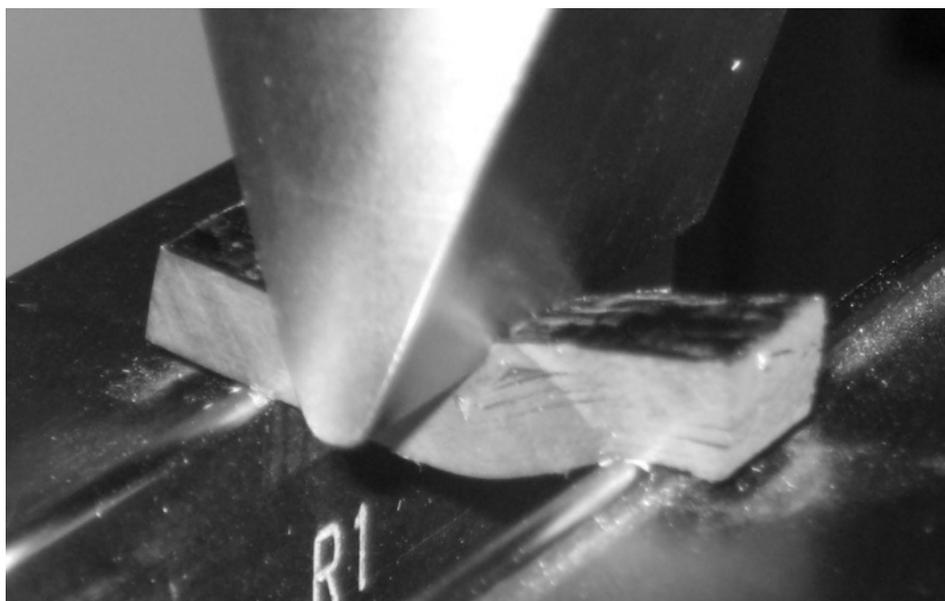


Abbildung 6.8 abgelöste Lagen einer Kurzbiegeprobe

Bei den interlaminaren Scherproben war immer ein Auseinanderschneiden der Lagen Bruch auslösend. Dies ist in den Aufnahmen der Proben klar erkennbar. Die Abbildung 6.8 zeigt eine solche Probe unter Last. Dass die Lagen annähernd gleich dick sind, zeigt Abbildung 6.9. Auch der Verlauf der Bruchflächen ist sehr gut erkennbar.

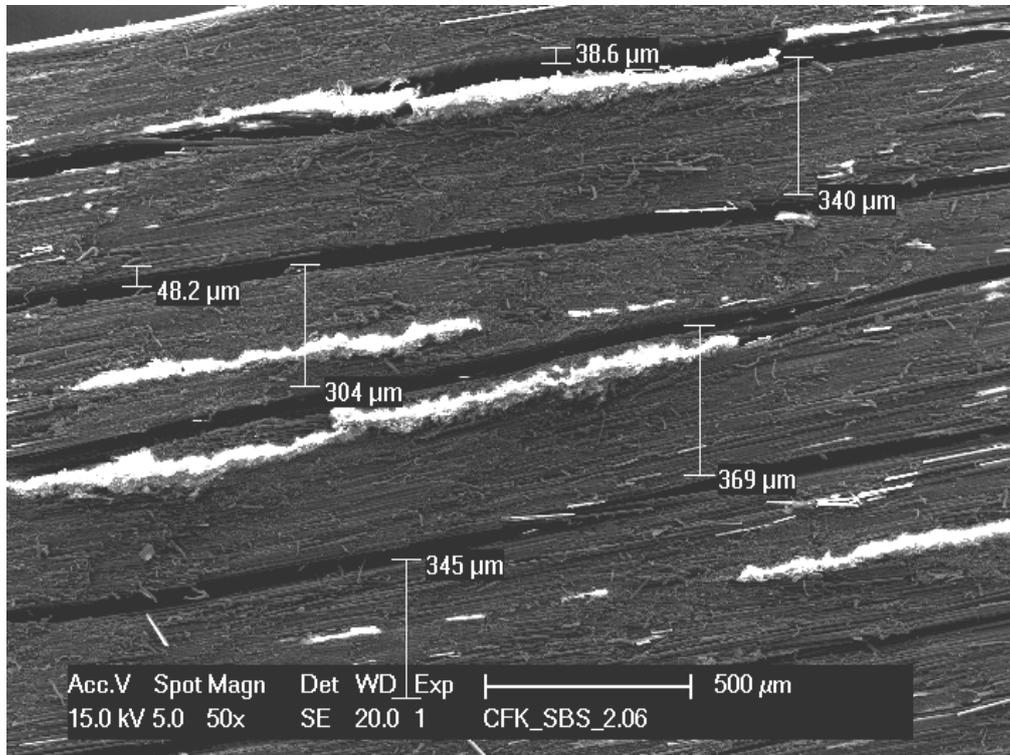


Abbildung 6.9 Dicke der Lagen einer Kurzbiegeprobe

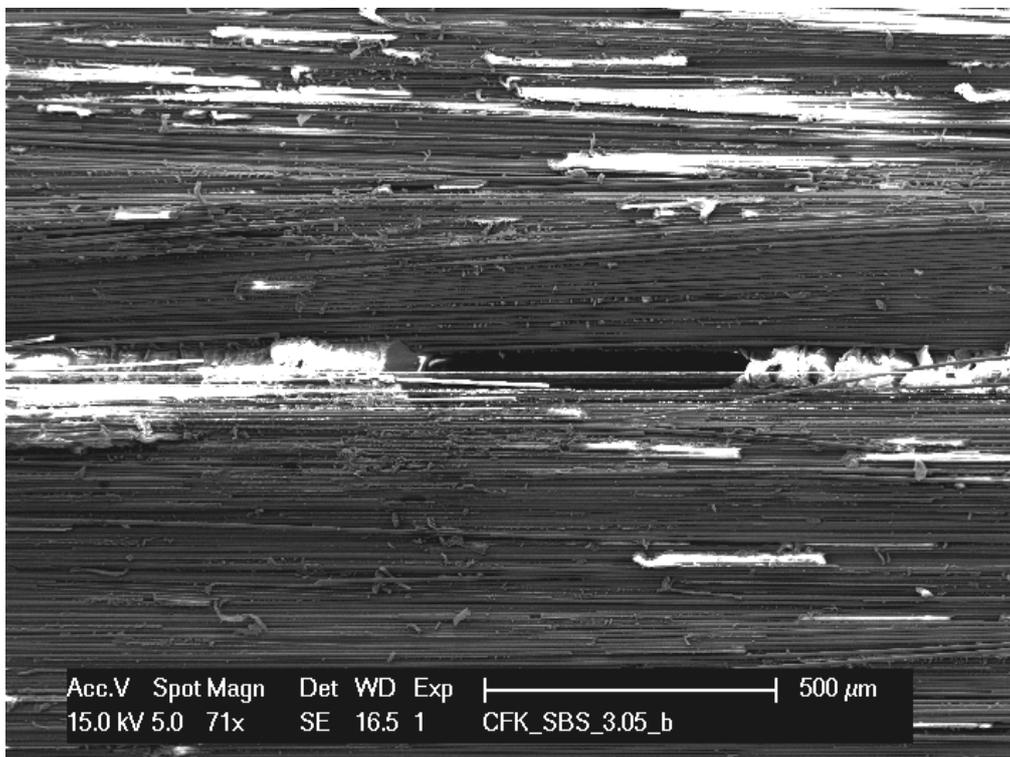


Abbildung 6.10 freigelegte Bruchfläche einer Kurzbiegeprobe

6.1.3.1 Haftung zwischen Faser und Matrix

Die freigelegten Bruchflächen zeigen, dass Harz und Faser sehr oft sauber voneinander abgelöst wurden. Dies ist gut in Abbildung 5.15, Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 zu sehen. Die Haftung zwischen den beiden Komponenten scheint ein Schwachpunkt der Materialien zu sein, was die Interlaminare Festigkeit im Vergleich zu theoretischen Werten sicher herabsetzt.

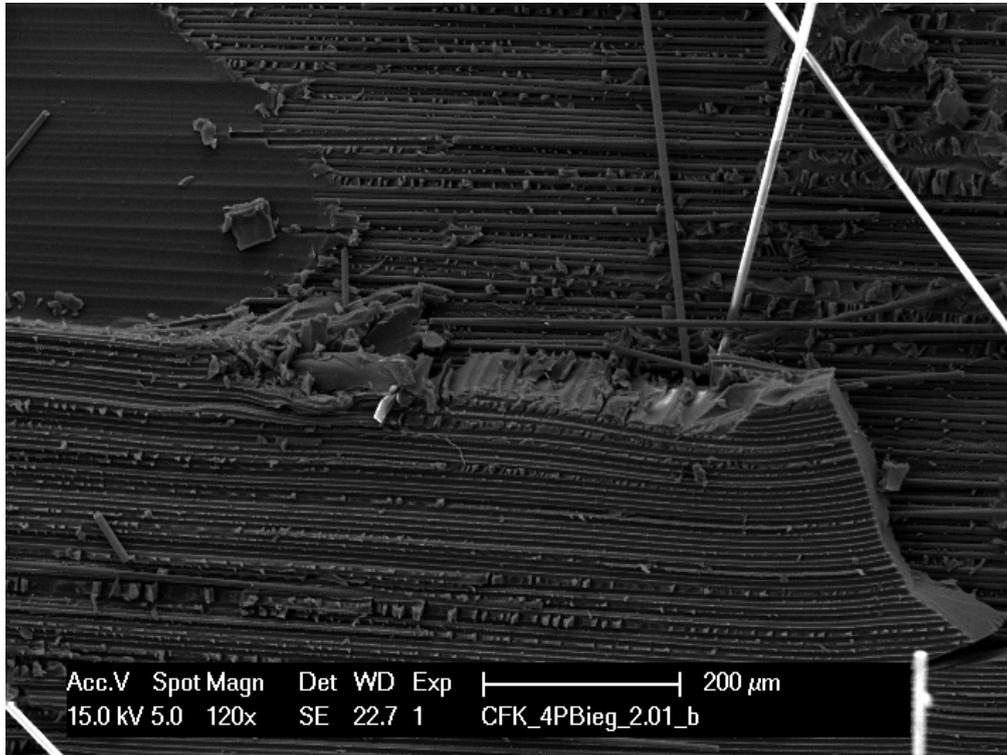


Abbildung 6.11 freigelegte Bruchfläche einer Biegeprobe

6.1.3.2 Proben unter Wechsellast und Akustische Emissionsmessung

Bei der AE-Messung von Probe 1.04 aus dem Material Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar sieht man, dass bereits im ersten Lastzyklus bei nur 350 MPa kleine Harzbrüche stattfinden. Die Ereignisanzahl steigt mit jedem Lastzyklus. Bei 200 sec ist die Schädigung schließlich so groß, dass eine Delamination oder ein größerer Harzbruch stattgefunden hat. Der AE Ausschlag beträgt 280 Events und danach sinkt der Biegemodul (ab Modul 5) der Probe. Versagen der Fasern tritt erst im nächsten Lastzyklus auf und in Zyklus 6 versagt die Probe schließlich bei 550 MPa, was der mittleren Biegefestigkeit dieses Material entspricht.

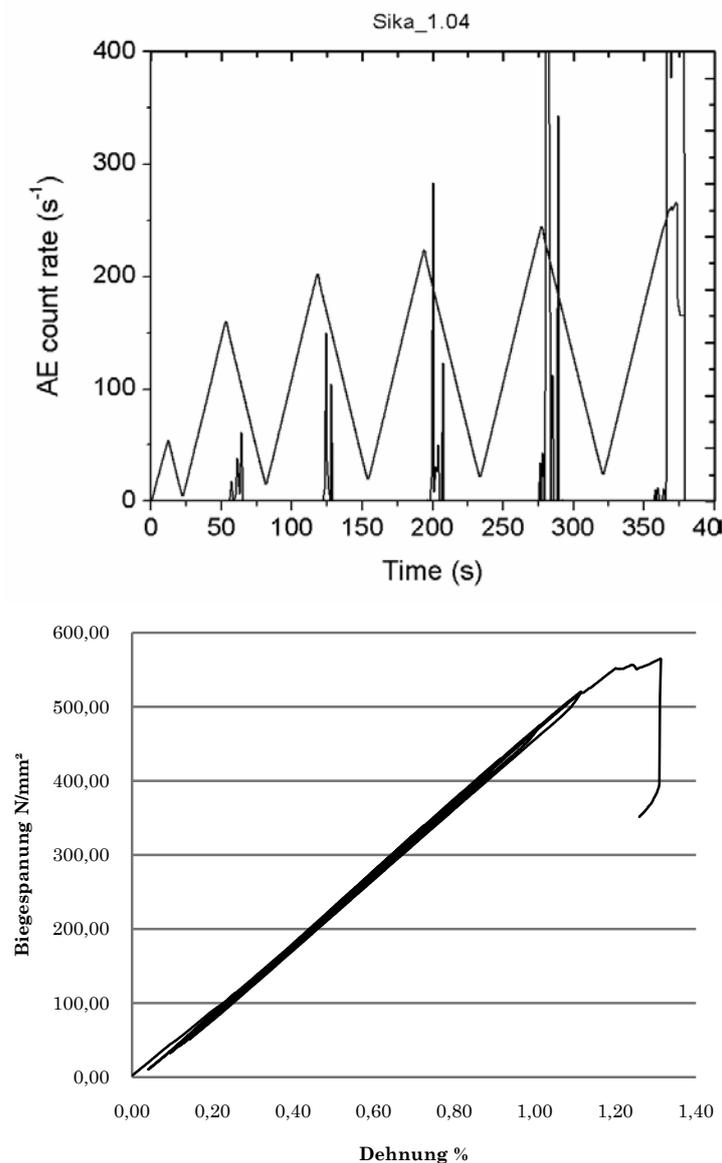


Abbildung 6.12 akustische Emission und Spannungs Dehnungs Diagramm Probe 1.04

Die AE Events bei Probe 1.04 treten immer in derselben Zyklusphase kurz nach der Entlastung auf. Sie Steigen mit der Belastungshöhe an. Bei Probe 1.05 sind immer in der Belastungsspitze AE Events zu beobachten. Der Modul sinkt aber erst in den letzten zwei Zyklen.

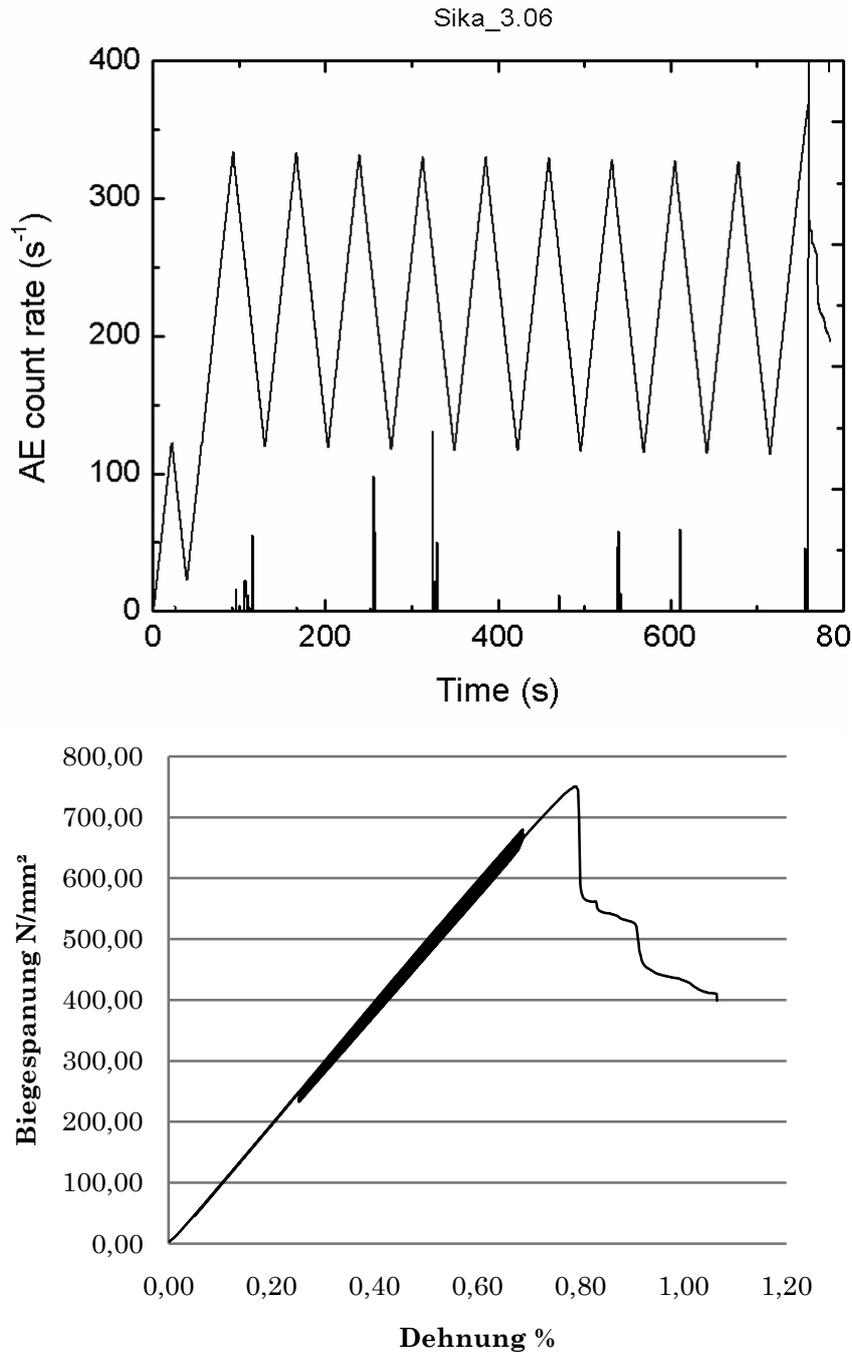


Abbildung 6.13 akustische Emission und Spannungs Dehnungs Diagramm 3.06

Probe 3.06 ist eine besonders starke Probe ihrer Materialgruppe. Sie hat die zehn Lastzyklen bei fast gleichbleibendem Biegemodul von 99 GPa mit ganz niedrigen AE Signalen, welche auf kleine Brüche im Harz hinweisen überstanden. Sie versagte im Zyklus 11 schlagartig bei 750 MPa Biegespannung.

6.1.4 Zusammenhang zwischen Fehlstellen und mechanischen Kennwerten

6.1.4.1 Fasermisorientierung

Besonders aufgefallen ist die Probe Si_HTS_3bar_10. Sie hatte in der oberen Randfaser im Prüfbereich eine Fasermisorientierung um ca. 45°, diese Probe hatte einen signifikant niedrigeren Biegemodul und hat frühzeitig versagt. Sonst wurde die Fasermisorientierung nicht näher untersucht.

6.1.4.2 Einfluss der Poren auf die Festigkeit

Ob ein erhöhter Porengehalt die Modulwerte negativ beeinflusst ist aus den Messungen nicht klar hervorgegangen. In den Diagrammen der Abbildung 6.14 ist aber zu erkennen, dass die ermittelten Festigkeitswerte mit zunehmendem Porengehalt des Materials abnehmen. Dies ist, da hier verschiedene Materialkombinationen miteinander verglichen werden, als rein qualitative Aussage zu verstehen.

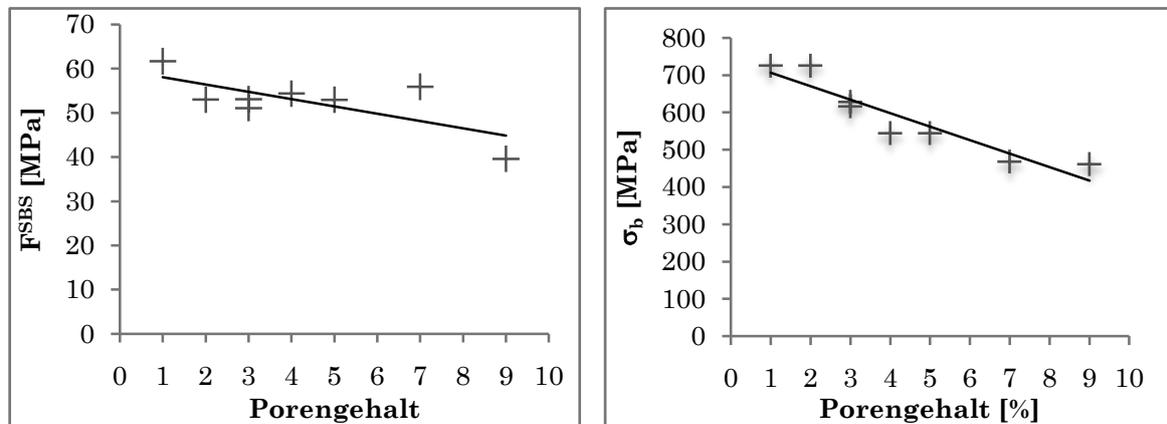


Abbildung 6.14 Zusammenhang zwischen Festigkeit und Porengehalt

Sicherlich ist es so, dass nicht nur der Porengehalt sondern auch die Form und Verteilung der Poren einen Einfluss auf die Festigkeit hat. Anders wäre der große Unterschied in der Biegefestigkeit selbst nach Normierung auf Volumenanteile zwischen den Materialien Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar und Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar sowie Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar und Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar nicht erklärbar.

Material	σ_{bn} [MPa]
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	662
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	747
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	633
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	789

Erst beim direkten Vergleich der mikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 6.15 bis Abbildung 6.18 dieser Materialien sieht man, dass bei den mit 1 bar Ausgehärteten besonders viele Poren zwischen den Faserbündeln bzw. Gewebelagen sind. In der Abbildung 6.17 sieht man, dass diese Poren die Harzschicht zwischen den Lagen extrem reduziert, was natürlich zu einer verringerten interlaminaeren Festigkeit führt.

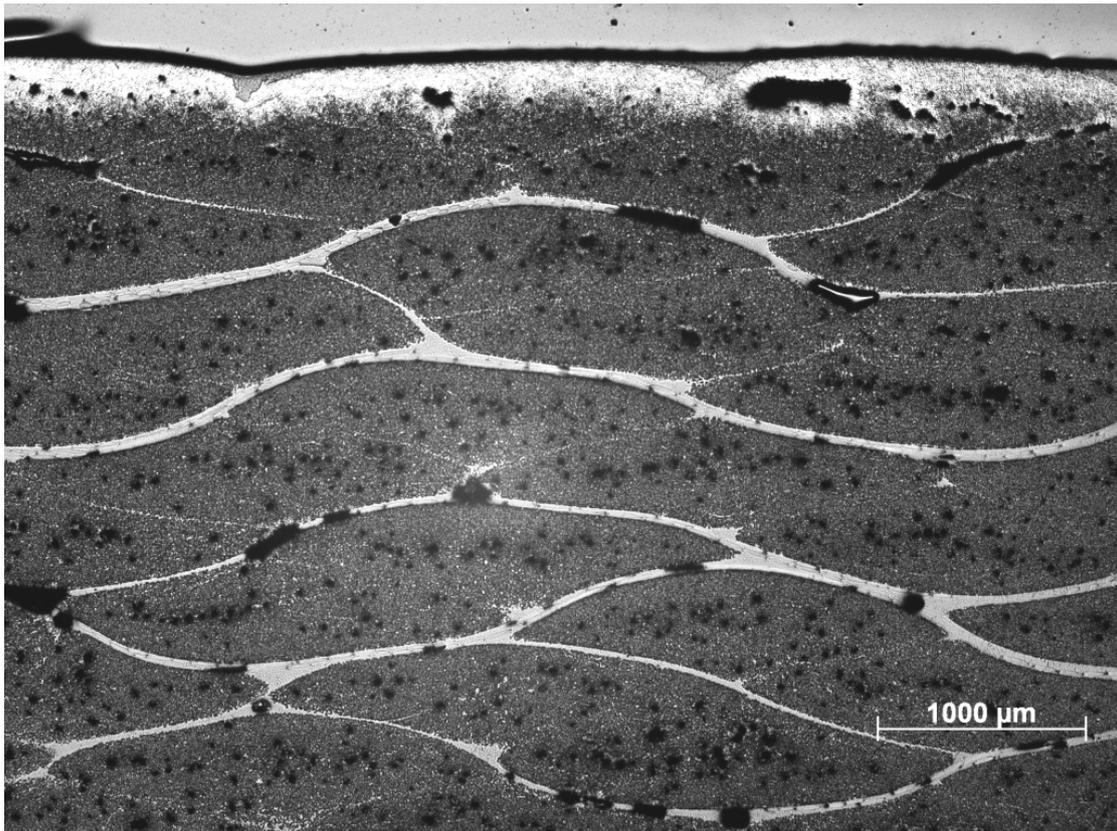


Abbildung 6.15 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1

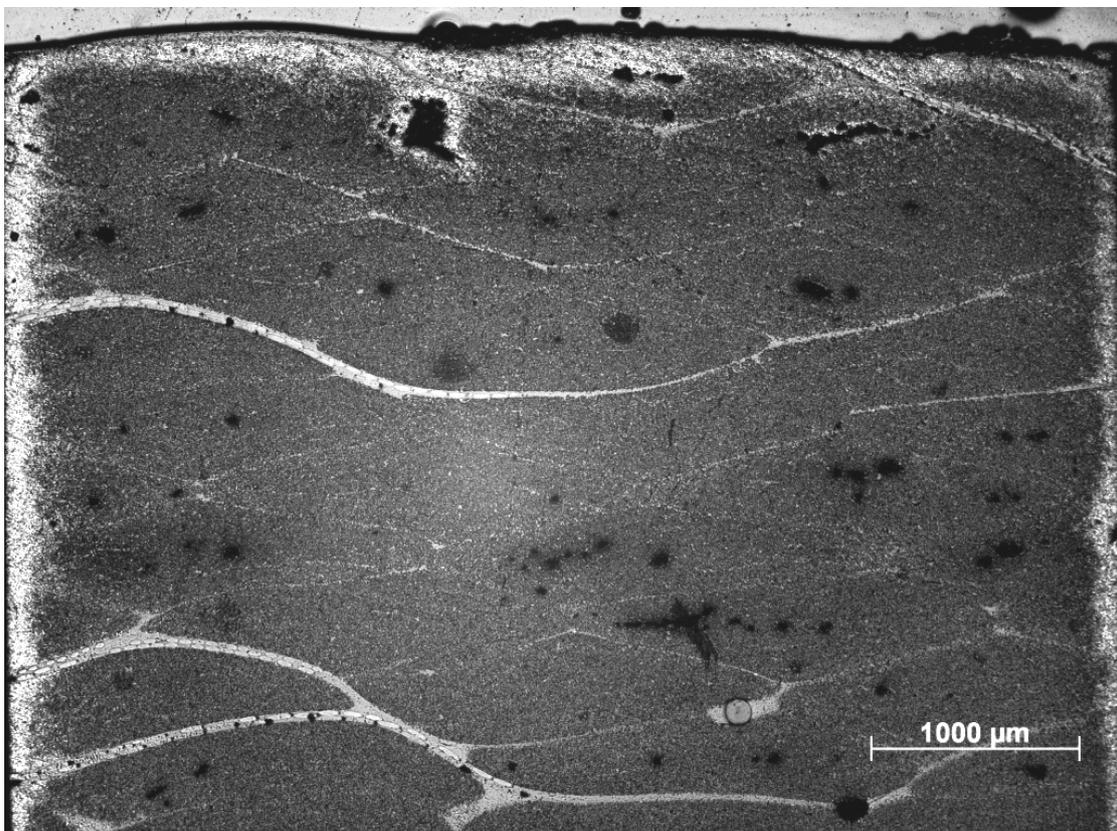


Abbildung 6.16 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 1

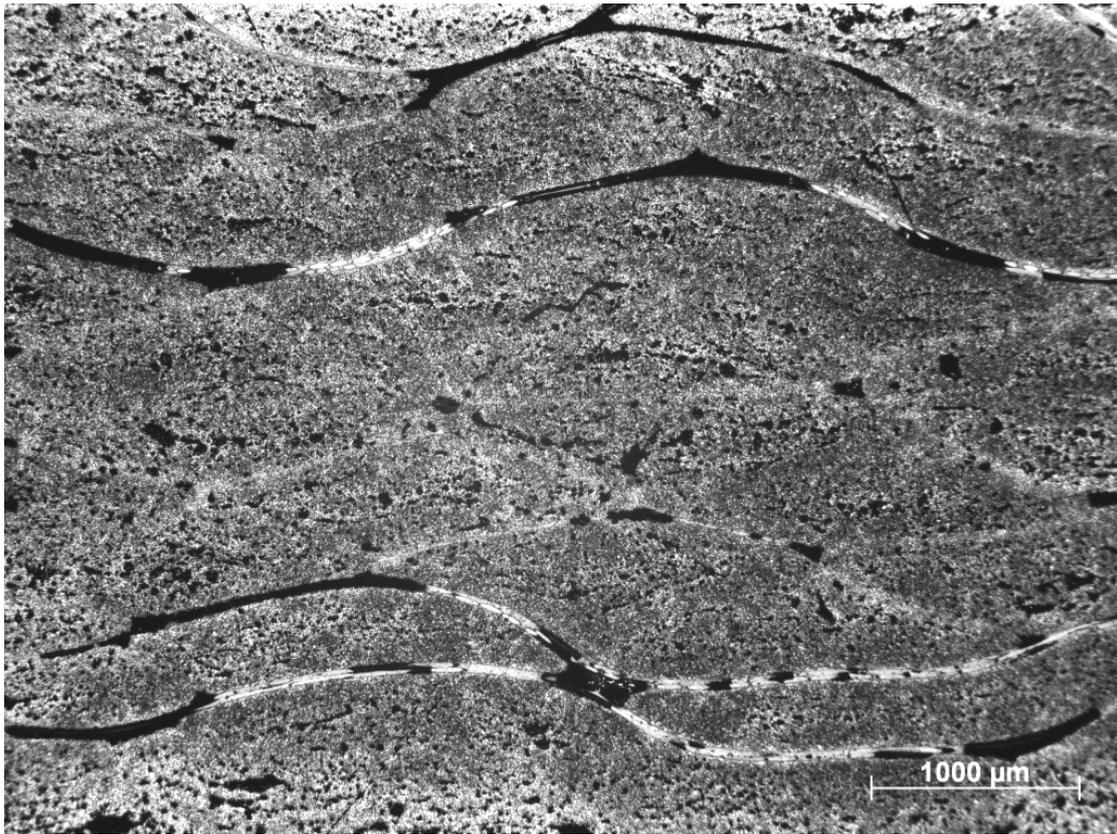


Abbildung 6.17 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1

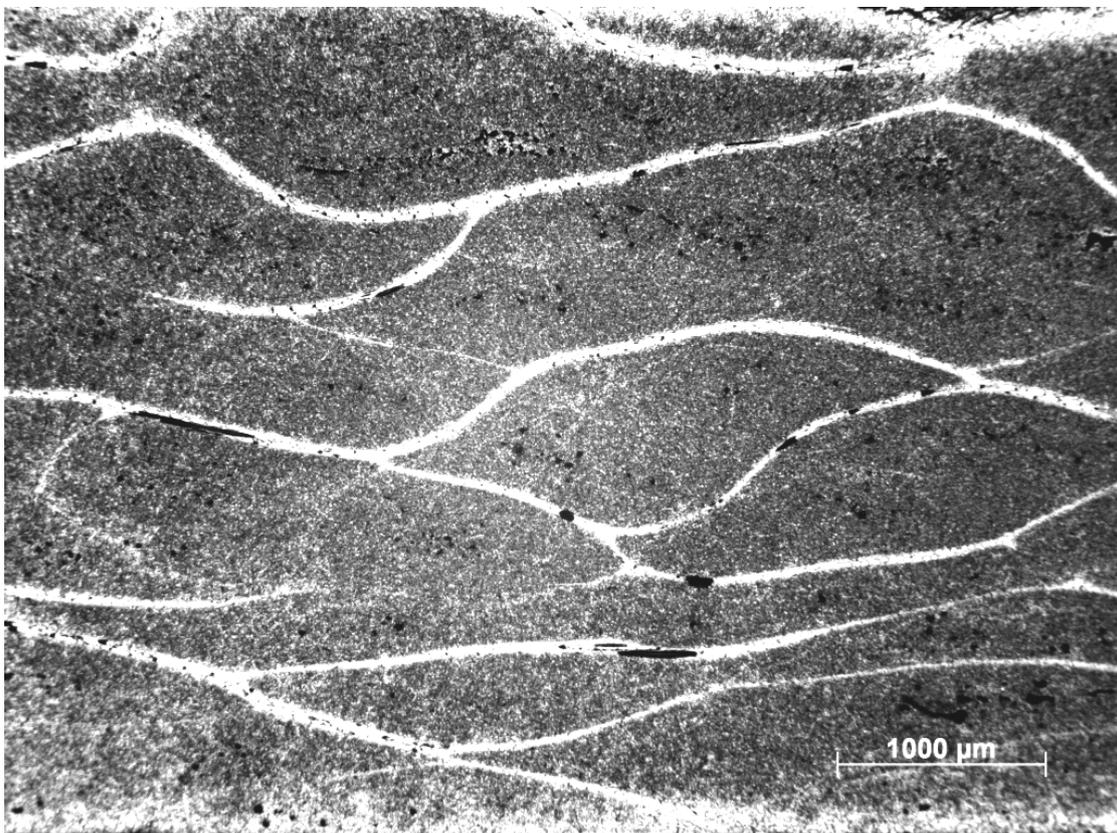


Abbildung 6.18 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 1

6.2 Einfluss des Harzes und der Temperatur auf mechanische Eigenschaften

Da die beiden Harzsysteme annähernd gleiche mechanische Eigenschaften haben, ist der Einfluss des Harzes auf die Steifigkeit und Festigkeit nicht durch reinen Vergleich der Harzkennwerte erfassbar. Auffällig ist aber, dass die Proben mit dem Laminierharz L418 wesentlich höhere Porengehalte haben als jene mit den Biresin CR132 Harz. Das liegt möglicherweise an der Sorgfalt der Probenherstellung, kann aber auch darauf hinweisen, dass sich dieses Harz schlechter verarbeiten lässt. Möglicherweise ist die Viskosität bei der Verarbeitung schon zu hoch, und es verteilt sich dadurch nicht richtig im Laminat. Es könnte aber auch sein, dass die Luftblasen, welche beim Handlaminieren immer ins Laminat eingearbeitet werden und durch das Anlegen von Vakuum während des Aushärtens abgesaugt werden sollten, nicht entweichen können und somit im Laminat verbleiben.

Es konnte kein Einfluss des Aushärtungsgrades auf die Festigkeitswerte festgestellt werden.

6.2.1 Glasübergang und Steifigkeit

6.2.1.1 Ergebnisse der drei Messmethoden

Die Glasübergangstemperatur wurde mit drei verschiedenen Methoden bestimmt, der DSC, der DMA und der TGA. In Tabelle 6.5 werden die Ergebnisse dieser Messungen miteinander verglichen. Insgesamt war die Streuung der Messergebnisse sehr groß. Es zeigt sich, dass die Messmethode durchaus einen Einfluss auf das Ergebnis liefert. Interessanterweise ist dieser bei den beiden Materialien unterschiedlich. Dies ist durch die unterschiedlichen physikalischen Prinzipien welche hinter den Messmethoden stehen erklärbar. Während die DSC auf eine Veränderung der Wärmekapazität reagiert, gibt das Ergebnis der DMA eine Veränderung der Steifigkeit wieder und die TMA eine Veränderung des Ausdehnungskoeffizienten. Ein Einfluss der Heizrate kann ausgeschlossen werden, sie betrug bei allen Methoden 3 °C pro Minute. Für die Anwendung in einem Bauteil ist eigentlich der Glasübergangswert, welcher mittels DMA ermittelt wurde, von größerem Interesse, da es sich hierbei um eine Kenngröße handelt, die tatsächlich jene Temperatur angibt, bei der die Steifigkeit des Harzes sinkt. Sie liegt für das Biresin CR 132 Harz bei 122 °C und für das Laminierharz L418 bei 124 °C. Die Ergebnisse der TMA-Messung bestätigen diesen Wert.

Material	DSC	DMA	TMA
Sika Harzwürfel	124 ±3	-	129 ±3
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	125 ±4	119 ±3	118 ±1
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	117	121 ±1	120 ±6
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	129	124 ±2	127 ±5
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	129 ±1	124 ±2	123 ±5
Sika Verbund	127 ±5	122 ±3	122 ±6
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	119 ±2	125 ±1	-
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	115 ±1	125	-
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	105 ±3	123 ±1	-
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	107 ±2	122	-
Mittelwert Hexion	111 ±6	124 ±1	-

Tabelle 6.5 Glasübergangswerte in °C im Vergleich der Messmethoden

Alle ermittelten Glasübergangswerte sind in den Kapiteln 5.2.4.2 und 5.2.5 sowie im Anhang B zu finden. Ab Beginn des Glasübergangsbereiches ca. 10 °C vor den Glaspunkt sinkt die Steifigkeit des Materials beträchtlich. Dies ist auch in Abbildung 5.25 zu sehen. Dies muss in der Festlegung des Einsatzbereiches berücksichtigt werden. Darum endet dieser bei ca. 30 °C unter dem ermittelten Glasübergangswert. Dies wäre nach den Ergebnissen der DMA Messung bei 90-95°C.

6.2.1.2 Vergleich der Messergebnisse mit den Herstellerangaben

- Biresin CR132 von Sika

Die für das Biresin CR 132 Harz vom Hersteller angegebene Glasübergangstemperatur beträgt 135 °C. Sie ergibt sich nach einer achtstündigen Temperung bei 125 °C und wurde laut Datenblatt mittels TMDSC mit einer Heizrate von 3 K/min einer Modulationsamplitude von 1 °C und einer Modulationsperiode von 60 sec gemessen. Da die Materialien, welche das Harz Biresin CR 132 enthalten, 8 h bei 120 °C getempert wurden, war ein Glasübergang von ca. 130 °C zu erwarten. Der Glasübergang wurde mittels TMDSC wie im Herstellerdatenblatt angegeben nachgemessen. Ein Tg von 130 °C wurde allerdings nur von einzelnen Proben mit der C-HTS5631 Faser erreicht. Der Mittelwert der Verbundmaterialien lag bei 127 °C, jener der Reinharzproben sogar nur bei 124 °C. Die große Streuung spricht für eine nicht vollständige Mischung von Harz und Härter und eine ungleichmäßige Temperung der Proben. Eventuell sollten sowohl der Mischprozess als auch der Temperprozess noch einmal genau überprüft werden. Das Harz kann aber den angegebenen Tg erreichen.

- Laminierharz L418 von Hexion

Die für das Laminierharz L418 angegebene Glasübergangstemperatur von 120 -125 °C ergibt sich laut Datenblatt nach einer Temperung von 24 h bei 20-25 °C und 10 h bei 100 °C. Sie wurde mittels DSC nach DIN 51007 [20] ermittelt. Die Probenmaterialien wurden nach Auslagerung im Wärmerraum 15 h bei 140 °C getempert. Bei den untersuchten Proben konnte mit der TMDSC ein durchschnittlicher Tg Wert von 111 °C und mit der DMA ein Wert von 124 °C nachgewiesen werden. Die Herstellerangaben konnten im Mittel also erreicht werden, die Streuung ist aber auch bei diesen Proben beträchtlich, so liegt der niedrigste DSC-Wert bei 101 °C und der

höchste bei 121 °C. Die Temperung bei höherer Temperatur als der Herstellerangabe hat aber nicht zu einer zusätzlichen Erhöhung der Glasübergangstemperatur geführt.

6.2.2 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

In Abbildung 5.24 sieht man die Messergebnisse einer Materialprobe. Qualitativ war der Verlauf aber bei allen gemessenen Proben gleich und entsprach den Erwartungen.

In [21] sind die thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen 0 °C und 100 °C der Faser und Matrixmaterialien angegeben. Epoxidharze haben demnach einen Ausdehnungskoeffizienten von 50 bis 67 $10^{-6}/K$, die HT-Kohlefasern in Längsrichtung einen Negativen von $-0,5 \cdot 10^{-6}/K$ und in Querrichtung $12,5 \cdot 10^{-6}/K$. Da sich also Karbonfasern mit der Wärme nicht ausdehnen, dehnt sich auch der Verbundwerkstoff in Längsrichtung nicht. Die Ausdehnung des Verbundmaterials ist in Dickenrichtung jener des Harzes sehr ähnlich, aber etwas niedriger, wegen des geringen Harzvolumenanteils und weil die Fasern in Dickenrichtung einen geringeren aber positiven Ausdehnungskoeffizienten haben. Der Glasübergangsbereich ist deutlich an Anstieg der Messkurve zu sehen. In Querrichtung behindern die Hilfsfasern aus Glas und PES die Ausdehnung des Harzes etwas.

6.3 Vergleich der Harze

6.3.1.1 Temperaturfestigkeit

Da die mit der DSC-Messung ermittelten Glasübergangswerte des Biresin CR132 Harzes höher waren, würde man im ersten Moment denken, es wäre das Harz mit der höheren Temperaturfestigkeit. Nach Berücksichtigung der DMA Ergebnisse kehrt sich dies allerdings um, da die Steifigkeit über der Temperatur für die mechanische Beurteilung eines Materials letztlich ausschlaggebender ist. Zusätzlich wird im Datenblatt [9] auch noch darauf hingewiesen, dass dieses Harz besonders unempfindlich ist, was die Verringerung des Glasüberganges durch Feuchte betrifft.

6.3.1.2 Aushärtetemperatur

Die notwendige Aushärtetemperatur ist beim Laminierharz L418 geringer als bei Biresin CR132 Harz, die Bauteile lassen sich also mit geringerem Energieverbrauch herstellen. Allerdings ist dafür die empfohlene Temperzeit um zwei Stunden länger, was wiederum zu Nachteilen in der Belegung der Temperöfen führt.

6.3.1.3 Poren in den Harznestern und Laminaten

In den Materialien mit dem Laminierharz L418 war der Porenvolumengehalt wesentlich höher. Möglicherweise gast dieses Harz beim Vakuumieren aus, oder es erfordert eine größere Sorgfalt in der Verarbeitung als jene, mit der die Probenplatten hergestellt wurden.

6.3.1.4 Produktion und Gesundheit

Während der Laminiertätigkeit mit dem Biresin CR132 Harz haben viele der Mitarbeiter über Übelkeit, Schwindelgefühle und Kopfschmerzen geklagt. Dies war beim Laminierharz L418 scheinbar kein Problem. Leider wurde dieser Umstand bis jetzt nicht weiter untersucht.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Erreichte Ziele

Der Vergleich der zu untersuchenden Materialien und eine generelle Charakterisierung waren mit den gewählten Methoden durchaus möglich. Es konnten auch Probleme in der Herstellung identifiziert werden. Die Untersuchung des Glasüberganges ist sehr ausführlich erfolgt, auch die Vergleichbarkeit der gewählten Methoden war durchaus gegeben. Die Ermittlung der interlaminaren Scherfestigkeit mit dem Kurzbiegeversuch war sehr gut möglich.

Mit den gewählten Methoden ist es gelungen, den Einfluss des Porengehaltes der Materialien auf die Festigkeit zu untersuchen. Bei einem Porenvolumensanteil von 3 % ist die Biegefestigkeit bereits um 12 % herabgesetzt, bei 9 % Porenvolumenanteil sogar um 30 %. Ob der Porenvolumengehalt die Steifigkeit beeinflusst ist nicht ganz klar. Zusätzlich konnte durch Mikrofraktografie einiger Proben der lokale Einfluss von Poren als Fehlstelle und somit Schädigungsbeginn nachgewiesen werden. Es war aber durch die geringe Probenanzahl nicht möglich diesen Einfluss quantitativ zu erfassen. Eine Möglichkeit wäre, den Porengehalt jeder einzelnen Probe tomografisch zu untersuchen. Da dieser jedoch lokal unterschiedlich sein kann und für eine Beurteilung des Bruchverhaltens jener direkt an der Bruchstelle von Interesse ist, ist das mit den hier angewandten Methoden nicht möglich. Mit mikrofraktografischen Methoden könnte der Aufbau der Probe im Bruchbereich auch untersucht werden, um eine quantitative Aussage des Einflusses der Porengröße auf die Festigkeit zu erhalten müssten aber noch mehr Proben untersucht werden.

Die Frage, welches der beiden Harzmaterialien letztlich besser für das Handlaminierverfahren geeignet ist, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Bei jenen Materialien mit gleichen Fasern und vergleichbarem Porengehalt waren die mechanischen Eigenschaften mit Beiden Harzen gleich. Es ist aber klar, dass die Materialien mit dem Biresin CR132 Harz weniger Poren enthalten und somit im Schnitt bessere mechanische Eigenschaften aufweisen. In punkto Steifigkeit bei erhöhter Temperatur liegen die beiden Materialien gleichauf. Durch die ausführliche Untersuchung konnten auch noch einige Fragen die Harzeigenschaften und ihr Zusammenspiel mit den Fasern betreffend geklärt werden.

7.2 Ideen für weitere Untersuchungen des Fehlstelleneinflusses

Es wäre mit einer nicht allzugroßen Abwandlung des Versuchsaufbaus für die mechanische Prüfung und ergänzender Computertomografie möglich, die genaue Position des Versagensbeginns und den lokalen Porengehalt sowie die Form der Poren oder anderer Fehlstellen im Bereich des Versagensbeginns zu bestimmen. Dadurch könnte das Wissen über die Risseinleitung in Faserverbundmaterialien vertieft werden. Da der Vierpunktbiegeversuch einen größeren Prüfbereich mit konstantem Biegemoment aufweist, ist davon auszugehen, dass die Probe im schwächsten Punkt im Prüfbereich versagt. Wie [4] ausführlich beschrieben ist, ist es mit AE-Messung möglich die Position des Versagensbeginns und somit die schwächste Stelle der Probe zu ermitteln. Durch die Verwendung von zwei Schallsensoren kann auf die Quelle des AE-Signals entlang der Prüfachse rückgerechnet werden.

Mit zerstörungsfreier Prüfung, zum Beispiel Computertomografie könnte man die Proben vor der Prüfung dreidimensional abbilden. Mit CT ist es möglich Fasermisorientierungen, Fremdkörpereinschlüsse und vorallem Poren genau abzubilden. Nach Abgleich des CT Datensatzes und des Ergebnisses der AE Messung ist es möglich den Schädigungsbeginn räumlich einer Fehlstelle zuzuordnen. Auch die Bestimmung des lokalen Porengehalts wäre mit CT möglich. Damit könnte man tatsächlich den lokalen Einfluss von Poren und anderen Fehlstellen auf den Spannungszustand in der Probe und die Risseinleitung untersuchen.

Wenn die Bruchstelle hinterher noch mit mikrofraktografischen Methoden untersucht wird, ist eine komplette Abbildung des zeitlichen und räumlichen Bruchverlaufes möglich.

Eine solche Untersuchung könnte sinnvollerweise durch Modellierung von Fehlstellen und dem lokalen Versagen von CFK mit Finiten Elemente Methoden ergänzt werden.

Literaturverzeichnis

1. **Kindervater, Dipl.-Ing Ch.** *Technologie- und Dimensionierungsgrundlagen für Bauteile aus Faserverbundkunststoff (FVK)*. Universität Stuttgart : DLR Institut für Bauweisen und Konstruktionsforschung, 2006.
2. **HEXION.** *Technische Informationen Laminierharz MGS L285*. Stuttgart : s.n., 2006.
3. **Antonio F. Avila, David T.S. Morais.** A multiscale investigation based on variance analysis for hand lay-up composite manufacturing. *Composites Science and Technology*. 827-838, 2005, Vol. 65.
4. **Krassnitzer, Dipl. Ing. Thomas.** *Investigation of residual Stregth of Fiber reinforced Plastic*. Wien : Institut für Festkörperphysik TU Wien, 2005.
5. **Antonio F. Avila, David T.S. Morais.** *A multiscale investigtion based on variance analysis for hand lay-up composite manufacturing*. Belo Horizonte, Brazil : Mechanics of Composite Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.
6. **Kyeongsik Woo, John D. Whitcomb.** Effects of fiber tow misalignment on the engineering properties of plain weave textile composites. *Composite Structures* . 1997, Bd. Vol. 31, No. 314.
7. **Förtsch, Wolfgang.** *Mikrofraktographische Untersuchungen zum Ermüdungsversagen vorgeschädigter Preform-CFK-Werkstoffe mit EP-Matrizes*. Kaiserslautern : Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, TU Kaiserslautern, 2005. ISBN 3-934930-52-2.
8. **AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe.** *Handbuch Faserverbundkunststoffe*. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010. ISBN 978-3-8348-0881-3.
9. **HEXION.** *Technical Information Laminating resin MGS L418*. Stuttgart : s.n., 2006.
10. **Sika.** *Vorläufiges Produktdatenblatt Biresin CR132 Compositeharz-System*. 2010.
11. **Prof. Dr.-Ing Ehrenstein, G. W.** *Faserverbund - Kunststoffe*. München; Wien : Carl Hanser Verlag, 1992. ISBN 3-446-17328-5.
12. **Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Skrna-Jakl, Isabella.** Vorlesungsskriptum. *Leichtbau mit faserverstärkten Werkstoffen*. Technische Universität Wien : s.n., 2006.
13. **Gottfried W. Ehrenstein, Gabriela Riedel, Pia Trawiel.** *Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen*. München : Carl Hanser Verlag, 2003. ISBN 3-446-22340-1.
14. **CEN Europäisches Komitee für Normung.** *Bestimmung der Biegeeigenschaften*. Brüssel : s.n., März 1998. EN ISO 14125 : 1998.
15. **Prof. Wolfgang Grellmann, Prof. Sabine Seidler.** *Kunststoffprüfung*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 2005. ISBN 3-446-22086-0.

16. **ASTM (American Society for Testing and Materials)**. *Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and their Laminates*. West Conshohocken, USA : s.n., 2000. ASTM D2344.
17. **Carlsson, L. A. und Pipes, R. B.** *Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe*. Stuttgart : Teubner, 1989. ISBN 3-519-03250-3.
18. **Prof. F. G. Rammerstorfer, Prof. Helmut J. Böhm.** *Composite Engeneering*. Wien : Institut für Leichtbau und Strukturbiomechanik TU Wien, 2008.
19. **Jones, R.M.** *Mechanics of Composite Materials*. New York : Hemisphere Publishing Corporation, 1975.
20. **Deutsches Institut für Normung.** *Differenzthermoanalyse (DTA)*. Berlin : s.n., 1994. DIN 51007.
21. **Schürmann, Helmut.** *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. ISBN 3-540-40283-7.

A. Lichtmikroskopische Aufnahmen

Lichtmikroskopische Aufnahmen der untersuchten Materialien in allen drei Hauptebenen

Es werden in diesem Anhang die lichtmikroskopischen Aufnahmen von allen acht Materialien gezeigt. Die Abbildungen sind entsprechend den Seiten 1, 2 und 3 der Darstellung aus Kapitel 4.1.3 durchnummeriert. Besonders gut lassen sich die Struktur und der Aufbau des Materials in den Bildern der 1. Seiten und 2. Seiten erkennen. Genaueres zu den Ergebnissen der Lichtmikroskopie siehe 5.1.1.

Material Nr. 1 Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar

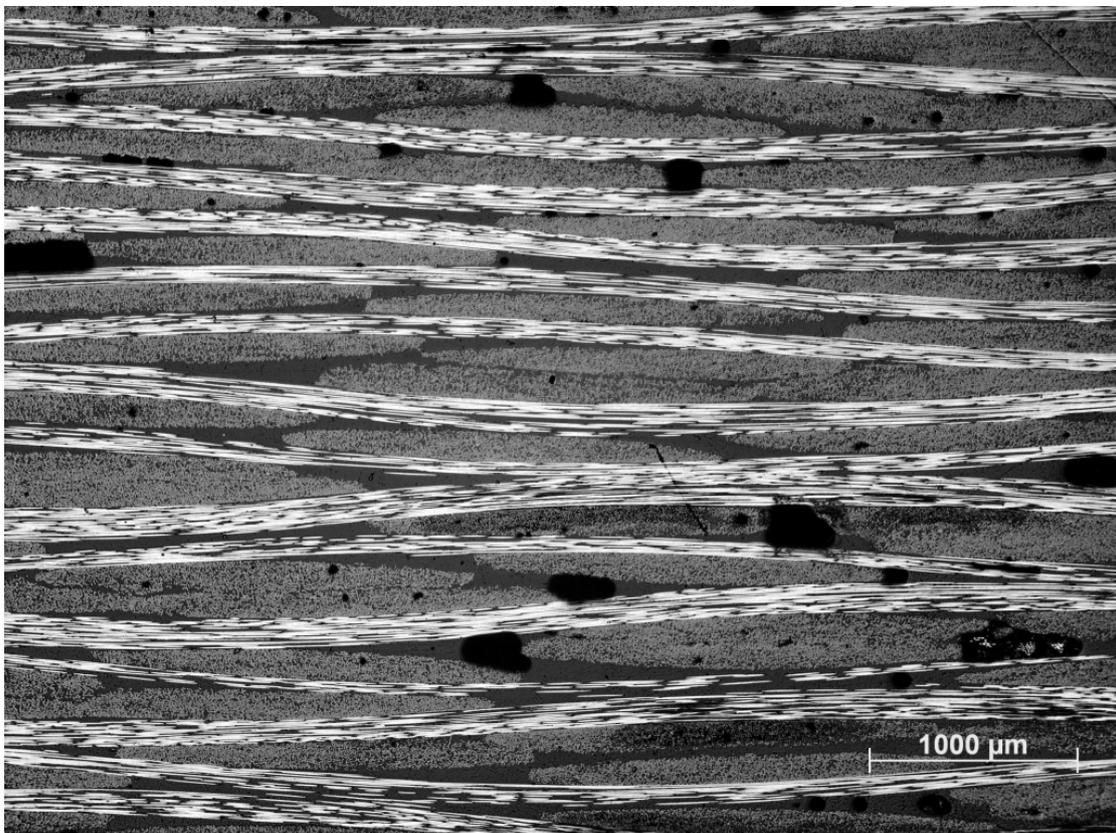


Abbildung A.1 Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 1

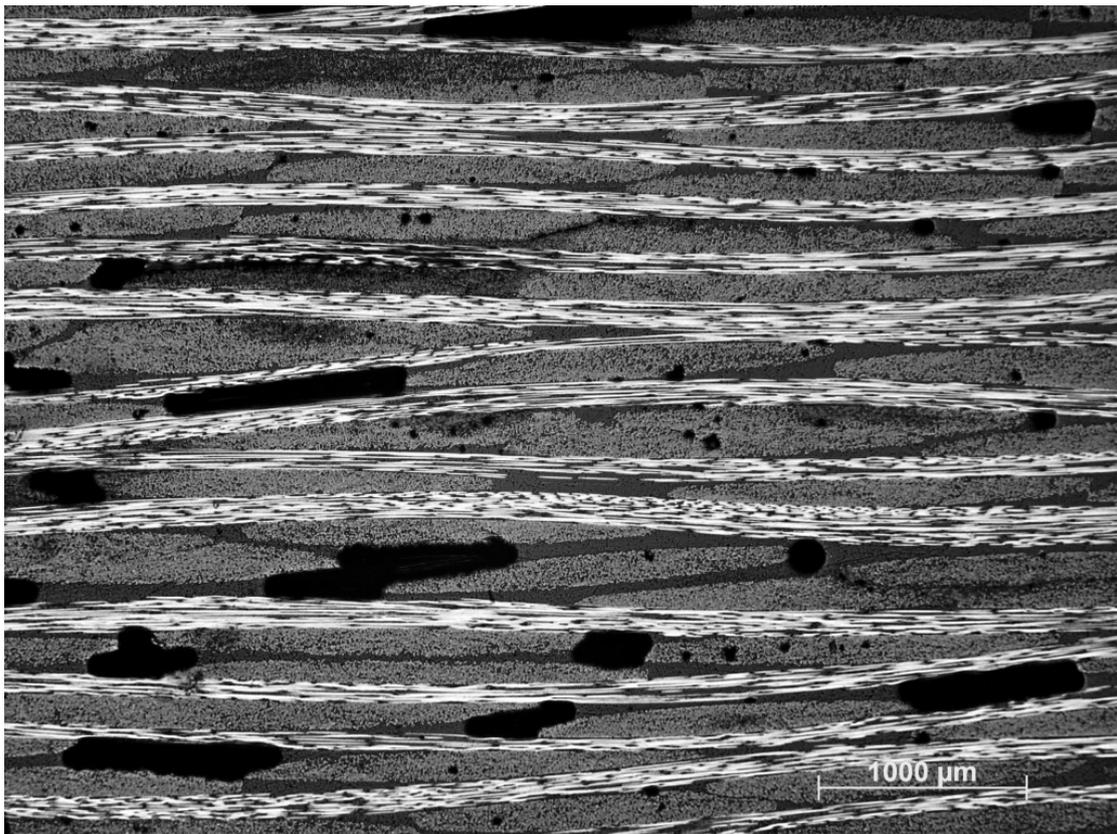


Abbildung A.2 Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 2

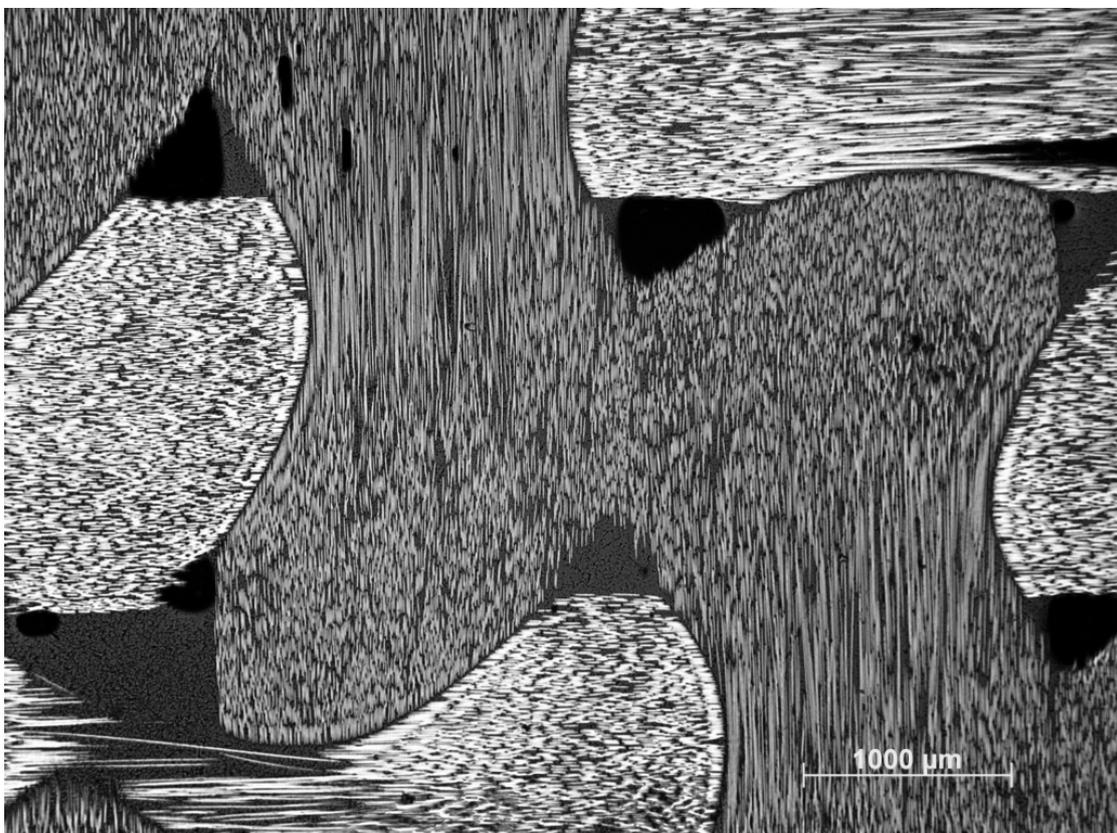


Abbildung A.3 Ep-Sik/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 3

Material Nr. 2 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar

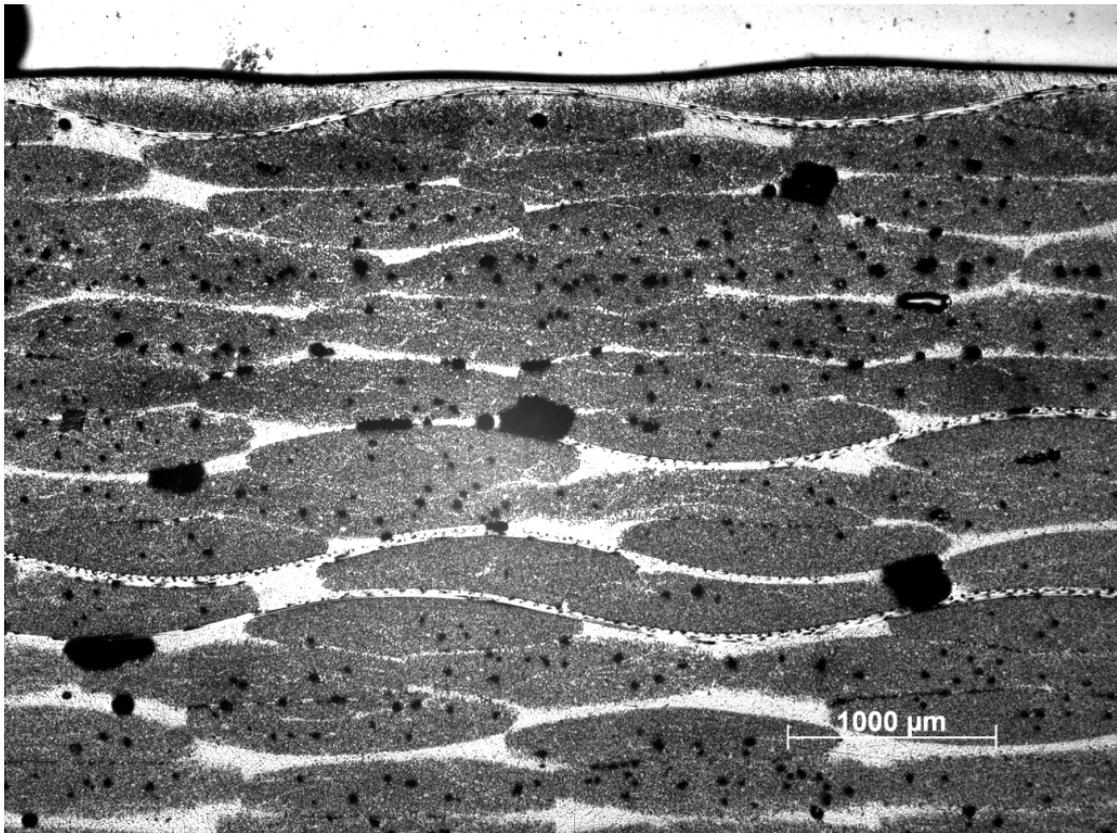


Abbildung A.4 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 1



Abbildung A.5 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 2

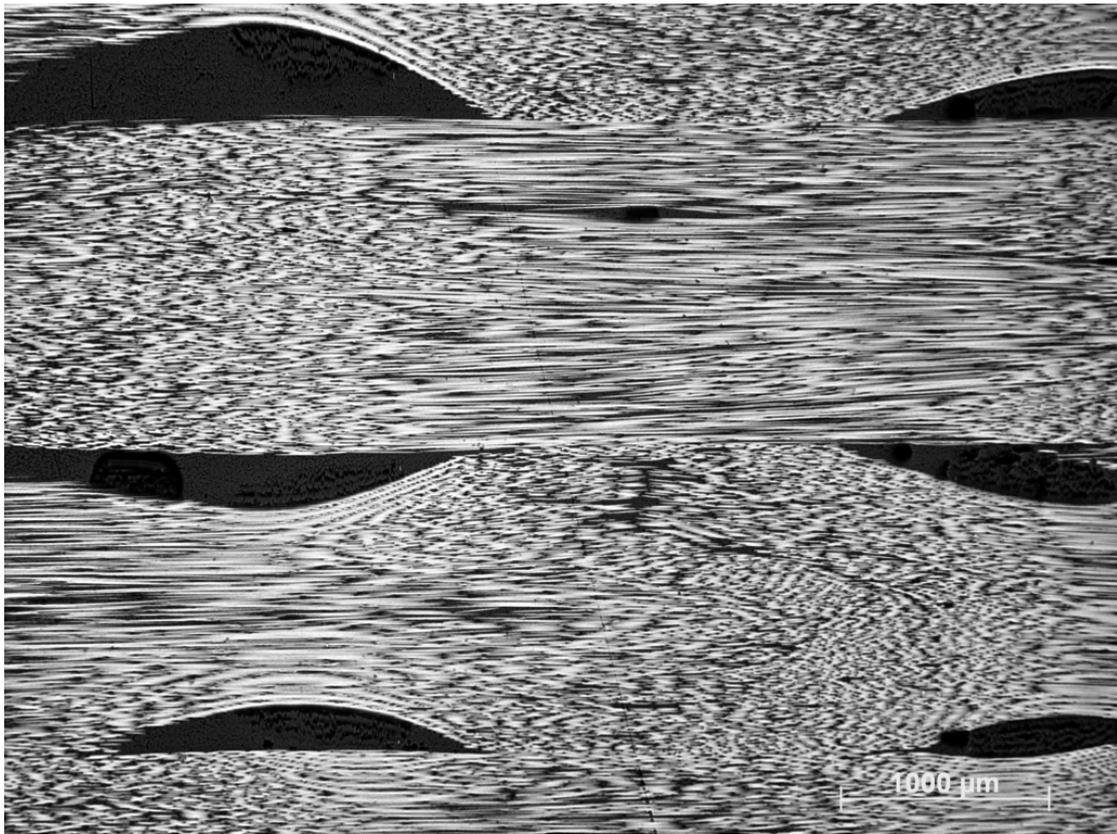


Abbildung A.6 Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 3

Material Nr. 3 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar

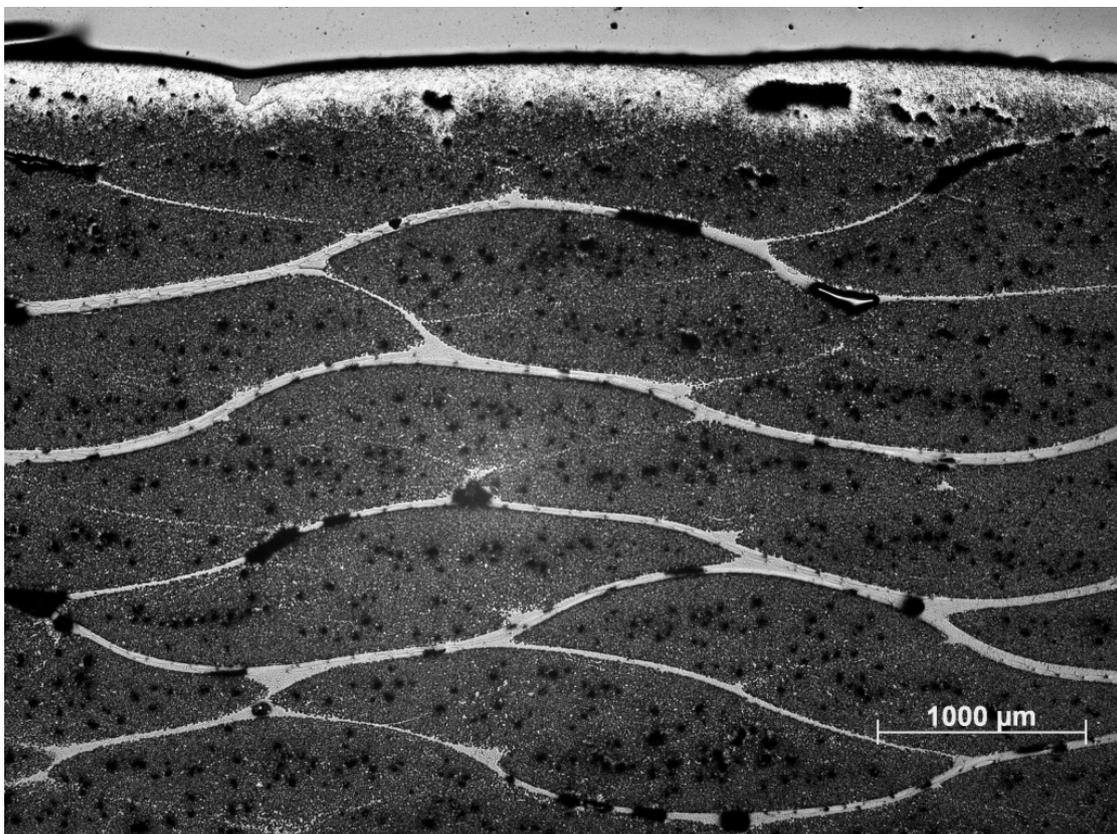


Abbildung A.7 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1

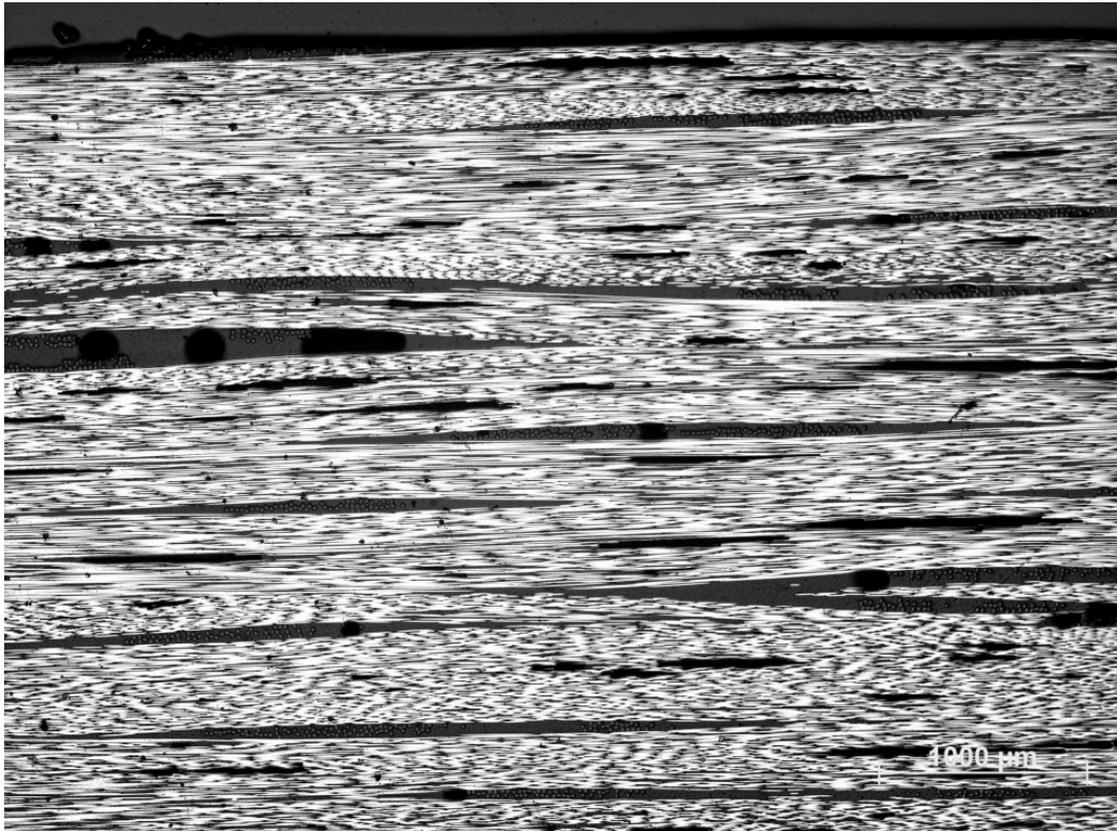


Abbildung A.8 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 2



Abbildung A.9 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 3

Material Nr. 4 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar

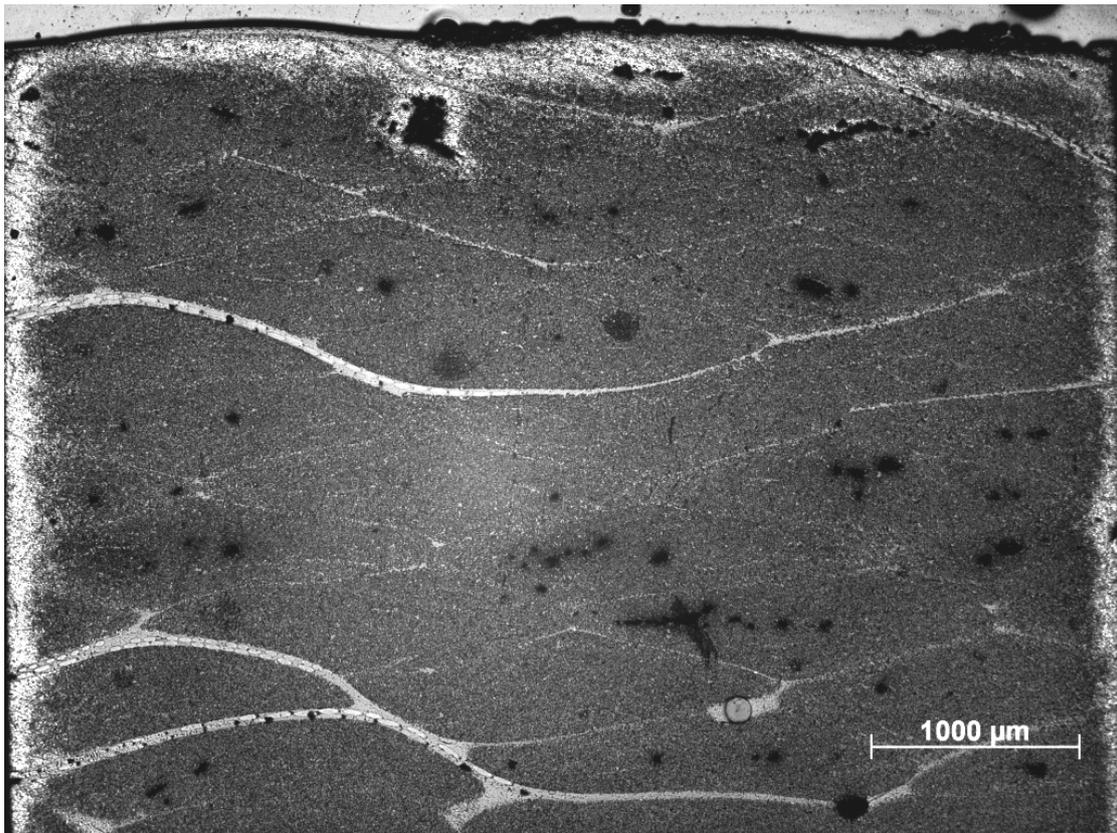


Abbildung A.10 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 1

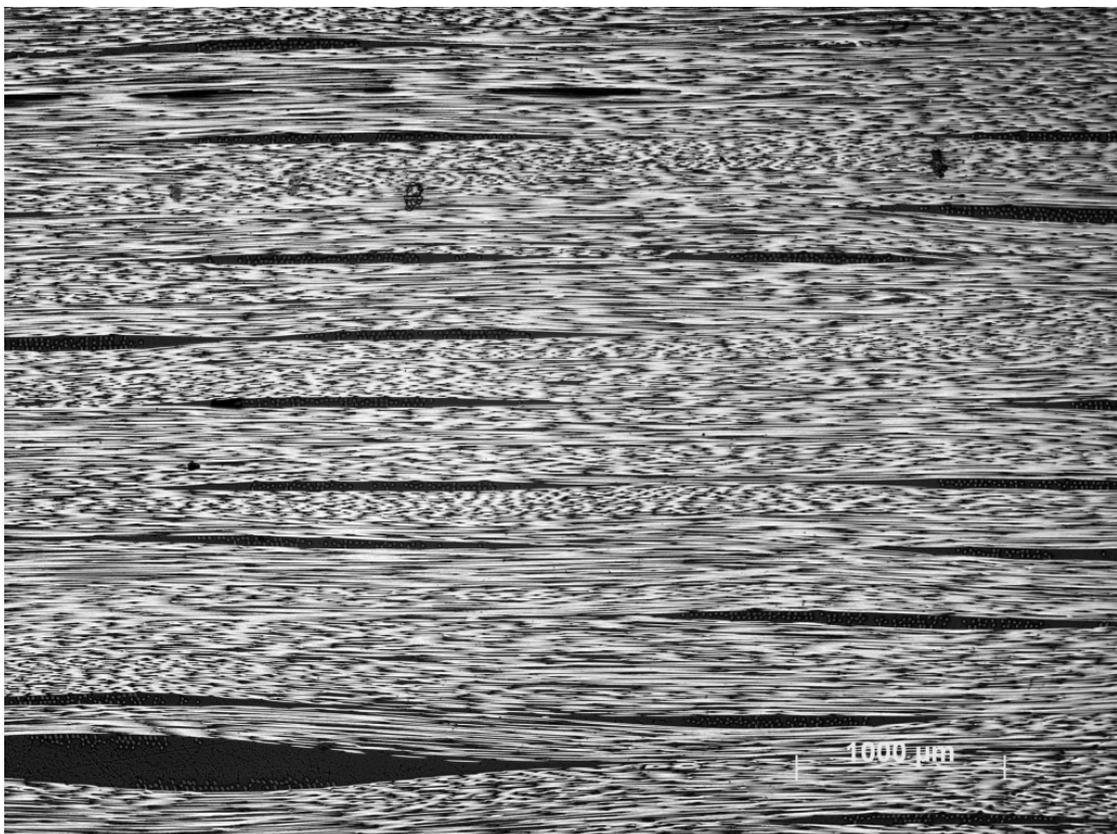


Abbildung A.11 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 2

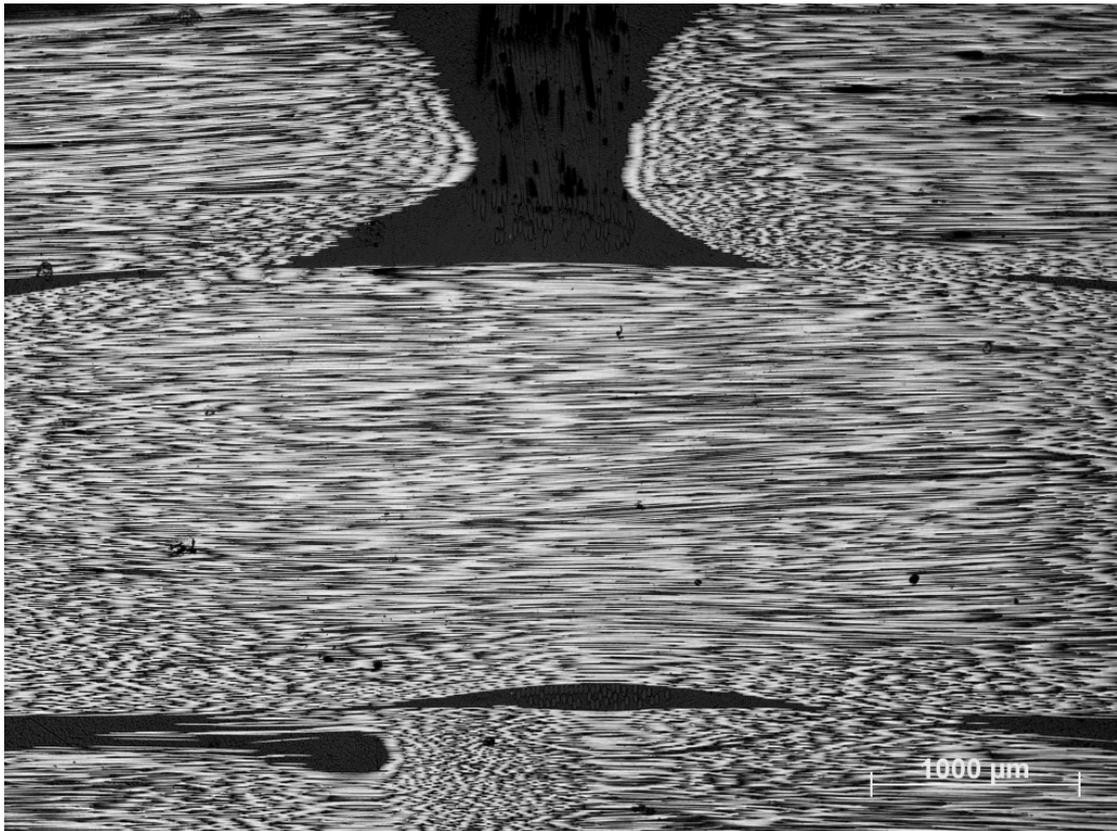


Abbildung A.12 Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 3

Material Nr. 5 Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar

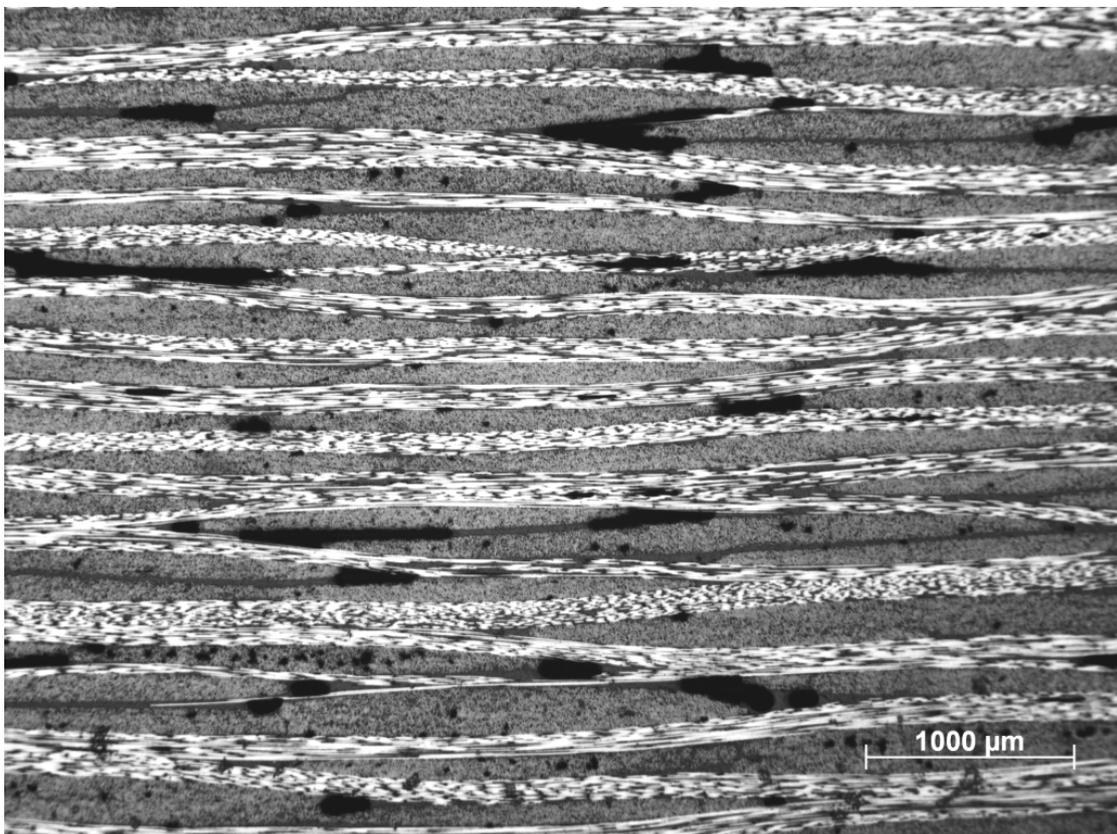


Abbildung A.13 Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 1

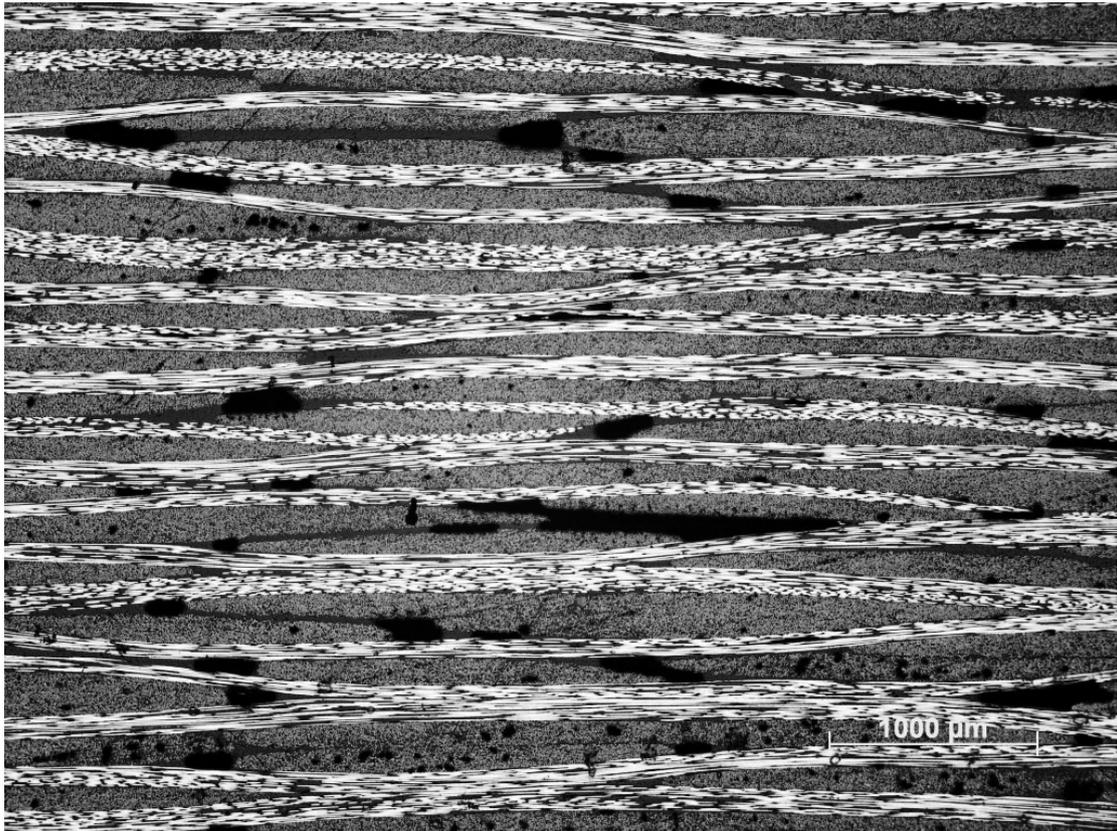


Abbildung A.14 Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 2

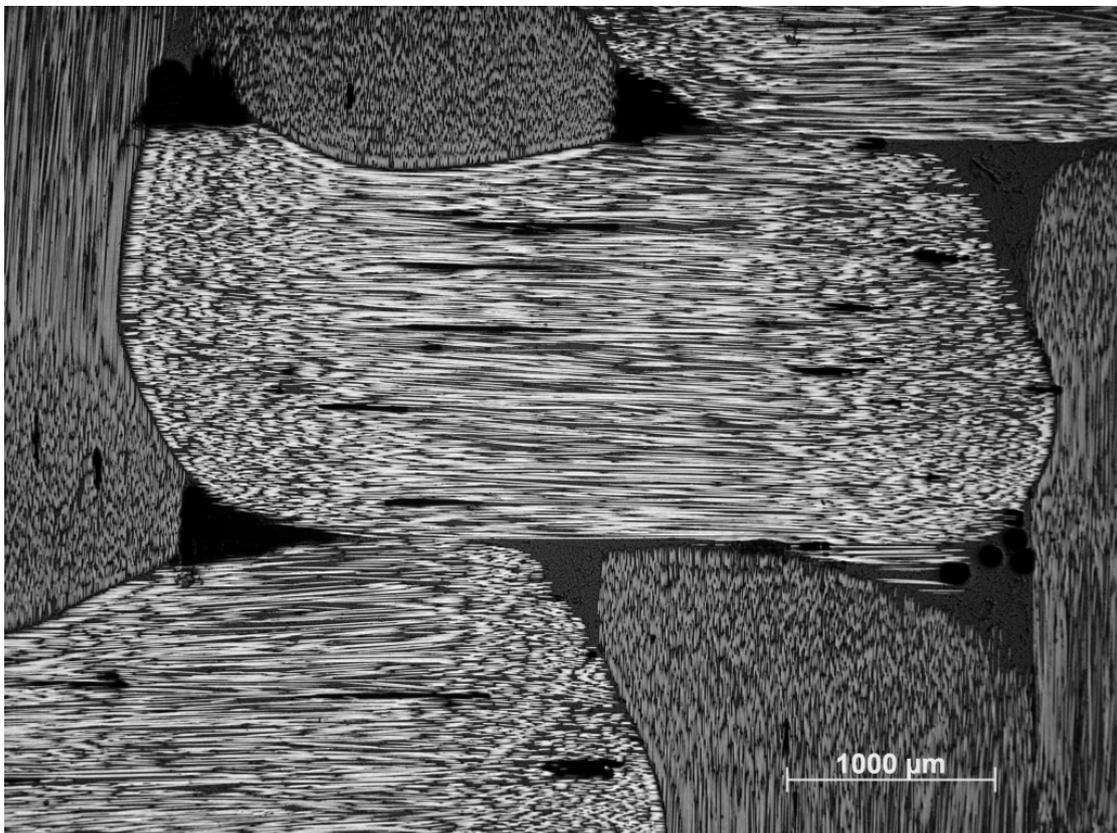


Abbildung A.15 Ep-Hex/C-FT300/0-90°/1 bar, Seite 3

Material Nr. 6 Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar

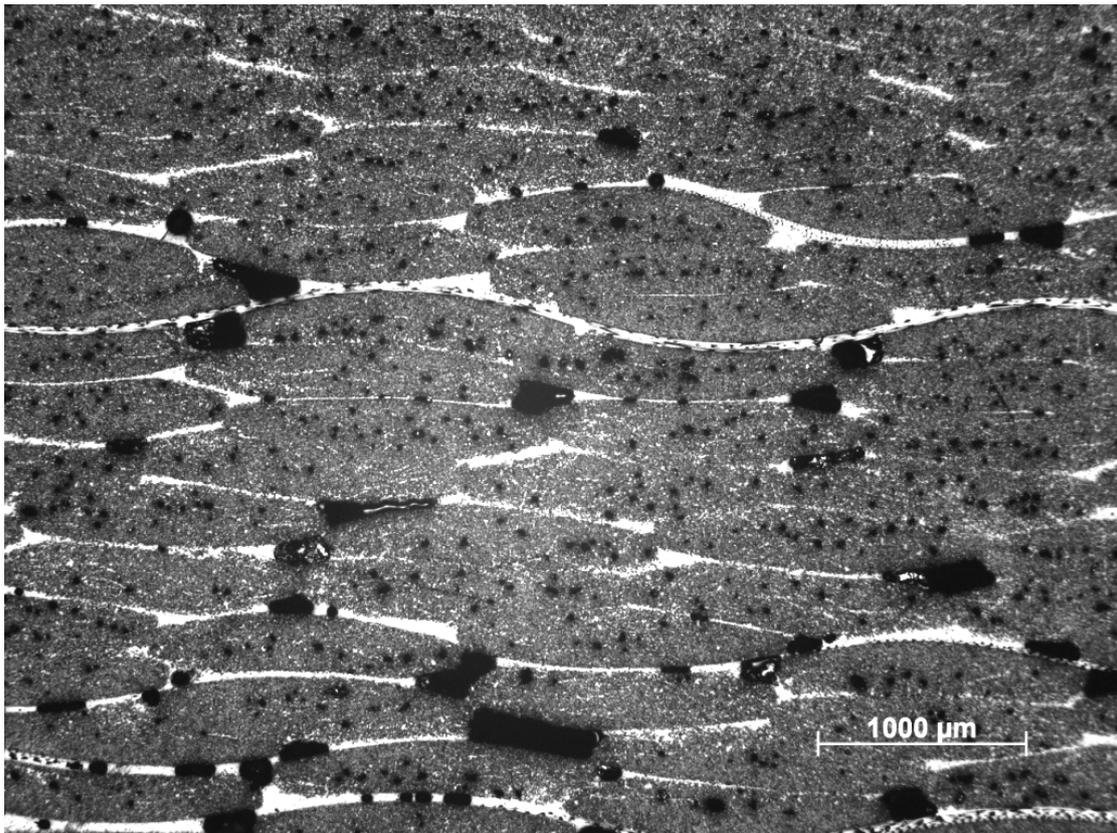


Abbildung A.16 Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 1

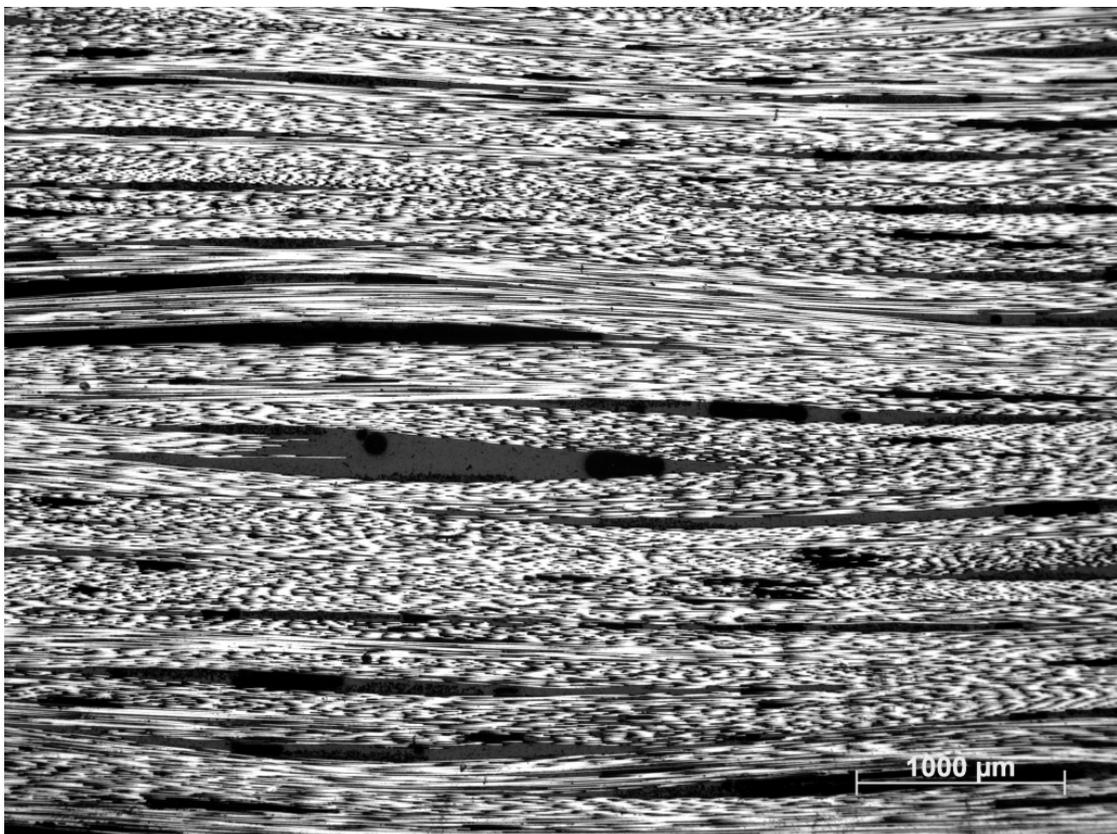


Abbildung A.17 Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 2

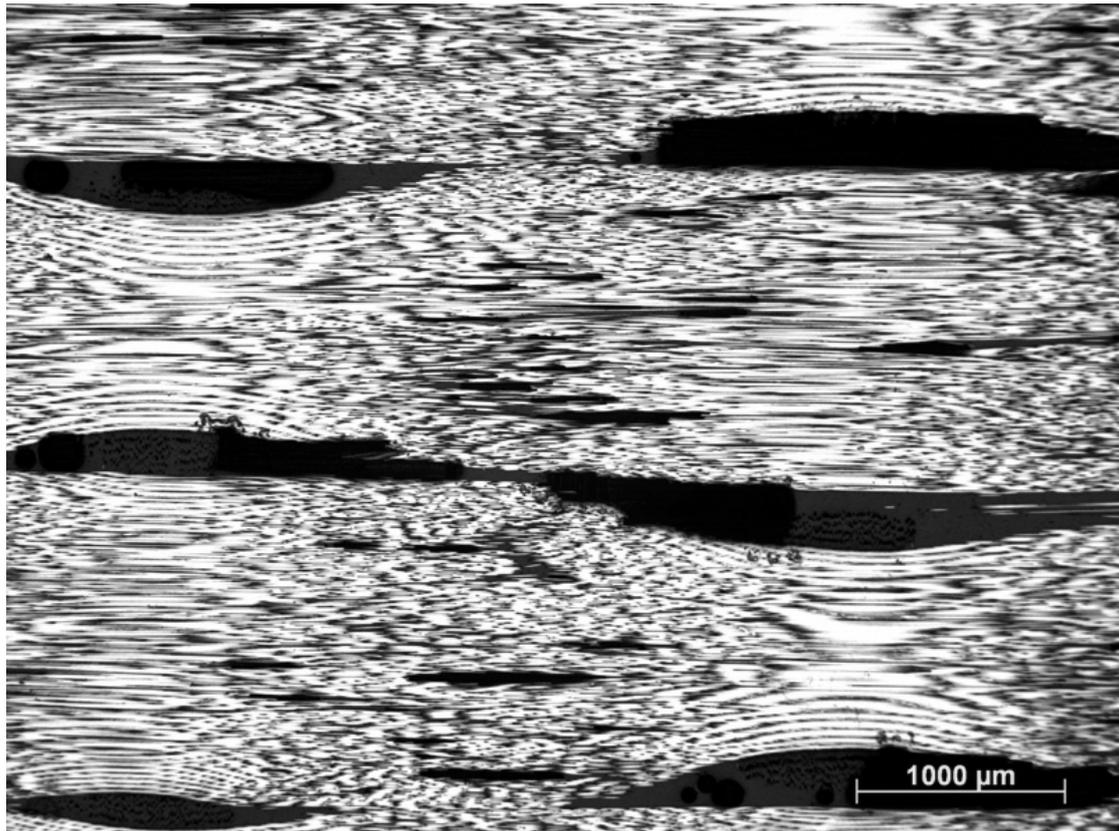


Abbildung A.18 Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar, Seite 3

Material Nr. 7 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar

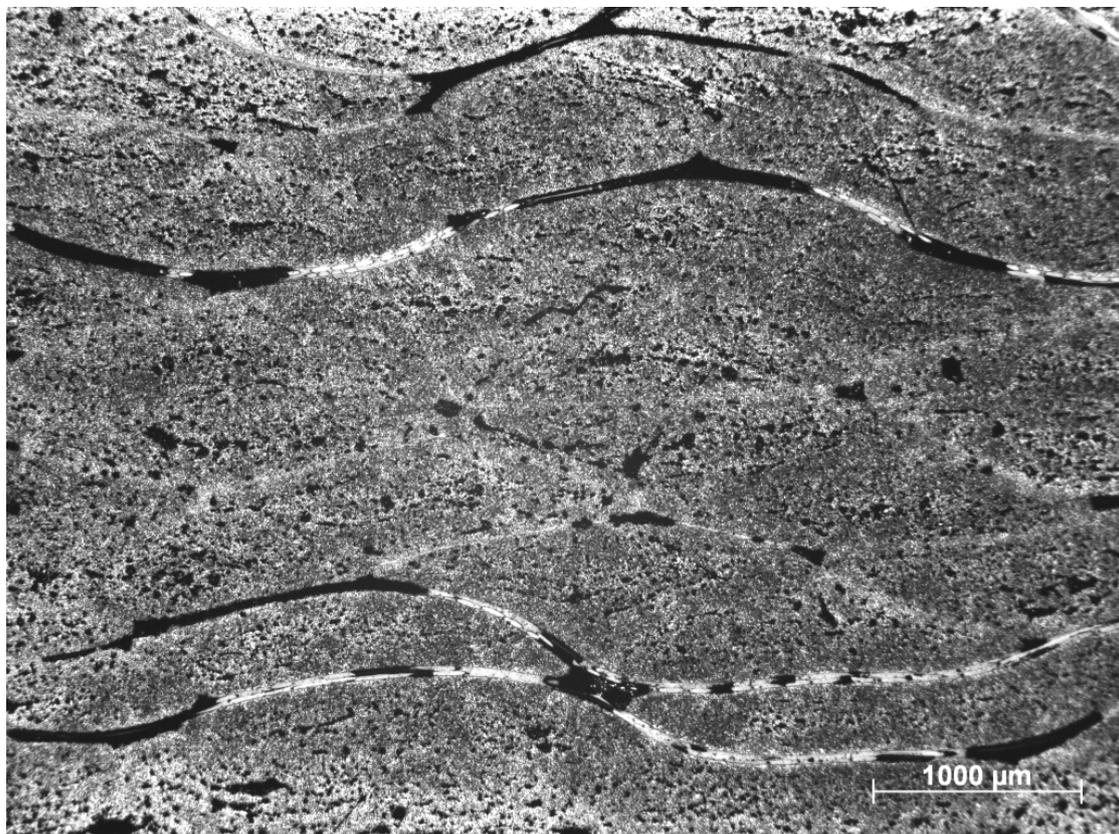


Abbildung A.19 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 1



Abbildung A.20 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 2



Abbildung A.21 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar, Seite 3

Material Nr. 8 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar

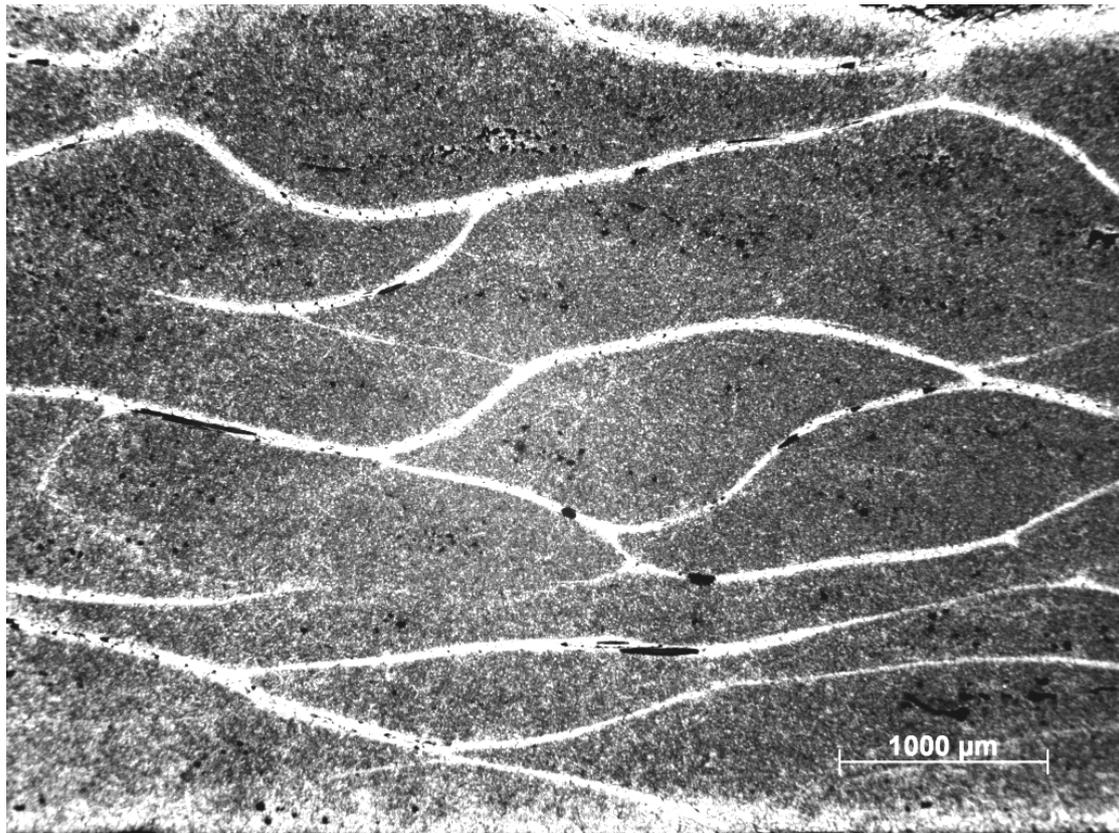


Abbildung A.22 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 1

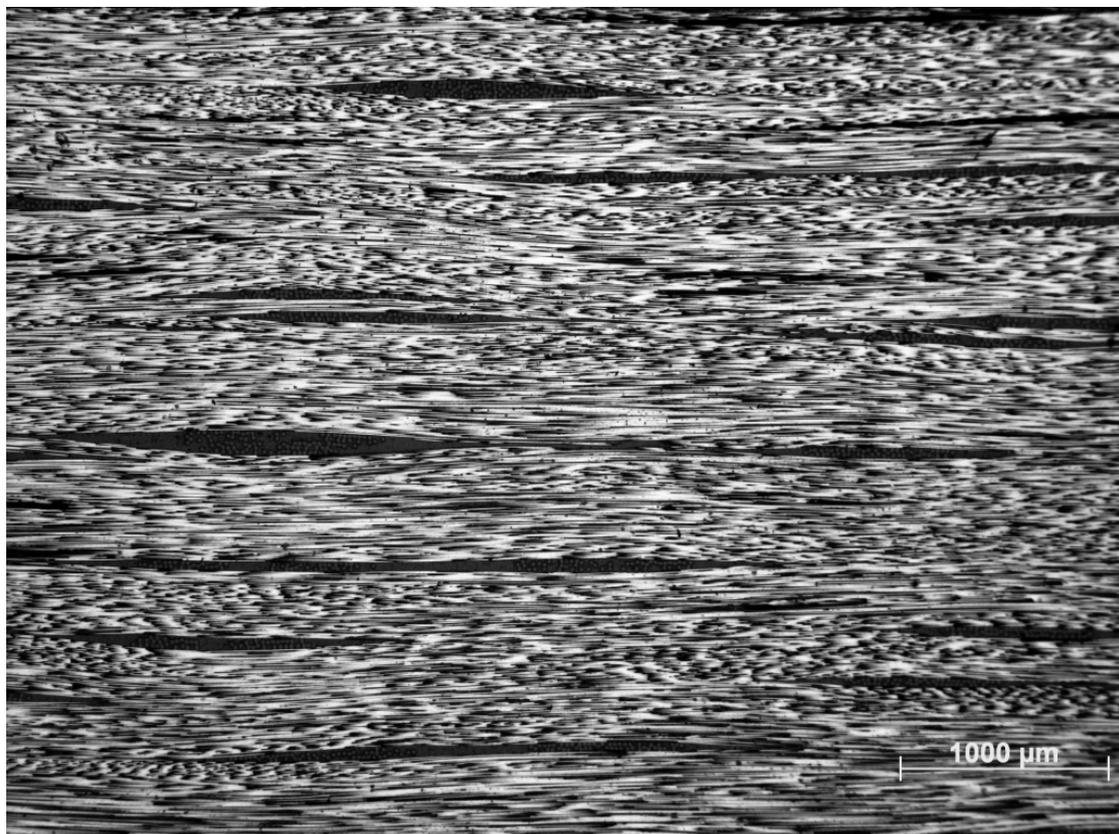


Abbildung A.23 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 2



Abbildung A.24 Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar, Seite 3

B. DSC Ergebnisse

Ergebnisse der DSC-Messungen für den Glasübergangsbereich der beiden Harze Biresin CR132 der Firma Sika und Laminierharz L418 der Firma Hexion.

Material	Probe	T _{gA} [°C]	T _g [°C]	T _{gE} [°C]
Biresin CR132 Reinharz	Si_HW1_1	114	122	129
	Si_HW1_2	117	127	132
	Si_HW1_3	119	127	133
	Si_HW2_1	119	126	132
	Si_HW2_2	119	126	132
	Si_HW3_1	115	124	132
	Si_HW3_2	111	120	131
	Si_HW4_1	117	127	133
	Si_HW4_2	109	118	122
	Si_HW5_1	117	122	126
	Si_HW5_2	123	124	126
Mittelwert der Harzwürfel	Si_HW_MW	116±4	124±3	130±4
Niedrigster Wert Sika HW	Si_HW_NW	109	118	122
Höchster Wert Sika HW	Si_HW_HW	123	127	133
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	Si_FT_1bar_1	123	129	123
	Si_FT_1bar_2	108	121	134
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar	Si_HTA_1bar_1	106	117	125
	Si_HTA_1bar_2	103	117	127
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar	Si_HTS_1bar_1	123	130	136
	Si_HTS_1bar_2	122	129	135
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar	Si_HTS_3bar_1	124	130	133
	Si_HTS_3bar_2	125	129	133
	Si_HTS_3bar_3	123	130	133
	Si_HTS_3bar_4	125	129	132
	Si_HTS_3bar_5	121	127	132
	Si_HTS_3bar_6	124	131	134
Mittelwert Sika Verbund	Si_Verbund_MW	119±8	127±5	131±4
Niedrigster Wert Sika Verbund	Si_Verbund_NW	103	117	123
Höchster Wert Sika Verbund	Si_Verbund_HW	125	131	136
Mittelwert Sika	Si_MW	118±6	125±4	131±4
Niedrigster Wert Sika	Si_NW	103	117	122
Höchster Wert Sika	Si_HW	125	131	136

Material	Probe	T_{gA} [°C]	T_g [°C]	T_{gE} [°C]
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar	He_FT_1bar_1	113	117	122
	He_FT_1bar_2	114	121	127
	He_FT_1bar_3	110	118	124
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar	He_HTA_1bar_1	109	115	121
	He_HTA_1bar_2	105	114	122
	He_HTA_1bar_3	111	115	121
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar	He_HTS_1bar_1	99	108	115
	He_HTS_1bar_2	95	101	105
	He_HTS_1bar_3	99	105	111
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar	He_HTS_3bar_1	98	105	111
	He_HTS_3bar_2	103	109	115
	He_HTS_3bar_3	99	107	112
Mittelwert Hexion	He_MW	105±6	111±6	117±6
Niedrigster Wert Hexion	He_NW	95	101	105
Höchster Wert Hexion	He_HW	114	121	127

Tabelle B.1 Glasübergangswerte Biresin CR132 und Hexion L418

C. Ergebnisse der Biegeprüfung

Material /Probe	E_b [GPa]	σ_b [MPa]	ε_b [%]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar			
Mittelwert	43±3	544±33	1,27±0,10
Si_FT_1bar_7	48	515	1,10
Si_FT_1bar_8	42	522	1,26
Si_FT_1bar_9	45	595	1,36
Si_FT_1bar_10	41	560	1,35
Si_FT_1bar_11	42	513	1,21
Si_FT_1bar_12	42	559	1,31
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/ 1 bar			
Mittelwert	84,6±2	616±23	0,76±0,02
Si_HTA_1bar_7	85,6	627	0,76
Si_HTA_1bar_8	83,5	638	0,79
Si_HTA_1bar_9	80,7	575	0,75
Si_HTA_1bar_10	84,6	618	0,78
Si_HTA_1bar_11	86,4	634	0,75
Si_HTA_1bar_12	86,9	605	0,72
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 1 bar			
Mittelwert	93±3	628±42	0,69±0,03
Si_HTS_1bar_7	82	564	0,72
Si_HTS_1bar_8	86	587	0,69
Si_HTS_1bar_9	96	613	0,66
Si_HTS_1bar_10	97	648	0,70
Si_HTS_1bar_11	94	638	0,69
Si_HTS_1bar_12	98	647	0,67
Si_HTS_1bar_13	91	631	0,72
Si_HTS_1bar_14	94	666	0,73
Si_HTS_1bar_15	95	634	0,69
Si_HTS_1bar_16	99	648	0,67
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/ 3 bar			
Mittelwert	102±6	725±42	0,74±0,03
Si_HTS_3bar_7	99	744	0,77
Si_HTS_3bar_8	103	774	0,79
Si_HTS_3bar_9	103	686	0,70
Si_HTS_3bar_10	93	663	0,75
Si_HTS_3bar_11	110	753	0,72
Si_HTS_3bar_12	104	728	0,72

Tabelle C.1 Biegeversuche Biresin CR132

Material /Probe	E_b [GPa]	σ_b [MPa]	ε_b [%]
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar			
Mittelwert	48±1	544±93	1,32±0,12
He_FT_1bar_1	49	518	1,11
He_FT_1bar_2	49	611	1,30
He_FT_1bar_3	47	560	1,40
He_FT_1bar_4	47	598	1,24
He_FT_1bar_5	48	368	1,44
He_FT_1bar_6	47	607	1,40
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar			
Mittelwert	70±3	468±23	1,05±0,17
He_HTA_1bar_1	70	467	0,90
He_HTA_1bar_2	72	483	1,06
He_HTA_1bar_3	64	427	1,31
He_HTA_1bar_4	69	468	1,20
He_HTA_1bar_5	73	494	0,90
He_HTA_1bar_6	72	467	0,95
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar			
Mittelwert	83±2	461±15	0,77±0,04
He_HTS_1bar_1	84	469	0,75
He_HTS_1bar_2	84	477	0,75
He_HTS_1bar_3	80	443	0,74
He_HTS_1bar_4	83	462	0,83
He_HTS_1bar_5	85	443	0,74
He_HTS_1bar_6	84	475	0,81
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar			
Mittelwert	88±3	725±94	0,88±0,02
He_HTS_3bar_1	93	806	0,92
He_HTS_3bar_2	87	722	0,87
He_HTS_3bar_3	86	551	0,86
He_HTS_3bar_4	87	706	0,87
He_HTS_3bar_5	90	783	0,88
He_HTS_3bar_6	87	782	0,90

Tabelle C.2 Biegeversuche Hexion L418

D. Ergebnisse der Kurzbiegeversuche

Material /Probe	F _{max} [N]	F _{sbs} [MPa]	F _{ILS} [MPa]
Ep-Sik/ C-FT300/ 0-90°/1 bar			
Mittelwert	5044±311	54,4±3,3	108,8±6,6
Si_FT_1bar_1	5317	57,82	115,63
Si_FT_1bar_2	5185	55,16	110,31
Si_FT_1bar_3	5289	56,98	113,97
Si_FT_1bar_4	4807	51,70	103,40
Si_FT_1bar_5	4625	50,23	100,45
Ep-Sik/ C-HTA40/UD/1 bar			
Mittelwert	3625±208	51,1±1,4	102,2±2,9
Si_HTA_1bar_1	3837	52,21	104,41
Si_HTA_1bar_2	3763	52,64	105,28
Si_HTA_1bar_3	3279	51,20	102,39
Si_HTA_1bar_4	3605	50,78	101,56
Si_HTA_1bar_5	3505	48,53	97,07
Si_HTA_1bar_6	3760	51,25	102,51
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/1 bar			
Mittelwert	3312±181	53,1±0,9	106,3±1,9
Si_HTS_1bar_1	3071	52,14	104,27
Si_HTS_1bar_2	3322	53,50	107,00
Si_HTS_1bar_3	3428	52,99	105,98
Si_HTS_1bar_4	3505	52,03	104,05
Si_HTS_1bar_5	3112	53,68	107,37
Si_HTS_1bar_6	3434	54,42	108,83
Ep-Sik/C-HTS5631/UD/3 bar			
Mittelwert	3118±74	61,7±1,4	123,4±2,7
Si_HTS_3bar_1	3034	59,72	119,44
Si_HTS_3bar_2	3075	61,16	122,33
Si_HTS_3bar_3	3066	62,27	124,55
Si_HTS_3bar_4	3221	62,71	125,43
Si_HTS_3bar_5	3191	63,41	126,82
Si_HTS_3bar_6	3119	60,93	121,85

Tabelle D.1 Kurzbiegeversuche Biresin CR132

Material /Probe	F _{max} [N]	F _{sbs} [MPa]	F _{ILS} [MPa]
Ep-Hex/ C-FT300/ 0-90°/ 1 bar			
Mittelwert	4160±153	53±1,1	106±2,2
He_FT_1bar_1	4361	54,65	109,29
He_FT_1bar_2	4054	52,54	105,09
He_FT_1bar_3	4015	52,10	104,20
He_FT_1bar_4	4168	53,08	106,16
He_FT_1bar_5	4035	51,77	103,55
He_FT_1bar_6	4330	53,82	107,63
Ep-Hex/ C-HTA40/UD/ 1 bar			
Mittelwert	4102±51	55,9±1,1	111,8±2,3
He_HTA_1bar_1	4090	57,08	114,15
He_HTA_1bar_2	4087	55,30	110,60
He_HTA_1bar_3	4073	55,19	110,37
He_HTA_1bar_4	4041	54,48	108,97
He_HTA_1bar_5	4145	56,11	112,22
He_HTA_1bar_6	4180	57,32	114,63
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 1 bar			
Mittelwert	2360±18	39,6±0,5	79,2±0,9
He_HTS_1bar_1	2345	39,09	78,18
He_HTS_1bar_2	2359	39,36	78,72
He_HTS_1bar_3	2391	39,84	79,69
He_HTS_1bar_4	2345	39,45	78,90
He_HTS_1bar_5	2355	40,37	80,75
He_HTS_1bar_6	2370	39,62	79,24
Ep-Hex/C-HTS5631/UD/ 3 bar			
Mittelwert	2616±111	53,0±2,2	106,0±4,4
He_HTS_3bar_1	2511	51,29	102,59
He_HTS_3bar_2	2575	52,90	105,80
He_HTS_3bar_3	2653	53,56	107,12
He_HTS_3bar_4	2802	56,72	113,43
He_HTS_3bar_5	2507	50,28	100,55
He_HTS_3bar_6	2653	53,31	106,63

Tabelle D.2 Kurzbiegeversuche Hexion L418