

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

Einfluss rechteckiger z-Pins auf die mechanischen Eigenschaften translaminar verstärkter Verbundwerkstoffe mit Kohlenstofffaserverstärkung

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

Matthias Knaupp

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau

Universität Rostock

2014

urn:nbn:de:gbv:28-diss2014-0178-7

Gutachter:

Prof. Dr. -Ing. Gerhard Scharr

Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau

Prof. Dr. -Ing. Martin Maier

Universität Kaiserslautern
Institut für Verbundwerkstoffe
Abteilung Berechnung und Konstruktion

Prof. Dr. -Ing. Michael Heine

Universität Augsburg
Institut für Materials Resource Management
Lehrstuhl für Materials Engineering

Abgabe: 18.09.2013

Verteidigung: 14.08.2014

Meiner Frau

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Problem- und Zielstellung	3
2	Stand der Technik	7
2.1	Herstellung z-Pin verstärkter Verbundwerkstoffe	7
2.2	Mikrostruktur verpinnter Faserverbundwerkstoffe	10
2.3	Steifigkeit und Festigkeit	14
2.4	Bruchmechanische Eigenschaften	17
2.5	Impacteigenschaften und Schadenstoleranzverhalten	24
3	Material und Methoden	33
3.1	Werkstoffe und Halbzeuge	34
3.1.1	Faserhalbzeug	34
3.1.2	Matrixwerkstoff	35
3.1.3	Halbzeug zur Pin-Herstellung	35
3.2	Prüfkörperherstellung	36
3.3	Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit	38
3.4	Rissöffnung unter Mode I Belastung	40
3.5	Pin-Auszugsverhalten	44
3.6	Impact und Post-Impact-Eigenschaften	47
4	Ergebnisse	53
4.1	Zugeigenschaften	53
4.1.1	Elastizitätsmodul	53
4.1.2	Zugfestigkeit	56
4.2	Mode I	58
4.2.1	Kraft-Weg-Verlauf und Widerstandskurven	58

4.2.2	Kritische Energiefreisetzungsrates	61
4.3	Pin-Auszugsverhalten	66
4.4	Impact- und Schadenstoleranzverhalten	72
4.4.1	Schädigung auf der Ober- und Unterseite des Laminats	72
4.4.2	Kraft-Zeit-Verläufe	74
4.4.3	Zerstörungsfreie Prüfung der Delaminationsfläche	78
4.4.4	Dissipierte Energie während des Impactvorgangs	81
4.4.5	Restdruckfestigkeit nach Impactbeanspruchung	84
5	Auswertung	89
5.1	Qualität des Herstellungsverfahrens	89
5.2	Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit	93
5.3	Mode I - Interlaminare Risszähigkeit	94
5.4	Pin-Auszugsverhalten	96
5.5	Impact- und Post-Impact-Eigenschaften	97
5.6	Schlussfolgerung	99
6	Zusammenfassung und Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	105

Abbildungsverzeichnis

1.1	Einflussfaktoren auf die Beanspruchbarkeit von Verbundwerkstoffen im Flugzeugbau	2
1.2	Einfluss der z-Pin Geometrie auf die mikromechanischen Störungen	4
2.1	Arbeitsschritte beim Ultraschall-Verpinnprozess	8
2.2	Aufbau zur Verstärkung eines Laminats mit z-Pins im Autoklavverfahren	9
2.3	Methode zum Verpinnen von Prepregs ohne Preforms	9
2.4	Automatisiertes Verpinnen für das <i>Liquid Composite Molding</i> Verfahren	10
2.5	Ausbildung von harzreichen Zonen und Harzkanälen	11
2.6	Symmetrische und asymmetrische Faserumlenkung um den z-Pin	12
2.7	Inklination sowie Einfluss des Verarbeitungsschrittes auf den Inklinationwinkel	13
2.8	Fasereinzug	14
2.9	Zugmodul E_x eines unidirektionalen 0° CFK-Laminats	16
2.10	Abhängigkeit der Zug- und Druckfestigkeit eines unidirektionalen 0° -Laminats von der z-Pin Flächendichte	17
2.11	Schematische Darstellung der drei Bruchmodi	18
2.12	Fiber-Bridging-Effekt während der DCB-Versuchsdurchführung	19
2.13	Einfluss von Fiber-Bridging auf die kritische Energiefreisetzungsrate G_I	20
2.14	Einfluss von z-Pins auf die Anrisskraft und den Kraft-Traversenweg-Verlauf	21
2.15	G_{IC} in Abhängigkeit der Flächendichte	22
2.16	Stufenweise Darstellung eines Mode I Versuchs	23
2.17	Schadensbilder in einem $[0,90]_s$ Laminat nach Impactbeanspruchung	27
2.18	Zusammenhang zwischen Kraft-Zeit-Verlauf und Schadensmodus im Impactversuch	29
2.19	Vergleich des Kraft-Zeit-Verlaufs bei Penetration und Delaminationswachstum	30
2.20	Zusammenhang zwischen Sichtbarkeit, Restdruckfestigkeit und Impactenergie	31
3.1	Aufbau des Laminats in der Laminierform	37

3.2	Einbringen der z-Pins in das nasse Laminat	37
3.3	Schematischer Aufbau zum Verpressen der verpinnten Lamine	37
3.4	Schematische Darstellung und Geometrie der Proben für die Zugprüfung	39
3.5	Prüfkörpergeometrie und Prüfkörpertypen der Mode I-Untersuchungen	41
3.6	Schematischer Aufbau der Auszugsprobe und des Versuchsaufbaus	45
3.7	Exemplarischer Kraft-Weg-Verlauf beim Auszugsversuch	47
3.8	Prüfkörpergeometrie und Lagenaufbau der CAI-Proben	48
3.9	Fallwerk <i>Dynatup 8250</i>	50
3.10	Vorgeschlagene und verwendete CAI-Prüfeinrichtung	51
4.1	Experimentell ermittelter Elastizitätsmodul E_1 bei unidirektionalem Laminataufbau	54
4.2	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der harzreichen Zonen	55
4.3	Experimentell ermittelte Zugfestigkeit σ_1 bei unidirektionalem Laminataufbau	57
4.4	Reaktionskräfte und Rissbildung im Laminat infolge Zugspannung	58
4.5	Einfluss der Flächendichte auf den Kraft-Weg-Verlauf unter Mode I Belastung	60
4.6	Vergleichende Darstellung ausgewählter Widerstandskurven	62
4.7	Kritische Energiefreisetzungsrate G_I der verschiedenen Prüfserien	63
4.8	Schadensbildung unter Mode I Belastung bei runden und rechteckig, längs ausgerichteten z-Pins; a,b) elastische Deformation des Harzes; c) Matrixbruch in der harzreichen Zone	65
4.9	REM-Aufnahmen der Kanten der harzreichen Zonen nach der Mode I Prüfung	66
4.10	Exemplarisch dargestellter Kraft-Weg-Verlauf eckiger und runder Pins	67
4.11	Einfluss der z-Pin Geometrie auf die Schubspannung in der Schicht zwischen z-Pin und Laminat τ_p und der Zugspannung σ_p im Ablösezeitpunkt	69
4.12	Vorbereitung der Pin-Auszugsproben für REM-Aufnahmen	69
4.13	REM-Aufnahmen der Auszugskanten runder und eckiger z-Pins	70
4.14	REM-Aufnahmen der Bruchflächen eckiger und runder Pins im Parallelschnitt	71
4.15	Schadensbild einer mit 35 J getesteten Impactprobe mit runden Pins, $\Phi = 0,5\%$	73
4.16	Schadensbild einer mit 52,5 J getesteten Impactprobe mit runden Pins, $\Phi = 0,5\%$	74
4.17	Kraft-Zeit-Verläufe beim Impactvorgang	77
4.18	Projizierte Delaminationsfläche aus Ultraschalluntersuchungen	79
4.19	Delaminierte Fläche nach Impactbelastung in Abhängigkeit der Impactenergie	80
4.20	Delaminationsfläche in Abhängigkeit der beim Impact dissipierten Energie	82

4.21	Restdruckfestigkeit nach Impactbelastung	85
4.22	Sublaminatbildung infolge äußerer Druckspannungen σ_c bei unverpinnten Proben. Rissöffnungskraft F_{CO} und die Länge der Delaminationsfläche l_{del} beeinflussen die Druckeigenschaften	86
4.23	Einflussfaktoren auf die Beanspruchbarkeit von Verbundwerkstoffen im Flugzeugbau	87
5.1	Dickenverteilung der unverstärkten, verpinnten und kumulierten Proben bei unidirektionalem Laminataufbau	90
5.2	Dickenverteilung der unverstärkten, verpinnten und kumulierten Proben bei quasi-isotropem Laminataufbau	91
5.3	Vergleich zwischen porenfreiem Laminat (a) und mit Poren behaftetem Laminat (b)	92

Tabellenverzeichnis

2.1	Prüfverfahren zur Ermittlung der Energiefreisetzungsrate für verschiedene Bruchmodi	19
3.1	In der Arbeit verwendete Prüfnormen	33
3.2	Eigenschaften der T700SC Carbonfasern	34
3.3	Eigenschaften von LR385/LH386, Aushärtung: 24 h/23 °C + 15 h/55°C . .	35
3.4	Mechanische Eigenschaften der pultrudierten CFK-Stäbe zur Herstellung von z-Pins	36
3.5	Durchgeführte Prüfungen zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls	40
3.6	Prüfserien zur Ermittlung der kritischen Energiefreisetzungsrate unter Mode 1 Belastung	42
3.7	Prüfserien zur Untersuchung des Pin-Auszugsverhaltens	45
3.8	Prüfserien zur Ermittlung der Impact und Post-Impact-Eigenschaften . . .	48
3.9	Prüfparameter zur Durchführung der Impactuntersuchungen in Anlehnung an die AITM1-0010	49
4.1	Parameter zur Beschreibung der harzreichen Zone um den z-Pin	56

Abkürzungsverzeichnis

AITM	Airbus Industries Test Method
BMI	Bismaleimide
BVID	Barely Visible Impact Damage, kaum sichtbarer Impactschaden
CAI	Compression after Impact, Restdruckfestigkeit nach Impact
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CRS	Crack Rail Shear
DCB	Double Cantilever Beam
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMS	Dehnungsmessstreifen
E-L	Eckig-Längs, rechteckige z-Pins längs ausgerichtet
E-Q	Eckig-Quer, rechteckige z-Pins quer ausgerichtet
EDT	Edge Delamination Tension
ELS	End Loaded Split
ENF	End Notched Flexure
FE	Finite-Elemente
FVK	Faser-Verbund-Kunststoff
FVG	Faservolumengehalt
FU	Faserumlenkung
HVI	High Velocity Impact, Hochgeschwindigkeitsimpact
I	Impactversuch
ISO	International Organization for Standardization
LCM	Liquid Composite Molding
LVI	Low Velocity Impact, Niedergeschwindigkeitsimpact
M1	Mode I DCB Versuch
MMB	Mixed Mode Bending
P	Gleiche Anzahl eckiger Pins wie 0,5% runde Pins
PMI	Polymethacrylimid
PO	Pullout, z-Pin Auszugsversuch
Prepreg	Preimpregnated fibers, vorimprägnierte Fasern
PTFE	Polytetrafluorethylen
QI	Quasi-isotrop
R	Rund
REM	Rasterelektronenmikroskopie
SCB	Split Cantilever Beam
TEXCAD	Textile Composite Analysis for Design
UAZ	Ultrasonically Assisted Z-fiber Process, Ultraschallgestützte z-Pin Insertion

UC	Unit Cell, Einheitszelle
UD	Unidirektional
US	Ultraschall
Z	Zugversuch

Formelverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
δ	mm	Traversenweg beim Mode I Versuch
ε	–	Dehnung
ε_b	%	Bruchdehnung
ε_r	%	Bruchdehnung nach Impactbelastung
ν_{ij}	–	Querkontraktionszahlen
ρ_f	g/cm ³	Dichte der Verstärkungsfasern
ρ_h	g/cm ³	Dichte des Matrixharzes
σ_1	MPa	Zugspannung bei $\varepsilon_1 = 0,005$
σ_2	MPa	Zugspannung bei $\varepsilon_2 = 0,025$
σ_b	MPa	Zugspannung beim Bruch
σ_p	MPa	Zugspannung im z-Pin beim Auszugsversuch
σ_r	MPa	Restdruckfestigkeit nach Impactbelastung
τ_p	MPa	Schubspannung im Interface zwischen Pin und Laminat
v_i	–	Anteil der Teilfläche i an der Gesamtfläche
φ	–	Faservolumengehalt
Δ	–	Korrekturfaktor der korrigierten Balkentheorie
Δ_E	%	Relative Reduktion des Zugmoduls
Δ_R	%	Relative Reduktion der Zugfestigkeit
Δ_A	%	Relative Reduktion der Delaminationsfläche
Δ_I	%	Relative Reduktion der Restdruckfestigkeit
Δ_ε	%	Relative Reduktion der Bruchdehnung nach Impactbelastung
Θ	°	Faserumlenkungswinkel
Φ	%	z-Pin Flächendichte
$[S]$	mm ² /N	Steifigkeitsmatrix
$[C]$	N/mm ²	Nachgiebigkeitsmatrix
$[T]$	–	Transformationsmatrix
a	mm	Risslänge
b	mm	Breite
c	°	Cosinus
g	m/s ²	Gravitationskonstante
h	mm	Höhe
h_i	m	Fallhöhe des Impacters
h_n	%	Relative Häufigkeit
l_b	mm	Bruchlänge
l_0	mm	Ausgangslänge

Symbol	Einheit	Bedeutung
m_i	kg	Masse des Impacters
n_p	-	Anzahl an z-Pins
p_H	bar	Luftdruck im Hebekissen
p_L	MPa	Verpressdruck im Laminat
p_R	N	Kraft bei Restdruckfestigkeit
s	°	Sinus
t_e	mm	Im Eingriff befindliche z-Pin Länge
t_i	ms	Zeitpunkt während des Impactversuchs
v_i	m/s	Impactgeschwindigkeit
A_{SL}	mm ²	Kontaktfläche zwischen Stempel und Laminat
A_{HS}	mm ²	Kontaktfläche zwischen Hebekissen und Stempel
A_{UC}	mm ²	Gesamtfläche der Einheitszelle
A_d	mm ²	Delaminationsfläche infolge Impactbeanspruchung
A_i	mm ²	Teilflächen der Einheitszelle
A_p	mm ²	Querschnittsfläche des z-Pins
D	mm	z-Pin Durchmesser
E	MPa	Elastizitätsmodul
E_d	J	Während des Impacts dissipierte Energie
E_i	J	Impactenergie
E_s	J/mm	Spezifische Impactenergie
F	N	Kraft
F_i	N	Kontaktkraft während des Impactversuchs
F_{Max}	N	Maximalkraft
F_p	N	Pin-Auszugskraft
F_s	N	Stempelkraft
G_I	J/m ²	Energiefreisetzungsrate bei Mode I Belastung
G_{IC}	J/m ²	kritische Energiefreisetzungsrate bei Mode I Belastung
G_{ij}	MPa	Schubmodul
P	N	Rissöffnungskraft
R^+	MPa	Zugfestigkeit
R^-	MPa	Druckfestigkeit
U_p	mm	Umfang eines z-Pins
W_{diss}	mJ	Dissipierte Energie beim Pin-Auszug

1 Einführung

1.1 Einleitung

Der Leichtbau als Hilfsmittel zur Entwicklung neuer ressourcenschonender Bauteile gewinnt immer größere Bedeutung durch ein wachsendes Umweltbewusstsein innerhalb der Bevölkerung. Faserverstärkte Kunststoffe nehmen im Bereich der Leichtbauwerkstoffe eine zentrale Rolle ein. Sie bieten dem Ingenieur herausragende spezifische, auf die Dichte bezogene, mechanische Eigenschaften.

Der Einsatz von Verbundwerkstoffen ist jedoch oftmals limitiert durch ihre Schwäche bei Schlagbelastungen. In der Regel besitzen sie Fasern, die lediglich innerhalb der Belastungsebene ausgerichtet sind. Durch das Fehlen der Faserverstärkung senkrecht zur Plattenebene wird die Beanspruchbarkeit bei Stoßbelastungen von den Matrixeigenschaften und der Grenzfläche dominiert. Dynamische Beanspruchungen infolge Hagel, Vogelschlag oder herunterfallendem Werkzeug können bei Bauteilen aus Verbundwerkstoffen starke Schädigungen innerhalb des Werkstoffs hervorrufen. Insbesondere die schichtweise Ablösung der Einzelschichten voneinander, Delaminationen genannt, können die verbleibenden mechanischen Eigenschaften signifikant reduzieren. Bei glasfaserverstärktem Kunststoff gestaltet sich die Schadensdetektion im Vergleich zu kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff einfach, da die Delaminationen als weißlich transluzente Bereiche hervortreten. CFK hingegen ist opak, weswegen ein Schaden innerhalb des Werkstoffes mit bloßem Auge nicht zu detektieren ist. Hinzu kommt, dass das Ausmaß des Schadens meist nicht auf der Aufschlagseite, sondern auf der Rückseite des Bauteils sichtbar wird. An schwer zugänglichen Orten, wie z.B. im Tragflügelbereich, ist die Detektionswahrscheinlichkeit daher gering.

Durch die sich einstellende Delamination infolge Schlag- oder Stoßbelastung, nachfolgend nur noch Impactbelastung genannt, büßt das Bauteil einen Großteil seiner Festigkeit und

Steifigkeit ein. Daher werden Bauteile aus FVK, die einer möglichen Impactbelastung während ihrer Lebensdauer unterliegen können, mit hohen Sicherheitsbeiwerten ausgelegt. Infolge dessen steigt der Widerstand des Bauteils gegenüber Impactbelastungen an, was jedoch mit einer Erhöhung des Bauteilgewichts einhergeht. Damit geht eine geringere Werkstoffausnutzung unter Betriebslast einher, die im Widerspruch zum Leichtbaugedanken steht. In Abbildung 1.1 ist exemplarisch dargestellt, welchen Einfluss die Sensitivität des Werkstoffs gegenüber Impact und Kerben auf die Beanspruchbarkeit einnimmt [1]. Im Auslegungsprozess von Bauteilen aus Verbundwerkstoffen wird real lediglich ein Drittel der Bruchdehnung ausgenutzt, um die Sensitivität des Werkstoffs auszugleichen. Eine höhere Ausnutzung des Materialpotentials hätte positive Auswirkung auf das Bauteilgewicht und die Material- und Herstellungskosten.

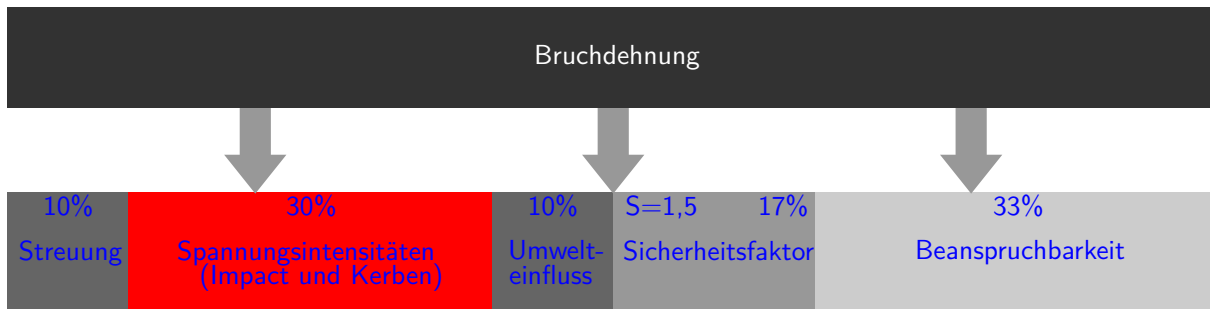


Abbildung 1.1: Einflussfaktoren auf die Beanspruchbarkeit von Verbundwerkstoffen im Flugzeugbau [1]

Vor allem im Flugzeugbau nimmt der Anteil an Verbundwerkstoffen seit den letzten Jahrzehnten stetig zu. Mit zunehmendem Anteil an der Primärstruktur rückt das Interesse an Methoden zur dreidimensionalen Verstärkung dieser Compositbauteile stärker in den Vordergrund. Um diesen Mangel auszugleichen wurden bisher unterschiedliche Verfahren zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften senkrecht zur Plattenebene entwickelt. Das wohl bekannteste und am meisten genutzte Verfahren ist das Nähen. Hierbei werden die einzelnen Lagen im trockenen Zustand miteinander vernäht und abschließend mit Harz imprägniert. Weitere Verfahren zur Entwicklung 3D-verstärkter Bauteile sind das Stricken, Sticken, Flechten, Nadeln und Weben der Bauteile. Im Luft- und Raumfahrtsektor werden hauptsächlich vorimprägnierte Fasern genutzt, Prepregs (preimpregnated fibers) genannt. Allerdings können diese mit konventionellen 3D-Verstärkungsmethoden nicht kombiniert, sondern lediglich mit z-Pins verstärkt werden. Dabei werden dünne Nadeln aus CFK senkrecht zur Bauteiloberfläche in die Prepregs eingebracht. Anschließend werden die Bauteile im Autoklav ausgehärtet.

1.2 Problem- und Zielstellung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften translaminar verstärkter Verbundwerkstoffe mit rechteckigen z-Pins. Bisher wurde die Topologie von z-Pins als Einflussfaktor auf die mechanischen Eigenschaften noch nicht untersucht. Dabei können rechteckige Pins deutliche Vorteile auf mikromechanischer Ebene gegenüber kreisrunden haben. Der Kreis als geometrische Form hat bei gegebenem Flächeninhalt gegenüber allen anderen Formen immer den kleinsten Umfang. Bezogen auf einen kreisrunden Pin im Laminat wird der Verbund mikromechanisch bei kleinster Kontaktfläche zwischen Pin und Laminat maximal gestört. Im Umkehrschluss können nicht kreisrunde z-Pins bei gleichbleibender Querschnittsfläche eine geringere Störung bei gleichzeitig größerer Kontaktfläche ermöglichen.

Das Ziel zur effektiven Verstärkung sollte daher eine minimale mikromechanische Störung bei maximaler Kontaktfläche des Verstärkungsmaterials zum umgebenden Pin sein. Der Zusammenhang zwischen Pin-Geometrie und mikromechanischer Beeinflussung ist in Abbildung 1.2 exemplarisch für einen kreisrunden und rechteckigen Pin dargestellt. Die kreisrunde Verstärkung hat eine ausgeprägte Umlenkung der Fasern und eine, im Vergleich zum rechteckigen Pin, größere harzreiche Zone zur Folge. Sowohl Faserumlenkung als auch die Größe der harzreichen Zonen stehen in direktem Zusammenhang mit der Steifigkeit und Festigkeit des Laminats in der Plattenebene. Eine Vergrößerung beider Faktoren resultiert in einer Verringerung der mechanischen Eigenschaften in der Plattenebene. Bei rechteckigen z-Pins ist daher zu erwarten, dass insbesondere die Zug- und Druckeigenschaften einer geringeren Degradation als bei runden Pins unterliegen. Als Beste Lösung, in Bezug auf die zuvor genannten mikromechanischen Störungen, würden sich z-Pins mit elliptischer Kontur eignen.

Unter Berücksichtigung der bruchmechanischen Eigenschaften verpinnter Lamine stellt die Kontaktfläche zwischen Pin, Laminat und harzreicher Zone einen möglichen Einflussparameter dar. Unter Mode 1 Belastungen könnte eine größere Kontaktfläche die Risszähigkeit erhöhen, da mehr Energie während des reibungsbehafteten Auszug des Pins durch eine größere Oberfläche umgesetzt werden kann und somit die Risszähigkeit ansteigt. Des Weiteren könnte die Kontaktzone zwischen z-Pin und den umliegenden Fasern des Laminats das Pin-Auszugsverhalten beeinflussen, siehe Abbildung 1.2. Äußere Lasten, die den Auszug der Pins bewirken, könnten zum Teil durch die „Interphase“ in der Kontaktzone an die

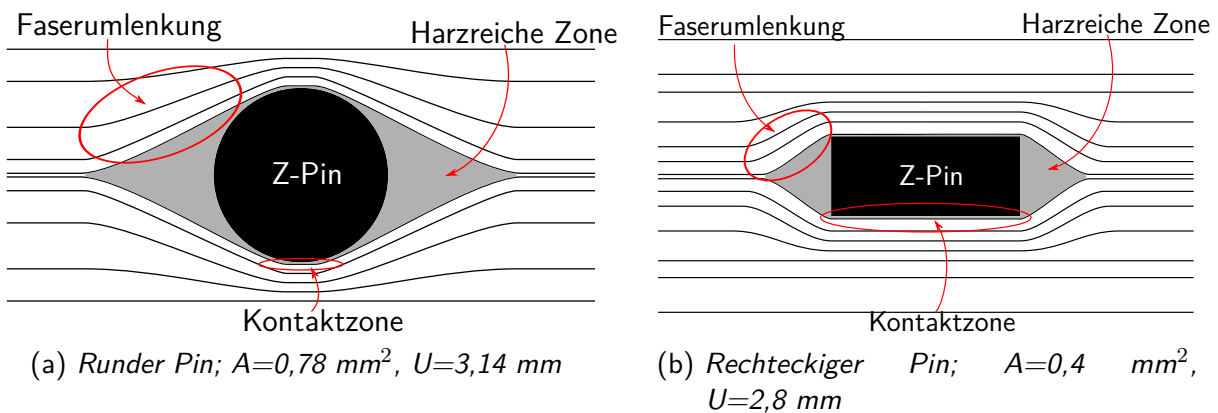


Abbildung 1.2: Einfluss der z-Pin Geometrie auf die mikromechanischen Störungen

umgebenden Fasern umgeleitet werden, wodurch die Bindungsfestigkeit des Pins zum Laminat ansteigt.

Zuletzt sei der Einfluss des Formfaktors des Verstärkungsmaterials genannt. Bei länglichen Pins mit einem Formfaktor > 1 kann die Ausrichtung der Längsseite relativ zur Faserausrichtung die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Ein zylindrischer Pin hat innerhalb der xy-Ebene aus allen Richtungen dieselbe Biegesteifigkeit und bewirkt bei allen Faserorientierungen eine identische harzreiche Zone und Faserumlenkung. Im Gegensatz dazu besitzt ein rechteckiger z-Pin in Abhängigkeit der Biegeachse unterschiedliche Biegesteifigkeiten. Zusätzlich wird bei der Ausrichtung der Längsseite des Rechtecks parallel zur Faserorientierung eine geringere Faserumlenkung und harzreiche Zone ausgebildet, als bei der Ausrichtung quer zur Faser. Dieser Umstand könnte ebenfalls bei Mode 1 Belastungen positiven Einfluss haben, da in Abhängigkeit der z-Pin Ausrichtung die Größe der Kontaktzone und die Biegesteifigkeit änderbar ist.

Die Wahl geeigneter Abmessungen der rechteckigen Pins ist durch die Vielzahl der variablen Einflussfaktoren auf das Laminat, und die damit einhergehenden Eigenschaften schwierig. Aus Gründen der Handhabbarkeit und der begrenzten Verarbeitungszeit des Reaktionsharzes ist der Durchmesser der runden Pins auf $D = 1,0 \text{ mm}$ festgelegt worden. Um ähnliche Bedingungen zu schaffen, wurde als Auswahlkriterium eine maximale Ausdehnung des Pins von $1,0 \text{ mm}$ festgelegt, wodurch die Faserauslenkung bei rechteckigen Pins nicht größer werden kann als bei runden Pins. Da im Vordergrund der Untersuchungen das Schadenstoleranzverhalten und die bruchmechanischen Eigenschaften stehen, wurde als zweites Auswahlkriterium der rechteckigen z-Pin Halbzeuge die Äquivalenz des Umfangs festgelegt. Aus den zur Verfügung stehenden Halbzeugen der Firma *Van Dijk Pultrusion Profiles* sind

daher rechteckige Pins mit den Abmaßen von 0,4 x 1,0 mm ausgewählt worden.

Die Querschnittsfläche der ausgewählten rechteckigen Pins ist in etwa halb so groß wie die der runden z-Pins. Um die mechanischen Eigenschaften beider Pin Geometrien zu vergleichen werden die Proben mit äquivalenten Flächendichten verstärkt. Als Flächendichte wird dabei das Verhältnis aus der Querschnittsfläche aller Pins zur Gesamtfläche des gepinnten Bereichs bezeichnet. Insbesondere die bruchmechanischen- und impact-Eigenschaften könnten jedoch durch die doppelte Anzahl an eckigen Pins bei gleicher Flächendichte verfälscht werden. Daher wurden für die Proben der Mode I und impact-Versuche weitere Prüfkörper hergestellt, bei denen die Flächendichte und der Pin-zu-Pin Abstand der eckigen und runden z-Pins identisch ist. Umgerechnet auf die Flächendichte folgt aus der gleichen Pin-Anzahl bei 0,5% Anteil runder Pins eine Flächendichte von 0,26% für rechteckige Pins.

Um eine allgemeine Aussage über die Leistungsfähigkeit rechteckiger Pins gegenüber den konventionellen treffen zu können, werden drei verschiedene Eigenschaften experimentell untersucht. Als erstes wird die Zugfestigkeit und der Elastizitätsmodul unter Zugbelastung der Laminats gemessen, um Aussagen über die Degradation in Abhängigkeit der Geometrie treffen zu können.

Im zweiten Teil wird die Risszähigkeit unter Mode I Belastung experimentell ermittelt. Im Allgemeinen sind Untersuchungen zur Risszähigkeit unter Mode I Belastung von theoretischer Natur, da diese in der Realität alleine kaum vorzufinden sind. Jedoch werden diese Versuche am Häufigsten zur Bewertung von 3D-Verstärkungsverfahren angewendet, weshalb ebenfalls zu Vergleichszwecken Mode I Versuche durchgeführt werden. Um den Einfluss der Kontaktzone zwischen Pin und Laminat untersuchen zu können, werden Pin-Auszugsversuche an unidirektionalen Laminaten durchgeführt. Die dabei gewonnen Informationen über die maximale Auszugskraft, der Interface-Schubspannung und der umgesetzten Energie während des reibungsbehafteten Auszugs können zur Auswertung der Leistungsfähigkeit der z-Pin Geometrie genutzt werden.

Als dritter Schwerpunkt werden Impactversuche durchgeführt. Im Anschluss daran wird die Delaminationsfläche innerhalb des Laminats und die Restdruckfestigkeit sowie die Bruchdehnung der geschädigten Proben gemessen. Im Gegensatz zu den Mode I Versuchen ist die dabei wirkende Belastung unter Betriebsbedingungen häufig vorzufinden. Daher eignet sich diese Prüfung sehr gut, um Aussagen über den Einfluss der Geometrie von

z-Pins über die Leistungsfähigkeit treffen zu können.

2 Stand der Technik

Das nachfolgende Kapitel setzt sich mit den Grundlagen der dreidimensionalen Verstärkung von Verbundwerkstoffen, insbesondere mit der Methode des z-Pinnings auseinander. Sowohl die bisher entwickelten Fertigungsverfahren als auch die Eigenschaften und Schädigungsmechanismen von verpinneten Werkstoffen werden eingehend betrachtet.

2.1 Herstellung z-Pin verstärkter Verbundwerkstoffe

Im Allgemeinen wird in zwei konventionellen Verfahren zur Herstellung von z-Pin verstärkten Verbundwerkstoffen unterschieden. Zum einen das Einbringen der Pins über Ultraschall, auch Ultrasonically Assisted Z-fiber Process (UAZ) genannt, und zum anderen das Einbringen der Pins im Autoklav durch Vakuum. Beide Verfahren können zur Verstärkung von vorimprägnierten Faserhalbzeugen (preimpregnated fibers, kurz: Prepregs) angewandt werden. Bei beiden Verfahren kommen Preforms zum Einsatz. Diese bestehen aus zwei Schäumen unterschiedlicher Dichte und den senkrecht eingebrachten z-Pins. Der Schaum ist notwendig, um die Pins orthogonal in das Laminat einbringen zu können, und ein Ausknicken der Pins infolge der Insertionskräfte zu verhindern.

Beim Ultraschalleinbringen werden die Pins mit einem Ultraschallkopf sektionsweise eingetrieben, siehe Abbildung 2.1. Der Kopf wird mit einer hochfrequenten Schwingung angeregt und vollzieht gleichzeitig eine translatorische Bewegung in der z-Achse. Sobald die Pins und der Ultraschallkopf in Kontakt treten, wird das gegenüberliegende Ende des Pins angeregt und beginnt zu Schwingen. Infolgedessen erwärmt sich das Matrixharz der Prepregs lokal und erweicht. Durch die Erweichung des Harzes reduziert sich der Insertionswiderstand, welcher der translatorischen Bewegung des Pins entgegengesetzt ist.

Im Anschluss an den Insertionsprozess wird das Bauteil zur Abscherung des überschüssigen, kompaktierten Preform-Materials vorbereitet. Dazu wird das Laminat eingefroren, wodurch die Viskosität des Harzes ansteigt, und die Pins im Laminat fixiert werden. Mit Hilfe eines Beitelers oder ähnlichem Stechwerkzeug wird die Preform abgeschert.

Im letzten Schritt wird das verpinnnte Bauteil im Autoklav unter definierten Temperatur- und Druckbedingungen ausgehärtet [2, 3].

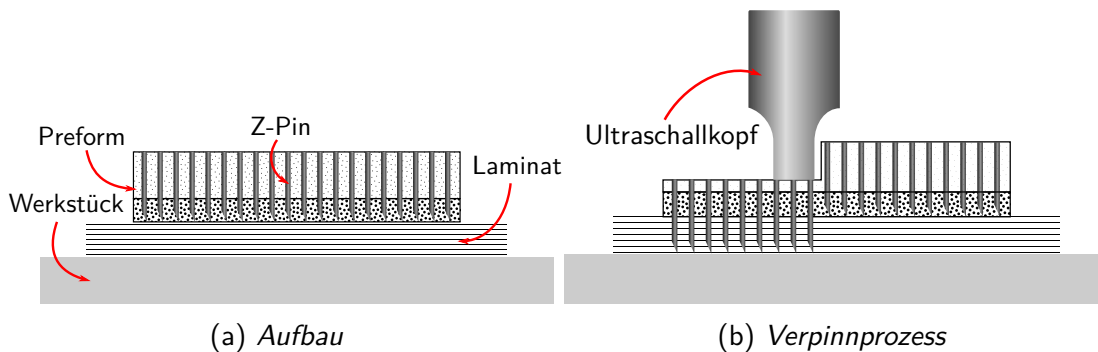


Abbildung 2.1: Arbeitsschritte beim Ultraschall-Verpinnprozess

Die Ultraschallinsertion kann entweder manuell oder automatisiert erfolgen. Bei der manuellen Insertion werden mit einem Handgerät die Preformen bearbeitet, was eine große Bewegungsfreiheit ermöglicht. Die automatisierte Insertion erfolgt über Traversen, an denen das Werkzeug angebracht ist. Diese eignet sich besonders für die Bearbeitung von ebenen Bauteilen mit großen zu verpinnenden Flächen.

Das Vakuumverfahren zur Herstellung dreidimensional verstärkter Laminare erfolgt in ähnlicher Weise. Der Laminataufbau und das Aufbringen der Preforms ist identisch zum Ultraschallverfahren. Die Verfahren unterscheiden sich jedoch beim Einbringen der Pins und Abschneiden der kompaktierten Preform. Der zuvor erstellte Aufbau wird mitsamt der nicht komprimierten Preformen im Autoklav ausgehärtet, siehe Abbildung 2.2. Der im Autoklav wirkende Überdruck und das aufgebrachte Vakuum bewirken unter Temperatureinwirkung, dass die Preform gleichmäßig kompaktiert, und die z-Pins in das Laminat eingetrieben werden. Der nach dem Aushärten kompaktierte Schaum wird erst nach dem Entformen abgeschert [3].

Das Vakuumverfahren bietet den Vorteil, dass durch den Wärmeeintrag des Autoklav die Viskosität des Harzes nicht lokal, sondern global verringert wird. Dies erleichtert die Insertion und es treten weniger Faserbrüche auf als beim Ultraschallverfahren [3].

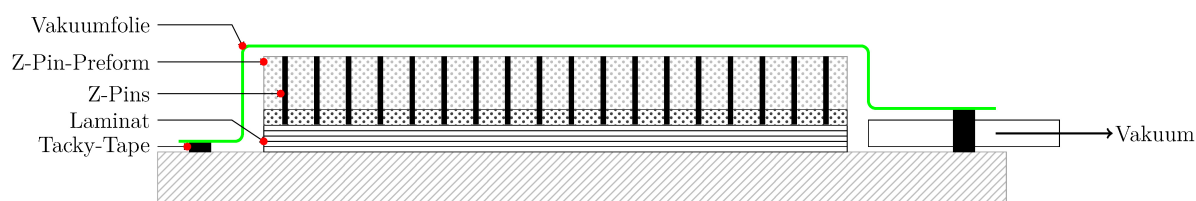


Abbildung 2.2: Aufbau zur Verstärkung eines Laminats mit z-Pins im Autoklavverfahren

In der Vergangenheit wurden zudem weitere Verfahren zur Einbringung von z-Pins entwickelt. CHOI ET AL. entwickelten eine Verpinnmethode auf Basis der Vakuuminserterion. Im Unterschied dazu werden jedoch keine Preforms als Insertionshilfsmittel genutzt, sondern wiederverwendbare Aluminiumformen, siehe Abbildung 2.3. In die Formen werden im gewünschten Verpinnmuster Löcher gebohrt. Als Gegenstück wird eine Platte mit Stahlstiften hergestellt. Die Stifte sind koaxial zu den Bohrungen angebracht. Das Laminat wird in der Laminierform aufgebaut und darüber die Aluminiumplatte mit dem Verpinnmuster befestigt. Die Bohrungen der Aluminiumplatte werden manuell mit z-Pins besetzt. Anschließend wird die Platte mit den Stiften eingelegt, und der Aufbau im Vakuumsack verschlossen. Die Aushärtung findet ebenfalls im Autoklav statt. Der Überdruck bewirkt, dass die gestiftete Platte die z-Pins in das Laminat eindrückt. Nach dem Aushärten und der Entformung können die Lochplatten wiederverwendet werden [4].

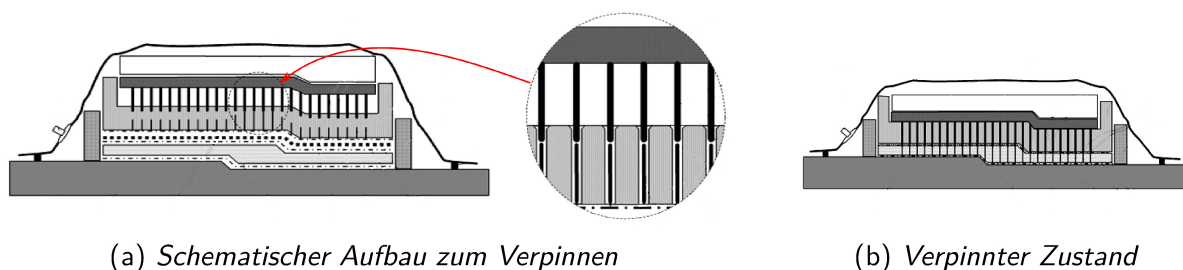


Abbildung 2.3: Methode zum Verpinnen von Prepregs ohne Preforms [4]

EADS entwickelte in Zusammenarbeit mit HEXCEL ein Verpinnverfahren für trockene Faserhalbzeuge, die im Liquid Composite Molding Verfahren (LCM-Verfahren) verarbeitet werden. Das Verfahren, in Abbildung 2.4 dargestellt, arbeitet mit vibrierenden Nadeln. Diese sind robotergesteuert und fahren sukzessive die zu verpinnenden Punkte an und verdrängen lokal die Fasern, sodass ein zylindrischer Hohlraum für die z-Pins entsteht, Abbildung 2.4a, 2.4b. Anschließend werden die Punkte mit einem weiteren Werkzeug angefahren, an dessen Kopf sich ein Hohlzylinder befindet. Diesem werden automatisch die Pins aus einer Kassette zugeführt. Sobald die Koordinaten des Pins erreicht sind, wird der z-Pin in das vorgesehene Loch im Laminat eingeschoben, Abbildung 2.4c, 2.4d [5].

EADS ECC hat dieses Verfahren weiterentwickelt, sodass die Pins mit nur einem Werkzeug und in einem Schritt verarbeitet werden können. Als Werkzeugkopf nutzen sie hohle Nadeln, die in das Laminat eindringen. Der in der Nadel befindliche Pin wird losgelassen und die Nadeln herausgezogen, ähnlich Abbildung 2.4c, 2.4d [5].

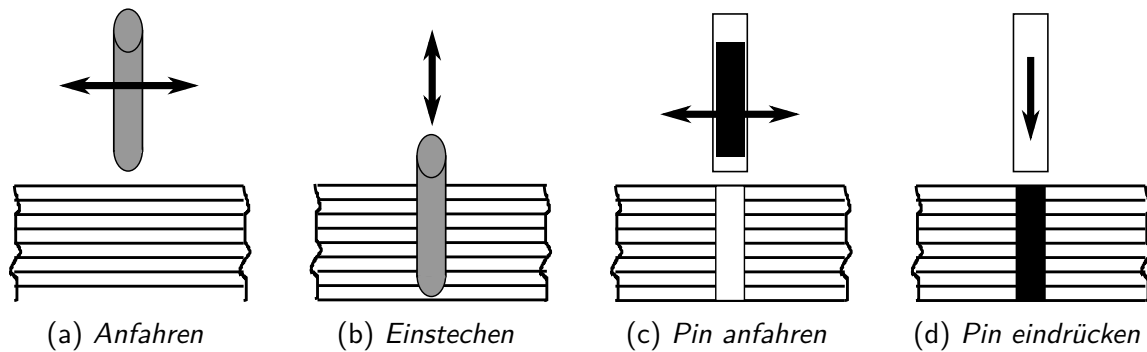


Abbildung 2.4: Automatisiertes Verpinnen für das Liquid Composite Molding Verfahren [5]

Diese Verpinnmethode hat bedeutende Vorteile gegenüber der konventionellen Ultraschalleinbringung und den Vakuummethoden. Die Herstellungskosten dieser Methode liegen deutlich unter den zuvor genannten Verfahren, da keine Preforms und Prepregs mehr verwendet werden müssen, und der kostenintensive Aushärteprozess im Autoklav ebenfalls entfällt. Des Weiteren ist das Verfahren in vielerlei Hinsicht flexibler. Gekrümmte Oberflächen können nahezu problemlos bearbeitet werden. Zudem können beliebige Verpinnmuster umgesetzt, als auch jeder einzelne Pin individuell, bezüglich Verpinntiefe und Inklination, eingesetzt werden [5].

2.2 Mikrostruktur verpinnter Faserverbundwerkstoffe

Die Einbringung von z-Pins in Verbundwerkstoffe zieht eine Veränderung der Mikrostruktur des resultierenden Werkstoffs nach sich. Die mechanischen Eigenschaften von z-gepinnten Laminaten werden signifikant durch die geänderte Mikrostruktur beeinflusst. Insbesondere die mechanischen Eigenschaften in der Plattenebene (in-plane) werden herabgesetzt. Da mikrostrukturelle Beeinflussung beim Einsatz von z-Pins nicht möglich ist, wird versucht diese zu minimieren.

Generell besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen Durchmesser und Flächendichte der z-Pins mit den resultierenden mechanischen Eigenschaften des Laminats. Als Flächen-

dichte Φ wird das Verhältnis der resultierenden Querschnittsfläche aller eingebrachten Pins zur verstärkten Laminatfläche bezeichnet.

Durch das Einbringen der Pins werden die in unmittelbarer Umgebung befindlichen Fasern umgelenkt. Dabei bildet sich lokal eine augenförmige Struktur aus, in dessen Mitte sich der Pin befindet. Der hierbei entstandene Hohlraum füllt sich im Laufe des Verarbeitungsprozesses mit Harz, woraus sich die Bezeichnung *harzreiche Zone* ableiten lässt, Abbildung 2.5a. Experimentell konnte von STEEVES ET AL. ein linearer Zusammenhang zwischen dem Durchmesser des Pins und dem Faserumlenkungswinkel θ ermittelt werden. Dabei addiert sich der Winkel um jeweils 1° bei einer Erhöhung des Durchmessers um 0,07 mm [6]. Mit zunehmender z-Pin Flächendichte sinkt der Pin-zu-Pin Abstand und es können sich Harzkanäle bilden, Abbildung 2.5b. Diese entstehen, wenn sich aufgrund des geringen Abstandes der Pins zueinander die Fasern nicht mehr annähern können und ihre ausgelenkte Position beibehalten [2].

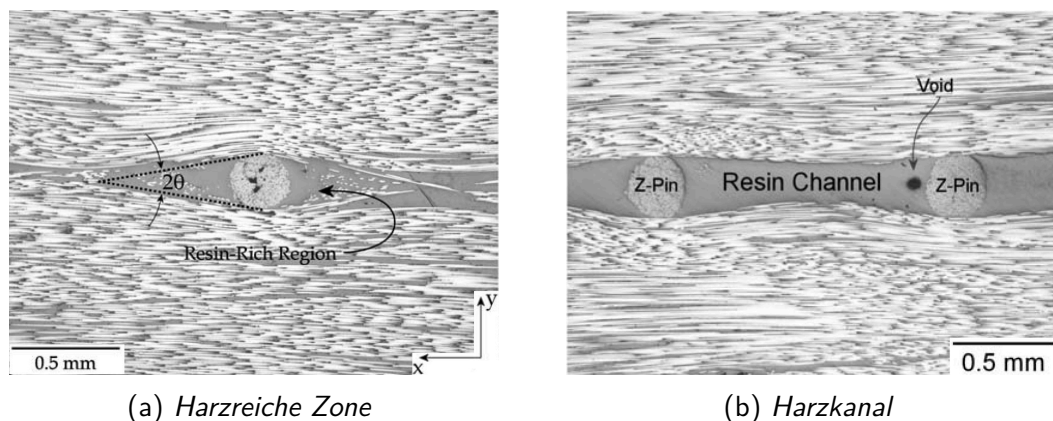


Abbildung 2.5: Ausbildung von harzreichen Zonen und Harzkanälen [2]

Die sich ausbildende Faserwelligkeit kann sowohl einen symmetrischen als auch einen asymmetrischen Verlauf annehmen, wenn die Längsachsen der z-Pins nicht in einer Ebene verlaufen. Der daraus resultierende Versatz zwischen Achse und Ebene begünstigt ein asymmetrisches Auslenken der Fasern, siehe Abbildung 2.6. In Bezug auf die Festigkeit ist eine asymmetrische Umlenkung der Fasern als besonders kritisch zu betrachten, da diese mit zunehmender Umlenkung weniger zur Lastübertragung beitragen [7].

Sowohl fertigungsbedingt als auch zur Erleichterung der Insertion sind die z-Pins an den Enden angeschäftet. Die Pins werden bereits mit einem Neigungswinkel in die Preforms eingebracht. Während der Verarbeitung neigt sich der Pin schließlich in die entgegengesetzte Richtung, sodass sich dieser theoretisch senkrecht im Laminat befinden sollte. Die

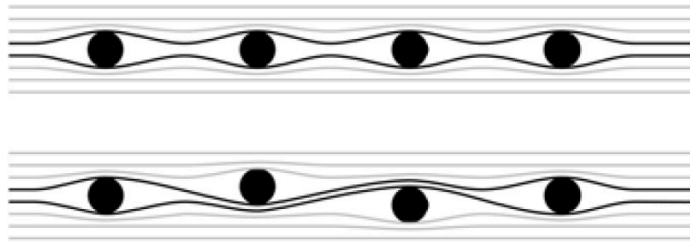


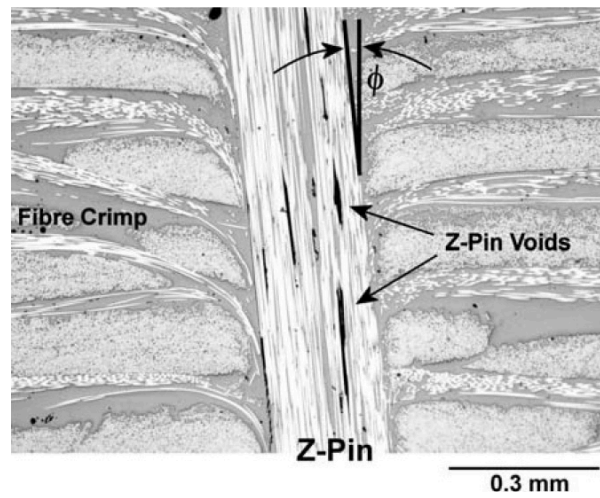
Abbildung 2.6: *Symmetrische und asymmetrische Faserumlenkung infolge z-Pin Versatz [2]*

Winkelabweichung der Achse des Pins zu der senkrechten des Laminats, wie in Abbildung 2.7a, wird als *Inklination* bezeichnet. Beim manuellen Einbringen der Pins mit Hilfe eines Ultraschallhandgerätes beträgt der Winkel ca. 20° , werden diese hingegen mit einem portalgeführten Ultraschallkopf eingebracht, kann der Inklinationswinkel verringert werden [7, 2].

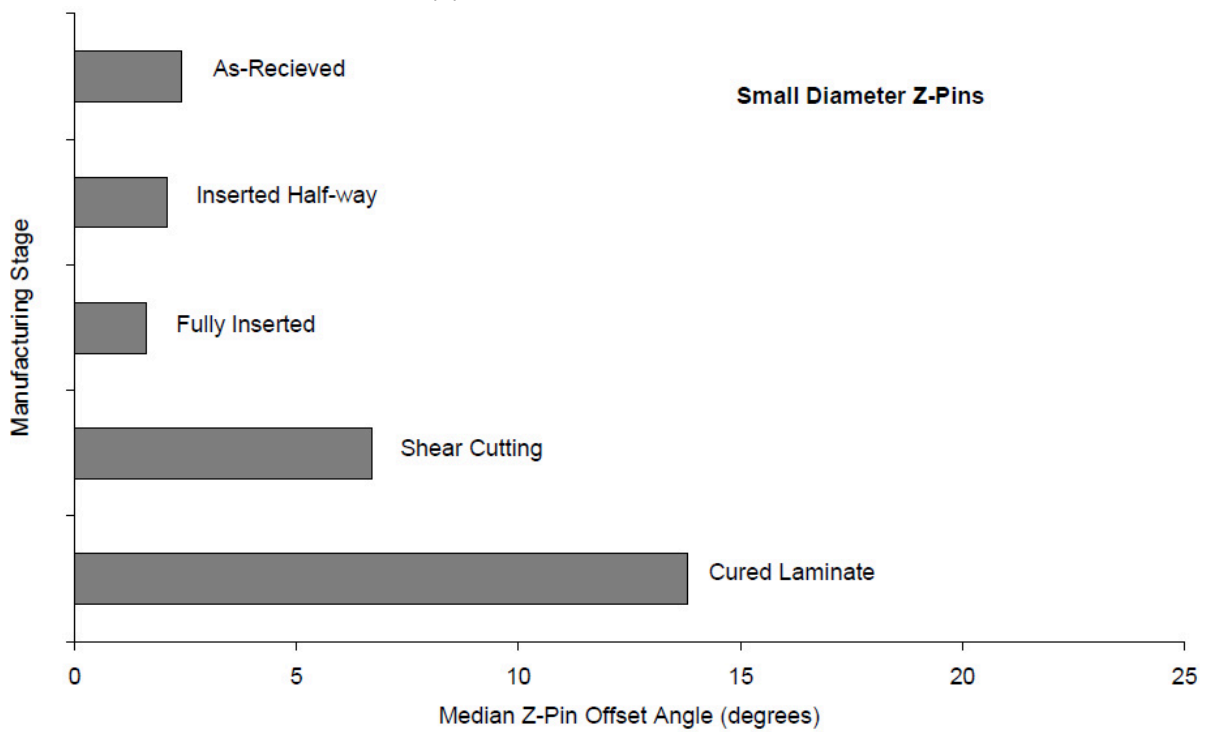
CHANG zeigte, dass sich der Auslenkungswinkel bei unterschiedlichen Pin-Durchmessern stetig über die verschiedenen Stufen im Verarbeitungsprozess ändert, Abbildung 2.7b. Besonders stark steigt der Winkel demnach beim Abscheren der Preforms, bevor und insbesondere während des Aushärteprozesses im Autoklav. Bei einem Durchmesser von 0,51 mm war der Winkel im ausgehärteten Laminat ca. 10% höher als bei den Pins mit 0,27 mm Durchmesser [2]. Im Autoklav wird das Laminat stark kompaktiert worauf der Pin um seine angeschärfte Spitze kippt, um bündig mit der Laminatoberfläche abzuschließen.

Der Faservolumengehalt im verpintten Bereich unterscheidet sich lokal vom ungepintten Laminat. Das Verpinnen findet im nicht kompaktierten Zustand der Einzelschichten statt, sodass die Länge des Pins nach dem Abscheren der Dicke des Laminats im vorliegenden Zustand entspricht. Beim Aushärten verdichten sich aufgrund des Umgebungsdrucks die Einzelschichten, wohingegen der Pin nur geringfügig gestaucht wird. Die Höhendifferenz zwischen der Länge des Pins und der Dicke des Laminats wird dabei durch das Aufschwellen mit überschüssigem Harz automatisch ausgeglichen. Im ausgehärteten Zustand entspricht die Dicke des Laminats schließlich der Länge des Pins. Dieser Effekt wird mit zunehmendem Durchmesser und Flächendichte verstärkt, sodass der Faservolumengehalt in den verstärkten Bereichen stetig abnimmt [2, 7].

Zwischen z-Pin und Grundlaminat kann es während des Verarbeitungsprozesses ebenfalls zu Ablösungserscheinungen kommen. SWEETING ET AL. konnten anhand Finiten-Elemente Simulationen nachweisen, dass es, aufgrund der Differenz des thermischen Ausdehnungskoeffizienten,



(a) *Inklination mit Winkel Φ*



(b) *Verarbeitungsbedingte Inklination $D=0,27$ mm*

Abbildung 2.7: *Inklination sowie Einfluss des Verarbeitungsschrittes auf den Inklinationswinkel kleiner und großer z-Pin Durchmesser [2]*

effizienten von Pin und Grundlaminat, zur Überschreitung der Festigkeit des Interfaces kommt. Infolge dessen bildet sich ein Riss in der Matrix zwischen Pin und Laminat aus, der bis zu einer ausgeprägten Bruchfläche wächst, siehe Abbildung 2.8a [8].

Zusätzlich kann es während des Einbringprozesses vereinzelt zum *Faserbruch* und zum *Fasereinzug* kommen. Beim Fasereinzug werden Fasern beim Verpinnen in die Insertionsrichtung des Pins ausgelenkt, wodurch um den Pin ein dreidimensionales Faserumlenkungsgebiet entsteht, Abbildung 2.8b. Zum Teil überschreiten die dabei in den Fasern induzierten Spannungen die Festigkeit, sodass es zum Faserbruch kommt. Dabei steht die Anzahl der Faserbrüche im direkten Zusammenhang zum Durchmesser und der Flächendichte der Pins. Je größer und höher diese beiden Parameter sind, umso mehr Faserbrüche treten auf [2, 2].

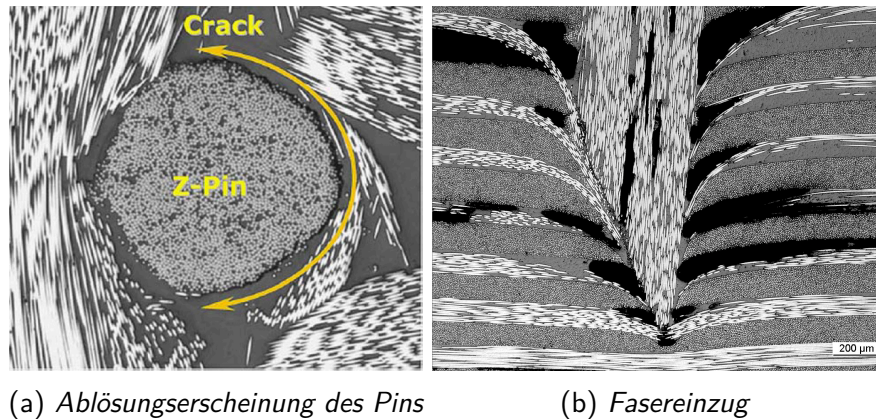


Abbildung 2.8: Ablösung des Pins vom Grundlaminat und Fasereinzug [2]

Alle zuvor genannten Einflussfaktoren tragen zur Degradation der mechanischen in-plane Eigenschaften von z-gepinnten Verbundwerkstoffen bei. Insbesondere harzreiche Zonen und Faserumlenkungen beeinflussen maßgeblich die Steifigkeit, Festigkeit und Lebensdauereigenschaften des Bauteils [2, 9].

2.3 Steifigkeit und Festigkeit

Die zuvor genannten mikrostrukturellen Veränderungen durch die Insertion von z-Pins beeinflussen sowohl die Steifigkeiten als auch die Festigkeiten von verstärkten Verbundwerkstoffen bei Belastung in der xy-Ebene (in-plane). Nachfolgend wird der Einfluss von CFK-Nadeln auf diese Eigenschaften unter in-plane-Belastung betrachtet.

Der im Zugversuch ermittelte Elastizitätsmodul wird beeinflusst von dem Durchmesser der verwendeten Pins, ihrer Flächendichte und verschiedener Parameter des Laminats. Sowohl mit zunehmender Flächendichte als auch mit zunehmendem Durchmesser nimmt die Steifigkeit ab [10, 2, 11]. Die Reduktion infolge der Durchmessererhöhung bei Zugbeanspruchung ist dabei größer als mit zunehmender Flächendichte, Abbildung 2.9.

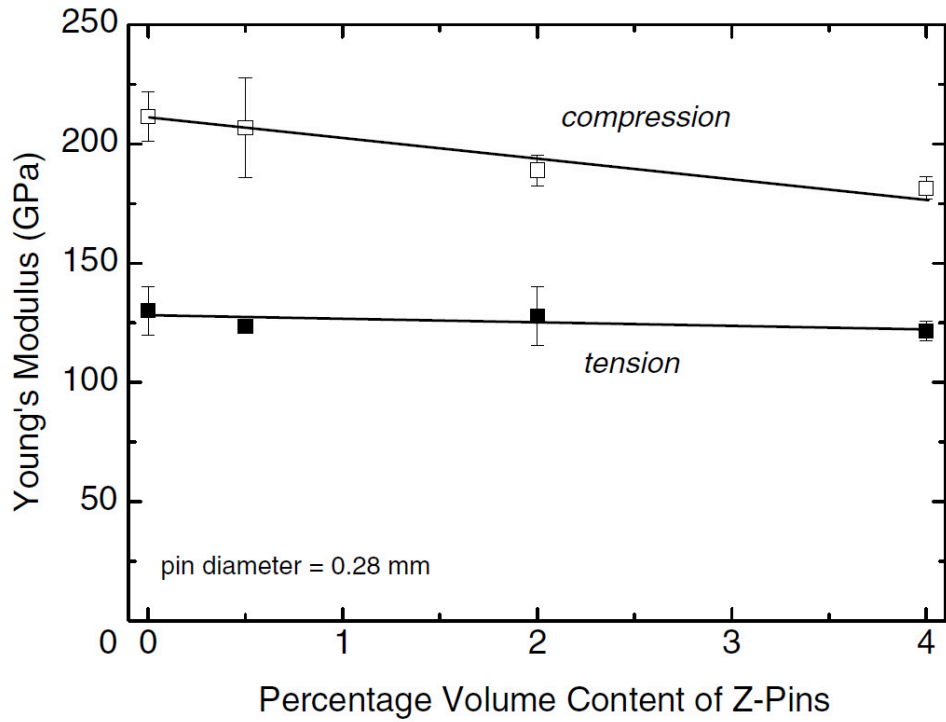
Unidirektionale Laminare werden von z-Pins am stärksten beeinflusst, da alle Einzelschichten der Lastübertragung dienen. Umso weniger lasttragende 0° Lagen im Laminataufbau sind, desto kleiner ist die Steifigkeitsreduktion des Werkstoffs. Bei quasi-isotropen Laminaten reduziert sich der Elastizitätsmodul um weniger als 5%, wohingegen bei biaxialen Laminaten ($\pm 45^\circ$) kein Einfluss der Flächendichte und des Durchmessers registriert werden kann [12, 13, 7].

GRASSI ermittelte anhand numerischer FE-Simulationen, dass die Degradation des Zugmoduls auf die Faserumlenkungen zurückzuführen ist [12]. Die ausgebildeten harzreichen Zonen tragen ebenfalls, jedoch in schwächerer Form, zur Steifigkeitsabnahme bei [6].

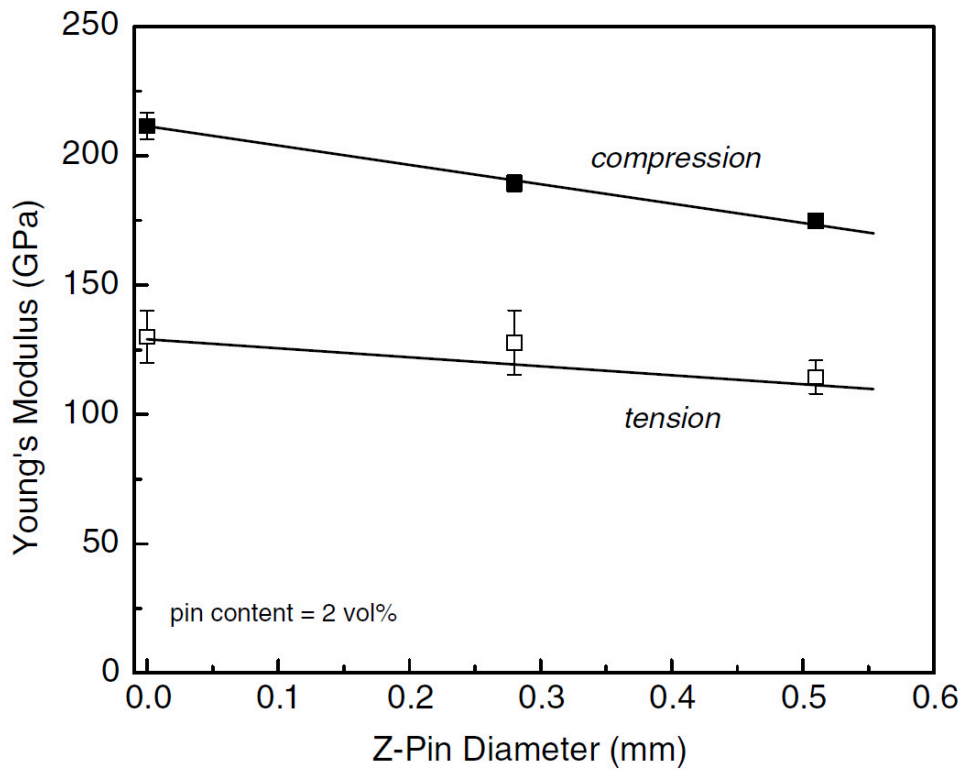
Die Zugfestigkeit nimmt gleichermaßen, wie auch die Steifigkeit, mit zunehmender Flächendichte und Pin-Durchmesser ab, siehe Abbildung 2.10. Die Ursache dafür liegt im Herstellungsprozess der Laminare. Beim Einbringen der Pins werden einzelne Filamente zerstört, wodurch die äußeren Lasten umgelenkt werden müssen. Der lokale Faservolumengehalt in den verpinnten Bereichen ist geringer als im umliegenden Laminat, was zur Abnahme der Festigkeit beiträgt [6, 2, 7].

Die beim Zugmodul zugrunde gelegten Ursachen und Einflussfaktoren sind ebenfalls für den Druckmodul gültig [14]. Die Drucksteifigkeit von verpinnten Laminaten unterliegt jedoch einer höheren Reduktion im Vergleich zum Zugmodul. Während beim Zugmodul eine maximale Abnahme um 10% ermittelt wurde, steigt diese beim Druckmodul auf bis zu 30% an [14, 2, 15].

Gleichermaßen wie der Druckmodul, wird auch die Druckfestigkeit durch die Einbringung von z-Pins reduziert, Abbildung 2.10. Bei unidirektionalen Druckproben entspricht die Druckfestigkeit noch ca. 90% (bei 2% Flächendichte) der von ungepinnten Proben [16, 17]. STEEVES ET AL. hingegen konnten bei gleichen Parametern eine Reduktion um 33% feststellen [18, 32].



(a) Flächendichte



(b) Pin-Durchmesser

Abbildung 2.9: Zugmodul E_x eines unidirektionalen 0° CFK-Laminats in Abhängigkeit des z-Pin Durchmessers und der Flächendichte [7]

Mehrfach konnte festgestellt werden, dass beim Druckversuch die Faserwelligkeit der Ausgangspunkt des späteren Versagens ist. Sobald die welligen Fasern nicht mehr von der Matrix gestützt werden, setzt lokales Mikroklicken der Fasern ein. Infolgedessen formen sich Knitterbänder (*kink-bands*) die schließlich zum globalen Versagen der Struktur führen [19, 20, 14].

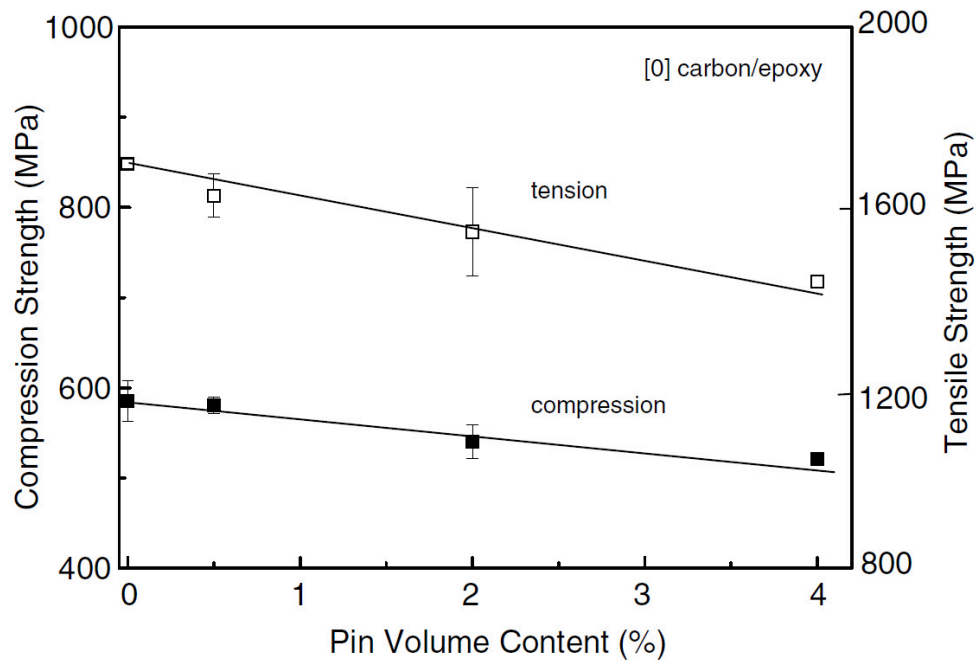


Abbildung 2.10: Abhängigkeit der Zug- und Druckfestigkeit eines unidirektionalen 0° -Laminats von der z-Pin Flächendichte [7]

2.4 Bruchmechanische Eigenschaften

Aus bruchmechanischer Sicht unterscheiden sich Verbundwerkstoffe erheblich von metallischen Konstruktionswerkstoffen. Letztere weisen häufig ein ausgeprägtes duktilen Materialverhalten auf, wohingegen Verbundwerkstoffe spröde sind. Überbelastungen können daher nicht plastisch abgebaut werden, sondern haben Brüche, Risse oder Delaminationen zur Folge.

Delaminationen in Bauteilen aus Verbundwerkstoffen können infolge von Fehlern während des Herstellungsprozesses und des Zusammenbaus von Baugruppen entstehen. Unabhängig davon können diese ebenfalls die Folge temporärer Überbelastungen im Betrieb, wie z. B. durch Vogel-, Hagelschlag oder herunterfallendes Werkzeug sein. Sobald Risse

oder Delaminationen im Werkstoff induziert werden, können diese unter Betriebslast wachsen und die Festigkeit, Steifigkeit sowie Lebensdauer des Bauteils drastisch reduzieren [21, 22, 23].

Im Designprozess können Delaminationen über die Energiefreisetzungsrate G , auch interlaminare Risszähigkeit genannt, berücksichtigt werden. Sie entspricht dem notwendigen Energieeintrag, um eine neue Einheit freier Oberfläche zu erzeugen. Üblicherweise wird sie in Joule je Quadratmeter angegeben. Wird die kritische Energiefreisetzungsrate G_C überschritten, setzt das Risswachstum ein [21]. Wenn die Energiefreisetzungsrate konstant und unabhängig von der Belastung und der Geometrie ist, gilt $G = G_C$ [21].

Tatsächlich ist die Energiefreisetzungsrate jedoch abhängig vom Bruchmodus, der in drei reinen Formen und daraus abgeleiteten Mischformen unterteilt werden kann, siehe Abbildung 2.11. Als Bruchmodus I wird die Öffnung eines Risses durch Abheben der Rissflanken bezeichnet, Abgleiten der Rissflächen innerhalb der Rissebene entspricht dem Bruchmodus II und die Querschere Modus III.

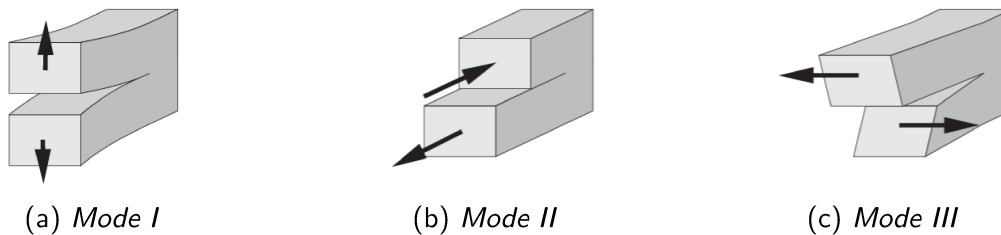


Abbildung 2.11: *Schematische Darstellung der drei Bruchmodi; (a) Rissöffnung, (b) Längsscherung, (c) Querschere [24]*

Das Materialverhalten unter Belastung von Verbundwerkstoffen kann über den Lagenaufbau beeinflusst werden. Dabei kann eine Vielzahl unterschiedlicher Isotropien als auch Anisotropien realisiert werden. In Abhängigkeit vom Materialverhalten kann es vorkommen, dass an einer Risspitze im Werkstoff gleichzeitig alle drei Bruchmodi auftreten [22].

Zur Quantifizierung der interlaminaren Risszähigkeit existieren sowohl für jeden Bruchmodus als auch für ihre abgeleiteten Mischformen ein Prüfverfahren, siehe Tabelle 2.1.

Eine klare Abgrenzung der jeweiligen Bruchmodi zueinander ist nicht bei allen genannten Verfahren möglich, sodass es fälschlicherweise zu einem gemischten Bruchmodus kommen kann, der die Quantität der Kennzahl beeinflusst. PARIS ET AL. fanden heraus, dass bei Mode II Versuchen aufgrund der Welligkeit und Rauigkeit der Rissflanken an der Risspitze

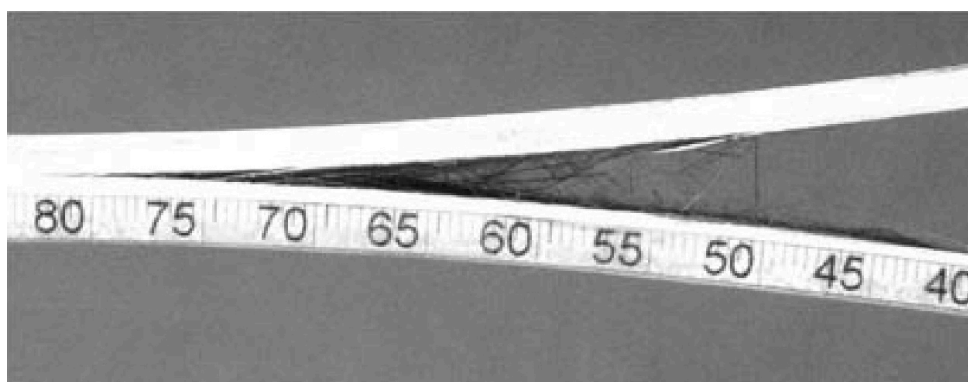
Tabelle 2.1: Prüfverfahren zur Ermittlung der Energiefreisetzungsrate für verschiedene Bruchmodi

Modus	Prüfverfahren
I	Double Cantilever Beam (DCB)
II	End Notched Flexure (ENF, 4ENF), End Loaded Split (ELS)
III	Split Cantilever Beam (SCB), Crack Rail Shear (CRS)
I/II	Mixed Mode Bending (MMB), Edge Delamination Tension (EDT)

eine reine Mode I Belastung vorliegt [25]. Global betrachtet entspricht der Bruchmodus dadurch einer Mixed Mode Belastung mit variablem Mode I Anteil [22]. Unter Mode III Belastung konnte MARTIN feststellen, dass beim Split Cantilever Beam Versuch kein Zerreißen stattfindet, sondern eine reine Mode II Belastung vorliegt [26, 22].

Ein weiteres Problem der Kennwertermittlung der interlaminaren Risszähigkeit sind die inneren und äußeren Einflüsse des Laminats. Neben dem Laminataufbau existiert eine Vielzahl an nicht oder nur schwer beeinflussbarer Faktoren, die eine Verzerrung des Kennwerts zur Folge haben.

Beim Double Cantilever Beam Versuch tritt bei unidirektionalen Laminaten der *Fiber-Bridging*-Effekt ein. Beim Rissfortschritt kann der Riss die Ebene wechseln, wodurch einzelne Filamente zwischen der oberen und unteren Rissflanke aufgespannt werden, siehe Abbildung 2.12. Die Filamente reduzieren die an der Risspitze wirkende Spannung, indem sie die äußeren angreifenden Lasten überbrücken und homogener über die Rissflanken verteilen [27, 28, 7].

Abbildung 2.12: *Fiber-Bridging-Effekt während der DCB-Versuchsdurchführung [27]*

Fiber-Bridging führt dazu, dass die Kraft für den Rissfortschritt größer wird, wodurch wiederum die Risszähigkeit ansteigt und überbewertet wird [28]. DE MOURA ET AL. führten eine experimentelle Untersuchung zum Einfluss des Fiber-Bridgings durch. Dabei

durchtrennten sie während des Versuchs die Fasern, um den Brückeneffekt zu vermeiden. In Abbildung 2.13 sind die resultierenden Widerstandskurven (R-Kurven) abgebildet. Dabei wird ersichtlich, dass mit zunehmender Risslänge die interlaminare Risszähigkeit durch Fiber-Bridging steigt. Im Gegensatz dazu verläuft die R-Kurve der durchtrennten Filamente parallel zur x-Achse, wodurch die kritische Energiefreisetzungsrate konstant ist und nicht überbewertet wird [27].

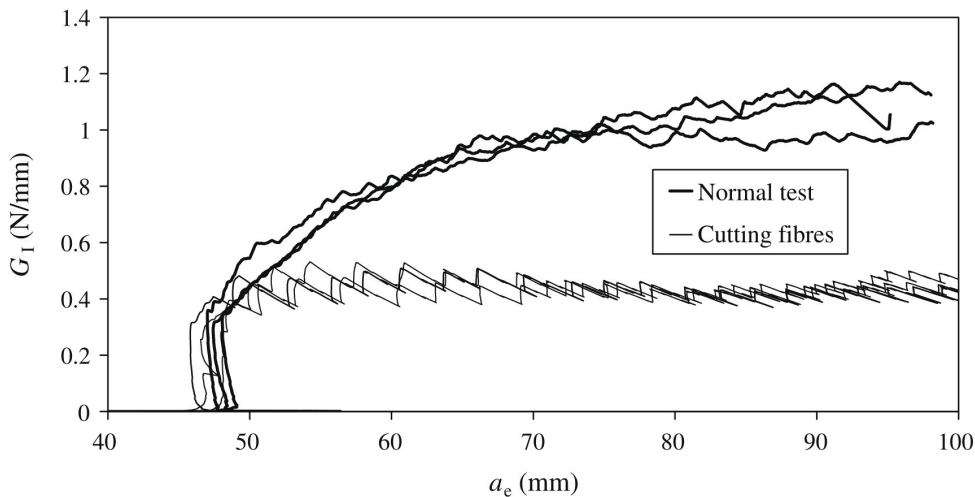


Abbildung 2.13: Einfluss von Fiber-Bridging auf die kritische Energiefreisetzungsrate G_I [27]

Weitere ungewollte Interaktionen treten bei Matrixbrüchen auf. Diese können der Ausgangspunkt von Delaminationen sein, wodurch ebenfalls die interlaminare Risszähigkeit überbewertet wird [22]. Bei multidirektionalen Aufbauten tritt zudem das Problem der wechselnden, beim Riss im Eingriff befindlichen Schichten auf. Dabei wechselt die Rissfront aufgrund von Orientierungswechseln der Einzelschicht. Dies hat zur Folge, dass die Ergebnisse als zu optimistisch eingeschätzt werden, da mehrere Rissfronten und Rissflächen entstehen, die zum Energieverzehr beitragen [29, 30, 31, 22].

Der Einfluss von z-Pins auf die interlaminare Risszähigkeit unter Mode I Belastung wurde bereits intensiv am Lehrstuhl für Leichtbau der Universität Rostock und von anderen Forschergruppen untersucht. Z-Pins erwiesen sich dabei als effektive Methode, um die Risszähigkeit unter Mode I, II und I/II Belastung zu erhöhen [32, 33, 7].

Die Rissinitiierung kann durch das Einbringen von z-Pins nicht beeinflusst werden, da der Riss in der harzreichen Zone zwischen den Einzelschichten wächst, und somit nur über die Matriceigenschaften beeinflusst werden kann [7].

Die zum Risswachstum notwendige Kraft hingegen wird signifikant durch z-Pins beeinflusst.

Äquivalent zum Fiber-Bridging rufen die Pins ebenfalls Brückeneffekte hervor und leiten den Kraftfluss um. Die z-Pins erzeugen eine der Rissöffnung entgegengesetzte Rückstellkraft, wodurch die Spannung an der Rissspitze stark reduziert wird, teilweise sogar bis zur Einstellung des Risswachstums [34, 35, 36]. Mit größer werdender Flächendichte wird die Rissfortschrittskraft in Abhängigkeit von dem Pin-Durchmesser gesteigert. Dabei wirken sich dünnere Pins stärker auf die Kraft aus als dickere Pins, Abbildung 2.14 [37].

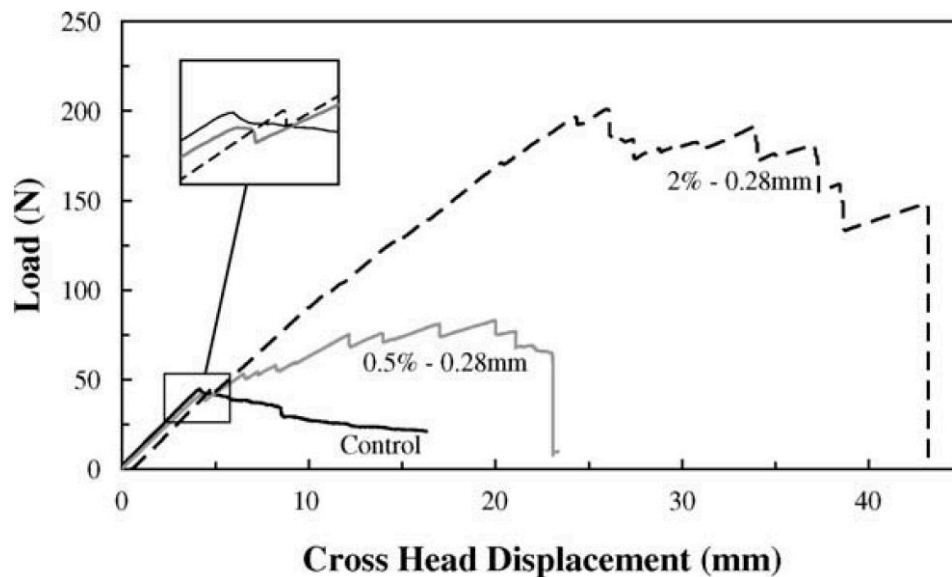
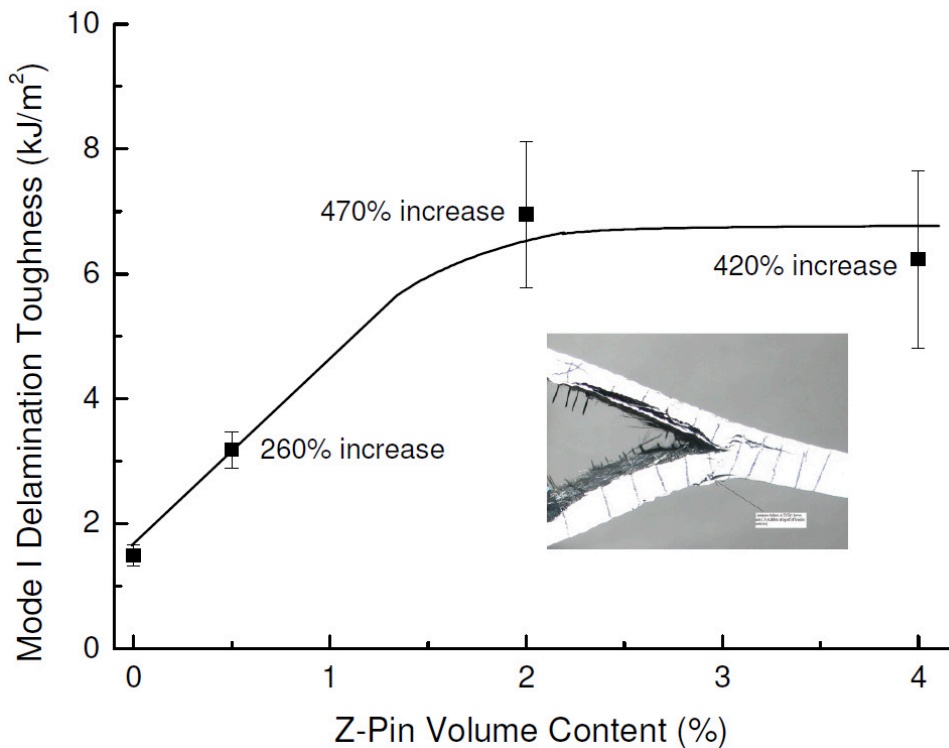


Abbildung 2.14: Einfluss von z-Pins auf die Anrisskraft und den Kraft-Traversenweg-Verlauf [37]

CARTIÉ ET AL. ermittelten an verpinnten DCB-Prüfkörpern eine bis zu 15-fach höhere Risszähigkeit als an unverpinnten Proben [38, 2]. FREITAS ET AL. fanden einen linearen Zusammenhang zwischen der Flächendichte von z-Pins und der interlaminaren Risszähigkeit, wobei sich diese verdoppelt, sobald die Flächendichte um 0,5% steigt [39]. Die Ergebnisse sind deckungsgleich mit den am Lehrstuhl ermittelten Werten [32]. In Abbildung 2.15 ist der Einfluss von Pins auf die Risszähigkeit dargestellt. Bis zu einer Flächendichte von 2% nimmt diese linear zu. Bei höheren Flächendichten tritt keine Verbesserung ein. Wird die Flächendichte darüber hinaus gesteigert, ist der durch die z-Pins hervorgerufene Verstärkungseffekt zu groß, als dass der Riss weiter wachsen könnte. Im Zuge dessen unterliegen die Arme der Probekörper dem Bruchversagen[10].

Die verbesserte interlaminare Risszähigkeit durch das z-Pinning ergründet sich aus den Schadensmechanismen während der Versuchsdurchführung, in Abbildung 2.16 dargestellt.

Mit steigender Rissöffnung nimmt die Risslänge zu und durchschreitet sukzessive die Pin-Reihen. Auch wenn der Riss die Pins passiert hat, tragen diese dennoch positiv zur

Abbildung 2.15: G_{IC} in Abhängigkeit der Flächendichte [10]

Risszähigkeit bei, da sie sich noch im Eingriff befinden. Mit zunehmendem Rissfortschritt werden die Pin-Reihen nacheinander komplett aus dem Grundlaminat gezogen. Der Auszugsprozess beginnt bereits, sobald die Risspitze die erste Pin-Reihe durchschritten hat und kann in drei Phasen unterteilt werden. In der ersten Phase erfolgt eine Rissumlenkung, wodurch dieser entlang der Pin-Längsrichtung zwischen dem Grundlaminat verläuft. Das Risswachstum bis zur vollständigen Ablösung des Pins kennzeichnet die zweite Phase des Auszugsprozesses. Nachdem der Pin keinem Stoffschluss mehr unterliegt, kann dieser aus dem Laminat gleiten. Während des Gleitprozesses wird weitere Energie verzehrt, da dieser reibungsbehaftet ist. Der Pin trägt, sobald dieser vollständig herausgezogen ist, nicht mehr zur Überbrückung der Kräfte bei, Abbildung 2.16c [40, 41, 42, 43].

In einer anderen Veröffentlichung fanden CARTIÉ ET AL. heraus, dass sich durch die eingebrachten Pins das Risswachstumsverhalten ändert. Unverstärkte Kontrollproben zeigten während des DCB-Versuchs ein stabiles und stetiges Risswachstum. Die verpinnten Proben zeigten hingegen ein ausgeprägtes *stick-slip*-Verhalten. Dabei stoppte der Riss nach Durchschreitung der Pin-Reihe (*stick*), anschließend löste sich die Bindung zwischen Grundlaminat und Pin auf, wodurch der Pin aus dem Laminat gleitet (*slip*) [36]. In experimentellen Untersuchungen mit Prüfkörpern, in denen sich zwischen zwei verpinnten

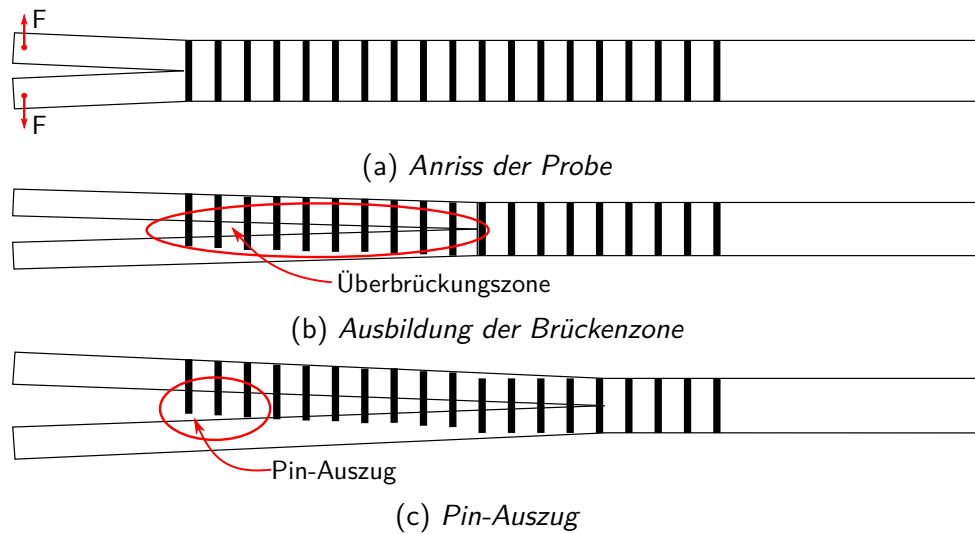


Abbildung 2.16: Stufenweise Darstellung eines Mode I Versuchs; (a) Anriss des Laminats, (b) Bildung der Brückenzone mit mehreren im Eingriff befindlichen Pins, (c) Pin-Auszug durch Rissöffnung

Bereichen ein unverstärkter befindet, zeigte MOURITZ, dass eine instabile Rissausbreitung durch z-Pins in eine stabile transformiert werden kann. Während der Riss den ersten verpinnten Bereich durchschreitet, wird nach dessen letzter Pin-Reihe die im System gespeicherte Deformationsarbeit schlagartig freigegeben, wodurch instabiles Risswachstum im unverstärkten Bereich eintritt. Sobald der Riss auf die zweite verpinnte Sektion trifft, wird das Risswachstum in ein stabiles transformiert [36, 33].

Die interlaminare Risszähigkeit bei einer Mode II Belastung wurde in der Vergangenheit intensiv in mehreren Veröffentlichungen von CARTIÉ ET AL. untersucht. Er ermittelte, dass z-Pins die Risszähigkeit bis zu einem gewissen Grad erhöhen, jedoch auch den Rissfortschritt vollständig unterbinden können. In Abhängigkeit von der Flächendichte und dem z-Pin-Durchmesser stellt er fest, dass bei geringer Anzahl an z-Pins die Rissinitiierung nicht beeinflussbar ist (Durchmesser 0,28 mm und $\Phi=0,5\%$ sowie $D=0,51$ mm und $\Phi=2\%$). Bei einer Steigerung der Flächendichte auf 2%, bei einem Durchmesser von 0,28 mm, konnte sowohl die Rissinitiierung als auch die Risszähigkeit signifikant verbessert werden [44].

Die mechanischen Vorgänge bei einer Mode II Belastung lassen sich zurückführen auf elastische Schubdeformationen, Ablösungseffekten zwischen Pin und Grundlaminat, „Snubbing“ und schubinduziertem Pinauszug [44, 42, 45]. Als „Snubbing“ wird der Effekt bezeichnet, bei dem die Relativverschiebung zwischen den beiden Laminathälften dazu

führt, dass der Pin aus dem Grundlaminat gezogen wird. Dadurch wird die Reibung zwischen Pin und Laminat verstärkt, wodurch die Delaminationsfestigkeit unter Mode II ansteigt [42]. COX ET AL. zeigten ebenfalls, dass der Inklinationswinkel den Snubbing-Effekt verstärken kann. Daher können gezielt ausgelenkte Pins bei einer zu erwartenden Mode II Belastung von Vorteil sein [42].

YAN ET AL. entwickelten ein Finite-Elemente Modell zur Ermittlung der Risszähigkeit G_{IIC} im End-Notched-Flexure Test. Als Versuchsparameter wählten sie dieselben Flächendichten und Pin-Durchmesser wie CARTIÉ in seiner Dissertation [44]. Durch den Einsatz von z-Pins konnte die Risszähigkeit im Maximum um den Faktor 3 gesteigert werden.

Des Weiteren untersuchten YAN ET AL. in einer Parameterstudie, welche Parameter die Mode II Risszähigkeit positiv beeinflussen. Den dabei größten Einfluss hatten die Maximalkraft beim Pin-Auszug, die Anzahl an Pin-Reihen und der Reihenabstand der Pins zueinander. Eine höhere Pin-Auszugskraft zusammen mit vielen eng beieinander liegenden z-Pin Reihen führt demnach zur größtmöglichen Verbesserung von G_{IIC} [46].

2.5 Impacteigenschaften und Schadenstoleranzverhalten

Unter Impact und Impactbelastungen sind dynamische Belastungen, die senkrecht zur Bauteiloberfläche wirken, zu verstehen. Typische Ursachen bei einem Flugzeug sind herunterfallendes Werkzeug und Hagel- oder Vogelschlag. Der Impact kann nach seiner Belastungsgeschwindigkeit in drei Kategorien eingeteilt werden: Dem niedergeschwindigkeits- (Low Velocity Impact, LVI), hochgeschwindigkeits- (High Velocity Impact, HVI) und Hypergeschwindigkeitsimpact. Es existiert jedoch keine einheitliche klare Abgrenzung der jeweiligen Belastungsstufen voneinander.

SJÖBLOM [47] und SHIVAKUMAR [48] definieren einen LVI als quasi-statischen Vorgang, der bei Geschwindigkeiten von $v_i \leq 1ms^{-1}$ stattfindet. Der HVI hingegen wird durch die Ausbreitung von Spannungswellen dominiert. Der Stoßvorgang läuft dabei zu schnell ab, als dass die Struktur des Bauteils auf die Belastung reagieren könnte. Daher ist der dabei entstehende Schaden lokal begrenzt und wächst nicht in Form von Delaminationen im Laminat weiter. Abweichende Definitionen, allein auf Basis der Belastungsgeschwindigkeit, kommen von CANTWELL und MORTON [49], die als Grenze für den niedergeschwindig-

keitsimpact $v_i \leq 10ms^{-1}$ definieren. Dem gegenüber legt ABRATE [50] diese Grenze bei $v_i \leq 100ms^{-1}$ fest. Eine abweichende Klassifikation auf Basis des sich dabei einstellenden Schadens definieren LIU [51] und JOSHI [52]. Demnach ist der LVI definiert durch das Auftreten von Delaminationen, Matrixbrüchen und Zwischenfaserbrüchen, beim HVI hingegen ist das Schadensbild dominiert von Faserbrüchen und der Penetration des Laminats [23].

Von großer Bedeutung ist der sich einstellende Schaden beim Niedergeschwindigkeitsimpact, da dieser oftmals mit einer kaum sichtbaren Schädigung der Impactseite des Laminats einhergeht (Barely Visible Impact Damage, BVID). Meist kann der Schaden infolge der Belastung zwar auf der Rückseite des Laminats detektiert werden, der Zugang ist jedoch häufig nur eingeschränkt möglich. Insbesondere im Bereich der Tragflügelkanten eines Flugzeugs ist die Detektionswahrscheinlichkeit sehr gering.

Bei metallischen Konstruktionswerkstoffen sind Impactbelastungen weniger kritisch einzustufen als bei Verbundwerkstoffen. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass das duktile Materialverhalten der Metalle bei der plastischen Verformung große Mengen an Energie absorbiert. Bei Verbundwerkstoffen ist der Schaden infolge von Impactbeanspruchungen matrixdominiert, d. h. das ausbildende Schadensbild wird hauptsächlich von den Matrixeigenschaften beeinflusst. Duroplastische Matrixwerkstoffe haben im Gegensatz zu Metallen ein sprödes Materialverhalten. Geringe Energiemengen können durch Reibung, Verformungsarbeit, Wärme und Geräusentwicklung dissipiert werden. Größere Energiemengen hingegen werden durch Rissbildung- und Ausbreitung absorbiert. Ein plastisches Materialverhalten ist nicht vorhanden, weshalb bei Überschreitung der elastischen Deformationsgrenze direkt irreversible Schädigung und Versagen eintritt [23, 53].

Der beim LVI eintretende Schaden kann in vier Versagensmodi unterteilt werden [53]:

1. Zwischenfaserbrüche und dem Einsetzen von Matrixrissen,
2. der Delaminationsinitiierung und dem Delaminationswachstum,
3. Faserbrüche,
4. Penetration des Laminats.

Ihr Auftreten ist abhängig von der eingebrachten Impactenergie und wird nachfolgend anhand eines $[0,90]_s$ Laminataufbaus erklärt, Abbildung 2.17.

Ein Schaden im Laminat entsteht erst, sobald eine kritische Kraftobergrenze auf das Bauteil einwirkt. Nach Überschreiten der Kraft treten als Initialschäden Matrixrisse parallel zur Faserlängsrichtung auf. Zusätzlich können Zwischenfaserbrüche eintreten, diese bezeichnen einen Riss zwischen einer Faser und der sie umgebenden Matrix. Zwischenfaserbrüche treten infolge der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften von Matrix- und Fasermaterial auf [23]. Aufgrund der Biegebeanspruchung, hervorgerufen durch den Impact, treten im Laminat mehrere Beanspruchungen auf. Aufschlagseitig dominieren Druck- und Scherbeanspruchungen direkt um den Aufschlagpunkt, die zum Versagen der Deckschicht führen können. Die dadurch entstehenden Risse wachsen üblicherweise in einem Winkel von 45° durch die Deckschicht. Auf der Rückseite des Laminats auftretende Risse können auf die aus der Biegung resultierenden Zugkräfte zurückgeführt werden. Diese Risse wachsen senkrecht zur Belastungsrichtung und parallel zur Faserlängsrichtung, Abbildung 2.17a. CANTWELL und MORTON [54] stellten fest, dass der Matrixriss-Typ abhängig von der Probendicke ist. Bei dünnen Proben entstehen, durch Überschreitung der Dehngrenze des Matrixwerkstoffs, Biegerisse. Bei dicken Proben sind die Deformationen gering, dafür wirken jedoch hohe Kontaktkräfte, die wiederum hohe Schubspannungen induzieren und somit Scherrisse in der Matrix hervorrufen. Die Matrixrisse können aufgrund der zunächst geringen absorbierten Energie nur lateral bis zur nächsten, anders orientierten Einzelschicht, im Laminat wachsen. Dadurch wird das Risswachstum an dieser Einzelschicht gestoppt [23, 55].

Matrixrisse sind der Ausgangspunkt für Delaminationen und das Delaminationswachstum. Diese treten zwischen zwei angrenzenden und ungleich orientierten Schichten auf und wachsen in der harzreichen Zone zwischen den Einzelschichten [56, 57, 23]. Der Steifigkeitssprung zwischen Einzelschichten ungleicher Orientierung ist die Ursache für das Wachstum von Delaminationen. Unter Biegelast nimmt die Spannungsdifferenz zwischen den beiden angrenzenden Schichten mit zunehmender Winkeldifferenz zu. Bei einem Laminataufbau von $[0,90]$ erreicht die interlaminare Scherspannung ihr Maximum und ist daher dem Delaminationswachstum am Zuträglichsten, siehe Abbildung 2.17b. [51, 58, 23]. Anhand numerischer Simulationen konnten RAZI und KOBAYASHI feststellen, dass während des Risswachstums eine Mode II Belastung vorliegt [23, 59]. LIU konnte experimentell ebenfalls feststellen, dass die resultierende Delaminationsfläche eine längliche Form annimmt, die entlang der Faserorientierung der unteren Einzelschicht verläuft. Die Delaminationsformen werden oftmals als erdnuss- oder schmetterlingsförmig bezeichnet [60, 23, 55].

Eine Steigerung der Impactlast über das Niveau des Delaminationswachstums hinaus

hat zur Folge, dass Faserbrüche im Laminat auftreten, Abbildung 2.17c. In Abhängigkeit von der Laminatdicke können diese sowohl aufschlag- als auch rückseitig eintreten. Aufschlagseitig treten Faserbrüche infolge des Scherversagens der Fasern auf. Dabei ist die am Auftreffpunkt wirkende Schubspannung größer als die Schubfestigkeit des Laminats. Rückseitige Faserbrüche hingegen sind die Folge von großen Durchbiegungen. Die dabei induzierten Zugkräfte überschreiten die Faserzugfestigkeit und resultieren in diesem Versagensmodus. Mit zunehmender Laminatdicke wird das Auftreten von Faserbrüchen auf der Rückseite unwahrscheinlicher, da die Biegesteifigkeit ansteigt, und mit ihr die Durchbiegung unter Last abnimmt [23, 55].

Faserbrüche sind ein Indiz dafür, dass die Penetration des Laminats bevorsteht. Diese können daher als Indikator für eine maximal ertragbare Impactlast dienen. Mit zunehmender Anzahl an Faserbrüchen steigt die Wahrscheinlichkeit zur Durchstoßung des Laminats an. Die sofortige Penetration tritt ein, sobald eine kritische Anzahl an Fasern durchtrennt wurde, Abbildung 2.17d. Dieser Versagensmodus tritt meist bei einem Hochgeschwindigkeitsimpact ein, kann jedoch auch durch hinreichend große Massen und Fallhöhen während eines Niedergeschwindigkeitsimpactes eintreten [23, 55].

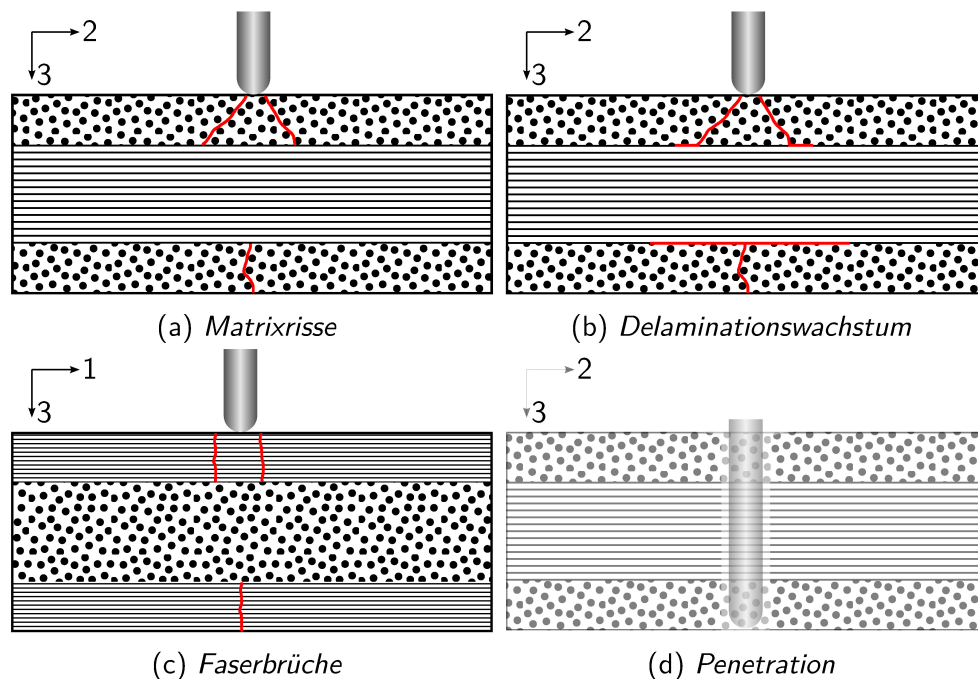


Abbildung 2.17: Schadensbilder in einem $[0,90]_s$ Laminat nach Impactbeanspruchung

Beim instrumentierten Impactversuch kann anhand der Kontaktkraft-Zeit-Verläufe der resultierende Schaden qualitativ beurteilt werden. In Abbildung 2.18 sind fünf verschiedene

Schadensmodi und ihre charakteristischen Kraft-Zeit-Verläufe dargestellt. Dazu wird eine Kraft F_i eingeführt, unterhalb derer kein irreversibler Schaden eintritt, oberhalb jedoch, in Abhängigkeit der Kraftgröße, Schäden detektierbar sind. Das Einsetzen von kleinen Delaminationen führt zur Ausbildung eines Plateaus im Kraftverlauf. Die Kraft kann dabei nicht weiter ansteigen, da die dafür notwendige Energie durch Rissbildung dissipiert wird. Ein plötzlicher Kraftabfall stellt daher ein Indiz für die Ausbildung eines Initialschadens dar.

Wird die Impactenergie darüber hinaus gesteigert, so setzt im Laminat das Delaminationswachstum ein. Dieses knüpft direkt an den Initialschaden an und führt zu einem steilen Anstieg der Kraft. Dies kann auf den dabei eintretenden Energieverzehr zurückgeführt werden. Um das Risswachstum aufrecht zu halten muss demnach mehr Energie, in Form von größeren Kräften, eingebracht werden.

Die Kraft F_{ult} kann jedoch nur bis zur Scherfestigkeitsgrenze der Deckschicht ansteigen. Die dabei erzielte Maximalkraft F_{max} wird begleitet von einem rapiden Kraftabfall. Ist die Penetration des Laminats noch nicht erreicht, fällt die Kraft bis zur Plateaubildung ab. Dabei wird so viel Energie verzehrt, dass sich der Bruchmodus von Faserbrüchen in erneutes Delaminationswachstum transformiert hat.

Bei sehr großen Impactenergien kommt es zur direkten Penetration des Laminats. Der Kraft-Zeit-Verlauf ist dabei bis zur Maximalkraft äquivalent zu den vorher genannten Verläufen. Nach Erreichung des Höchstkraft fällt beim Durchstoßen des Laminats die Kraft steil bis zur Detektionsgrenze ab [53].

Das Wachstum von Delaminationen wird vielfach als negative Eigenschaft von Verbundwerkstoffen ausgelegt. Tatsächlich stellen sie einen einfachen und sehr effektiven Mechanismus zum Abbau von eingebrachten Schlagenergien dar. In Abbildung 2.19 sind zwei Kraft-Zeit-Verläufe dargestellt, zum einen stellt der Verlauf, gekennzeichnet durch die Punkte OB'C', ein beim Impact durchstoßenes Laminat dar. Zum anderen stecken die Punkte OABCD einen Impact mit ausgeprägten Delaminationswachstum dar. Im Punkt A setzt der Initialschaden ein und bei B' und C ist die Maximalkraft erreicht und Faserbrüche setzen ein.

Die von den Punkten AB'EB aufgespannte Fläche entspricht der beim Durchstoßen durch Schadensbildung dissipierten Energie. Im Vergleich dazu stellt die aufgespannte Fläche

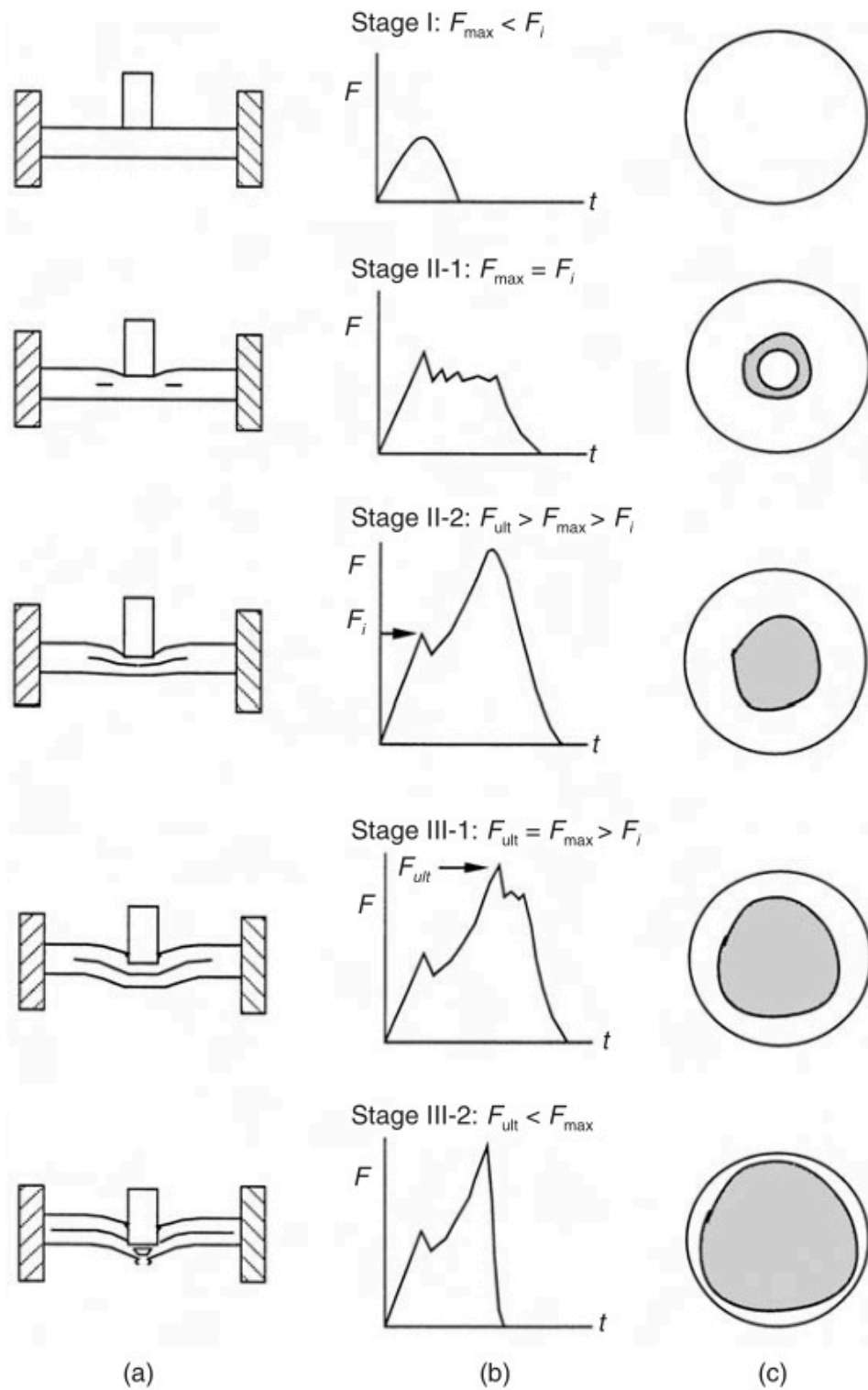


Abbildung 2.18: Zusammenhang zwischen Kraft-Zeit-Verlauf und Schadensmodus im Impactversuch [53]

von den Punkten ECDC' den Anteil der durch Schadensausbildung verzehrten Energie bei einem nicht durchstoßenen Laminat dar.

Quantitativ ist die umgesetzte Energie bei einem nicht penetrierenden Impact um ein vielfaches höher als beim Durchstoßen. Die dabei auftretende Differenz ist allein auf die Ausbildung und das Wachstum von Schädigungen zurückzuführen [53].

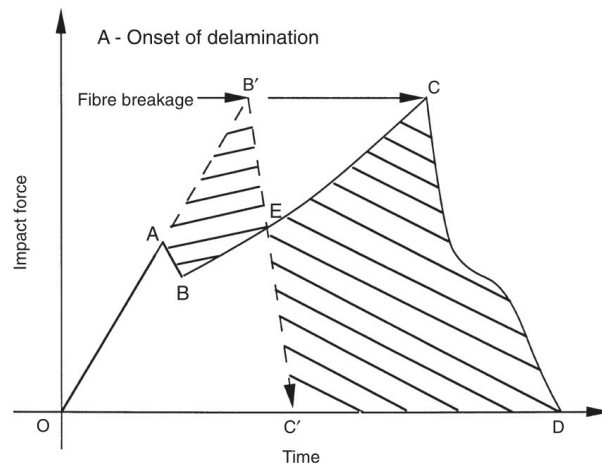


Abbildung 2.19: Vergleich des Kraft-Zeit-Verlaufs bei Penetration und Delaminationswachstum [53]

Die Charakterisierung von Impactschäden kann bei der Abschätzung der verbleibenden mechanischen Eigenschaften des Bauteils hilfreich sein. In Abbildung 2.20 ist der Zusammenhang zwischen Sichtbarkeit, Restdruckfestigkeit und Impactenergie dargestellt. Sobald die kritische Kraft zur Initiierung von Schäden im Laminat überschritten ist, fällt die Restdruckfestigkeit rapide ab, obwohl äußerlich kein sichtbarer Schaden zu verzeichnen ist. Die Verringerung kommt hauptsächlich aufgrund des Ausbreitens von Delaminationen zustande. Während des Druckversuchs teilen die Delaminationen das Laminat in Sublamine, die eine geringere Knicksteifigkeit als das komplette Laminat besitzen. Der Versagensmodus ändert sich daher vom globalen Knicken in lokales Knicken. Das lokale Knicken der Sublamine begünstigt wiederum das Risswachstum zwischen den Schichten. In letzter Instanz versagt das gesamte Laminat [23, 61]. Bei weiterer Kraftsteigerung weitet sich das Schadensbild aus, sodass rückseitig der Schaden detektiert werden kann. In diesem Bereich flacht jedoch die Degradation der Restdruckfestigkeit bereits ab. Ist der Schaden auf beiden Oberflächen sichtbar, sind nur noch geringe Abminderungen der Festigkeit zu erwarten [23, 62].

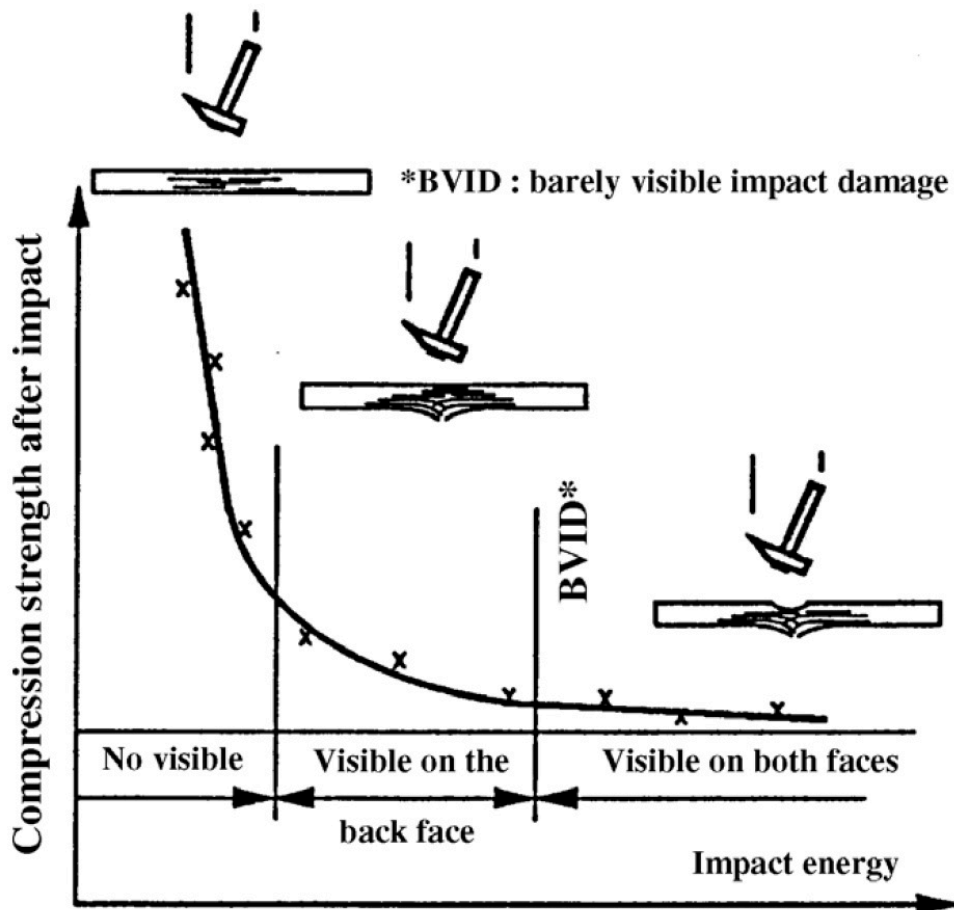


Abbildung 2.20: Zusammenhang zwischen Sichtbarkeit, Restdruckfestigkeit und Impactenergie [62]

Um die schwachen Impacteigenschaften von faserverstärkten Verbundwerkstoffe zu erhöhen, können z-Pins eingesetzt werden. Experimentell wurde die Fähigkeit Impactschäden zu reduzieren mehrfach unter Beweis gestellt. Die Delaminationsfläche kann durch ihren Einsatz signifikant verbessert werden. Sowohl eigene am Lehrstuhl durchgeführte Untersuchungen, als auch die von anderen Forschergruppen belegen, dass eine Reduktion der Schadensfläche infolge Impactbelastung um bis zu 64% möglich ist [55, 32, 63, 64]. Dabei ist zu beachten, dass eine höhere Flächendichte eine tendenziell geringere Delaminationsfläche zur Folge hat.

Das Delaminationswachstum kann jedoch nur durch den Einsatz von Pins reduziert werden, wenn das Risswachstum bereits durch sehr kurze Risse initiiert wurde. Die eigentliche Rissinitiierung kann nicht durch z-Pins beeinflusst werden. Ebenso wird das Wachstum sehr kurzer Risse nicht behindert. Eingebroughte Pins wirken sich erst positiv auf die delaminierte Fläche aus, sobald diese eine ausreichende Größe erreichen, in der

mehrere Pins zum Eingriff kommen [3, 64, 65, 66]. ISA ET AL. zeigten, dass erst ab einer Impactenergie von 17 J bei herkömmlichen Impactproben ein Unterschied in der resultierenden Delaminationsfläche auftritt. Dabei hatten sowohl Pin-Dichte und Pin-Durchmesser keinen Einfluss auf den Schaden [67]. Prinzipiell existieren zwei Erklärungen, weshalb z-Pins die Delaminationsinitiierung nicht beeinflussen. Zum einen, weil die Bindung zwischen Pin und Laminat durch die harzreichen Zonen sehr gering ist. Zum anderen, weil die Pins senkrecht zur Rissfläche stehen. Erst wenn sich der Riss infolge Mode II Beanspruchung fortsetzt, steht dem Risswachstum die Rotation des Pins, infolge der Relativbewegung der oberen und unteren Laminathälfte, entgegen [68].

Des Weiteren kann die Restdruckfestigkeit von verpinnten Proben ebenfalls deutlich verbessert werden. In unterschiedlichen Experimenten konnte diese um bis zu 45% gegenüber unverstärkten Proben gesteigert werden, abhängig von Durchmesser und Flächendichte der eingesetzten Pins [32, 63, 68]. Dies ist einerseits auf eine geringere Delaminationsfläche und andererseits auf eine höhere Knicksteifigkeit zurückzuführen. Die eingesetzten Pins überbrücken die Delamination, sodass Spannungen in die umgebenden Laminatschichten umgeleitet werden können. Die Bildung von Sublaminaten ist beim Stauchen der Probe durch das Zusammenhalten der verpinnten Schichten erschwert. Die Pins unterliegen dabei Pullout-Vorgängen, welche wiederum zum Energieverzehr beitragen [7, 68, 33].

Neben den zuvor genannten Verbesserungen bezüglich der Delaminationsfläche und der Restdruckfestigkeit unterliegt die Bruchdehnung ebenfalls einem positiven Einfluss unter Verwendung von z-Pins. Unverstärkte Lamine büßen aufgrund von Impactschädigungen einen Großteil ihrer Bruchdehnung ein. In der Luftfahrtindustrie wird diese mit mindestens 1,0% für ungeschädigte Lamine vorausgesetzt. Bei Impact geschädigten Probekörpern, ohne Verstärkung in z-Richtung, sinkt diese bis auf 0,3 bis 0,4% ab [68, 69, 70, 71]. ZHANG ET AL. untersuchten, ob z-Pins eine geringere Abnahme der Bruchdehnung zur Folge haben. Dabei konnte eine Verbesserung von 0,6% auf 0,9% erzielt werden [68].

3 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden im ersten Teil alle zur Herstellung der Prüfkörper verwendeten Materialien und das Herstellungsverfahren der CFK-Proben näher erläutert. Im zweiten Teil sind die verwendeten mathematischen und experimentellen Methoden zur Ermittlung ausgewählter mechanischer Eigenschaften beschrieben. Ein Überblick über alle verwendeten Normen findet sich in Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: *In der Arbeit verwendete Prüfnormen*

Eigenschaft	Norm	Titel
Zug	DIN 527	Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften
Mode I	ISO 15024	Fibre-reinforced plastic composites - Determination of mode I interlaminar fracture toughness G_{IC} , for unidirectionally reinforced materials
CAI	DIN 65561	Faserverstärkte Kunststoffe; Prüfung von multidirektionalen Laminaten; Bestimmung der Druckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung
	AITM1-0010	Fibre Reinforced Plastics - Determination of Compression Strength after Impact

Im Allgemeinen werden bei den mechanischen Untersuchungen zwei unterschiedliche Parameter zur z-Pin Verstärkung der Prüfkörper zu Grunde gelegt.

Ein Teil der Prüfkörper wird mit äquivalenter z-Pin Flächendichte hergestellt. Diese hat zur Folge, dass insgesamt mehr eckige als runde Pins in das Laminat eingebracht werden, wodurch der Abstand der jeweiligen Pins zueinander unterschiedlich groß ist. Insbesondere bei den Versuchen zur Ermittlung der interlaminaren Risszähigkeit und der Restdruckfestigkeit nach Impactbeanspruchung werden die Ergebnisse durch den Pin-zu-Pin Abstand beeinflusst. Daher werden ebenfalls für die beiden zuvor genannten Prüfungen weitere Proben hergestellt.

Beim anderen Teil der Prüfkörper ist die Anzahl und der Pin-zu-Pin Abstand zwischen eckigen und runden Pins identisch. Durch die geringere Querschnittsfläche der eckigen z-Pins unterscheiden sich die beiden Serien in ihrer Flächendichte. Proben, bei denen beide Pin-Geometrien äquidistant sind, werden gesondert mit „P“ gekennzeichnet.

3.1 Werkstoffe und Halbzeuge

Die in der Arbeit verwendeten Halbzeuge und Werkstoffe werden nachfolgend beschrieben. Soweit vom Hersteller angegeben, sind ebenfalls physikalische Eigenschaften zu den entsprechenden Materialien angefügt.

3.1.1 Faserhalbzeug

Die Faserhalbzeuge wurden von der Firma *Saertex GmbH & Co. KG* eingekauft. Dabei handelt es sich um ein Komplexhalbzeug aus unidirektional ausgerichteten Kohlefasern, die mit Thermoplastfäden fixiert wurden. Die Thermoplastfixierung verhindert, dass die Fasern während des Verarbeitungsprozesses von ihrer vorgegebenen Faserorientierung abweichen. Sie ist jedoch nicht mit den Verstärkungsfasern verwebt, sondern lediglich durch lokalen Wärmeeintrag auf die Kohlenstofffasern aufgeklebt. Eine zusätzliche Verwebung hätte bereits eine künstliche, ungewollte Faserwelligkeit und -umlenkung hervorgerufen. Bei den Kohlenstofffasern handelt es sich um *Torayca T700SC* Fasern mit einer Garnfeinheit von 12k tex. Das Flächengewicht des Halbzeugs inklusive der Thermoplastfixierung beträgt 154 g/m². Die vom Hersteller angegebenen mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2: *Eigenschaften der T700SC Carbonfasern [72]*

Eigenschaft	Zeichen	Einheit	Wert	Norm
Zugfestigkeit	$R_{ }^+$	MPa	4510	TY-030B-01
Elastizitätsmodul	E	MPa	221000	TY-030B-01
Bruchdehnung	ε	%	1,9	TY-030B-01
Dichte	ρ_f	g/cm ³	1,76	TY-030B-02

3.1.2 Matrixwerkstoff

Als Matrixharz wurde das kalthärtende Epoxidharzsystem *LR385/LH386* der Firma *Hexion Specialty Chemicals* verwendet. Der Einsatztemperaturbereich liegt, nach geeigneter Temperung, zwischen -60 °C und $+54\text{ °C}$. Die Verarbeitung findet unter Raumtemperatur statt, wobei die Topfzeit mit zwei Stunden angegeben ist. Das Epoxidharz benötigt eine minimale Aushärtezeit von 24 Stunden unter Raumtemperatur bevor es bei einer Temperatur von 60 °C für mindestens 15 Stunden getempert wird. Die mechanischen Eigenschaften des unverstärkten Harzes sind in Tabelle 3.3 angegeben. Sie wurden nach dem Handbuch der deutschen Luftfahrt WL 5.3203 Teil 1 und 2 ermittelt.

Tabelle 3.3: *Eigenschaften von LR385/LH386, Aushärtung: 24 h/23 °C + 15 h/55 °C [73]*

Gemessene Eigenschaft	Zeichen	Einheit	Wert
Zugfestigkeit	R_+	MPa	80
Druckfestigkeit	R_-	MPa	130
Biegemodul	E	MPa	3450
Schlagzähigkeit	-	kJ/m^2	52,5
Bruchdehnung	ε	%	7
Dichte	ρ_h	g/cm^3	1,19

3.1.3 Halbzeug zur Pin-Herstellung

Die verwendeten eckigen und runden z-Pins werden aus pultrudierten CFK-Stäben ausgearbeitet. Diese basieren nicht auf einer hochtemperaturstabilen Matrix aus Bismaleimide (BMI), da die Aushärtung der Proben lediglich unter Raumtemperatur stattfindet. Eine Sonderanfertigung der pultrudierten Profilstäbe mit einer Matrix aus BMI Harz und veränderter Querschnittsgeometrie wäre aber möglich gewesen.

Die kreisrunden Profilstäbe haben einen Durchmesser von $d = 1,0\text{ mm}$, und die rechteckigen Stäbe ein Breite zu Höhe Verhältnis von $b \times h = 1,0 \times 0,4\text{ mm}$. Die Halbzeuge werden von der Firma *Van Dijk Pultrusion Products* produziert und vertrieben. Nach ihrer Anlieferung werden die Profilstäbe von der Firma *Staedtler+Uhl* zu z-Pins weiterverarbeitet. Dabei werden sie zu Nadeln mit einer Länge von 15 mm abgelängt und angeschliffen. Die kreisrunden Pins werden umlaufend in einem Winkel von 15° angeschliffen, um eine kegelförmige Spitze zu erzeugen. Die rechteckigen Pins entsteht durch das Anschleifen von vier Seiten im Winkel von 15° . Die Ausarbeitung von Spitzen erleichtert die Einbringung

der Pins in das nasse Laminat und verhindert, dass der Pin beim Einbringen aus der Senkrechten ausgelenkt wird. Die mechanischen Eigenschaften des Pins sind in Tabelle 3.4 aufgeführt.

Tabelle 3.4: *Mechanische Eigenschaften der pultrudierten CFK-Stäbe zur Herstellung von z-Pins [74]*

Gemessene Eigenschaft	Zeichen	Einheit	Wert
Faservolumengehalt	φ	%	63
Zugfestigkeit	$R_{ +}$	MPa	2500
Druckfestigkeit	$R_{ -}$	MPa	1600
Elastizitätsmodul	$E_{ }$	MPa	140000
Bruchdehnung	ε	%	2

3.2 Prüfkörperherstellung

Die Prüfkörper in der vorliegenden Arbeit werden in einem dreistufigen Prozess hergestellt. Dabei wird zuerst das Laminat Nass-in-Nass aufgebaut. Anschließend werden die Pins mit Hilfe einer wiederverwendbaren Matrize eingebracht. Diese bestehen aus unterschiedlichen Aluminiumplatten, in die nach einer vordefinierten Rasterung Bohrungen und Taschen eingebracht sind. Abschließend wird das Laminat in einer pneumatischen Pressvorrichtung kompaktiert, um einen Faservolumengehalt von ca. 60% zu erzielen.

Der Aufbau des Laminats im Nass-in-Nass Verfahren ist schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt. Hierzu wird in die Laminierform eine Platte aus Polymethacrylid (PMI) Hartschaumstoff der Bezeichnung *Rohacell IG-F 51* eingelegt. Auf dieser findet im Anschluss der Laminierprozess statt. Um den Stoffschluss zwischen Laminat und Schaumstoffplatte zu verhindern, wird eine Trennfolie eingelegt. Bei Bedarf, wenn z. B. auf das Laminat Scharniere angeklebt werden müssen, kann Abreißgewebe auf die Folie aufgelegt werden. Bei einigen Proben ist es ebenfalls notwendig in der Symmetrieebene des Laminats eine weitere Trennfolie, die bei Mode I Versuchen als künstlicher Anriss fungiert, einzulaminieren. Auf die Oberseite des Laminats kann gegebenenfalls erneut Abreißlege aufgebracht werden.

Nachdem das Laminat aufgebaut ist, werden die z-Pins eingebracht. Dazu werden Matrizen an der Form über dem Laminat angeschraubt. In die Matrizen aus Aluminium wurden entweder Durchgangsbohrungen oder Taschen in vordefinierten Rasterungen auf einer

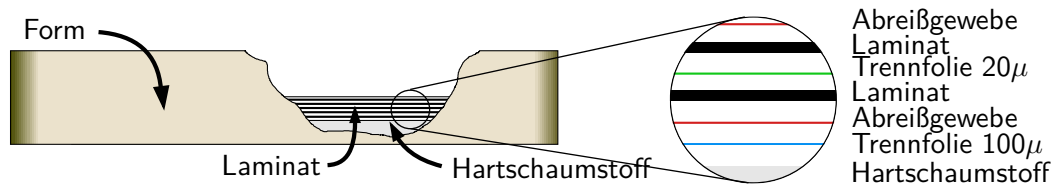


Abbildung 3.1: Aufbau des Laminats in der Laminierform

Fräse eingearbeitet. Die dabei angewendeten Raster wurden für die jeweiligen Versuche in Abhängigkeit der Flächendichte oder des Pin-zu-Pin Abstandes individuell ausgearbeitet. Zur 3D-Verstärkung des Laminats werden die Pins durch die Löcher und Taschen der Matrizen per Hand senkrecht zur Laminatenebene eingedrückt, Abbildung 3.2a. Im zweiten Arbeitsgang werden die Pins mit einem Stempel durch die Matritze gedrückt, um mit der Laminatoberfläche bündig abzuschließen, Abbildung 3.2b.

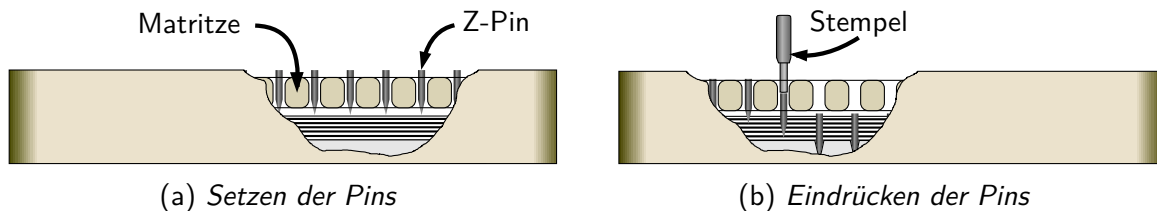


Abbildung 3.2: Einbringen der z-Pins in das nasse Laminat

Danach werden die Matrizen von der Form abgeschraubt und gegen Aluminiumstempel ausgetauscht. Die Stempel sind starr über eine 10 mm dicke Aluminiumplatte miteinander verbunden. Die fertige Form wird anschließend in die Pressvorrichtung eingelegt, siehe Abbildung 3.3. Zwischen Stempel und oberer Platte der Presse wird das pneumatische Druckluftkissen eingelegt. Im Betrieb drückt das Kissen auf die beiden Stempel, wodurch das Laminat kompaktiert wird.

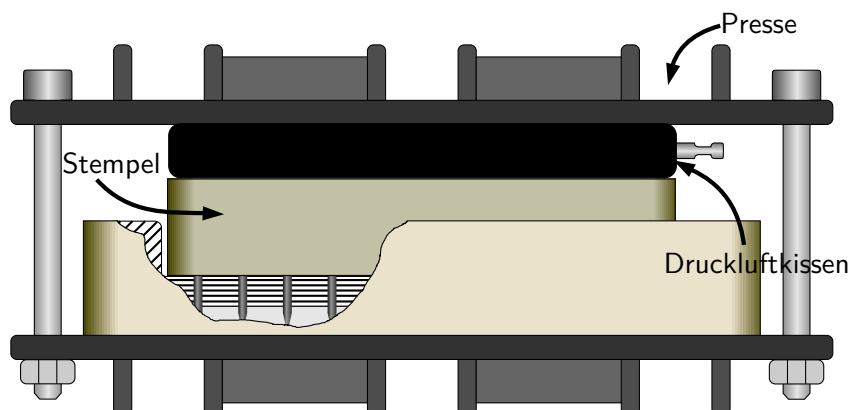


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau zum Verpressen der verpinnten Laminat

Der notwendige Druck im Druckluftkissen zum Verpressen der Lamine kann, in Abhängigkeit vom gewünschten Verpressdruck im Laminat berechnet werden. Hierzu sind die Kontaktflächen zwischen Stempel und Laminat, A_{SL} , sowie zwischen Druckluftkissen und Stempel, A_{HS} , notwendig. Zunächst berechnet sich die Verpresskraft nach Gleichung 3.1. Daraus lässt sich im Anschluss nach Gleichung 3.2 der einzustellende Druck im Hebekissen errechnen.

$$F_S = p_L \cdot A_{SL} \quad (3.1)$$

$$p_H = \frac{F_S}{A_{HS}} \quad (3.2)$$

F_S = Auf den Stempel vom Druckluftkissen wirkende Kraft [N]

p_L = Im Laminat wirkender Verpressdruck [MPa]

p_H = Luftdruck im Druckluftkissen [MPa]

A_{SL} = Kontaktfläche zwischen Stempel und Laminat [mm²]

A_{HS} = Kontaktfläche zwischen Druckluftkissen und Stempel [mm²]

Für alle Prüfkörperplatten wird im Laminat ein Verpressdruck von 0,4 MPa angewendet. Im Vorfeld wurde experimentell bestimmt, dass bei einem Druck von 0,4 MPa im Laminat beim Verpressen ein Faservolumengehalt von 60 ± 4 % erreicht wird. Daraus ergibt sich aufgrund ihrer Größe für die CAI-Platten ein einzustellender Druck im Druckluftkissen von 3,48 bar und bei allen übrigen Proben ein Druck von 3,3 bar.

Die Lamine werden in der Presse für 24 Stunden kaltausgehärtet und anschließend für weitere 15 Stunden unter Normaldruck bei 60 °C warmausgehärtet.

3.3 Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit

Der faserparallele Elastizitätsmodul E_1 und die Zugfestigkeit werden in Anlehnung an die Norm ISO 527 ermittelt [75]. Informationen zur Prüfung translaminar verstärkter Verbundwerkstoffe sind normativ nicht festgelegt, daher orientiert sich die zu verpinnende Fläche an der freien Länge der Prüfkörper.

Die Fertigung findet gemäß dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Verfahren statt. Die Geometrie und Abmaße der Probekörper entsprechen denen in der Norm als Typ 2 festgelegten, siehe Abbildung 3.4. Zur Herstellung der unidirektionalen Proben wurde der Lagenaufbau $[0]_{10s}$ gewählt. Der Faservolumengehalt ist mit $\varphi = 60\%$ avisiert, was einer Probendicke von 2,7 mm entspricht. Die Zugproben sind 250 mm lang und 25 mm breit. Die freie Länge zwischen den Krafteinleitungsstellen beträgt 150 mm und wird vollständig verpinnt.

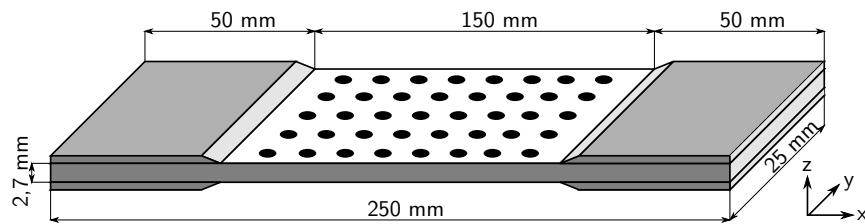


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung und Geometrie der Proben für die Zugprüfung

Es befinden sich jeweils vier Proben auf einer laminierten Platte. Insgesamt werden für jede Prüfserie mindestens fünf Proben laminiert. Diese werden im Anschluss an die Kalt- und Warmaushärtung ausgefräst. An den Krafteinleitungsstellen wurden 25 x 50 x 1 mm große Aufleimer mit dem 2K-Epoxy Kleber *Araldite 2015* aufgebracht und mindestens 24 Stunden bei Raumtemperatur ausgehärtet.

Die Versuche zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit wurden am *Fraunhofer Anwendungszentrum für Großstrukturen in der Produktionstechnik* in Rostock durchgeführt. Dazu wurde eine Universalprüfmaschine der Firma *Zwick/Roell* vom Typ *Z400E* mit berührendem Extensiomter verwendet.

Die Versuche finden unter Raumtemperatur statt und werden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min durchgeführt. Anhand der über das Extensiomter gemessenen Dehnung wird der Elastizitätsmodul nach dem Sekantenanstieg im Dehnungsbereich zwischen 0,05 und 0,25% nach Formel 3.3 berechnet.

$$E_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.3)$$

E_1 = Faserparalleler Zugmodul [MPa]

σ_1 = Gemessene Spannung [MPa] bei $\varepsilon_1 = 0,0005$

σ_2 = Gemessene Spannung [MPa] bei $\varepsilon_1 = 0,0025$

Das Extensiometer löst sich bei Überschreitung der Dehnung von 0,3% automatisch von der Probe, um eine Beschädigung infolge des Bruchs zu vermeiden.

Die Bruchspannung errechnet sich aus den gemessenen Werten nach Gleichung 3.4.

$$\sigma_b = \frac{F_{max}}{A} \quad (3.4)$$

σ_b = Bruchspannung [MPa]

F_{max} = Beim Bruch gemessene Kraft [N]

A = Querschnittsfläche der Probe

Eine Übersicht der getesteten Prüfserien ist in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5: *Durchgeführte Prüfungen zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls*

Serie	Laminataufbau	Pin-Geometrie	Flächendichte Φ [%]	Probenanzahl
Z-UD-U	Unidirektional	-	-	5
Z-UD-R-05	Unidirektional	Rund	0.5	5
Z-UD-R-1	Unidirektional	Rund	1.0	5
Z-UD-E-L-05	Unidirektional	Eckig/Längs	0.5	5
Z-UD-E-L-1	Unidirektional	Eckig/Längs	1.0	5
Z-UD-E-Q-05	Unidirektional	Eckig/Quer	0.5	5
Z-UD-E-Q-1	Unidirektional	Eckig/Quer	1.0	5

3.4 Rissöffnung unter Mode I Belastung

Die Versuche zur Ermittlung der Risszähigkeit unter Mode I Belastung wurden in Anlehnung an die ISO 15024 [78] durchgeführt. Im Allgemeinen wurde die Vorgehensweise zur Durchführung und Auswertung der Proben dieser Richtlinie übernommen. Sie enthält jedoch keine Informationen über die Prüfung von dreidimensional verstärkten Prüfkörpern, diese orientieren sich an den bisher themenbezogenen Veröffentlichungen. In einem Großteil der Veröffentlichungen wird eine verpinnte Fläche von 25 x 25 mm genutzt [28, 79, 80, 81, 82]. Aufgrund der Größenunterschiede zwischen konventionellen Pins, deren Durchmesser im Bereich von 0,27 und 0,51 mm liegt, und den zugrundegelegten Pins, deren maximaler Durchmesser 1,0 mm beträgt, wurde die verpinnte Fläche auf 25 x 80 mm vergrößert. Andernfalls hätten zu wenige Pins innerhalb der verstärkten Zone

eingbracht werden können, um eine adäquate Beurteilung der Risszähigkeit der Proben zu gewährleisten.

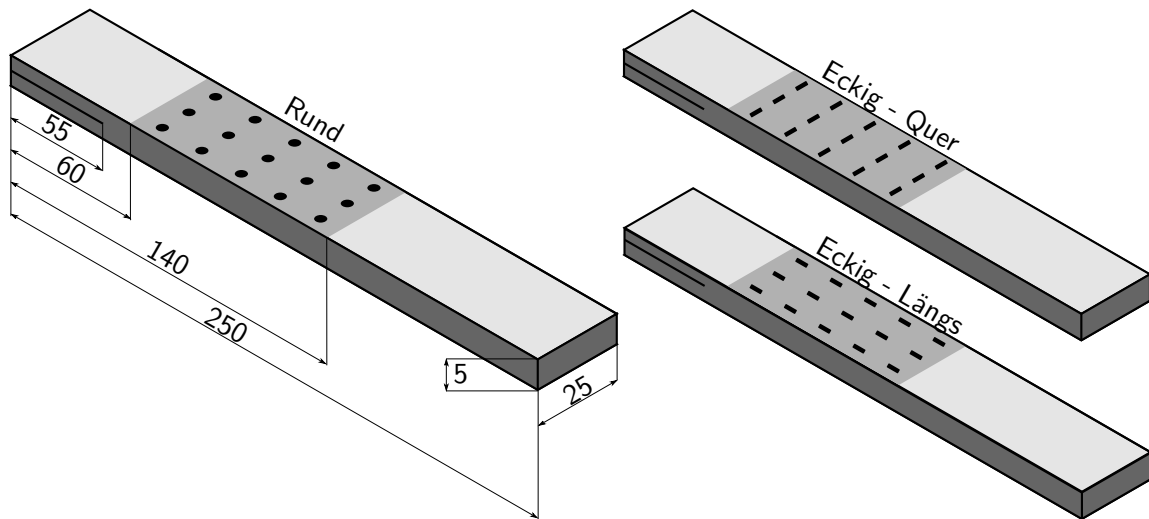


Abbildung 3.5: Prüfkörpergeometrie und Prüfkörpertypen der Mode I-Untersuchungen

Die Proben wurden alle nach dem im Abschnitt 3.2 beschriebenen Verfahren hergestellt. Die von der Norm vorgeschlagene Probendicke beträgt 3 mm. In der vorliegenden Arbeit wurde die Dicke jedoch auf 5 mm erhöht, um die Gefahr des Bruchs der Laminathälften zu vermeiden und die Biegeeinflüsse zu verringern.

Die Geometrie der Prüfkörper mitsamt der Pin-Ausrichtung ist in Abbildung 3.5 zu sehen. Die Prüfkörper sind insgesamt 250 mm lang, und in vier Bereiche eingeteilt. Im ersten ist eine PTFE-Folie mit einer Dicke von $20\ \mu\text{m}$ und einer Länge von 55 mm einlaminieren, die als künstlicher Anriss fungieren soll. Dahinter befindet sich ein 5 mm langer unverstärkter Übergangsbereich, der in die 80 mm lange verstärkte Zone übergeht. Die übrigen 110 mm sind ebenfalls unverspanntes Laminat. Die Proben sind allesamt 25 mm breit und weisen eine Dicke von 5 mm auf.

Im Anschluss an die Herstellung werden die einzelnen Proben ausgefräst. An der Seite der Rissöffnung müssen nachfolgend Scharniere zur Lasteinleitung aufgeklebt werden. Hierzu wird die Ober- und Unterseite des Laminats an der Klebestelle, sofern beim Laminieren kein Abreißgewebe verwendet wurde, mit Sandpapier angeschliffen und mit Aceton gereinigt. Selbiges wird ebenfalls an den zu verklebenden Flächen der Scharniere durchgeführt. Die Scharniere werden, wie in der Norm vorgeschrieben, ausgerichtet und mit *Araldite 2011*, einem auf epoxidbasis kalthärtenden Kleber zur Verbindung von CFK und Metallteilen, aufgeklebt. Die Aushärtung findet bei $50\ ^\circ\text{C}$ für acht Stunden statt. Abschließend werden

die Seitenflächen parallel zur Probendicke mit weißer Sprühfarbe gefärbt. Auf die Farbe wird ein Maßstab mit einer Teilung von fünf Millimetern aufgezeichnet. Während der Versuchsdurchführung kann anhand der Teilung die Risslänge a quantifiziert werden.

In Tabelle 3.6 sind die durchgeführten Versuchsreihen aufgelistet. Die Prüferien sind unterteilt in Pin-Geometrie, Ausrichtung und Flächendichte der z-Pins. Die Ausrichtung der z-Pins wird jeweils relativ zur Faserlängsrichtung der Probe angegeben. Die Pins sind entweder parallel oder senkrecht zur Faserlängsrichtung orientiert. Bei den mit „P“ gekennzeichneten Proben wird die wahre Flächendichte in Klammern dahinter angegeben.

Tabelle 3.6: *Prüfserien zur Ermittlung der kritischen Energiefreisetzungsrate unter Mode 1 Belastung*

Serie	Pin-Geometrie	Pin-Ausrichtung	Flächendichte Φ [%]	Probenanzahl
M1-U	-	-	-	5
M1-R-05	Rund	-	0.5	5
M1-R-1	Rund	-	1.0	5
M1-E-L-05	Eckig	Längs	1.0	5
M1-E-L-1	Eckig	Längs	1.0	5
M1-E-Q-05	Eckig	Quer	0.5	5
M1-E-Q-1	Eckig	Quer	1.0	5
M1-P-E-L-05	Eckig	Längs	0.5 (0.26)	5
M1-P-E-Q-05	Eckig	Quer	0.5 (0.26)	5

Zur Gewährleistung der statistischen Sicherheit wurden von jeder Serie fünf Prüfkörper hergestellt und geprüft. Dabei variierte ebenfalls die Position der Proben innerhalb der Laminierform, um Einflüsse der Fertigung auf das Versuchsergebnis auszuschließen.

Die Versuche wurden am *Lehrstuhl für Fluidtechnik und Mikrofluidtechnik* der Universität Rostock an einer *Zwick/Roell zwicki-Line Z5.0* Prüfmaschine durchgeführt. Diese ist mit einer 5 kN Messdose ausgestattet. Während des Versuchs wird mit einer Abtastrate von 24 Hz die Kraft und der Traversenweg aufgezeichnet. Alle Proben wurden unter Raumtemperatur geprüft, wobei die Versuche weggesteuert mit einer Traversengeschwindigkeit von 5 mm/min durchgeführt werden.

Während des Versuchs werden die beiden durch die künstliche Delamination getrennten Laminathälften voneinander abgehoben. Der dabei entstehende Riss geht am Ende der Delamination in das ungeschädigte Laminat über und erreicht nach einer kurzen Einlaufphase den verpinnten Bereich. Sobald der Riss im z-Pin verstärkten Bereich wächst wird jeweils

ein Messpunkt aufgenommen, sobald sich die Risslänge um 5 mm erhöht hat. Bei einem Messpunkt wird zu einer Risslänge a die dabei wirkende Kraft P und der zurückgelegte Traversenweg δ aufgezeichnet. Eine Probe kann nur ausgewertet werden, wenn mindestens elf Messpunkte aufgezeichnet werden konnten. Bei einer geringeren Anzahl an Messpunkten ist die Probe ungültig.

Zur Auswertung der kritischen Energiefreisetzungsrate G_{IC} stehen in der Norm drei Verfahren zur Auswahl. Die Daten können über die Balkentheorie, die korrigierte Balkentheorie und der Nachgiebigkeit ausgewertet werden. Eine generelle Empfehlung zur Verwendung einer bestimmten Berechnungsmethode wird in der Norm nicht gegeben. In der vorliegenden Arbeit wird die korrigierte Balkentheorie verwendet. Diese erweitert die Balkentheorie um die Korrekturfaktoren Δ und F , um große Verformungen auszugleichen. Die kritische Energiefreisetzungsrate kann über die Gleichung 3.5 berechnet werden.

$$G_{IC} = \frac{3 \cdot P \cdot \delta}{2 \cdot b (a + |\Delta|)} \cdot F \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} P &= \text{Rissöffnungskraft [N]} \\ \delta &= \text{Traversenweg [mm]} \\ b &= \text{Probenbreite [mm]} \\ a &= \text{Delaminationslänge [mm]} \\ \Delta, F &= \text{Korrekturfaktoren} \end{aligned}$$

Der Korrekturfaktor F berechnet sich über Gleichung 3.6. Der Wert l_1 ist der gemessene vertikale Abstand von der Achse des Scharniergelenks und der Probendeckschicht.

$$F = 1 - \frac{3}{10} \left(\frac{\delta}{a} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\delta \cdot l_1}{a^2} \right) \quad (3.6)$$

Der Korrekturfaktor Δ kann graphisch ermittelt werden. Hierzu wird der Wert $C^{1/3}$, welcher sich berechnet aus $C = \delta/P$, über der Risslänge a aufgetragen. Der vertikale Abstand zwischen der x-Achse und dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der

y-Achse entspricht dabei dem gesuchten Wert Δ .

3.5 Pin-Auszugsverhalten

Im Zuge der Mode I Untersuchungen werden ebenfalls Pin-Auszugsversuche durchgeführt. Die dabei gewonnenen Ergebnisse lassen sich auf wenige Parameter zurückführen, und können daher für eine differenzierte Analyse der verstärkenden Mechanismen von z-Pins auf die interlaminare Rissfestigkeit von Verbundwerkstoffen genutzt werden.

Eine Norm oder Prüfvorschrift ist aufgrund der speziellen Anwendung, und damit einhergehenden seltenen Anwendung nicht vorhanden. In den themenbezogenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen wurden bisher zwei Ansätze verfolgt, die sich an das Auszugs- und Eindrückverhaltens von einzelnen Filamenten oder Rovings anlehnen. Erstmals wurde von DAI ET AL. [41] ein Verfahren für z-Pins vorgeschlagen und in dieser Arbeit angewendet. Dabei wird in die Symmetrieebene des Laminats eine Trennfolie einlaminiert, und die Probe vor der Aushärtung mit neun z-Pins verstärkt. Die obere und untere Laminathälfte werden während des Versuchs auseinandergezogen, und die dabei wirkende Kraft und der Traversenweg aufgezeichnet. In einer weiteren Veröffentlichung von VAZQUEZ ET AL. wurden ebenfalls Pin-Auszugsversuche in Anlehnung an DAI ET AL. durchgeführt. Sie reduzierten jedoch die Anzahl der verwendeten Pins auf einen einzigen Pin [43, 83].

Die Prüfkörper zur Ermittlung des Pin-Auszugverhaltens wurden in Anlehnung an DAI ET AL. hergestellt. Die Prüfkörper sind 25 mm breit, 50 mm lang und haben eine Dicke von 6 mm. Daraus ergibt sich der Lagenaufbau $[0]_{20s}$. Zur Verstärkung werden neun Pins symmetrisch um den Mittelpunkt der Probe eingebracht. In die Symmetrieebene des Laminats ist eine Trennfolie einlaminiert, um den Stoffschluss zwischen oberer und unterer Laminathälfte zu unterbinden. Bei der Trennfolie handelt es sich um eine PTFE-Folie mit einer Dicke von 20 μm . Die Kraft wird mit Hilfe von T-Profilen aus Aluminium in die Probe geleitet. Dazu wird der Gurt partiell mit *Araldite 2015* auf die nicht verpinnten Bereiche der oberen und unteren Laminathälften geklebt. Der verpinnte Bereich wird zusätzlich mit einer Trennfolie abgedeckt, um das Ankleben der Pins an das T-Profil zu verhindern, siehe Abbildung 3.6.

Die Prüfkörper wurden am *Lehrstuhl für Fluidtechnik und Mikrofluidtechnik* der Universi-

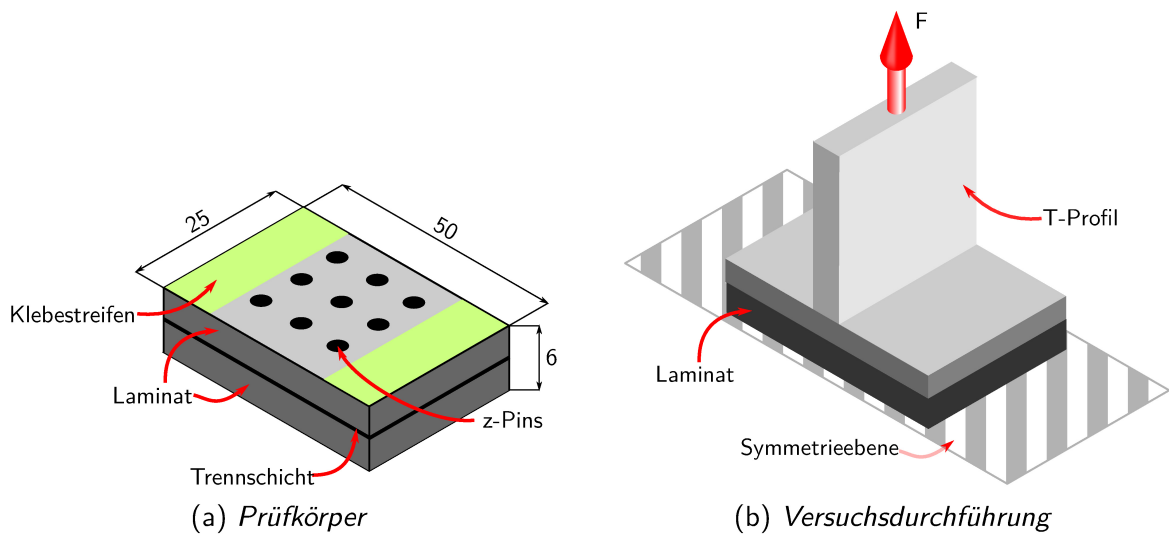


Abbildung 3.6: Schematischer Aufbau der Auszugsprobe und des Versuchsaufbaus

tät Rostock auf einer *Zwick/Roell zwicki-Line Z5.0* Prüfmaschine getestet. Während des Versuchs wurde mit einer Abtastrate von 24 Hz der Traversenweg und die Kraft aufgezeichnet. Die Verfahrensgeschwindigkeit beträgt bei allen Prüfserien 0,5 mm/min. Insgesamt sind je Prüfserie 10 Proben mit eckigen Pins, parallel zur Faserlängsrichtung eingebracht, und mit runden Pins geprüft worden, siehe Tabelle 3.7.

Tabelle 3.7: Prüfserien zur Untersuchung des Pin-Auszugsverhaltens

Serie	Pin-Geometrie	Pin-Ausrichtung	Probenanzahl
P-R	Rund	-	10
P-E	Eckig	Längs	10

Bei der Auswertung werden sowohl die aufgezeichneten Daten als auch die Bruchflächen der Pins und den Grundlaminaten mit Hilfe von Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen untersucht.

Aus den aufgezeichneten Daten lässt sich die Schubspannung im Interface zwischen z-Pin und Grundlaminat ermitteln, Gleichung 3.7.

$$\tau_p = \frac{F_p}{n_p \cdot U_p \cdot t_e} \quad (3.7)$$

F_p = Auszugskraft

n_p = Anzahl der z-Pins

U_p = Umfang eines z-Pins

t_e = Im Eingriff befindliche Länge des Pins

Weiterhin kann die im Pin wirkende Zugspannung errechnet werden, um Aussagen über die Auslastung der Zugfestigkeit des einzelnen z-Pins zu erhalten, Gleichung 3.8.

$$\sigma_p = \frac{F_p}{n_p \cdot A_p} \quad (3.8)$$

A_p = Querschnittsfläche der Pins

Anhand des Kraft-Weg-Verlaufs lässt sich die dissipierte Energie durch das reibungsbehaftete Herausziehen der Pins errechnen. In der Abbildung 3.7 ist exemplarisch die Auszugskraft über dem Traversenweg dargestellt. Die Fläche unter der Kurve entspricht der im gesamten Versuch verrichteten Arbeit. Die grün schraffierte Fläche stellt die elastische Deformationsarbeit dar. Die rot schraffierte Fläche repräsentiert die während des reibungsbehafteten Auszugs dissipierte Energie und kann nach Gleichung 3.9 berechnet werden. Die untere Integrationsgrenze u befindet sich im Kraftabfall, in der Grafik bei $s = 1$ mm und die obere Integrationsgrenze o am Versuchsende.

$$W_{\text{diss}} = \int_u^o F_p(s) \cdot ds \quad (3.9)$$

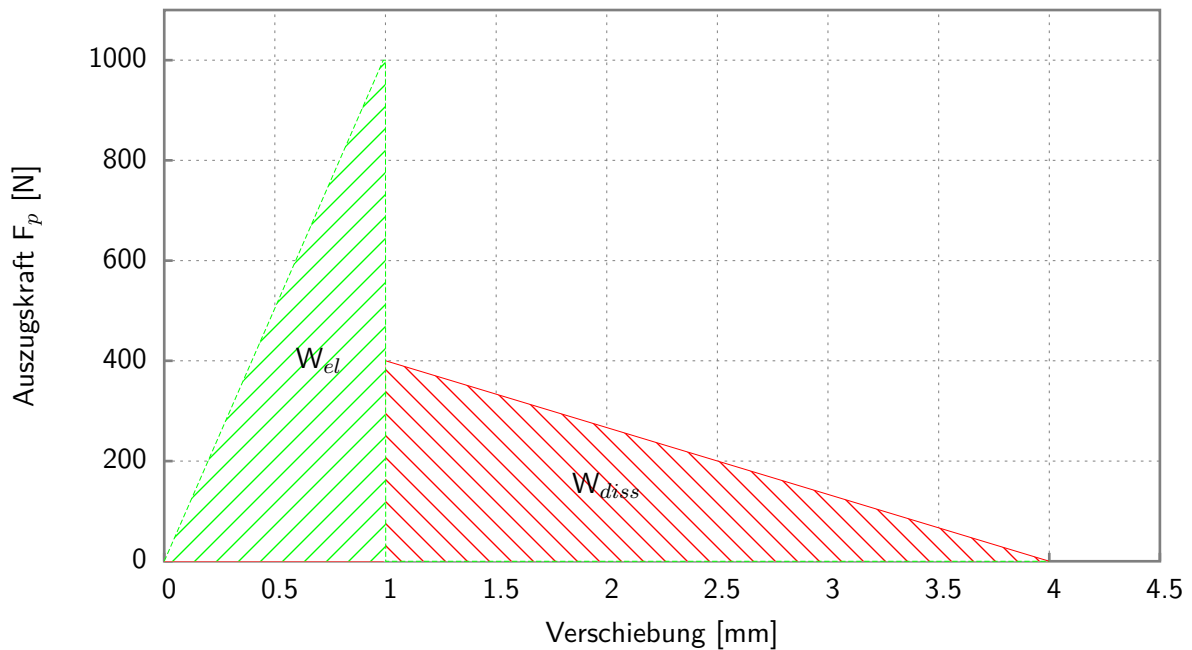


Abbildung 3.7: Exemplarischer Kraft-Weg-Verlauf beim Auszugsversuch

3.6 Impact und Post-Impact-Eigenschaften

Die Ermittlung der Impact und Post-Impact-Eigenschaften der Prüfkörper findet in Anlehnung an die Airbus Prüfvorschrift AIM1-0010 [84] und die DIN65561 statt [85]. Hierzu wurden jeweils zwölf Prüfkörper je Prüfserie aus 24 Einzelschichten mit dem Lagenaufbau $[\pm 45, 0, 90, 0, 90, \pm 45, 0, 90, \pm 45]_s$ hergestellt. Im Gegensatz zur DIN 65561 wurde die Anzahl der Lagen und die Probendicke reduziert. Ausschlaggebend dafür war die Limitation der am Lehrstuhl vorhandenen Prüfmaschine, die lediglich bis zu einer Maximalkraft von 100 kN prüfen kann. Ausgehend von der Druckfestigkeit des Materials wurde die Dicke der Proben auf 3,5 mm reduziert, um die Ermittlung der Restdruckfestigkeit garantieren zu können. Durch die verringerte Dicke der Proben reduziert sich die Anzahl an Einzelschichten, weshalb der Laminataufbau gegenüber den Normen geändert werden musste, siehe Abbildung 3.8.

Insgesamt werden sieben Serien mit jeweils zwölf Proben untersucht. Eine Übersicht über die getesteten Prüfserien findet sich in Tabelle 3.8.

Die DIN65561 nennt keine klaren Regelungen in Bezug auf die zu verwendenden Impactenergien. Es wird jedoch vorgeschlagen Abstufungen der Energie, ausgehend von

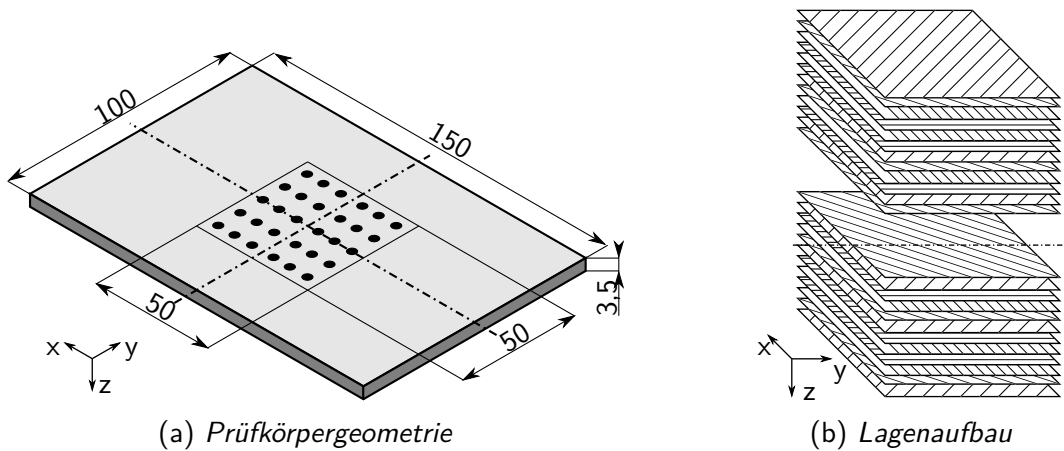


Abbildung 3.8: Prüfkörpergeometrie und Lagenaufbau der CAI-Proben

Tabelle 3.8: Prüferien zur Ermittlung der Impact und Post-Impact-Eigenschaften

Serie	Pin-Geometrie	Pin-Ausrichtung	Flächendichte Φ [%]	Probenanzahl
I-U	-	-	-	12
I-R-05	Rund	-	0.5	12
I-R-1	Rund	-	1.0	12
I-E-L-05	Eckig	Längs	1.0	12
I-E-L-1	Eckig	Längs	1.0	12
I-P-E-L-05	Eckig	Längs	0.5 (0.26)	12
I-P-E-L-1	Eckig	Längs	1.0 (0.52)	12

3,3 J/mm Laminatdicke, vorzunehmen. Die Airbus Prüfvorschrift sieht hingegen vor, dass die Impactenergien in Abhängigkeit der Eindringtiefe des Impacters einer Referenzprobe gestaffelt werden. Die Referenzprobe wird bei einer Impactenergie von 50 J geprüft und die Eindringtiefe des Impacters gemessen. Wenn der resultierende Schaden tiefer als 1,0 mm ist, werden die übrigen Prüfkörper bei Energien von 10, 15, 20, 25, 30 und 40 J getestet. Ist die Eindringtiefe geringer, erhöhen sich die Impactenergien auf 20, 25, 30, 40, 60 und 70 J. In der vorliegenden Arbeit wurde auf die Abhängigkeit der Dellentiefe verzichtet und alle Prüfkörper mit derselben Energiereihe geprüft, um die Vergleichbarkeit über alle Energielevel zu ermöglichen.

Die Auswahl der Energielevel für die durchzuführenden Experimente orientierte sich an der Airbus Prüfvorschrift. Dabei lag der Fokus auf einer feineren Abstufung der Energieniveaus im unteren Bereich, da dort die Gefahr vom BVID am größten ist. Ab der Grenze von 10 J/mm Laminatdicke verdoppeln sich die Schritte von 1,25 J/mm auf

2,5 J/mm Laminatdicke, siehe Tabelle 3.9. Bei der Anzahl der zu prüfenden Proben weicht die Norm ebenfalls von der Prüfvorschrift ab. Nach der AITM1.0010 werden sieben Energielevel mit jeweils unterschiedlicher Anzahl an Proben getestet, um einen Überblick der Impacteigenschaften über ein breites Energiespektrum zu erlangen. Der Zugewinn an Informationen entsteht jedoch zum Nachteil der statistischen Sicherheit der Ergebnisse.

E	E_s	m	h	v	Probenanzahl
[J]	[J/mm]	[kg]	[m]	[m/s]	[-]
17,5	5	3	0.59	3.42	2
22	6.25	3	0.75	3.83	1
26	7.5	3	0.88	4.16	3
30.5	8.75	3	1.04	4.51	1
35	10	3	1.19	4.84	2
44	12.5	3	1.49	5.42	1
52.5	15	3	1.78	5.92	2

Tabelle 3.9: *Prüfparameter zur Durchführung der Impactuntersuchungen in Anlehnung an die AITM1-0010*

Der Prozess zur Ermittlung der Schadenstoleranzeigenschaften in Anlehnung an die entsprechenden Normen untergliedern sich in drei Teilschritte. Im ersten Schritt wird die Impactschädigung aufgebracht. Anschließend werden die im Material auftretenden Schäden mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren, wie z.B. Ultraschall oder Thermografie, bestimmt. Im letzten Schritt wird die Restdruckfestigkeit des geschädigten Laminats ermittelt.

1. Aufbringen der Impactbelastung

Die Proben wurden in der Arbeitsgruppe *Schadenstoleranz von Luftfahrzeugen* am *Institut für Luft- und Raumfahrttechnik* der Technischen Universität Dresden durchgeführt. Die Prüfungen fanden unter Raumtemperatur und ohne weitere klimatische Vorbehandlung der Prüfkörper statt. Dazu wurde eine Fallgewicht-Schlagversuchmaschine vom Typ *Dynatup 8250* der Firma *Instron* verwendet, siehe Abbildung 3.9.

Die Prüfkörper werden im Fallwerk auf eine Probenauflage mit einem in der Mitte befindlichen rechteckigen Fenster der Größe von 75×125 mm aufgelegt und mit jeweils vier Niederhaltern eingespannt. Der Impactor, der Teil des Fallwerks, der mittig auf den Prüfkörper aufschlägt, besteht aus einer gehärteten Stahlkugel mit einem Durchmesser von 16 mm. Die Impactenergie kann mit Hilfe der Parameter Höhe und Fallgewicht variiert werden und berechnet sich nach der Formel 3.10. Um den Einfluss der Masse auszuschließen,

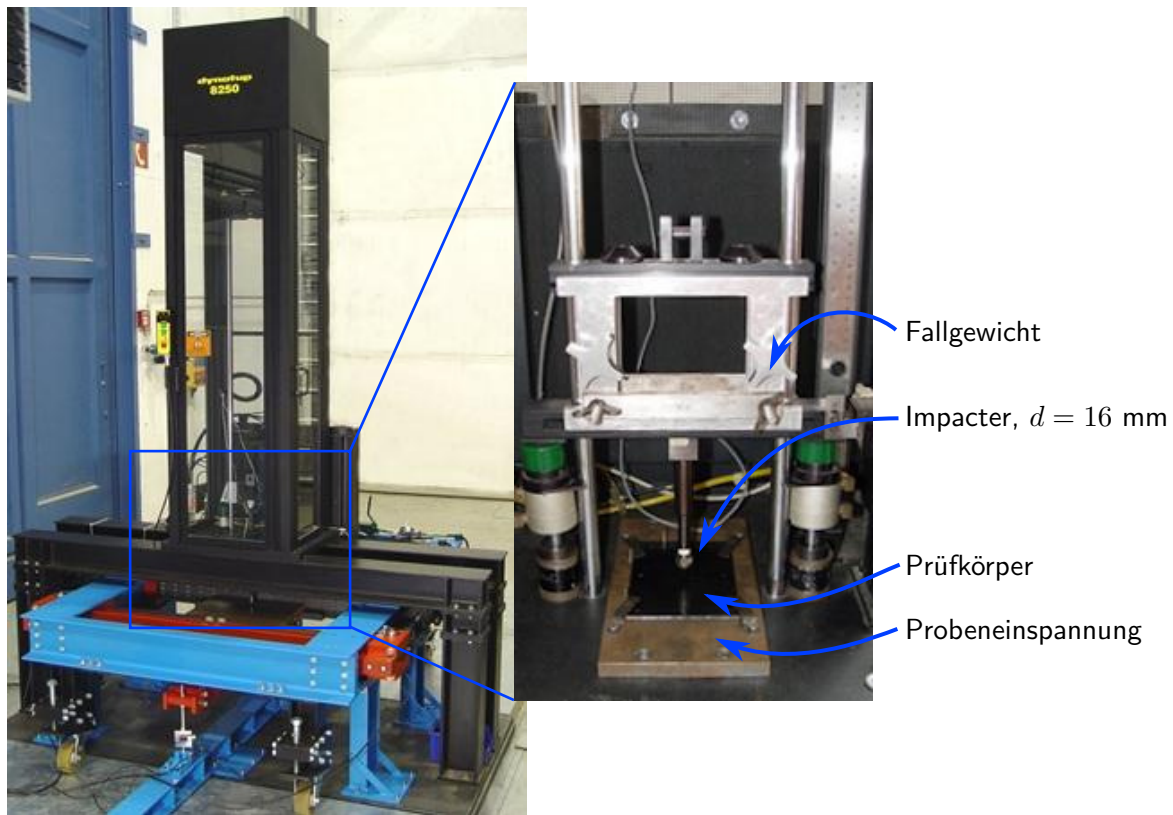


Abbildung 3.9: Fallwerk Dynatup 8250

wird jede Probe mit einem Fallgewicht von 3,020 kg belastet [85]. Eine höheres Fallgewicht führt zu höheren Kontaktkräften, einer längeren Kontaktzeit und größeren Durchbiegungen der Probe [86]. Die Variation der Impactenergie erfolgt anschließend ausschließlich über eine Änderung der Fallhöhe und folgt dem Vorschlag der DIN65561.

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (3.10)$$

Der Impactvorgang beginnt mit der Auslösung des Impacters, woraufhin dieser im freien Fall senkrecht auf den Prüfkörper aufschlägt. Beim Zurückprallen des Impacters wird dieser aufgefangen, um eine erneute Belastung der Probe zu verhindern. Während des Impactvorgangs werden über Kraft- und Wegmesseinrichtungen die Kontaktkraft und die Durchbiegung und Geschwindigkeit des Prüfkörpers aufgezeichnet. Aus den Daten lassen sich im Anschluss Informationen über die maximale Kontaktkraft, Schadensinitiierung und -ausbreitung, Durchbiegung und absorbiertes Energie ableiten.

2. Zerstörungsfreie Prüfung

Im Anschluss an die Impactbelastung werden die Proben mittels Ultraschall auf Schädigungen innerhalb des Laminats untersucht. Die Untersuchungen fanden ebenfalls an der *TU Dresden* statt. Dabei kam eine Ultraschalleinrichtung der Firma *Dr. Hillger* mit einem xy-Scanner *USC C3000 MUSE* zum Einsatz. Die Durchschallung fand bei einer Prüffrequenz von 8 MHz statt. Die Software errechnet automatisch die entsprechenden C- und D-Bilder und gibt diese als Bilder mit Informationen zum Rückwand-, Fehlerecho sowie der Laufzeit aus. Aus den ermittelten C- und D-Bildern lässt sich die projizierte Delaminationsfläche mit der Software *ImageJ* quantifizieren.

3. Ermittlung der Restdruckfestigkeit

Die Restdruckfestigkeit der geschädigten Proben wird an der Universalprüfmaschine *MTS 322* am *Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau* der *Universität Rostock* ermittelt. Im Gegensatz zu den in den Normen vorgeschlagenen Einspannvorrichtungen wird die von *SANCHEZ-SAEZ ET AL.* adaptiert [87]. Bei der Prüfeinrichtung der *AITM1.0010* besteht die Gefahr, dass die Probe einem Scherbruch an der Krafteinleitungsstelle unterliegt, da die Proben dort ungelagert sind. Da in diesem Falle das Versagen im ungeschädigten Bereich einsetzt, kann keine Aussage über die tatsächliche Restdruckfestigkeit des geschädigten Laminats getroffen werden. In der von *SANCHEZ-SAEZ ET AL.* entwickelten Einspannvorrichtung ist lediglich der Bereich direkt um den Aufschlagpunkt ungelagert, weshalb das Versagen immer im geschädigten Bereich stattfindet. Beide Versuchseinrichtungen sind in *Abbildung 3.10* vergleichend dargestellt.

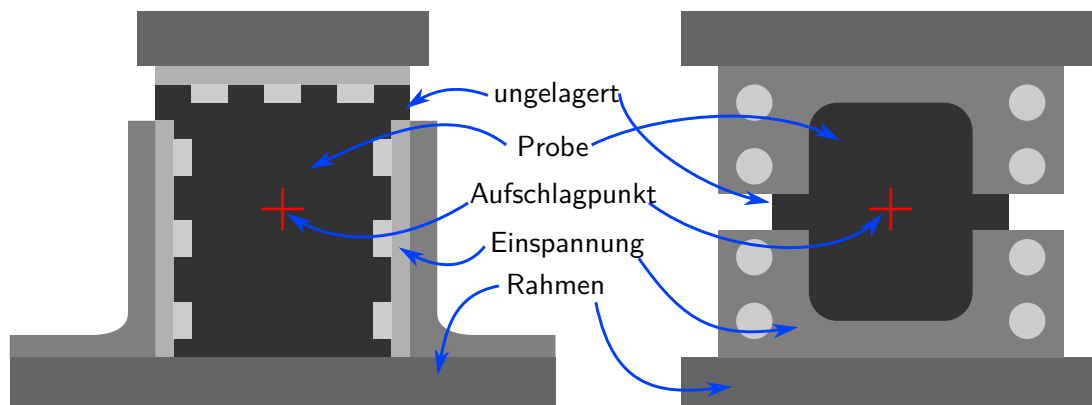


Abbildung 3.10: Prüfeinrichtungen zur Ermittlung der Restdruckfestigkeit nach Impactbeanspruchung; links die in der *AITM1-0010* vorgeschlagene und rechts die verwendete Prüfeinrichtung

4 Ergebnisse

4.1 Zugeigenschaften

4.1.1 Elastizitätsmodul

Zur Ermittlung des faserparallelen Elastizitätsmoduls E_1 und der Zugfestigkeit wird ein unidirektionaler Laminataufbau verwendet. Zur experimentellen Bestimmung der Steifigkeit wird der lineare Anstieg im Dehnungsbereich zwischen 0,05 und 0,25% der Kurve im Kraft-Dehnungs-Diagramm ausgewertet. Die Dehnungsmesswerte werden mit einem berührenden Extensometer der Firma *Zwick/Roell* aufgenommen.

Es werden vier Prüferien getestet, siehe Tabelle 3.5. Alle z-gepinnten Prüferien werden mit Flächendichten von 0,5 und 1,0% verstärkt. Die rechteckigen z-Pins werden jeweils quer und längs zur Faserorientierung ausgerichtet.

Die Ergebnisse des Elastizitätsmoduls sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Im oberen Teil des Diagramms sind die gemessenen Elastizitätsmoduln mit Punkten eingezeichnet. Im Bereich zwischen 0 und 1,0% sind die Punkte mit einer durchgezogenen Geraden interpoliert. Im Bereich zwischen 1,0 und 2,0% wird der Verlauf der Geraden für höhere z-Pin Flächendichten extrapoliert. Im unteren Teil des Diagramms ist der Betrag der Steifigkeitsreduktion gegenüber der unverstärkten Probe in einem Balkendiagramm dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Elastizitätsmodul E_1 von der Geometrie und der Ausrichtung der z-Pins beeinflusst wird. Alle Proben unterliegen einer Degradation des Elastizitätsmoduls, welcher linear mit zunehmendem z-Pin Anteil abfällt. Die Proben mit runden Pins unterliegen einer Abnahme des Moduls um 3 und 8% bis zu einer Flächendichte von 1,0%. Im Vergleich dazu ist bei eckig, längs ausgerichteten Pins lediglich eine äußerst geringe

Abnahme zu erkennen. Diese stellt sich zudem erst bei einer Flächendichte von 1,0% ein. Die quer ausgerichteten eckigen Pins haben die größte Reduktion des Elastizitätsmoduls zur Folge. Bei einer Flächendichte von 0,5% entspricht die Reduktion dem doppelten der Reduktion runder Pins. Durch die Erhöhung der Flächendichte auf 1,0% nimmt die Differenz zwischen runden und eckig, quer eingebrachten Pins ab, ihre Reduktion ist dennoch die höchste aller drei Serien.

Zusätzlich wurden die drei Geraden der linearen Interpolation des Elastizitätsmoduls bis zu einer Flächendichte von 2,0% extrapoliert, um Aussagen über die Reduktion bei höheren Flächendichten treffen zu können. Wie bereits im Kapitel 2.3 erwähnt, ist die Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen z-Pin Flächendichte und Elastizitätsmodul experimentell, numerisch und analytisch mehrfach aufgezeigt worden, weshalb dieser Ansatz verwendet wurde [88, 12, 66, 89]. Der extrapolierte E-Modul zeigt, dass dessen Reduktion signifikant durch die Geometrie und die Ausrichtung von eckigen z-Pins beeinflusst wird. Dabei reduziert sich der Elastizitätsmodul der längs ausgerichteten eckigen Pins bei einer Flächendichte von 2,0% um 3%. Demgegenüber fällt der E-Modul der quer ausgerichteten Pins im Vergleich zu den unverstärkten Proben um über 20% ab. Die Ergebnisse der runden Pins reduzieren sich um 16%.

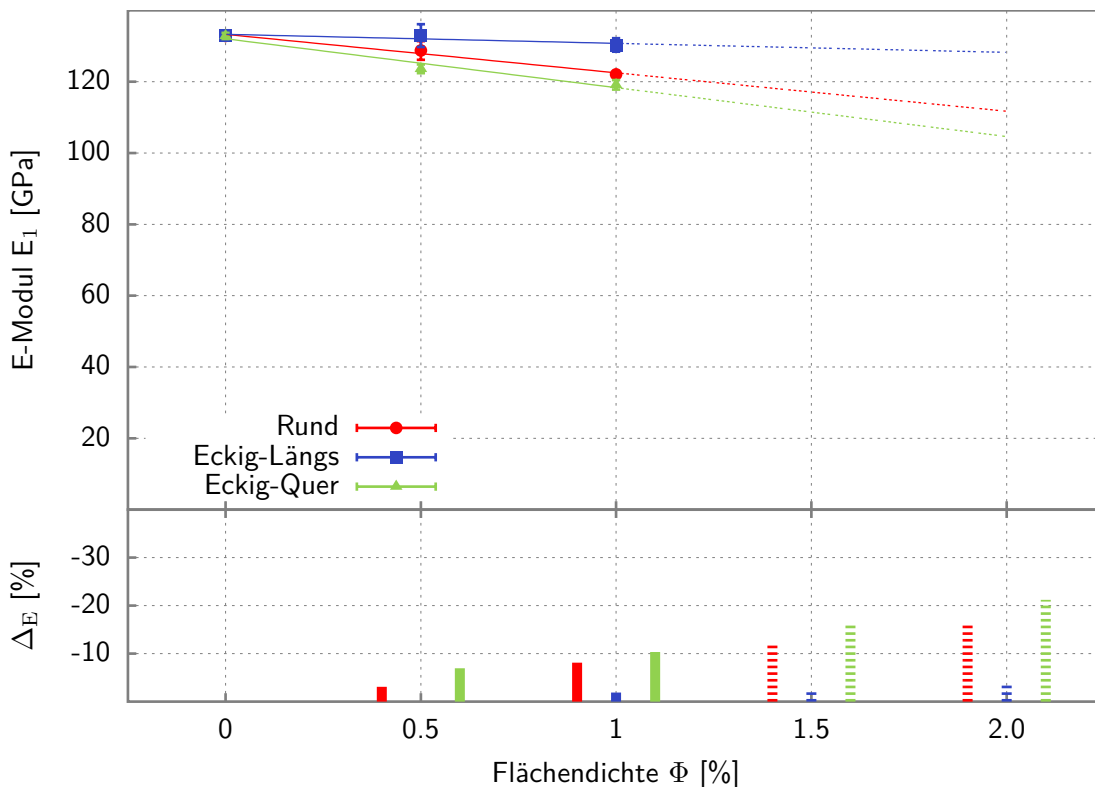


Abbildung 4.1: Experimentell ermittelter Elastizitätsmodul E_1 bei unidirektionalem Laminataufbau

Die Reduktion des Elastizitätsmoduls kann auf die mikromechanischen Störungen infolge der Einbringung von z-Pins zurückgeführt werden. Die einflussreichsten Faktoren sind dabei die Faserumlenkungen und harzreichen Zonen. Aus den gemessenen Werten der harzreichen Zonen lässt sich der Faserumlenkungswinkel berechnen. Maßgeblich für den Elastizitätsmodul eines quasi-isotropen Laminats sind die lasttragenden 0° -Lagen. Die Ergebnisse des unidirektionalen Laminataufbaus zeigen, dass insbesondere die lasttragenden Einzelschichten durch rechteckige Pins weniger als durch runde gestört werden. Weshalb die Steifigkeitsreduktion bei runden Pins um den Faktor 2 über den Werten der eckigen Pins liegt.

Anhand von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen können unterschiedliche, wichtige Parameter bestimmt werden, siehe Abbildung 4.2.

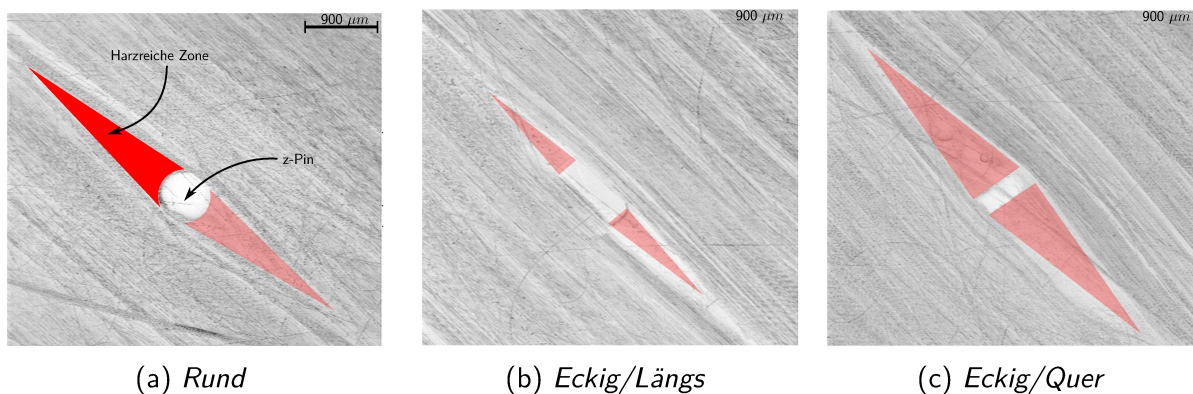


Abbildung 4.2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der harzreichen Zonen

Die Auswertung der REM-Aufnahmen sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Die angegebene Breite entspricht bei runden Pins ihrem Durchmesser und bei eckigen Pins ihrer maximalen Ausdehnung senkrecht zur Faserlängsrichtung. Die geringste Länge der harzreichen Zone wurde bei den längs zur Faser orientierten rechteckigen Pins gemessen. Obwohl die maximale Breite bei runden und rechteckig, quer ausgerichteten Pins dieselbe ist, unterscheiden sich die Längen der harzreichen Zonen um ca. 15%. Über die Trigonometrie kann aus Länge und Breite der harzreichen Zone der Faserumlenkungswinkel errechnet werden. Je größer dieser ist, desto geringer ist der resultierende Elastizitätsmodul E_x und umso höher die Reduktion der Steifigkeit.

Der Volumenanteil der harzreichen Zone beeinflusst ebenfalls den Elastizitätsmodul. Anhand des Einheitszellen-Modells lässt sich der Zusammenhang anschaulich erklären. Aus der Überlagerung der mechanischen Eigenschaften der im Laminat befindlichen Anteile

(Reinharzgebiet, ungestörtes Laminat, z-Pin und Faserumlenkungszone) lassen sich, in Abhängigkeit ihrer relativen Flächenanteile, die mechanischen Eigenschaften des verpinnten Laminats berechnen. Je mehr harzreiche Zonen im Laminat sind, umso größer ist der Anteil von Harz an der gesamten Laminatfläche. Der Elastizitätsmodul vom Reinharz ist gegenüber dem E-Modul vom Laminat um ein vielfaches geringer. Daher nimmt der E-Modul des verpinnten Bauteils ab, wenn der Anteil an harzreichen Zonen zunimmt.

Tabelle 4.1: *Parameter zur Beschreibung der harzreichen Zone um den z-Pin*

Parameter	Einheit	Runde	Eckig/Längs	Eckig/Quer
Länge	mm	7,3	4,5	6,4
maximale Breite	mm	1,0	0,4	1,0
Faserumlenkungswinkel	°	15,7	6,5	9,5
Flächeninhalt mit Pin	mm ²	3,7	1,1	3,4
Flächeninhalt ohne Pin	mm ²	2,9	0,7	3

4.1.2 Zugfestigkeit

Die Ergebnisse der faserparallelen Zugfestigkeit σ_1 verpinnter und unverstärkter Proben ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Bereits niedrige Flächenanteile von z-Pins bewirken eine signifikante Reduktion der Festigkeit. Bei 0,5% Pin Gehalt reduzieren runde Pins die Festigkeit um 10% und eckig, längs ausgerichtete um ca. 6%. Wird ein linearer Zusammenhang zwischen z-Pin Flächendichte und Festigkeit angenommen, so verdoppelt sich bei runden Pins die Festigkeitsabnahme bei einer Steigerung der Flächendichte um 0,5%. Die quer eingebrachten eckigen Pins zeigen einen zu runden Pins identischen Verlauf der Festigkeitsminderung. Bei diesen verdoppelt sich der Betrag der Festigkeitsreduktion erst bei einer Erhöhung der Flächendichte um 1,0%.

Im extrapolierten Bereich der Flächendichte steigt die Reduktion an auf bis zu 6% an. Runde z-Pins bewirken hingegen bereits bei geringen Flächendichten eine signifikante Reduktion der Festigkeit über die Grenzen des Konfidenzintervalls hinaus. Im extrapolierten Bereich nimmt diese um bis zu 17% gegenüber den unverstärkten Proben ab.

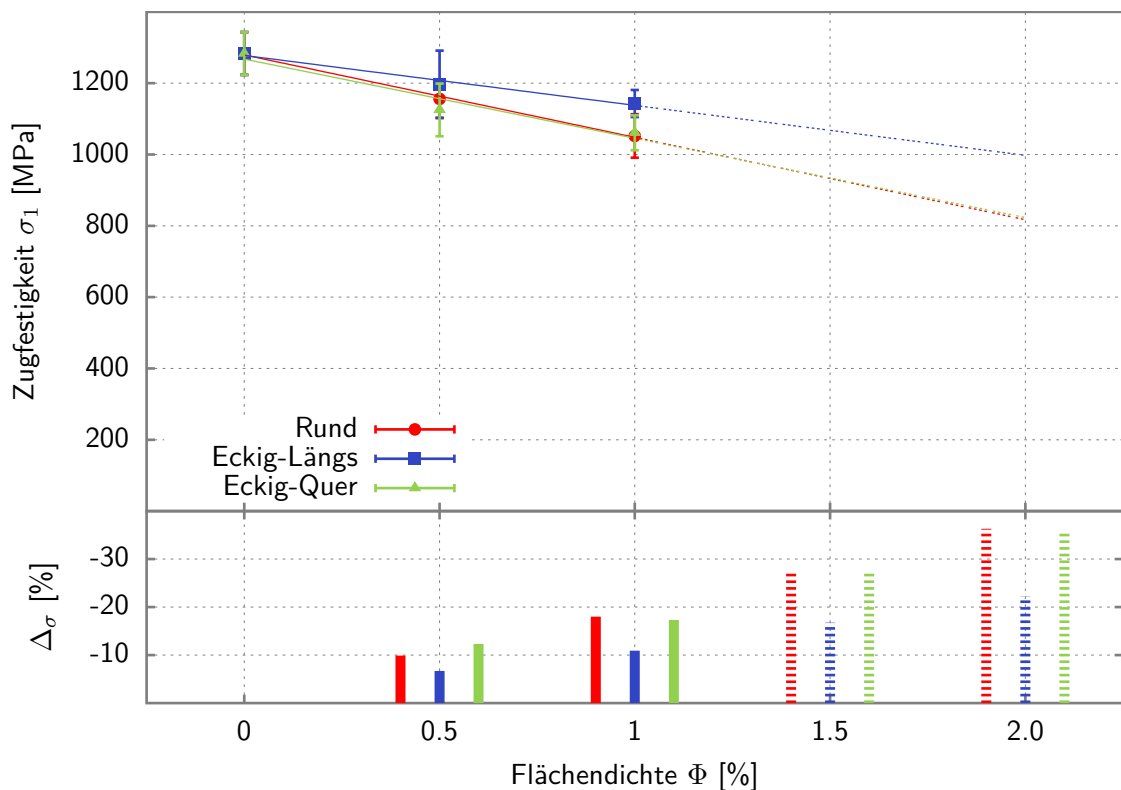


Abbildung 4.3: Experimentell ermittelte Zugfestigkeit σ_1 bei unidirektionalem Laminataufbau

Insbesondere bei der Festigkeit nimmt die Faserumlenkung und der Faserumlenkungswinkel besonderen Einfluss auf die Reduktion. Je größer der Faserumlenkungswinkel ist, desto geringer ist die Festigkeit, da die Lasten einer stärkeren Kraftumlenkung unterliegen. Auf mikromechanischer Ebene bildet sich ein Biegemoment um den z-Pin aus, welches zur Rissinitiierung und Splittung der Fasern führt.

Während des Zugversuchs versagten die verpinnten Proben mit unidirektionalem Laminataufbau nicht durch einen Bruch, dessen Bruchfläche senkrecht zur Belastungsrichtung orientiert ist. Vielmehr bildeten sich Risse aus, die ausschließlich parallel zur Belastungsrichtung verlaufen, siehe Abbildung 4.4. Diese Risse befinden sich immer innerhalb einer Pin-Reihe und spalten das Laminat in mehrere Teile. Die dadurch entstandenen Sublamine können aufgrund der noch immer intakten Fasern weiterhin Kräfte übertragen. Ihr Wert reduziert sich jedoch deutlich gegenüber der intakten Probe.

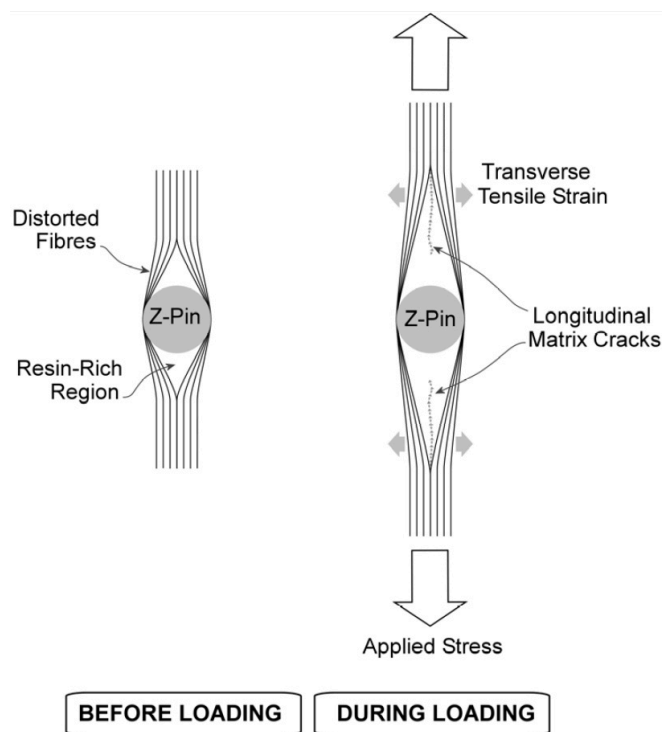


Abbildung 4.4: Reaktionskräfte und Rissbildung im Laminat infolge Zugspannung [2]

4.2 Mode I

Die Risszähigkeit unter Mode I Belastung wurde von verpinnten Laminaten mit runden und rechteckigen Pins ermittelt. Die Proben mit eckigen Pins wurden sowohl mit einer äquivalenten Flächendichte als auch mit äquidistanten z-Pins verstärkt.

4.2.1 Kraft-Weg-Verlauf und Widerstandskurven

In Abbildung 4.5 sind exemplarisch drei Kraft-Weg-Verläufe aus Mode I Versuchen mit verpinnten und unverpinnten Proben dargestellt. Der Versuch verläuft in drei Phasen bei verpinnten und in zwei Phasen bei unverstärkten Prüfkörpern. Die Phase, in der sich die Probe zum aktuellen Zeitpunkt befindet, ist mit Pfeilen und den darüberliegenden römischen Zahlen gekennzeichnet. Innerhalb der Grafik ist der Bereich, indem der Anriss der Probe stattfindet, gesondert hervorgehoben. Die Anrisskraft ist im Diagramm erkenntlich als erster Wendepunkt im linearen Anstieg der Kraft und kennzeichnet die erste Phase des

Versuchs. Sowohl die Anrisskraft als auch die erste Versuchsphase sind bei den dargestellten und übrigen, nicht abgebildeten Proben, identisch. Dies folgt aus der Tatsache, dass die für den Anriss notwendige Kraft von den Matriceigenschaften bestimmt wird. Z-Pins haben dagegen keinen Einfluss auf die Anrisskraft. Im weiteren Verlauf der Prüfung weichen die aufgezeichneten Messwerte der drei Proben voneinander ab.

Der Verlauf der unverstärkten Probe kann als bilineare Kurve approximiert werden. In der ersten Phase steigt diese bis zum Anriss linear an und fällt anschließend in der zweiten Phase bis zum Ende der Prüfung ab. Die Abnahme der Rissfortschrittskraft folgt aus dem größer werdenden Hebelarm. Mit zunehmender Risslänge wird der Hebelarm zwischen Rissfront und Krafteinleitung größer, wodurch sich die notwendige Rissfortschrittskraft reduziert.

Im Vergleich zu den unverstärkten Proben ist der Verlauf bei den verpinnten Prüfkörpern nach dem Anriss multilinear und kommt einer Treppenfunktion gleich. Der Kraft-Weg-Verlauf verpinnter Proben kann in drei Phasen unterteilt werden. In der ersten Phase (I) steigt die Kraft linear mit dem Traversenweg bis zum Anriss an. Unmittelbar nach dem Anriss setzt die zweite, die *entwickelnde Phase* (II) ein. In dieser steigt die Kraft weiterhin an. Der Verlauf ist jedoch, bedingt durch zwischenzeitliche Krafteinbrüche, nichtlinear. Sobald die Rissfront in dieser Phase eine Pin-Reihe durchschritten hat, fällt die Kraft kurzzeitig ab. Woraufhin ein erneuter Kraftanstieg folgt dessen Maximum über dem vorherigen liegt. Durch die dicht beieinander liegenden Pins entsteht ein Brückeneffekt, wodurch die Kräfte über die im Eingriff befindlichen Pins umgeleitet werden. In der *entwickelnden Phase* kann die Kraft trotz Pin-Ablösung weiter ansteigen, da sich mit zunehmender Risslänge mehr z-Pins in der Prozesszone befinden. Dadurch werden die äußeren Kräfte homogener verteilt und die Spannungen an der Rissspitze reduziert. Dieser Effekt wird als *Brückeneffekt* bezeichnet, und ist maßgeblich für eine Erhöhung der Energiefreisetzungsrate bei Mode I Versuchen verantwortlich. Je mehr Pinreihen innerhalb der Prozesszone im Eingriff sind und die äußeren Lasten überbrücken, umso größer sind die übertragbaren Zugkräfte, bzw. desto geringer ist die Spannung an der Rissspitze.

Nach der vollständigen Ausbildung der Brückenzone geht der Versuch von der *entwickelnden Phase* in die dritte Phase, die *stationäre Phase* (III) über. In dieser Phase werden die in der Prozesszone befindlichen Pin-Reihen sukzessive vollständig aus dem Laminat gezogen, sodass sie zur Kraftübertragung nicht mehr beitragen. Gleichzeitig erreicht die Rissspitze jedoch eine neue Reihe von Pins, wodurch sich die Anzahl der gleichzeitig im

Eingriff befindlichen Pins in dieser Phase nicht ändert. Kennzeichnend ist jedoch auch, dass die Kraft mit dem Übergang in die *stationäre Phase* mit zunehmender Risslänge abnimmt. Zwar steigt die Kraft kurzzeitig beim Auftreffen auf eine neue Reihe von Pins an, sobald der Riss diese jedoch durchschritten hat, fällt die Kraft mit der Aufhebung des Stoffschlusses zwischen Pin und Laminat schlagartig ab. Wie bei den unverstärkten Proben ist auch hier der zunehmende Hebelarm für die Kraftreduktion verantwortlich.

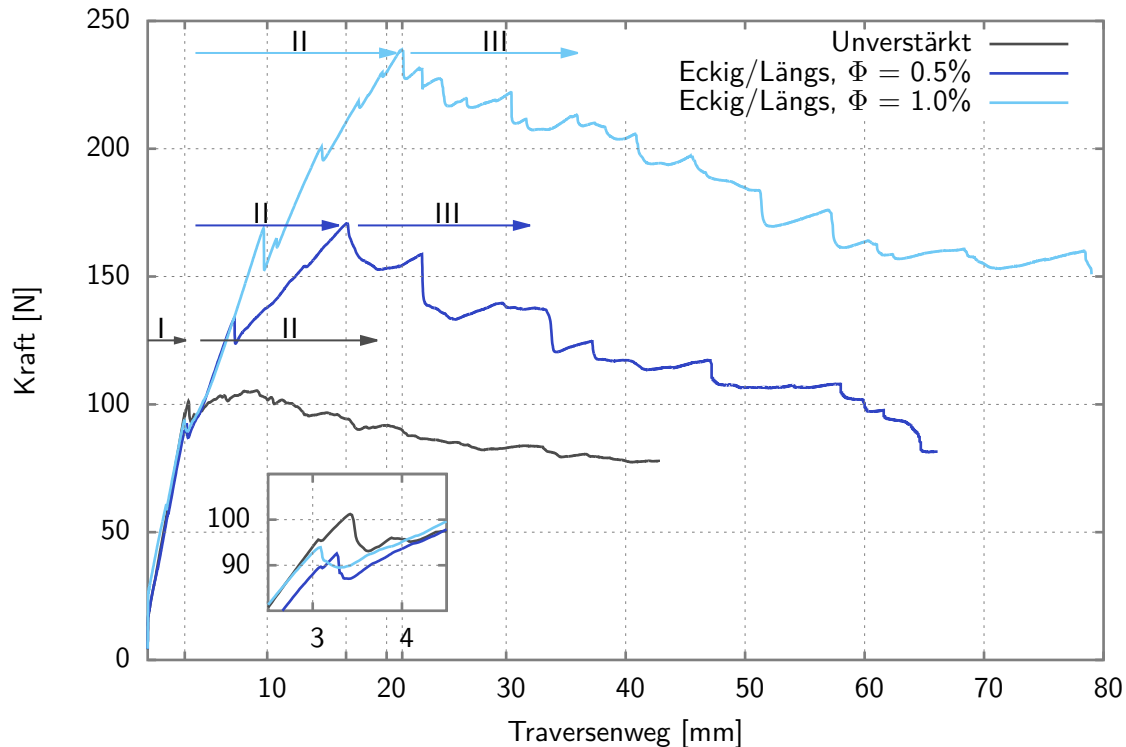


Abbildung 4.5: Einfluss der Flächendichte auf den Kraft-Weg-Verlauf unter Mode I Belastung

Mit Hilfe der während des Versuchs gemessenen Rissfortschrittskraft P und der Risslänge a lässt sich die kritische Energiefreisetzungsrate G_{IC} berechnen. Trägt man diese über der Risslänge a auf, so entstehen Widerstandskurven. Diese geben Auskunft über die tatsächliche Risszähigkeit an jeder gemessenen Risslänge. Exemplarisch sind in Abbildung 4.6 vier Widerstandskurven, auch R-Kurven genannt, gezeigt.

In der Darstellung sind zur Orientierung ebenfalls die Versuchsphasen eingezeichnet. Die erste Phase wird jedoch nicht erfasst, da diese den Kraftanstieg bis zum Anriss darstellt, wohingegen die R-Kurven erst ab der Rissinitiierung aufgezeichnet werden.

Alle Kurven, auch die nicht dargestellten, weisen eine Plateaubildung auf, sobald der Versuch in die *stationäre Phase* übergeht. Dabei wird der Einfluss des Biegemoments

mit Hilfe der korrigierten Balkentheorie auf die Energiefreisetzungsrates herausgerechnet, weshalb diese mit zunehmender Risslänge nicht abnimmt, obwohl die Kraft im Verlauf des Versuchs sinkt, siehe Abbildung 4.5. Während der *stationären Phase* unterliegt die Energiefreisetzungsrates geringen Schwankungen.

Weiterhin unterscheidet sich die Dauer der stationären Phase der Probe mit längs ausgerichteten Pins und einer Flächendichte von 1,0% von der übrigen verpinnten Proben. Die entwickelnde Phase ist kürzer im Vergleich zu den beiden anderen Proben. Damit einhergehend ist die stationäre Phase bei der höchsten Flächendichte eckiger Pins am längsten. Dies ist auf den Pin-zu-Pin Abstand innerhalb der Proben zurückzuführen. Dieser ist bei der Probe mit runden Pins und 1,0% Flächendichte identisch zum Pin-zu-Pin Abstand der eckigen Probe mit 0,5% Flächendichte. Am kleinsten ist dieser bei der größten Flächendichte mit eckigen Pins.

In der entwickelnden Phase zeigt sich zwischen dem Verlauf der Proben mit runden Pins und einer Flächendichte von 1,0% und den Proben mit eckigen Pins und einer Flächendichte von 0,5% eine signifikante Abweichung. Die Anzahl an eingebrachten Pins und der Abstand der Pins zueinander ist bei beiden Prüfkörpern identisch, dennoch nimmt die Risszähigkeit der Probe mit eckigen Pins schneller zu. Unter Einbeziehung, dass sowohl die resultierende Oberfläche als auch die Biegesteifigkeit der im Eingriff befindlichen eckigen Pins kleiner ist als die der runden, unterstützt dieser Verlauf die These, dass die Geometrie des z-Pins die Risszähigkeit des Laminats beeinflusst.

4.2.2 Kritische Energiefreisetzungsrates

Aus den aufgezeichneten Wertepaaren der Kraft und Risslänge lässt sich die kritische Energiefreisetzungsrates berechnen. Bei der Berechnung wurde die Methode der korrigierten Balkentheorie angewendet. Das Verfahren ist in Kapitel 3.4 detailliert beschrieben.

Die berechneten kritischen Energiefreisetzungsrates sind in Abbildung 4.7 dargestellt. Es werden Werte für die Flächendichten von 0,26 bis 1,0% angegeben. Dabei werden die Flächendichten 0,5 und 1,0% genutzt, um die kritische Energiefreisetzungsrates bei äquivalenter Flächendichte zu bewerten. Zusätzlich wird der Einfluss der Anzahl eingebrachter z-Pins bewertet, weshalb bei den eckigen Pins zusätzlich die Flächendichte von 0,26% eingeführt wurde. Dabei entspricht die Anzahl der eingebrachten eckigen Pins derselben Anzahl an

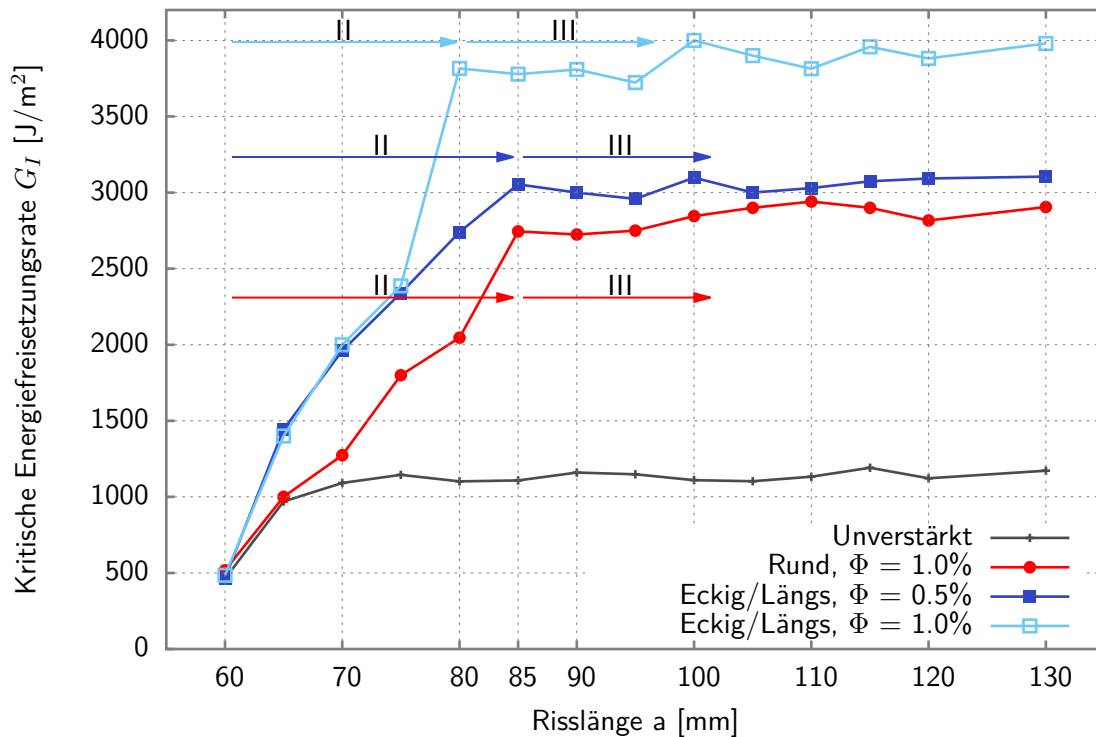


Abbildung 4.6: Vergleichende Darstellung ausgewählter Widerstandskurven

runden Pins bei einer Flächendichte von 0,5%. Demnach ist ebenfalls die Anzahl bei 0,5% eckigen Pins identisch zur Anzahl bei 1,0% runden Pins.

Die kritische Energiefreisetzungsrates der mit runden z-Pins verstärkten Proben wurde gegenüber der unverstärkten Referenzprobe signifikant gesteigert. Dabei nimmt diese mit zunehmender z-Pin Flächendichte linear zu. Bei den Proben mit eckig, längs ausgerichteten z-Pins und den Flächendichten von 0,5 und 1,0%, blau dargestellt, nimmt die kritische Energiefreisetzungsrates mit steigender Flächendichte zu. Im Vergleich zu den runden Pins haben diese jedoch eine frühere Zunahme zur Folge. Die Differenz zwischen der kritischen Energiefreisetzungsrates der runden und längs ausgerichteten z-Pins nimmt ebenfalls mit der Flächendichte zu. Von allen gemessenen Proben erreichen die längs ausgerichteten Pins bei der höchsten Flächendichte den absoluten Maximalwert. Im Vergleich dazu zeigen die quer ausgerichteten eckigen Pins, hellblau dargestellt, keinen eindeutigen Verlauf. Bei einer Flächendichte von 0,5% stimmt die Energiefreisetzungsrates der runden und der quer eingebrachten Pins überein. Wohingegen der Wert der eckigen Pins bei einer Flächendichte von 1,0% deutlich über dem der runden Pins liegt.

Unter Berücksichtigung der eckigen Pins, die äquidistant zu den runden Pins eingebracht

worden sind und eine Flächendichte von 0,26% aufweisen zeigt sich, dass der Verlauf der eckigen Pins nicht linear mit zunehmender Flächendichte ansteigt. In Bezug auf die Referenzproben haben sehr niedrige Flächendichten bereits einen hohen Anstieg der Risszähigkeit zur Folge. Insbesondere die Ergebnisse der längs ausgerichteten Pins, dunkelgrün dargestellt, übertreffen die Erwartungen. Bei der selben Anzahl runder und eckiger Pins ist die Risszähigkeit bei eckigen Pins höher als die runden Pins. Im Vergleich dazu ist die Risszähigkeit der quer eingebrachten Pins, hellgrün dargestellt, niedriger als die der längs orientierten und der runden Pins.

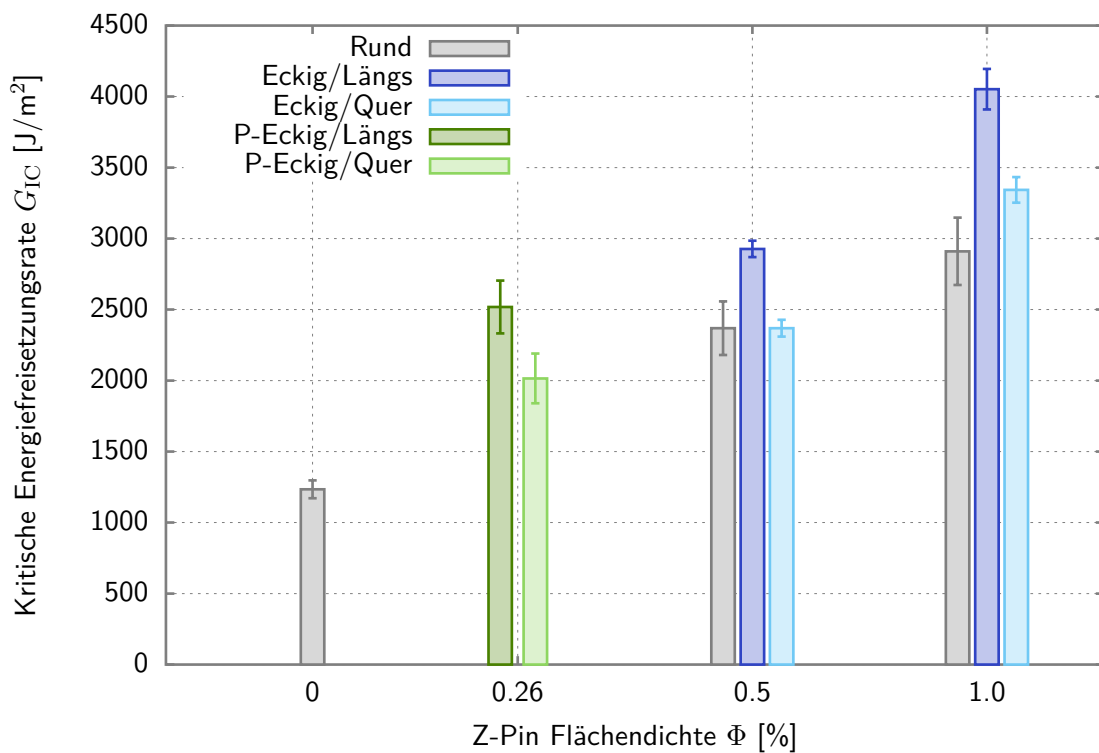


Abbildung 4.7: Kritische Energiefreisetzungsrates G_I der verschiedenen Prüfserien

Weiterhin zeigen die runden und eckigen Pins mit den Flächendichten von 0,5 und 1,0% Gemeinsamkeiten in der Standardabweichung. Diese nimmt mit zunehmender Flächendichte gleichermaßen bei allen Prüfserien zu. Bei den runden Pins ist diese mit mindestens 200 J/m^2 vergleichsweise hoch. Bei den eckigen Pins ist diese weniger als halb so groß und scheint ebenfalls von der Ausrichtung der Pins nicht beeinflusst zu werden. Im Vergleich dazu sind die Standardabweichungen der eckigen Pins mit 0,26% Flächendichte außergewöhnlich hoch und entsprechen den Werten der runden Pins.

Als mögliche Ursache für die Zunahme der Standardabweichung mit steigender Flächendichte könnte die Anzahl der harzreichen Zonen und der Fertigungsprozess in Betracht

gezogen werden. Ausgehend von einem über alle gefertigten Proben konstant bleibenden Volumenanteil an eingebrachten Poren, hat dieser bei einer hohen Anzahl an harzreichen Zonen einen größeren Einfluss auf die Qualität der Proben. Innerhalb der harzreichen Zonen können sich Makroporen bilden, wenn mehrere sehr kleine Poren aneinander grenzen. Diese können einen Großteil des Harzes verdrängen, wodurch der Stoffschluss zwischen dem z-Pin und dem Harz in der harzreichen Zone zum Teil aufgehoben wird. Durch die zunehmende Anzahl dieser Zonen nimmt die Wahrscheinlichkeit der Makroporenbildung zu. Obwohl der Einfluss der Kontaktzone zwischen Pin und Harz auf die Risszähigkeit nicht quantifiziert wurde, ist davon auszugehen, dass dieser ebenfalls zur Risszähigkeitssteigerung beiträgt.

Eine weitere, auf den Fertigungsprozess zurückzuführende Ursache, ist das Aufschwellen des Laminats um den z-Pin herum. Insbesondere bei den runden Pins bilden sich zum Teil Erhebungen in direkter Umgebung zum Pin mit einer Höhe von ca. 0,1 bis 0,2 mm aus. Dadurch nimmt die im Eingriff befindliche Länge des z-Pins ebenfalls zu, weshalb beim reibungsbehafteten Auszug mehr Energie dissipiert.

Hinzu kommt noch ein weiterer Effekt, der während der Versuchsdurchführung beobachtet werden konnte. Bei den längs orientierten und den runden Pins wird der Auszug aus dem Grundlaminat mit einem hörbaren Knacken, ähnlich dem Geräusch beim Bruchversagen, begleitet. Bei den quer ausgerichteten Pins ähnelt der dabei entstandene Ton dem einer eingespannten Blattfeder, die angeregt wird und in einer hohen Frequenz schwingt. Während die quer eingebrachten Pins ruckartig aus dem Grundlaminat herausspringen, brechen die runden und längs ausgerichteten Pins einen Teil des Harzes aus der harzreichen Zone heraus, siehe Abbildung 4.8.

Dies ist ein Indiz dafür, dass die Biegesteifigkeit des z-Pins das Auszugsverhalten beeinflusst. Die quer eingebrachten Pins haben aufgrund ihrer Orientierung relativ zur Biegeachse die geringste Biegesteifigkeit, und deformieren sich daher während des Versuchs stärker als die runden und längs eingebrachten Pins. Die Begutachtungen der harzreichen Zonen unter dem Rasterelektronenmikroskop weisen ebenfalls unterschiedliche Schäden auf. Auf den REM-Aufnahmen in Abbildung 4.9b ist daher kein Bruch an den Kanten zu erkennen. In den Abbildungen 4.9a und 4.9c hingegen sind die ausgebrochenen Kanten des Harzes gut sichtbar. Sobald die durch Biegung induzierte Kontaktkraft zwischen Harz und Pin die Festigkeit des Harzes überschreitet, wird der Bruch initiiert und die im Pin gespeicherte Deformationsarbeit schlagartig freigesetzt. Zusätzlich ist in Abbildung 4.9c beim runden

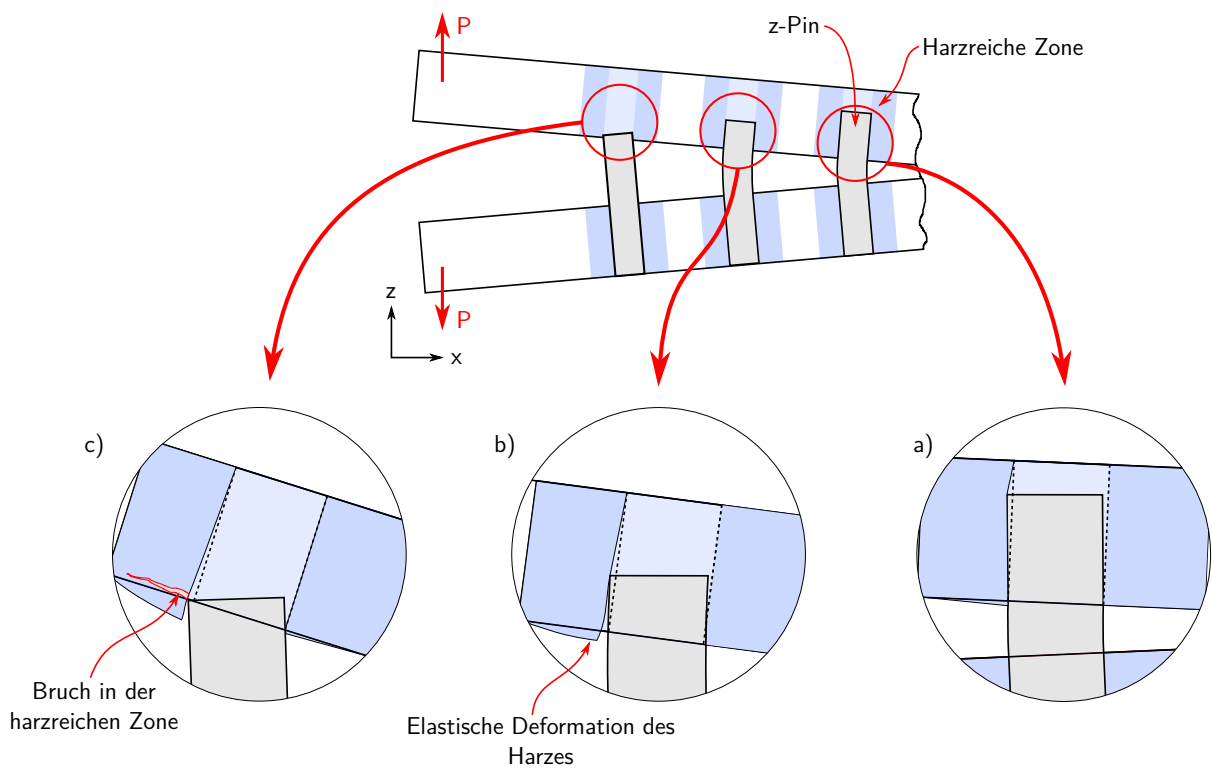


Abbildung 4.8: Schadensbildung unter Mode I Belastung bei runden und rechteckig, längs ausgerichteten z-Pins; a,b) elastische Deformation des Harzes; c) Matrixbruch in der harzreichen Zone

Pin gut erkennbar, dass das Harz während des Auszugs Verformungen unterliegt, da das zurückbleibende Loch im Harz nicht mehr rund sondern oval ist. Im Gegensatz dazu ist die Biegesteifigkeit der quer eingebrachten Pins zu gering, um die Festigkeit des Harzes zu überwinden und einen Matrixbruch hervorzurufen.

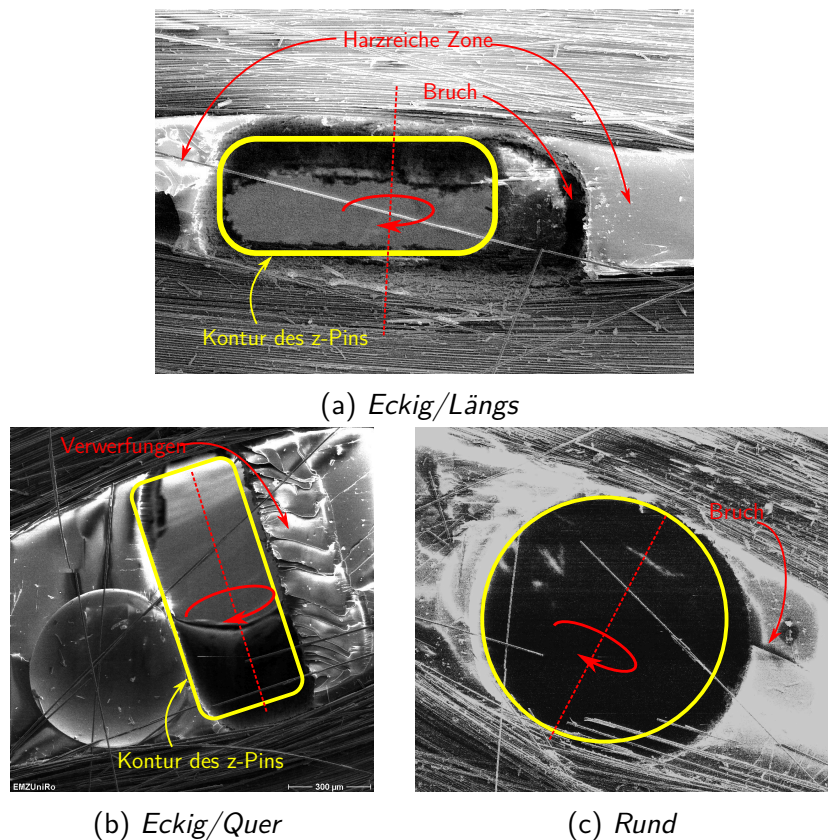


Abbildung 4.9: REM-Aufnahmen der Kanten der harzreichen Zonen nach der Mode I Prüfung

4.3 Pin-Auszugsverhalten

Zur detaillierteren Untersuchung der Mechanismen, die die Risszähigkeit verpinnter Bauteile bewirken, werden Pin-Auszugsversuche durchgeführt. Anhand der Ergebnisse können Aussagen zum Einfluss der Kontaktzone zwischen z-Pin und Grundlaminat sowie dem reibungsbehafteten Auszug getroffen werden.

In Abbildung 4.10 sind zwei Kraft-Weg-Verläufe eines Versuchs mit eckigen und runden Pins dargestellt. Die Anzahl der Pins und ihr Abstand zueinander sind bei beiden z-Pin Geometrien identisch. Im ersten Teil des Diagramms, gekennzeichnet durch den steilen, nahezu linearen Anstieg der Kraft bis zum signifikanten Krafteinbruch unterliegen die Pins einer elastischen Deformation. Bei einigen geprüften Proben trat vor der Ablösung der Pins vom Grundlaminat ein kurzzeitiger Kraftabfall mit erneutem Kraftanstieg auf. Dieser wird durch das vorzeitige Ablösen eines einzelnen Pins hervorgerufen.

Die Ablösung der Pins ist durch den sofortigen Einbruch des Kraftverlaufs gekennzeichnet.

Dabei unterscheidet sich der Betrag, um den sich die Kraft bei eckigen und runden Pins reduziert nicht voneinander, obwohl Quantitätsunterschiede im Krafteinbruch bei runden Pins hinreichend bekannt sind. Mit größer werdendem Durchmesser nimmt die Pin-Oberfläche zu, wodurch eine größere Reibungsfläche zum Laminat entsteht. Allgemein gilt, dass die Größe des Kraftabfalls beim Ablösen der Pins kleiner wird, wenn die Oberfläche der Pins zunimmt.

Der Übergang des Versuchs von der Pin-Ablösung zum reibungsbehafteten Auszug weicht bei den beiden Pin-Geometrien voneinander ab. Runde Pins weisen einen erneuten Kraftanstieg nach der Ablösung auf. Dieser könnte aus den rauen Bruchflächen zwischen Pin und Grundlaminat resultieren. Dabei verkeilen sich die Erhebungen beider Bruchflächen, wodurch beim Abgleiten gegeneinander eine höhere Kraft erforderlich ist. Das Bild in der roten Fläche in Abbildung 4.10 skizziert diesen Sachverhalt. Im Verlauf des Abgleitprozesses nimmt sowohl die Oberflächenrauigkeit als auch die im Eingriff befindliche Pin-Länge ab, wodurch die Auszugskraft sukzessive reduziert wird.

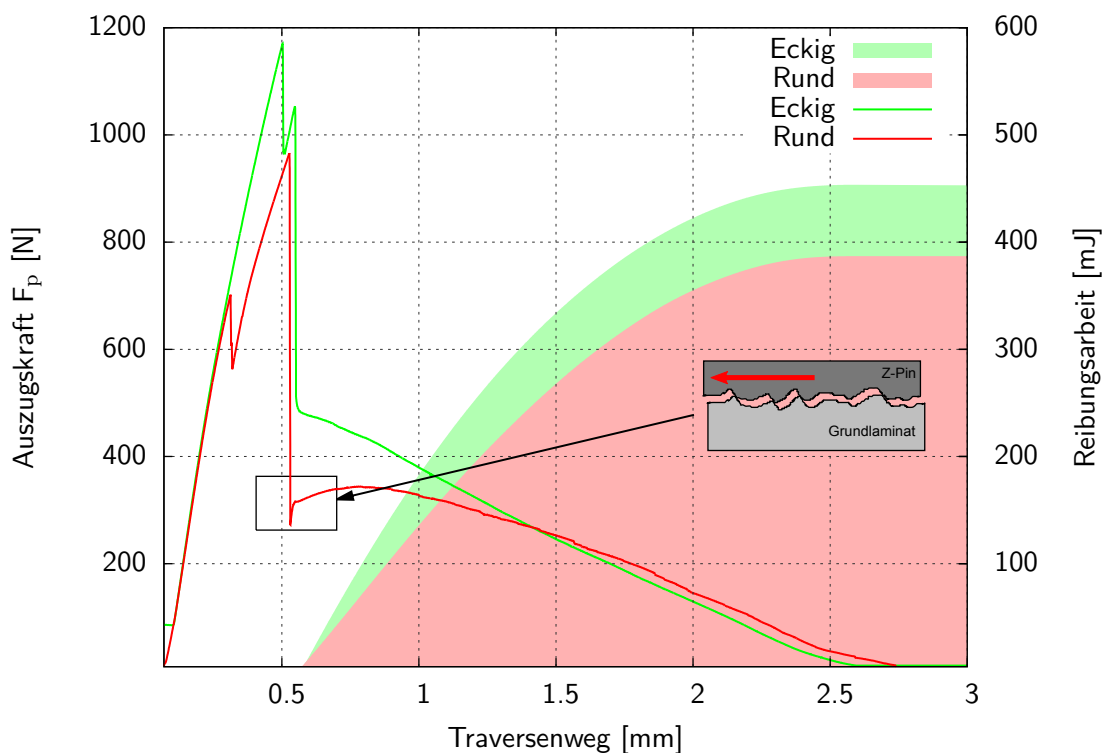


Abbildung 4.10: Exemplarisch dargestellter Kraft-Weg-Verlauf eckiger und runder Pins

In Abbildung 4.10 sind zusätzlich zwei ausgefüllte Kurven dargestellt. Diese bilden sich aus der Kraft, die über den Traversenweg während des reibungsbehafteten Auszugs integriert wird, und ergeben die dissipierte Energie. Die durch eckige Pins dissipierte Energie ist

in etwa 20% höher als bei runden z-Pins. Hauptsächlich ist der Unterschied auf die höhere Auszugskraft und der damit einhergehenden höheren Kraft beim Übergang zum reibungsbehafteten Auszug bei eckigen Pins zurückzuführen. Im weiteren Verlauf fällt die Auszugskraft der eckigen Pins jedoch schneller ab im Vergleich zu runden Pins.

Aus den im Versuch aufgezeichneten Messwerten lässt sich die gemittelte Pin-Auszugskraft auslesen, und die maximale Zugspannung im z-Pin errechnen. Die runden Pins lösten sich im Mittel bei einer Kraft von 1006 N vom Grundlaminat ab. Die Auszugskraft bei den eckigen Pins erhöht sich gegenüber den runden Pins um 130 N auf einen Wert von 1136 N. Aufgrund der unterschiedlich großen Querschnittsflächen beider Pin-Geometrien unterscheiden sich ebenfalls die im Pin wirkenden Zugspannungen. Eckige Pins unterliegen während der Versuchsdurchführung einer maximalen Zugspannung von 323 MPa, wohingegen die Spannung bei runden Pins 136 MPa beträgt, was einer Erhöhung um den Faktor 2,38 entspricht, Abbildung 4.11.

Die Scherspannung in der Schicht zwischen z-Pin und Laminat und die Pin-Auszugskraft stehen in direktem, linearem Zusammenhang. Aus ihr errechnet sich eine durchschnittliche Scherspannung im Ablösungszeitpunkt für runde Pins von $12,43 \pm 1,08$ MPa und für eckige einen Wert von $16,38 \pm 1,13$ MPa. Eckige z-Pins haben demnach eine Erhöhung der Auszugskraft um 13% und der Scherspannung innerhalb der Zwischenschicht um 32% gegenüber runden Pins zur Folge. Die prozentuale Abweichung zwischen Auszugskraft und Scherspannung ergibt sich aus der unterschiedlichen Mantelfläche A in der Prüfkörperdicke.

Die gemessenen Werte bringen zwei grundsätzliche, für die Risszähigkeit immanent wichtige Ergebnisse hervor. Prinzipiell ähneln sich die Verläufe eckiger und runder Pins sehr, sie unterscheiden sich jedoch zum einen in ihrer maximalen Auszugskraft und zum anderen im weiteren Verlauf des Kraftabfalls ab dem Zeitpunkt der Pin-Ablösung. Zur Begutachtung der Bruchflächen im Laminat wurden Rasterlektronenmikroskopie-Aufnahmen angefertigt. In Abbildung 4.12a ist die zu untersuchende Auszugskante skizziert, um die harzfreie Kontaktzone zwischen Pin und Laminat zu untersuchen. Zusätzlich werden Parallel- und Querschnitte der Proben angefertigt, um die Bruchflächen der Kontaktzone, sowie Pin und Reinharzgebiet zu untersuchen, Abbildung 4.12b.

Matrixharz setzt sich unter dem Rasterelektronenmikroskop bei nicht besputterten Proben farblich deutlich ab, da es im Gegensatz zum Laminat elektrisch nicht leitfähig ist. Daher

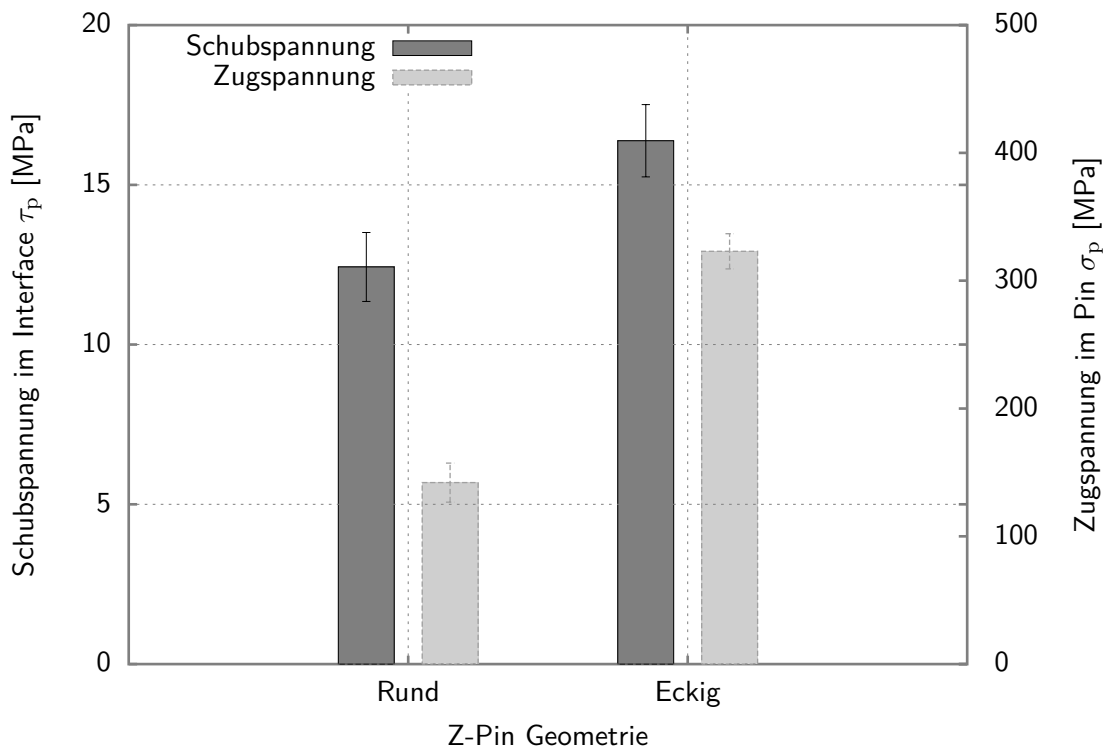


Abbildung 4.11: Einfluss der z-Pin Geometrie auf die Schubspannung in der Schicht zwischen z-Pin und Laminat τ_p und der Zugspannung σ_p im Ablösezeitpunkt

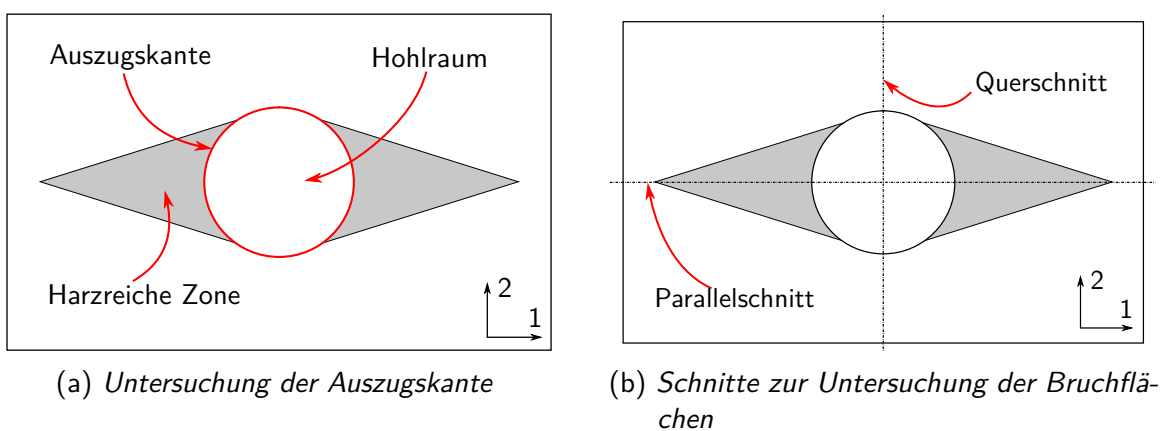
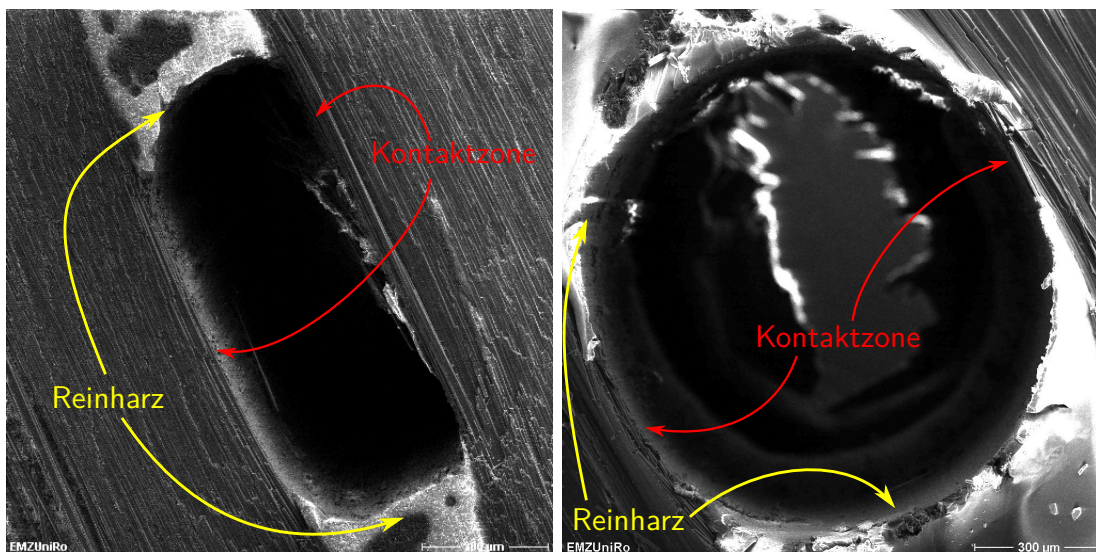


Abbildung 4.12: Vorbereitung der Pin-Auszugsproben für REM-Aufnahmen; a) zur Untersuchung der Auszugskante um den Hohlraum, b) Schnitte zur Untersuchung der Bruchflächen im Kontaktbereich Pin-Laminat und Pin-Harzreiche Zone

werden nicht leitfähige Proben vorbehandelt, indem die zu begutachtenden Flächen mit Gold oder Graphit bedampft werden (besputtern). Im Umkehrschluss kann das Auslassen des Besputterns dazu genutzt werden, um Harzansammlungen zu identifizieren. In Abbildung 4.13 sind die Auszugskanten einer mit runden und eckig, längs ausgerichteten Pins verstärkten Probe dargestellt. Dabei kann eindeutig festgestellt werden, dass die Auszugskante der Probe mit eckigen Pins an der Kontaktzone zum Laminat keine Ansammlung größerer Mengen an Epoxidharz aufweist. Die Zone zieht sich ebenfalls über die gesamte Länge des Pins hin. Im Gegensatz dazu weisen runde Pins eine ähnliche harzfreie Kontaktzone aus, diese ist jedoch um ein vielfaches kleiner.



(a) Auszugskante des eckigen Pins

(b) Auszugskante des runden Pins

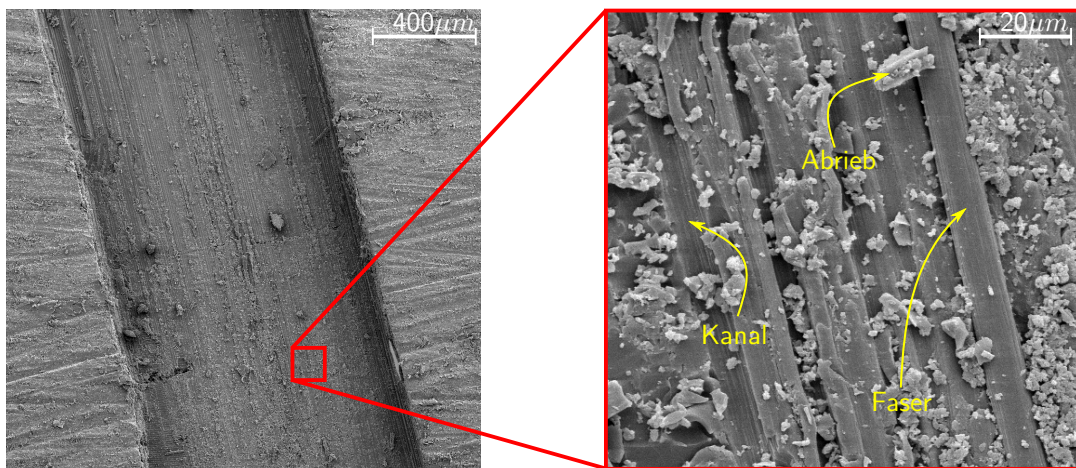
Abbildung 4.13: REM-Aufnahmen der Auszugskanten runder und eckiger z-Pins

Die Aufnahmen der Parallelschnitte sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Im oberen Bild ist die Bruchfläche im Laminat zu sehen. Bereits auf dem Übersichtsbild wirkt diese rau und zerrüttet. In der Vergrößerung sind schemenhaft einzelne Kanäle zu sehen, bei der sich der Pin sauber vom Harz gelöst hat und ausgezogen wurde. Demgegenüber finden sich auch vereinzelt Fasern, die sich vom Pin gelöst haben, was auf eine gute Haftung des Pins zum Harz schließen lässt. Zusätzlich findet sich Matrixharz in zwei Zuständen vor, zum einen kompakt mit geschlossener Oberflächenstruktur, und zum anderen in fein verteilten kleinen Partikeln die sich über die gesamte Bruchfläche nahezu homogen verteilen.

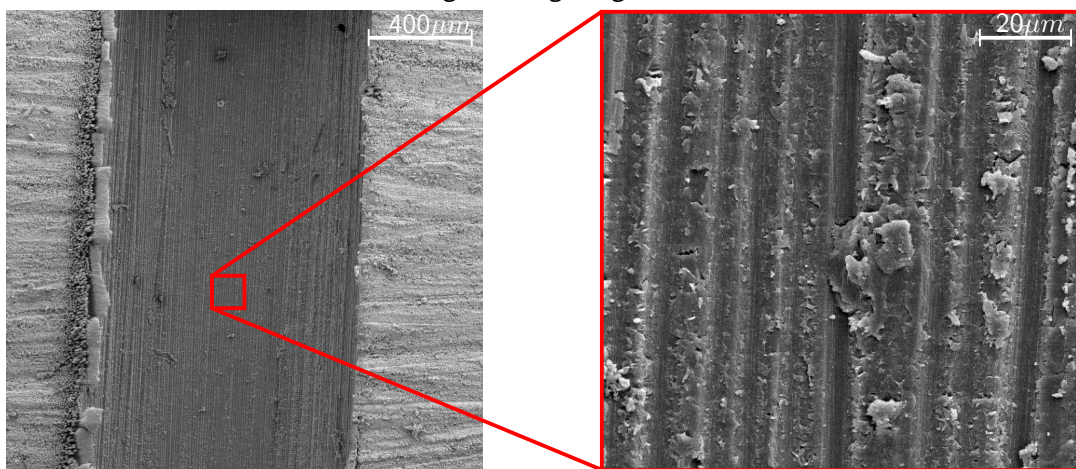
In Abbildung 4.14b sind die Bilder der Parallelschnitte der runden Pins abgebildet. Das Übersichtsbild ist rau und zeigt einige Erhebungen an der Bruchfläche, wirkt jedoch im Vergleich zum Bild des eckigen Pins weniger zerrüttet. In der Vergrößerung ist eine nahezu

überall geschlossene Oberfläche zu sehen, in der sich die Fasern des herausgezogenen Pins als konkave Vertiefungen abzeichnen.

Bemerkenswert bei allen Bildern aus Abbildung 4.14 ist, dass nirgends eine Abzeichnung der darunterliegenden Fasern des Grundlaminats zu erkennen ist. Die Fasern des Pins und des Laminats stehen demnach, unabhängig von der Geometrie des Pins, in keinem direkten Kontakt zueinander. Dennoch ist die Festigkeit der Anbindung in der Kontaktzone zwischen Grundlaminat und eckigem z-Pin höher als bei runden Pins, was ebenfalls durch abgelöste Fasern des z-Pins bestätigt wird.



(a) Parallelschnitt einer Probe mit eckigen Pins; links ist ein Übersichtsbild der Bruchfläche des Laminats und rechts die Vergrößerung dargestellt



(b) Parallelschnitt einer Probe mit runden Pins; links ist ein Übersichtsbild der Bruchfläche des Laminats und rechts die Vergrößerung dargestellt

Abbildung 4.14: REM-Aufnahmen der Bruchflächen eckiger und runder Pins im Parallelschnitt

4.4 Impact- und Schadenstoleranzverhalten

Die Ergebnisse der Impact- und Post-Impact-Eigenschaften von mit z-Pin verstärkten Laminaten werden im folgenden Kapitel dargelegt. Gemäß der im Abschnitt 3.6 beschriebenen Vorgehensweise zur Aufbringung der Schlagschädigung, der Ermittlung der Delaminationsfläche und der abschließenden Bestimmung der Restdruckfestigkeit, werden die Ergebnisse präsentiert.

4.4.1 Schädigung auf der Ober- und Unterseite des Laminats

Nach der Aufbringung der Schlagschädigung findet eine visuelle Betrachtung der äußerlichen Schäden der Laminats statt. Der sich einstellende Schaden auf der Impact- und Gegenseite kann in vier Schadensbereiche eingeteilt werden. Ein direkter Einfluss von z-Pins auf das mit bloßem Auge sichtbare Schadensbild konnte nicht festgestellt werden. Soweit nicht anders vermerkt, ist das beschriebene Schädigungsbild für alle Proben des jeweiligen Energieniveaus gültig.

Im niedrigsten Energiebereich von 17,5 J ist beidseitig keinerlei Schaden auf den Proben sichtbar. Das Schadensbild entspricht demnach den Kriterien des kaum sichtbaren Impactschadens.

Im Energiebereich von 22 bis 26 J treten auf der Impactseite um den Aufschlagpunkt wenige, kurze Risse auf, deren Verlauf unabhängig von der Orientierung der Decklage ist. Ihre Anzahl beschränkt sich auf maximal drei sehr kurze Risse, die erst bei intensiver Begutachtung sichtbar werden. Zusätzlich ist vorderseitig ein kaum sichtbarer Abdruck des Fallbolzens zu erkennen. Rückseitig ist der Schaden stärker ausgeprägt. Es treten nur wenige Risse auf, welche parallel zur Orientierung der Decklage verlaufen. Sie sind mit einer Länge von 20 bis 30 mm bis zu dreimal so lang wie die Risse auf der Vorderseite. Weitere Schädigungen, wie Beulen oder Absplitterungen sind nicht erkennbar. Bis zu einer Impactenergie von 26 J sind die Schädigungen mit bloßem Auge kaum wahrnehmbar.

Bei weiterer Steigerung der Impactenergie zwischen 30 und 44 J ist ein deutlicher Riss auf der Schlagseite zu erkennen. Die Risse verlaufen allesamt zickzack-förmig parallel zur Probenlängsrichtung. Die Risslänge variiert in Bereichen zwischen 50 und 70 mm, siehe

Abbildung 4.15a. Da auf Bildern der Riss kaum erkennbar ist, wurde dieser nachgezeichnet. Der nach dem Aufschlag zurückbleibende Eindruck der Halbkugel des Impactors hat eine Tiefe zwischen 0,2 und 0,5 mm, und führt zu sichtbaren Verwerfungen des Laminats um den Aufschlagpunkt. Die Risslänge auf der Unterseite nimmt ebenfalls deutlich zu. Die Risse verlaufen diagonal durch den verpinnten Bereich mit einer Länge zwischen 60 und 80 mm. Zum Teil erzeugen zwei nah beieinander liegende parallele Risse eine komplette Ablösung der dazwischen liegenden Decklage des Laminats. Auf der Rückseite des Aufschlagpunkts tritt eine Erhebung des Laminats hervor, siehe Abbildung 4.15b.

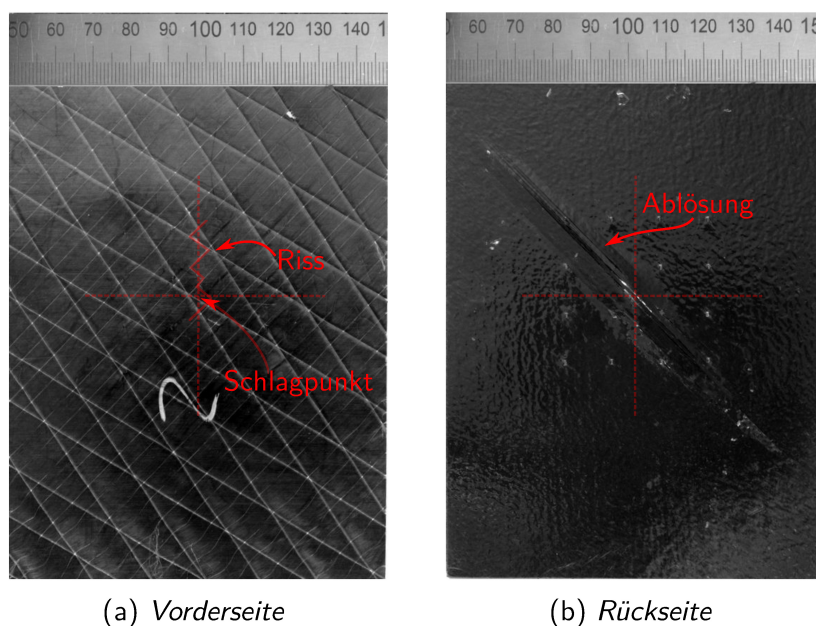
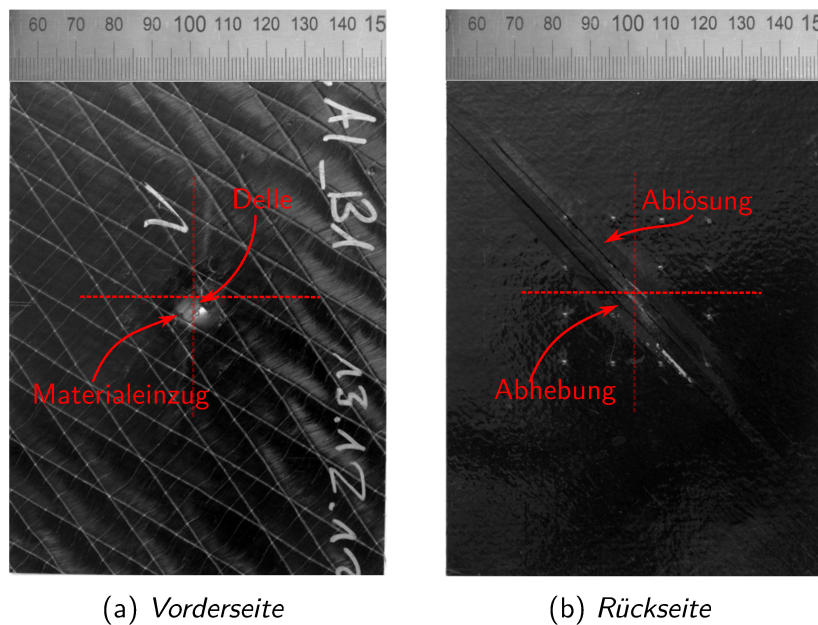


Abbildung 4.15: Schadensbild einer mit 35 J getesteten Impactprobe mit runden Pins, $\Phi = 0,5\%$

Die größte gewählte Impactenergie von 52,5 J erzeugt einen deutlich sichtbaren Schaden auf der Impactseite. Im Laminat zeichnet sich ein Abdruck über dem kompletten Durchmesser der Halbkugel ab, welcher mit Materialeinzug einhergeht. Die Tiefe des Abdrucks beträgt bei allen Proben dieses Energieniveaus ca. 0,8 mm, siehe Abbildung 4.16a. Es sind ebenfalls kaum sichtbare Risse um den Aufschlagpunkt zu sehen, die deutlich kürzer sind als im vorherigen Energiebereich. Ihre Länge schwankt zwischen 15 und 20 mm. Rückseitig bildet sich bei allen Prüfkörpern eine lokale Ablösung der Deckschicht mit einer Breite von ca. 20 mm und einer Länge von 80 bis 100 mm aus. Zusätzlich werden die Ablösungen vom Grundlaminat durch die heraustretenden Fasern, infolge der Dellenausbildung, vorderseitig abgehoben.



(a) Vorderseite

(b) Rückseite

Abbildung 4.16: Schadensbild einer mit 52,5 J getesteten Impactprobe mit runden Pins, $\Phi = 0,5\%$

4.4.2 Kraft-Zeit-Verläufe

Während des Stoßvorganges werden über eine Messdose am Impactschlitten die wirkenden Kontaktkräfte aufgezeichnet. In Abbildung 4.17 sind die Kraft-Zeit-Kurven eines Energieniveaus als Diagramm dargestellt. Im linken Bild sind die Rohdaten des Versuchs dargestellt. Zur besseren Beurteilung der Kurvenverläufe wird für jede Kurve eine Regressionsgrade 6. Grades ermittelt. Aus der Differenz zwischen der Kurve aus der Regression und der gemessenen Werte leiten sich die rechts dargestellten Diagramme ab. Anhand derer lässt sich die Reaktion des Werkstoffs auf die Belastung beurteilen. Es werden für die Impactenergien von 17,5, 26, 35 und 44 J jeweils Kurven der unverstärkten Referenzproben und der mit runden und eckigen Pins verstärkten Proben der Pin-Dichten 0,5 und 1,0% abgeleitet.

Aus den Diagrammen in der linken Spalte kann die maximale Kontaktkraft in Abhängigkeit der Impactenergie ermittelt werden. Diese nimmt mit steigender Impactenergie bis 35 J stetig zu. Eine Steigerung über 35 J hat keine weitere Zunahme der Kontaktkraft zur Folge, da die Bruchfestigkeit der Fasern überschritten wird und ihr Versagen eintritt. Der dabei hervorgerufene Faserbruch kann entweder durch eine große Verformung verursacht werden, wobei die dehnungsinduzierte Spannung an der Probenunterseite die Festigkeit der Faser übersteigt, oder durch die Überschreitung der Faserscherfestigkeit um den Aufschlagpunkt des Impactors. Bei einer Impactenergie von 52,5 J, dessen Verlauf nicht dargestellt ist,

fällt die Kraft nach ihrem Maximum sofort um mehrere Kilonewton ab, da die Anzahl der zerstörten, lasttragenden Fasern im Vergleich zur Impactenergie von 44 J rapide zugenommen hat. Sobald die dabei umgesetzte Energie die Kontaktkraft reduziert hat, sodass die Festigkeit der Fasern nicht überschritten wird, gleicht sich der nachfolgende Kraftverlauf denen niedriger Impactenergien an.

In Abbildung 4.17a rechts sind die Kraft-Zeit-Verläufe verpinnter und unverpinnter Proben bei einer Impactenergie von 17,5 J dargestellt. Die unverstärkte Probe zeigt bereits im Einlaufbereich, gekennzeichnet als der Bereich bis zum Scheitelpunkt bzw. zur Maximalkraft im Diagramm, deutliche Schwankungen im Verlauf. Diese haben zum Teil einen schlagartigen Kraftabfall um bis zu 1,5 kN zur Folge. Im weiteren Verlauf des Versuchs nimmt die Amplitude kontinuierlich ab. Im Vergleich dazu unterliegen die verstärkten Proben, sowohl mit eckigen als auch mit runden Pins, nur geringen Schwankungen im Verlauf. Im Bereich bis 1 ms unterscheiden sich die Amplituden der verstärkten und unverstärkten Proben nur geringfügig voneinander. Im Anschluss daran, bis zum Versuchsende, verbleiben die Amplituden der verstärkten Proben auf einem sehr niedrigen Niveau. Eine eindeutige Dämpfung der Schwingung mit zunehmender Flächendichte von z-Pins kann bei 17,5 J nicht festgestellt werden.

Die hohen Amplituden in der Versuchszeit von 0 bis 1 ms werden durch das Einsetzen von Delaminationen innerhalb des Laminats hervorgerufen. Die von der unverstärkten Probe abweichenden Kurvenverläufe bei $t_i \geq 1$ ms resultieren daher, dass das zuvor initiierte Delaminationswachstum durch die 3D-Verstärkung verlangsamt oder unterbunden wird. Im Gegensatz dazu können die Delaminationen im unverstärkten Prüfkörper ungehindert wachsen.

Im Vergleich zu den Kraft-Zeit-Verläufen der Impactproben mit 17,5 J nehmen die Amplituden der Kraft und die Häufigkeit der Schwingungen mit zunehmender Impactenergie zu, siehe Abbildung 4.17b, 4.17c und 4.17d. Das Zeitfenster, in denen große Kraftsprünge gemessen wurden, erweitert sich ebenfalls mit steigender Impactenergie, sodass die Schadensinitiiierung und das Schadenswachstum weit über den Einlaufbereich hinausgehen. Gleichzeitig heben sich die Schwankungen im Verlauf der Kurven immer deutlicher voneinander ab und zeigen, dass mit zunehmender Flächendichte von z-Pins die Amplitude der Schwingungen reduziert werden, siehe insbesondere Abbildung 4.17c. Anhand derer kann vermutet werden, dass die Delaminationsfläche innerhalb des Laminats durch die Einbringung von z-Pins gegenüber den unverstärkten Proben kleiner ist.

In Abbildung 4.17d sind rechts die Kurven bei einer Impactenergie von 44 J dargestellt. Bis 2 ms sind alle Kurvenverläufe nahezu identisch, sowohl die Schadensinitiierung als auch die eintretenden Faserbrüche sind gleich.

Nachdem jedoch keine weiteren Fasern mehr infolge des Impact durchtrennt werden, unterscheiden sich die Kurvenverläufe der unverstärkten und verstärkten Proben erneut voneinander. Die Amplituden sind sowohl bei den runden als auch bei den eckigen Pins mit einer Flächendichte von 1,0% am niedrigsten.

Im Allgemeinen kann aus den Kurven geschlossen werden, dass z-Pins die Initiierung von Schäden im Laminat nicht unterbinden können. Sie haben ebenfalls keinen Einfluss auf die maximalen Kontaktkräfte während des Versuchs. Allerdings können sie das Delaminationswachstum gegenüber den unverstärkten Proben vermindern.

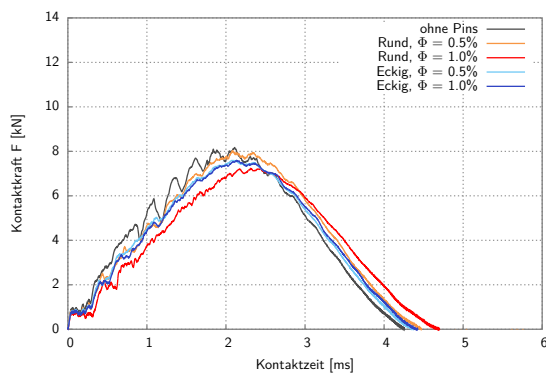
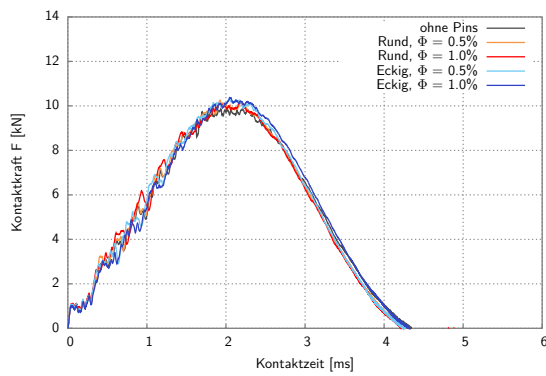
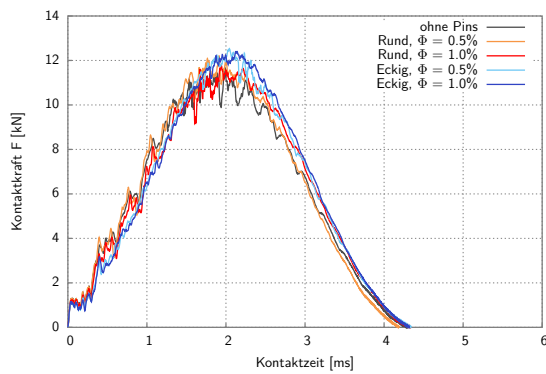
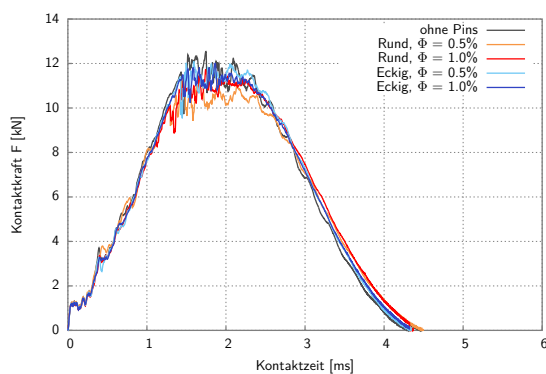
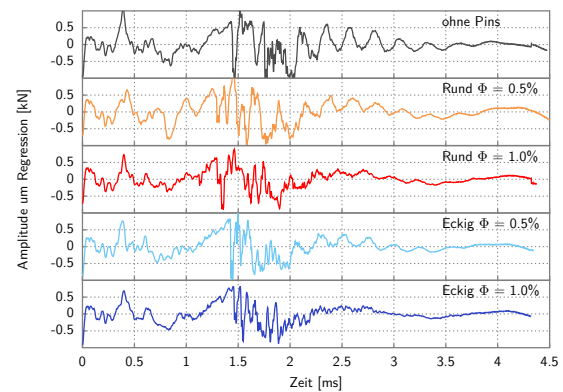
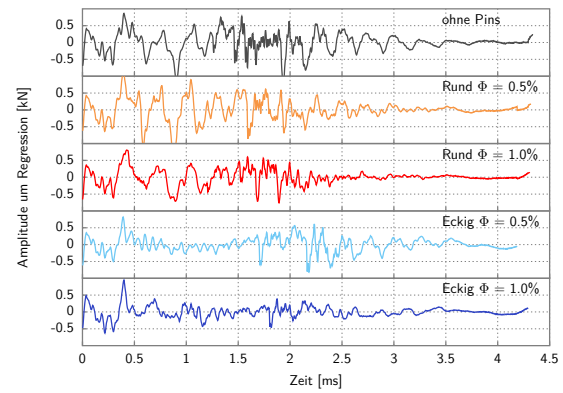
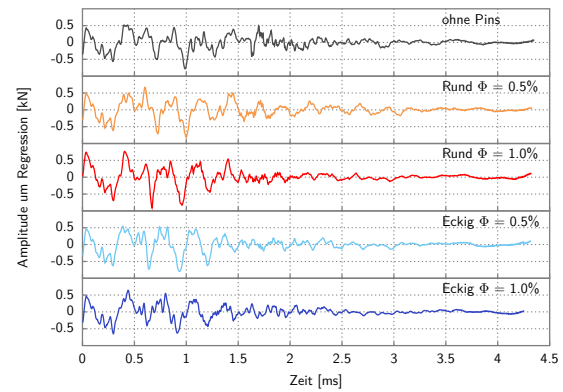
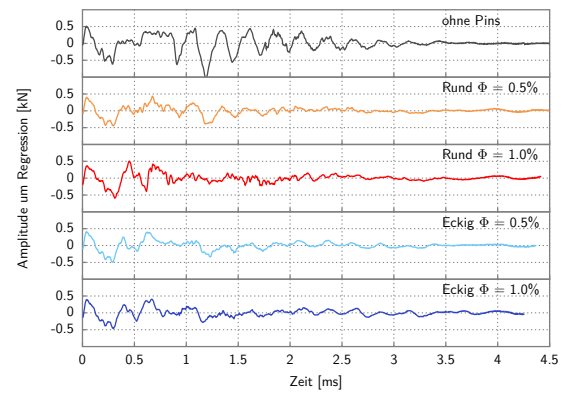
(a) $E_i = 17,5 J$ (b) $E_i = 26 J$ (c) $E_i = 35 J$ (d) $E_i = 44 J$ 

Abbildung 4.17: Gegenüberstellung der Kraft-Zeit-Verläufe aus den Impactversuchen

4.4.3 Zerstörungsfreie Prüfung der Delaminationsfläche

Die Delaminationsfläche innerhalb des Werkstoffs wird mit Hilfe von Ultraschall C- und D-Bildern ausgewertet. Dabei kann jeweils nur die projizierte Fläche der Delaminationen ausgewertet werden. In Abbildung 4.18 sind qualitativ die projizierten Delaminationsflächen von unverstärkten und verpinnten Proben dargestellt. Zur besseren Beurteilung der Schadensfläche wurde lediglich ihr Umriss eingezeichnet. Horizontal sind unterschiedliche Materialmodifikationen bei gleicher Impactenergie von unverstärktem Laminat bis eckig verpinnten Proben abgebildet. Vertikal steigt die Impactenergie von oben nach unten an.

Mit zunehmender Impactenergie wird die gemessene Delaminationsfläche der unverstärkten Proben größer. Ihre Kontur ändert sich dabei ebenfalls. Zu Beginn ist diese noch annähernd rund, Abbildung 4.18a, und wird schließlich länglicher und oval, Abbildungen 4.18d und g. Die Delaminationsfläche und die Kontur der Delamination ändert sich für die mit runden und eckigen Pins verstärkten Proben gleichermaßen.

Bei der Delaminationsfläche fällt insbesondere ihre signifikante Reduktion durch den Einsatz von z-Pins auf. Dabei ist diese bei eckigen Pins nochmals deutlich geringer als bei runden. Die Kontur der Delaminationen wandelt sich bei den verpinnten Proben im Vergleich zu den unverstärkten ebenfalls erst bei höheren Impactenergien um.

Die typische kreisrunde, lüfterartige Kontur (*fan shape*) der Delamination, die infolge der Impactbelastung auftritt, konnte bei keiner der untersuchten Proben festgestellt werden. Vielmehr wurde ihre Kontur länglicher.

Im oberen Bereich der Abbildung 4.19 ist die Delaminationsfläche über der Impactenergie unverstärkter und mit eckigen oder runden z-Pins verstärkter Prüfkörper dargestellt. Die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen sind dabei als Punkt im Diagramm eingezeichnet. Die eingezeichneten Geraden leiten sich aus der linearen Regression der Messwerte ab. Im unteren Teil des Diagramms ist in Balkenform die Reduktion der gemessenen Delaminationsfläche, bezogen auf die gemessene Fläche des unverstärkten Referenzprüfkörpers, dargestellt.

Alle Proben weisen eine lineare Abhängigkeit zwischen Impactenergie und Delaminationsfläche auf. Mit zunehmender Energie nimmt die detektierte Fläche der Delaminationen zu. Über alle Energielevel hinweg sind die Messwerte der unverstärkten Proben am Höchsten

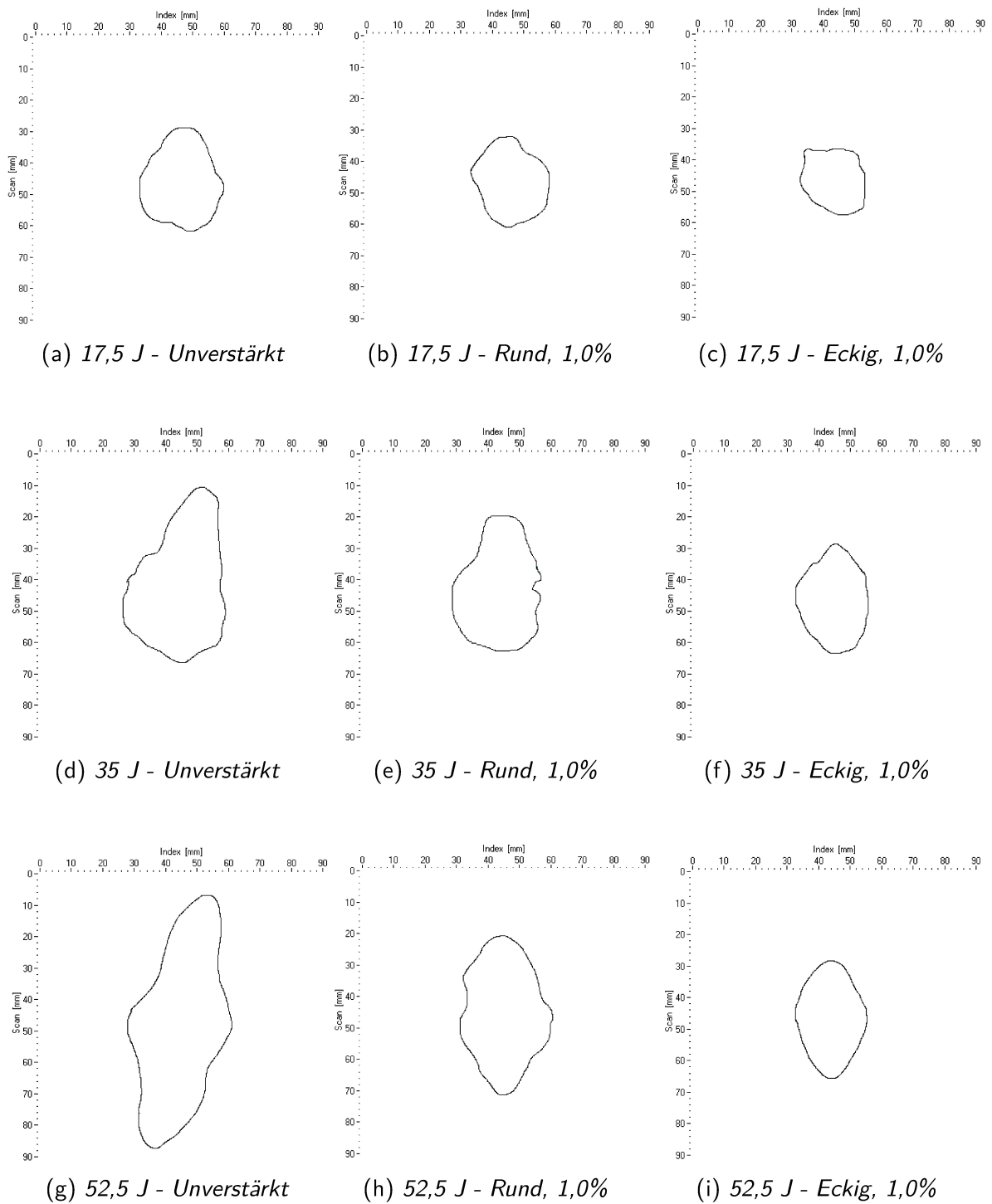


Abbildung 4.18: Projizierte Delaminationsfläche aus Ultraschalluntersuchungen. Von links nach rechts: Unverstärkte, mit runden und eckigen z-Pins verstärkte Laminats. Die Impactenergie steigt von oben nach unten an

und die der eckigen Pins mit einer Flächendichte von 1,0% am Niedrigsten. Dabei reduziert sich die Schadensfläche im Durchschnitt um ca. 60%. Die Delaminationsflächen der runden Pins mit $\Phi = 1,0\%$ und der eckigen Pins mit $\Phi = 0,5\%$ sind identisch über das gesamte Energiespektrum und reduzieren sich gegenüber der Referenzprobe um ca. 40%. Die Proben mit runden Pins der geringsten Flächendichte haben den niedrigsten Einfluss aller verpinnten Proben auf das Delaminationwachstum. Im Durchschnitt liegt ihr gemessener Wert in etwa 10% unter denen der Referenzprobe. Im Vergleich dazu sind die Proben mit eckigen Pins und einer Flächendichte von 0,26% mit einer Reduktion von ca. 13% effektiver in der Unterbindung des Delaminationwachstums.

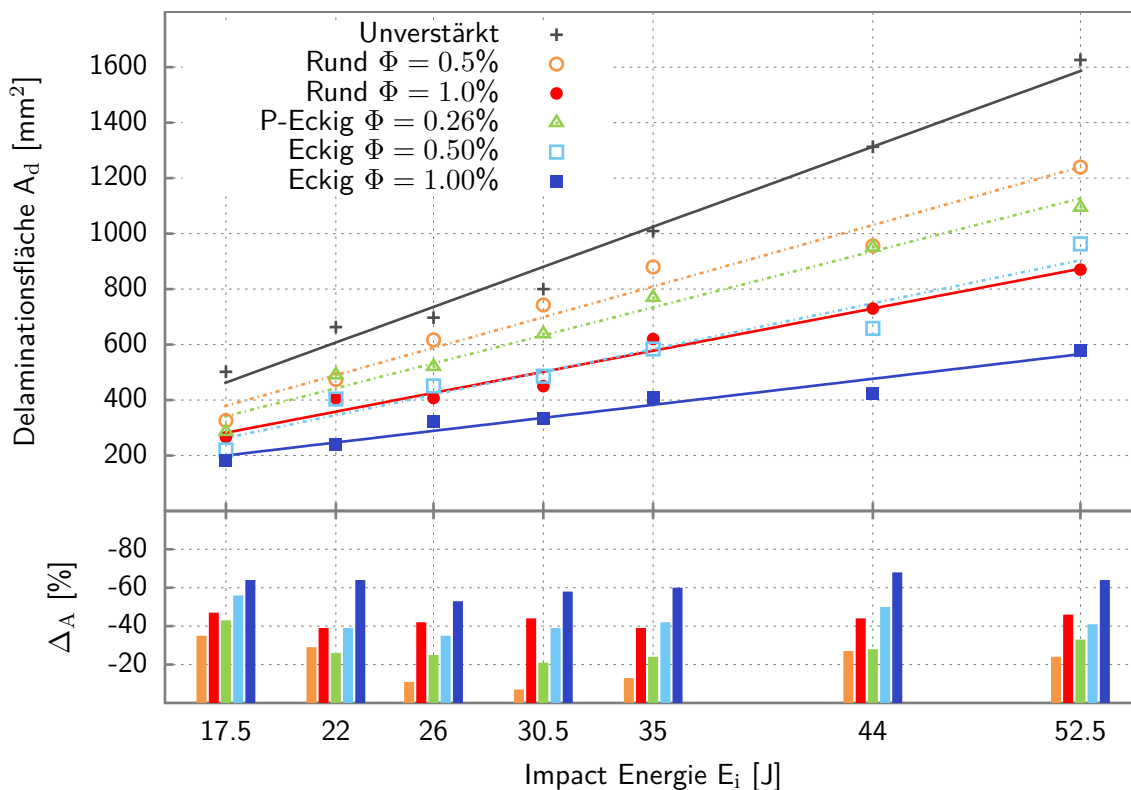


Abbildung 4.19: Delaminierte Fläche nach Impactbelastung in Abhängigkeit der Impactenergie

Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass z-Pins eine signifikante Reduktion der Delaminationsfläche infolge einer Impactbeanspruchung zur Folge haben. Zum anderen stellt sich ebenfalls heraus, dass ihre Quantität deutlich von der Geometrie des z-Pins beeinflusst wird. Die Ergebnisse der eckigen Pins bei $\Phi = 1,0\%$ können darauf zurückgeführt werden, dass der Abstand der Pins zueinander am Kleinsten und ihre Anzahl am Höchsten ist. Unterstützt wird diese Vermutung durch die Ergebnisse der runden Pins mit $\Phi = 1,0\%$ und der eckigen Pins mit $\Phi = 0,5\%$. Bei den beiden Prüferien ist die Anzahl der eingebrachten Pins und ihr Abstand zueinander identisch, ebenso wie ihre gemessenen Delaminationsflächen. Ungewöhnlich in diesem Zusammenhang sind daher die Messwerte beider Prüferien

mit der niedrigsten Flächendichte, wobei die eckigen Pins effektiver als die runden Pins sind, trotz gleicher Anzahl und Abstand. Bezogen auf die Flächendichte kann aus den Messwerten interpretiert werden, dass eckige z-Pins bei gleicher Flächendichte dem Delaminationswachstum unter Impactbelastung doppelt so effektiv entgegenwirken. Die Gültigkeit dieser Aussage beschränkt sich dabei jedoch auf die Grenzen dieser Versuchsserie.

4.4.4 Dissipierte Energie während des Impactvorgangs

In Abbildung 4.20 ist die durch eine Impactbelastung hervorgerufene Delaminationsfläche über die während des Versuchs dissipierte Energie aufgezeichnet. Diese lässt sich über die Geschwindigkeitsdifferenz des Impacters zum Zeitpunkt des Aufpralls und nach dem Aufprall berechnen. Die Messwerte sind als Punkte im Diagramm eingezeichnet. Aus ihnen lässt sich durch die Vorgabe einer logarithmischen Funktion eine Regressionskurve errechnen. Es werden die selben Prüfserien wie zuvor bei der Auswertung der Delaminationsfläche verwendet.

Die Abstufung der Kurven im Diagramm ist zu denen in Abbildung 4.19 zur Aufschlüsselung der Delaminationsfläche in Abhängigkeit der Impactenergie äquivalent. Die Kurve der unverstärkten Proben zeigt, dass die resultierende Delaminationsfläche im vorgegebenen Bereich der dissipierten Energie am höchsten ist. Dem gegenüber haben eckige Pins mit der größten Flächendichte die geringste Delaminationsfläche zur Folge. Die Kurve der eckigen Pins zeigt im Vergleich zur Referenzprobe einen kurzen Anstieg und flacht im weiteren Verlauf sehr schnell ab. Verglichen mit dem vorherigen Diagramm sind die Verläufe der Regression der Proben mit runden Pins mit $\Phi = 1,0\%$ und der mit eckigen Pins mit $\Phi = 0,5\%$ nicht exakt deckungsgleich. Vielmehr wird bei eckigen Pins ein größerer Anteil an dissipierter Energie dazu aufgewendet, um das Delaminationswachstum fortzuführen. Im Gegensatz dazu ist der Verlauf bei den Proben mit eckigen z-Pins und der niedrigsten Flächendichte umgekehrt, wobei weniger Energie für das Risswachstum genutzt.

Weiterhin lässt sich anhand des Diagramms feststellen, ob z-Pins die Quantität der dissipierten Energie im Versuch beeinflussen. Im unteren Energiebereich zwischen 0 und 10 J ist die dissipierte Energie der verstärkten Proben deutlich geringer als die der Referenzproben. Am wenigsten Energie wird dabei durch die eckigen Pins umgewandelt, wobei die Werte der Proben mit runden Pins im 95%-Konfidenzintervall der eckigen

liegen.

Im oberen Bereich der dissipierten Energie ab 20 J unterscheiden sich die Prüfserien kaum noch voneinander. Im Diagramm ist der Bereich der dissipierten Energie der Proben, die mit einer Impactenergie von 44 und 52,5 J getestet wurden, grau hinterlegt. Unabhängig davon, ob die Proben verstärkt oder unverstärkt sind, weicht ihre im Versuch dissipierte Energie kaum voneinander ab. Dafür treten große Unterschiede zwischen den Serien bezüglich der gemessenen Delaminationsfläche auf.

Anhand der Ergebnisse lässt sich belegen, dass durch den Einsatz von z-Pins weniger dissipierte Energie zum Delaminationswachstum umgesetzt wird. Insbesondere bei eckigen z-Pins wird für das Wachstum weniger Energie umgesetzt als bei runden Pins. Ausgenommen davon ist die Prüfserie der eckigen Pins mit einer Flächendichte von $\Phi = 0,5\%$.

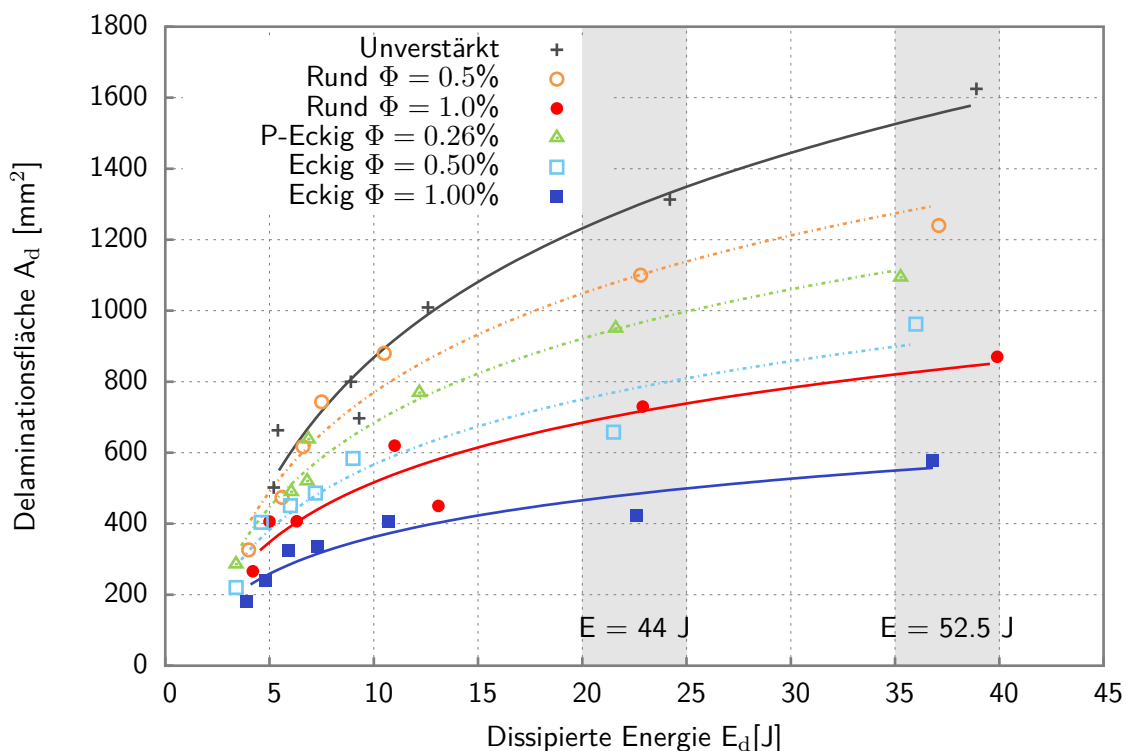


Abbildung 4.20: Delaminationsfläche in Abhängigkeit der beim Impact dissipierten Energie

Die Schädigungen infolge Impactbeanspruchung setzen sich zusammen aus diversen Schädigungen, wie z.B. Matrixrisse, Zwischenfaserbrüche, Delaminationen und Faserbrüche. Bei der äußeren Begutachtung der Proben konnte kein Unterschied zwischen dem ausgebildeten Schaden und dem Vorhandensein von z-Pins festgestellt werden. Demnach kann vermutet werden, dass Schädigungen wie Matrixrisse, Zwischenfaserbrüche und Faserbrüche in allen

Proben gleichermaßen auftreten. Geringfügige Abweichungen entstehen jedoch, da aufgrund der Pins die Steifigkeit des Laminats in den x,y,z-Richtungen beeinflusst wird.

Ausgehend von einem gleichmäßigen Auftreten und Vorhandensein dieser Schäden, müssen die Unterschiede der Energieumwandlung im Wachstum der Delaminationen liegen. Bei den unverstärkten Proben kann ein Riss nach seiner Entstehung ungehindert zwischen den Laminatschichten wachsen. Bei den verstärkten Proben hingegen kann dieser nur soweit ungehindert wachsen, bis die Rissspitze auf die z-Pins trifft. Ist die zur Verfügung stehende Energiemenge gering, so kann das Risswachstum gestoppt werden. Andernfalls existieren zwei Möglichkeiten zur Fortsetzung, entweder der Riss durchschreitet den Pin oder er ändert seine Wachstumsrichtung und verläuft senkrecht entlang des Pins und um diesen herum. Der erstgenannte Fall ist bei großen Pindurchmessern, wie in dieser Arbeit verwendet, unwahrscheinlich, da der Pin senkrecht zu seiner Längsachse durchtrennt werden müsste. Zu erwarten ist daher, dass der Riss seine Wachstumsrichtung ändert und zwischen z-Pin und harzreicher Zone wächst, wobei der Stoffschluss aufgehoben wird.

Aus der zuvor genannten Erklärung lässt sich einerseits schlussfolgern, dass insbesondere die Anzahl der eingebrachten Pins die Umwandlung der dissipierten Energie in Delaminationswachstum beeinflusst. Andererseits muss das Delaminationswachstum unter Impactbelastung über weitere Faktoren als nur der Anzahl an z-Pins beeinflusst werden. Bei den Proben mit runden Pins ($\Phi = 0,5\%$) und eckigen Pins ($\Phi = 0,26\%$) kann der abweichende Verlauf der Kurven nicht anhand der Anzahl an z-Pins begründet werden, da diese bei beiden Proben identisch ist. Ebenfalls kann der Einfluss der Oberfläche ausgeschlossen werden, da die eckigen Pins, absolut gesehen, eine geringere Oberfläche aufweisen als die runden Pins. Ansonsten müsste die Delaminationsfläche bei den eckigen Pins größer sein. Eine mögliche Erklärung kann auf Basis des Belastungsmodus entwickelt werden. Während der Impactbelastung unterliegt das Risswachstum einer reinen Mode II Belastung. Die Harztaschen sind bei runden z-Pins größer und ausgeprägter als bei eckigen Pins. Während der Mode II Belastung verschieben sich die durch eine Delamination getrennten oberen und unteren Sublamine relativ zueinander. Die z-Pins wirken dieser Bewegung in gewissem Maße entgegen, können jedoch auch das Harz der harzreichen Zone plastisch deformieren und aus dieser herausdrücken. Sehr dünne Pins können während dieser Belastung abgeschert werden, bei den verwendeten Pins konnte dieses Verhalten jedoch nicht vernommen werden. Mit zunehmender Relativbewegung der Sublamine zueinander, drücken die Pins so viel Harz heraus, bis nahezu vollständiger Kontakt zwischen Pin und umgelenktem Laminat

entsteht. Durch die Größe ihrer Harztaschen ist der Bewegungsfreiraum runder z-Pins, im Gegensatz zu dem eckiger Pins, größer. Sobald schließlich kein Harz mehr verdrängt werden kann, muss der z-Pin deformiert werden. Dabei ist die Verformung der eckigen Pins S-förmig und nicht reversibel. Unter der dabei wirkenden Schubbelastung entstehen Risse senkrecht zur Laminebene. Bei den runden Pins konnte nach dem Versuch keine bleibende Deformation oder Rissbildung im Pin festgestellt werden. Da durch die Spaltung der eckigen Pins ebenfalls Energie umgesetzt werden muss, könnte dies die Ursache für die geringere Delaminationsfläche sein.

4.4.5 Restdruckfestigkeit nach Impactbeanspruchung

Im Anschluss an die zerstörungsfreie Prüfung und Ermittlung der projizierten Delaminationsfläche innerhalb der Proben wurde die Restdruckfestigkeit nach Impact gemessen.

In Abbildung 4.21 sind im oberen Teil die gemessenen Restdruckfestigkeiten σ_r der getesteten Prüfserien mit verstärkten und unverstärkten Proben dargestellt. Diese sind über den Impactenergiebereich von 17,5 bis 52,5 J aufgetragen. Die y-Achse ist im Bereich zwischen 100 und 260 MPa dargestellt, um die Punkte und die Verläufe der Regressionsgeraden besser voneinander differenzieren zu können. Im unteren Bereich des Diagramms sind die prozentualen Verbesserungen der Messwerte, bezogen auf die unverstärkte Referenzprobe, als Balkendiagramm dargestellt.

Die Referenzproben unterliegen infolge der Impactbelastung der größten Degradation der Restdruckfestigkeit. Diese reduziert sich bei einer maximalen Impactenergie von 52,5 J um ca. 30% gegenüber den Werten bei 17,5 J. Die höchsten Restdruckfestigkeiten wurden bei den Proben mit eckigen Pins und größter Flächendichte gemessen. Die Werte der verstärkten Proben mit einer Flächendichte von $\Phi = 0,5\%$ liegen bis zu einer Impactenergie von 30,5 J dicht beieinander. Zwischen 35 und 52,5 J hebt sich die Restdruckfestigkeit der Proben mit eckigen Pins geringfügig positiv von denen mit runden Pins ab. Insgesamt unterliegen die Proben der letztgenannten Serie einer größeren Streuung als die der eckigen Proben. Auffallend sind insbesondere die Verläufe der Messwerte der Proben runder Pins mit $\Phi = 1,0\%$ und eckiger Pins mit $\Phi = 0,26\%$. Der Verlauf beider Geraden ähnelt sich besonders im hohen Energiebereich zwischen 35 und 52,5 J sehr stark und verläuft in

etwa parallel zur Regressionsgeraden der Referenzprobe. Demgegenüber ist der negative Anstieg aller übrigen Proben ausgeprägter. Würde man die Regressionsgeraden für größere Impactenergien extrapolieren, so würden beide Kurven bald die der Proben mit eckigen Pins und $\Phi = 1,0\%$ schneiden.

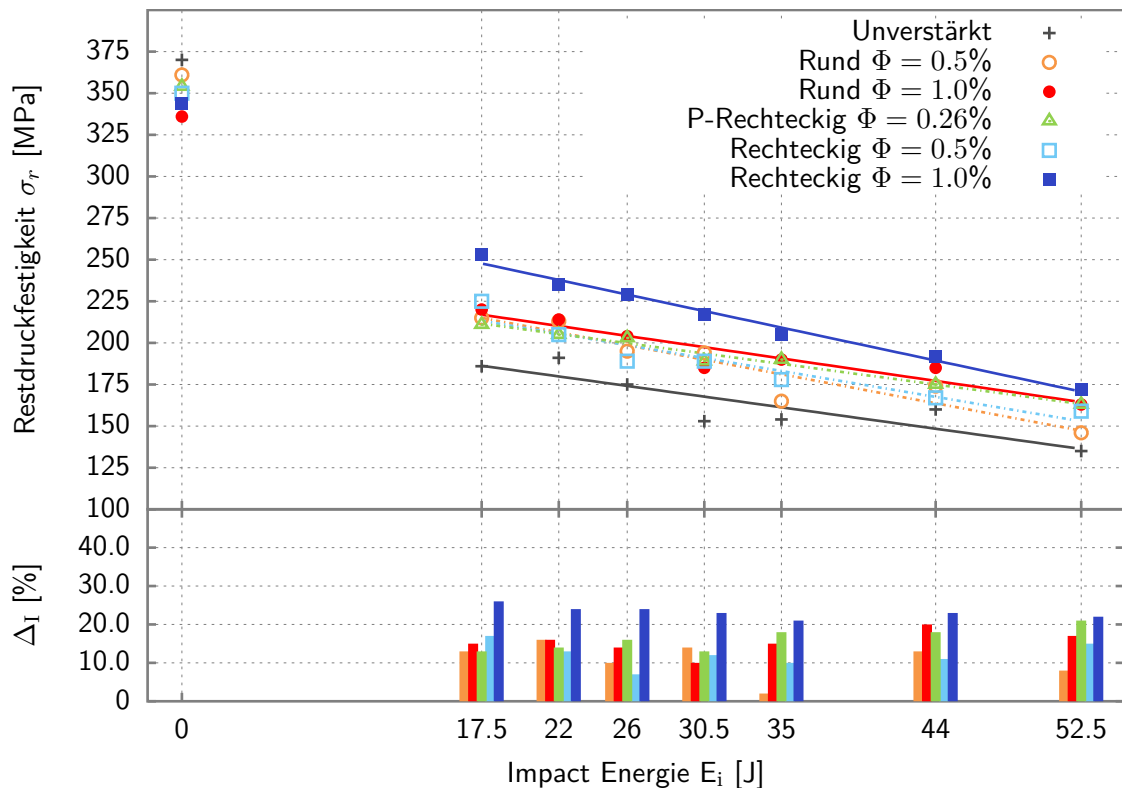


Abbildung 4.21: Restdruckfestigkeit nach Impactbelastung

Tendenziell ist die Annäherung der Restdruckfestigkeiten verpinnter Proben an die Werte unverstärkter Proben zu erwarten, insbesondere bei großen Impactenergien aus dem Hochgeschwindigkeitsbereich. Da mit zunehmender Impactenergie die Anzahl an Faserbrüchen zunimmt, bis zur Penetration des Laminats. Sobald die Prüfkörper vom Impacter durchstoßen werden, treten Delaminationen im Laminat nur noch geringfügig bis gar nicht mehr auf. Daher haben z-Pins keinen positiven Einfluss mehr auf die Restdruckfestigkeit.

Unter Berücksichtigung der gemessenen Delaminationsflächen sind die Werte der Restdruckfestigkeit atypisch. Der im Diagramm dargestellte Verlauf der Prüferien zeigte eindeutige, klar zu differenzierende Tendenzen an. Wohingegen bei der Restdruckfestigkeit lediglich die unverstärkten und die mit $\Phi = 1,0\%$ eckigen Pins verstärkten Proben die Erwartungen erfüllen. Insbesondere im Energiebereich zwischen 17,5 und 30,5 J liegt die Restdruckfestigkeit aller übrigen verpinnten Proben in der Mitte zwischen den zuvor genannten oberen

und unteren Grenzen. Bei 44 und 52,5 J beträgt die Differenz beider verpinnter Proben mit der höchsten Flächendichte zwischen 3 und 5%, obwohl ihre Delaminationsflächen um ca. 20% voneinander abweichen.

Durch den Einsatz von z-Pins treten zwei gegensätzliche Effekte ein. Zum einen reduzieren die eingebrachten Pins die Druckfestigkeit des Laminats aufgrund der Faserumlenkung und der beim Herstellungsprozess hervorgerufenen Faserbrüche. Zum anderen kann jedoch die Druckfestigkeit nach einer Impactbelastung durch z-Pins im Vergleich zu unverstärkten Proben signifikant verbessert werden. Unter Druckbeanspruchung kann lokales Knicken auftreten. Dabei bilden die durch Delaminationen getrennten Schichten Sublaminat aus, Abbildung 4.22. Die Knicksteifigkeit der Sublaminat ist gegenüber der ungeschädigten Probe um ein vielfaches geringer, wodurch die Druckbeanspruchbarkeit herabgesetzt ist.

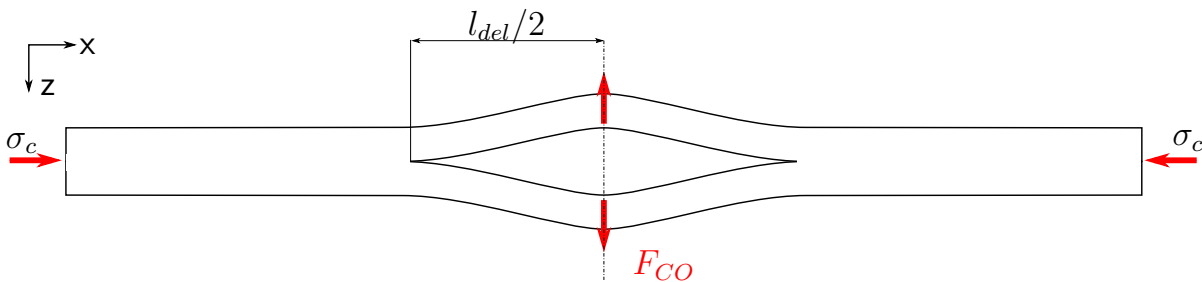


Abbildung 4.22: *Sublaminatbildung infolge äußerer Druckspannungen σ_c bei unverpinnten Proben. Rissöffnungskraft F_{CO} und die Länge der Delaminationsfläche l_{del} beeinflussen die Druckeigenschaften*

Bei mit z-Pin verstärkten Laminaten ist zum einen die Delaminationsfläche kleiner als bei unverstärkten Proben, wodurch die Knicklänge der Sublaminat geringer ist und damit die Knicksteifigkeit ansteigt. Zum anderen wird das lokale Knicken infolge der aufgetragenen Drucklast durch die eingebrachten z-Pins behindert. Sobald sich die Bruchflächen der Einzelschichten voneinander abheben bildet sich eine Brückenzone aus. Dabei werden die Lasten umgelagert und auf die umliegenden Schichten verteilt. Die Ausbildung von Sublaminaten wird dadurch eingeschränkt, weshalb die Restdruckfestigkeit positiv beeinflusst wird, Abbildung 4.23.

Aus den beiden zuvor genannten Ursachen, der mikromechanischen Störung und der positiven Beeinflussung der Brückenzonebildung und Unterdrückung der Bildung von Sublaminaten, erklären sich die unterschiedlichen Ergebnisse der Delaminationsfläche und Restdruckfestigkeit. Die Daten aus den Ultraschalluntersuchungen können nicht unmittelbar dazu genutzt werden, um Aussagen über die Restdruckfestigkeit zu treffen.

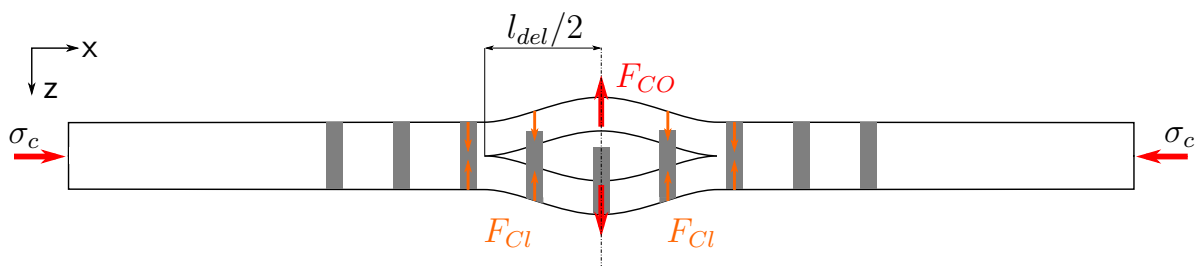


Abbildung 4.23: Durch z-Pins induzierte Rückstellkräfte F_{Cl} wirken der Rissöffnungskraft F_{CO} entgegen und verlangsamen das Risswachstum

5 Auswertung

5.1 Qualität des Herstellungsverfahrens

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Verfahren zur Herstellung von mit z-Pin verstärkten Laminaten unterscheidet sich von den konventionellen Herstellungsverfahren. Daher erfolgt in diesem Kapitel eine gesonderte Auswertung der Prüfkörperqualität.

Zwei Laminataufbauten werden zur Herstellung der Prüfkörper verwendet. Anhand der unidirektionalen Laminat wurde die Risszähigkeit unter Mode I Belastung, das Pin-Auszugsverhalten und die Zugeigenschaften ermittelt. Die quasi-isotropen Laminat wurden für die Impactproben genutzt. Abgesehen vom Druck im Druckluftkissen sind alle übrigen Fertigungsparameter bei allen Prüfkörper konstant.

Zur Bewertung der Fertigungsqualität werden die Wanddicke der Prüfkörper und das äußerliche und innerliche Erscheinungsbild betrachtet. Eine gesonderte Betrachtung des Faservolumengehalts findet nicht statt, da dieser im direkten Zusammenhang zur Wanddicke steht. Für die Bewertung der Proben mit unidirektionalem Laminataufbau werden die Zugproben genutzt. Bei den quasi-isotropen Laminataufbauten werden die Werte der Impactproben, mit einer Datenbasis von 72 Stück, verwendet. Die Häufigkeitsverteilung wird über der Prüfkörperdicke angegeben.

Die Ergebnisse des unidirektionalen Laminataufbaus sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Auf der x-Achse ist die Prüfkörperdicke, und auf der y-Achse ihre relative Häufigkeit dargestellt.

Rechnerisch beträgt der Erwartungswert der Dicke unidirektionaler Prüfkörper $\mu_{t_{UD}} = 2,7$ mm bei einem Faservolumengehalt von 60%. Im Diagramm sind die Messwerte als

Histogramm in Balken dargestellt. Aufgrund der Normalverteilung der Ergebnisse ist die Verteilungsfunktion in rot eingezeichnet. Die Werte der Dicke weisen ein Maximum bei 2,7 mm aus. Der Großteil der Messwerte befindet sich oberhalb des Erwartungswertes. Der Mittelwert der Prüfkörperdicke beträgt $\bar{t}_{UD} = 2,85$ mm. Aus den Messwerten ergibt sich eine Standardabweichung von $s_{\bar{t}_{UD}} = \pm 0,18$ mm. Rechnerisch beträgt der Faservolumengehalt im Mittel 59% mit einer Abweichung von $\pm 3\%$. Die Übereinstimmung zwischen errechnetem und gemessenem Faservolumengehalt kann als sehr gut bewertet werden.

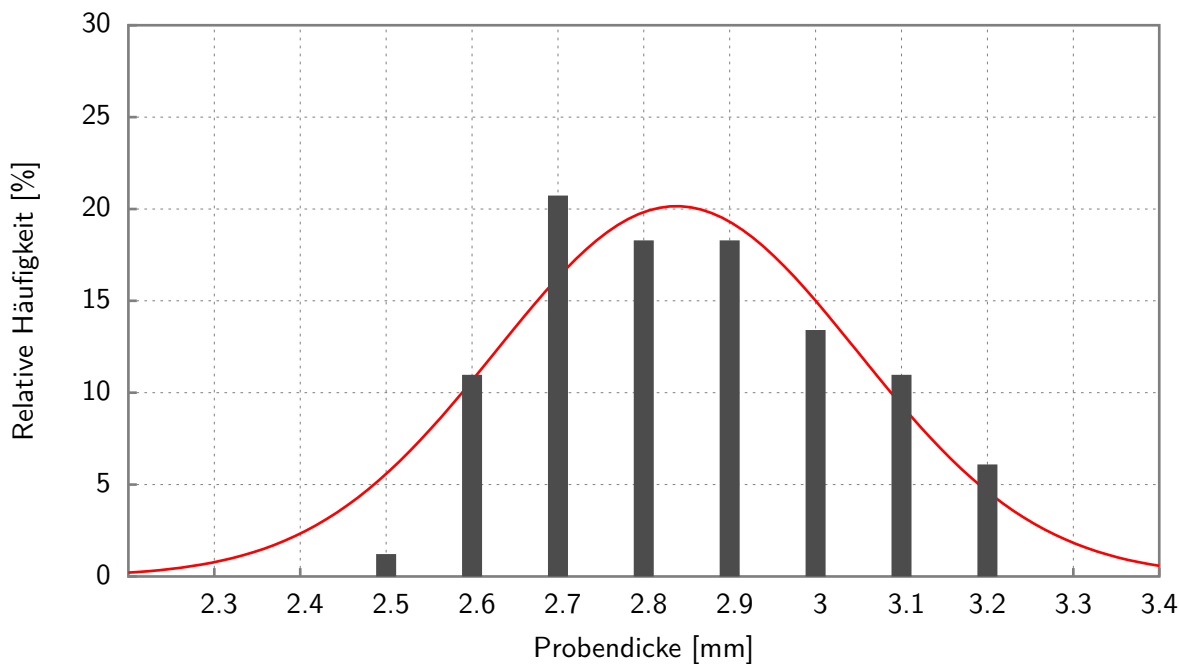


Abbildung 5.1: Dickenverteilung der unverstärkten, verpintten und kumulierten Proben bei unidirektionalem Laminataufbau

Die Wanddickenverteilung der quasi-isotropen Laminataufbauten ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die Funktion der Normalverteilung ist im Diagramm rot eingezeichnet. Der Erwartungswert bei einem Faservolumengehalt von 60% beträgt bei den quasi-isotropen Laminaten $\mu_{t_{QI}} = 3,5$ mm. Der Mittelwert der Wanddicke beträgt $\bar{t}_{QI} = 3,6$ mm mit einer Standardabweichung von $s_{\bar{t}_{QI}} = \pm 0,2$ mm. Der Faservolumengehalt beträgt im Mittel 58% und schwankt in einem Intervall von $\pm 3\%$. Die Ergebnisse des Faservolumengehalts weichen geringfügig vom Erwartungswert ab, sind aber dennoch als gut einzustufen.

Die Verteilung der Wanddicken und der resultierende Faservolumengehalt der Lamine unterscheiden sich bei beiden Varianten nur geringfügig voneinander. Bei der optischen Begutachtung der Prüfkörper treten hingegen sichtbare Unterschiede auf. Die unidirektionalen Lamine bilden auf der zum Schaum zugewandten Seite kreisrunde Wölbungen um

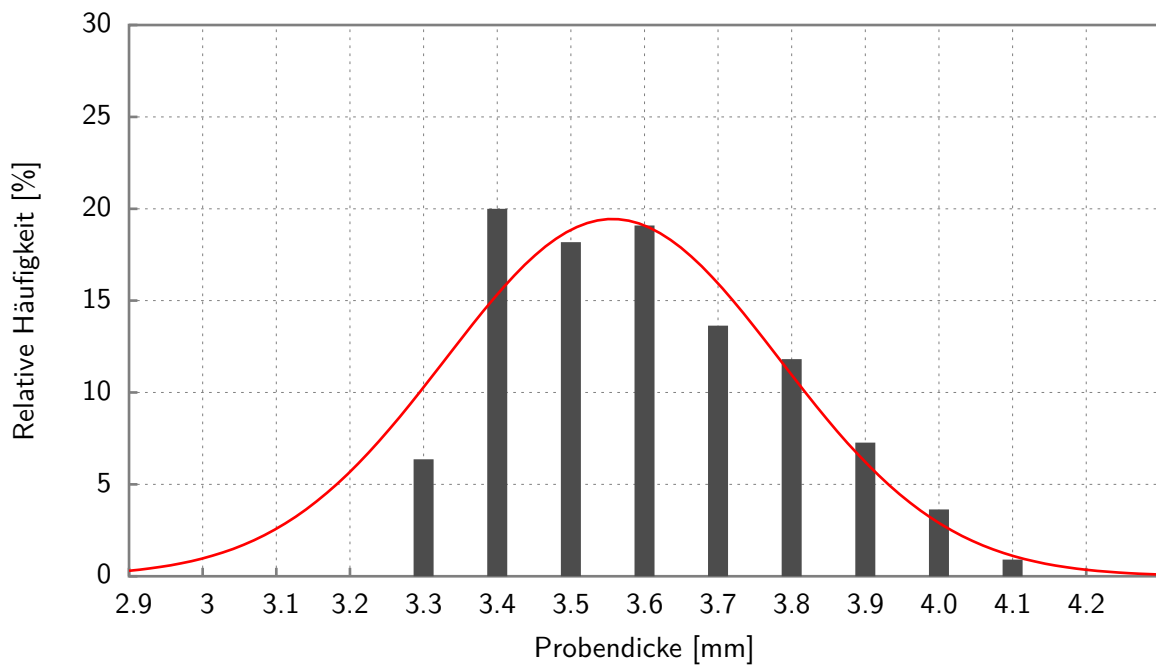


Abbildung 5.2: *Dickenverteilung der unverstärkten, verpinnten und kumulierten Proben bei quasi-isotropem Laminataufbau*

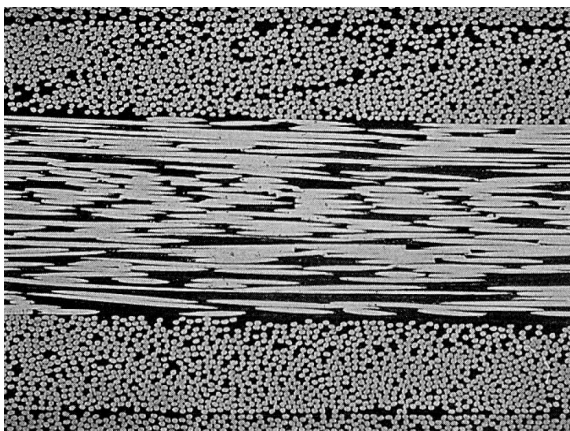
die einzelnen Pins aus. Diese können eine Aufdickung der Proben um bis zu 0,2 mm hervorrufen. Im Gegensatz dazu sind diese Erhebungen beim quasi-isotropen Laminataufbau nicht erkennbar.

Bei unidirektionalem Laminat entweicht das überschüssige Harz unter den hohen einwirkenden Drücken hauptsächlich parallel zur Faserlängsrichtung. Dieser Effekt lässt sich während des Pressvorgangs beobachten. An den faserparallelen Rändern tritt kaum Harz aus, sondern entweicht größtenteils an den Enden senkrecht zur Faserlängsrichtung. Durch die eingebrachten Pins werden die umliegenden Fasern umgelenkt, weshalb das Harz nicht mehr ungehindert entlang der Fasern fließen kann. Infolge dessen sammelt sich in direkter Umgebung zum Pin Harz an und bildet Wölbungen aus. Der Druck im Laminat steigt dabei soweit an, dass der darunter befindliche Schaum teilweise kollabiert. Bei den quasi-isotropen Laminaten treten derartige Harzansammlung nicht auf, da durch die unterschiedliche Orientierung der Einzelschichten das Harz in mehrere Richtungen abfließen kann.

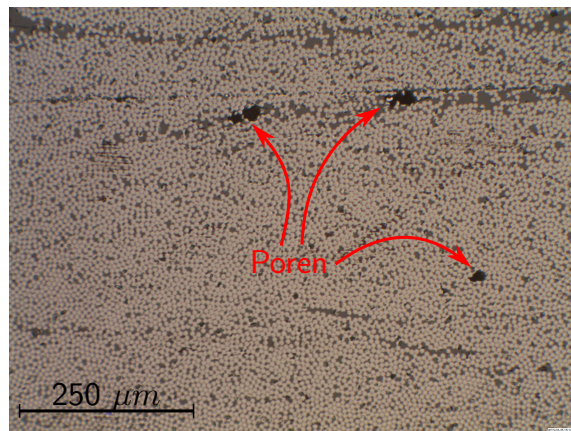
CHANG [2] hat die Fertigungsqualität verpinnter Proben, die im UAZ-Verfahren hergestellt wurden, untersucht. Die Standardabweichung der Probendicke ergab für das unidirektionale Laminat einen Wert von 2% und beim quasi-isotropen von 1%.

Poren im Laminat reduzieren die mechanischen Eigenschaften des Laminats, da sie Spannungskonzentrationen hervorrufen. Fertigungsbedingt befinden sich Mikroporen gleichmäßig verteilt zwischen einzelnen Filamenten. Besonders ausgeprägt sammeln sich diese jedoch in den harzreichen Zonen um die z-Pins und wachsen dabei teilweise zu Makroporen an. Diese mit bloßem Auge sichtbaren Poren verdrängen einen Großteil des Harzes aus der harzreichen Zone, wodurch die Anbindung des Pins an das Laminat beeinträchtigt ist.

In Abbildung 5.3 sind zwei Schlibfbilder dargestellt. In Bild 5.3a ist ein porenfreies, im Autoklavverfahren aus Prepregs hergestelltes Laminat, abgebildet. Im Vergleich dazu ist in Bild 5.3b ein Schlibfbild eines porenbehafteten Laminats dargestellt, welches nach der für diese Arbeit verwendeten Methode hergestellt wurde.



(a) Porenfreies Laminat [90]



(b) Porenbehaftetes Laminat

Abbildung 5.3: Vergleich zwischen porenfreiem Laminat (a) und mit Poren behaftetem Laminat (b)

Das Auftreten von Poren und der damit einhergehenden Herabsetzung der mechanischen Eigenschaften lässt sich mit dem verwendeten Herstellungsverfahren nicht vermeiden. Durch den Stempeldruck wird zwar ein Teil der Luftblasen aus dem Laminat herausgepresst, sie können jedoch nicht ganz vermieden werden. Die Poren werden im Fertigungsprozess durch das Handlaminieren eingebracht. Dem Harz wird nach dem Vermischen die dabei eingebrachte Luft in einem Exsikkator unter Vakuum entzogen. Durch das Aufbringen des Harzes im Handlaminierverfahren mit Lammfellrollen gelangt erneut Luft ins Laminat.

Das verwendete Herstellungsverfahren ermöglicht die Herstellung verpinnter Lamine aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Der avisierte Faservolumengehalt von 60% konnte hierbei realisiert werden. Ein Schwachpunkt des Verfahrens ist, dass die Lamine nicht unter Vakuum aushärten, um Poren zu reduzieren.

5.2 Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit

Der E-Modul und die Festigkeit wurden anhand von Zugversuchen mit unidirektionalem Laminataufbau in Anlehnung an die ISO 527 [75] untersucht. Dazu wurden Referenzproben aus CFK ohne z-Pins, und verstärkte Prüfkörper mit runden und rechteckigen Pins hergestellt.

Der faserparallele Elastizitätsmodul E_1 der unidirektionalen Laminat reduziert sich durch die Einbringung von z-Pins in das Laminat. Die Ergebnisse weisen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Geometrie der z-Pins auf. Bei allen Proben reduzierte sich die Steifigkeit E_1 mit zunehmender Pin-Dichte. Die erzielten Ergebnisse liegen damit im allgemeinen Trend der wissenschaftlichen fachbezogenen Publikationen von PARTRIDGE ET AL. [66] und MOURITZ ET AL. [91], wobei eine maximale Reduktion des E-Moduls von 25% ermittelt wurde. In Experimenten mit runden z-Pins mit einem Durchmesser von 0,27 mm zeigten MOURITZ ET AL. [91], dass sich der E-Modul E_1 bei einer Flächendichte von 0,5% um 5% gegenüber der unverstärkten Probe reduziert. Die Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit der Proben mit runden Pins und einem Durchmesser von 1,0 mm liegen einen Prozentpunkt unter den zuvor genannten. KRUEGER ET AL. [19] zeigten anhand numerischer Simulationen, dass die z-Pin Flächendichte einen negativeren Einfluss auf die Steifigkeiten hat als der z-Pin Durchmesser. MOURITZ [10, 14] konnte dies ebenfalls experimentell nachweisen. In diesem Zusammenhang sind die erzielten Ergebnisse plausibel, da der Durchmesser der z-Pins zwar relativ groß ist, ihre Anzahl in der verstärkten Zone jedoch um ein vielfaches kleiner ist als bei äquivalenter Flächendichte.

Insbesondere längs ausgerichtete eckige Pins haben bei unidirektionalen Laminataufbauten nur einen sehr geringen Einfluss auf den Elastizitätsmodul. Selbst im extrapolierten Bereich der Flächendichte von 2,0% lagen die Werte für E_1 noch im 95%-Konfidenzintervall der Referenzprobe. Demgegenüber bewirken quer ausgerichtete Pins eine signifikante Reduktion der Steifigkeit, die sogar geringfügig die Werte der runden z-Pins übersteigen. Diese Abweichung kann auf die Anzahl der eingebrachten Pins zurückgeführt werden, denn es werden nur halb so viele runde wie eckige z-Pins bei gleicher Flächendichte eingebracht. Es wurde bisher durch mehrere Forschergruppen festgestellt, dass die Festigkeitseigenschaften von CFK-Laminaten durch z-Pins stärker beeinträchtigt werden als die Steifigkeitseigenschaften. Bei unidirektionalen Laminaten konnte durch PARTRIDGE ET AL. [66] eine Festigkeitsreduktion von 35% gegenüber dem unverstärkten Laminat bei einem z-Pin

Anteil von 4% und einem Durchmesser von 0,27 mm ermittelt werden. In etwa die gleiche relative Herabsetzung wurde von STEEVES ET AL. [6] prognostiziert. Die gemessene Zugfestigkeit der Proben mit runden und eckigen Pins dieser Arbeit haben eine ähnlich hohe Reduktion zur Folge. Bei den Proben mit runden z-Pins wurde eine Reduktion um 18% bei einer Flächendichte von 1,0% gemessen. Im extrapolierten Bereich erhöhte sich diese im Maximum auf 35%. Ein direkter Vergleich der gemessenen Werte mit denen aus der Literatur ist nicht problemlos möglich, da sich die Durchmesser der Pins deutlich voneinander unterscheiden, und ein anderes Herstellungsverfahren verwendet wurde. Bezüglich des z-Pins Durchmessers haben CHANG ET AL. [88] experimentell zeigen können, dass die Erhöhung des Durchmessers von 0,28 auf 1,0 mm eine Festigkeitsreduktion um 15% zur Folge hat. Dabei verwendeten sie ein unidirektionales Laminat, das mit nur einem z-Pin verstärkt wurde. Der Ergebnistrend kann durch die eckig eingebrachten Pins bestätigt werden. Bei längs ausgerichteten eckigen Pins beträgt die Breite der Umlenkung bezogen auf die Faserorientierung 0,4 mm, wohingegen sich diese bei den quer eingebrachten Pins auf 1,0 mm erhöht. Infolgedessen verdoppelt sich die Reduktion der Festigkeit der quer eingebrachten Pins gegenüber den längs eingebrachten. Die Festigkeitseigenschaften der runden und quer eingebrachten eckigen Pins sind nahezu identisch. Die längs ausgerichteten Pins haben eine geringere Herabsetzung der Zugfestigkeit zur Folge. Diese liegt weit unterhalb derer runder Pins.

5.3 Mode I - Interlaminare Risszähigkeit

Zur Bewertung der interlaminaren Risszähigkeit wurden Versuche unter Mode I Belastung in Anlehnung an die ISO 15024 [78] durchgeführt. Für die Versuche wurden Lamine aus CFK hergestellt, die mit eckigen und runden z-Pins verstärkt sind. Als Referenzproben dienen Prüfkörper ohne z-Pins. Bei den Proben mit eckigen Pins wurde zusätzlich der Einfluss der Ausrichtung der z-Pins in Relation zur Faserorientierung untersucht.

Unter realen Bedingungen treten reine Mode I Belastungen äußerst selten auf. TAO ET AL. [30] zeigten anhand experimenteller Untersuchungen, dass sich Risse nur bei Sonderfällen zwischen zwei Einzelschichten derselben Orientierung ausbreiten. Dennoch ist die interlaminare Risszähigkeit unter Mode I Last die am häufigsten untersuchte Eigenschaft bezogen auf dreidimensionale Verstärkung von Verbundwerkstoffen. Das Versuche dieser Belastungsart sinnvoll sind wurde von POLAHA [21] bewiesen, indem er zeigte, dass

die Risszähigkeit zweier angrenzender 0° -Lagen am niedrigsten ist. Im Vergleich zu den weiteren möglichen Bruchmodi sind die gemessenen Kennwerte von G_{IC} am geringsten.

Im Experiment fanden FREITAS ET AL. [39] und CARTIÉ [44] einen linearen Zusammenhang zwischen der z-Pin Flächendichte und der interlaminaren Risszähigkeit, die sich verdoppelt, wenn die Flächendichte jeweils um 0,5% erhöht wird. Dieser Zusammenhang konnte ebenfalls für die eckigen Pins, sowohl bei einer Ausrichtung längs als auch quer zur Faserorientierung, nachgewiesen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass längs ausgerichtete z-Pins die höchste Risszähigkeitserhöhung aller getesteten Prüfserien bewirken. Die gemessenen Werte der runden z-Pins für G_{IC} waren bei beiden Flächendichten 0,5 und 1,0% am niedrigsten. Es besteht zwar ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen G_{IC} und Flächendichte, eine Verdoppelung der Risszähigkeit konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Die signifikante Erhöhung der Risszähigkeit eckiger z-Pins gegenüber runder kann auf die Anzahl der eingebrachten Pins und dem damit einhergehenden Pin-zu-Pin Abstand zurückgeführt werden. Anhand Finiter-Elemente-Simulationen konnten GRASSI ET AL. [92] zeigen, dass mit kleiner werdendem Durchmesser die interlaminare Risszähigkeit G_{IC} bei äquivalenter Flächendichte zunimmt. Experimentell werden die Ergebnisse von CARTIÉ [44] gestützt. Er konnte nachweisen, dass sich G_{IC} bei selbiger Flächendichte halbiert, wenn der z-Pin Durchmesser verdoppelt wird. Über eine Parameterstudie am FE-Modell konnten YAN ET AL. [34] zeigen, dass mit kleiner werdendem Pin-zu-Pin Abstand die Risszähigkeit zunimmt, da die Anzahl der im Eingriff befindlichen z-Pins ebenfalls steigt.

Daher wurde in dieser Arbeit eine weitere Serie verpinnter Proben eingeführt. Dabei sind eckige Pins längs und quer zur Faserorientierung eingebracht worden. Ihr Pin-zu-Pin Abstand entspricht demselben der Proben mit runden z-Pins und einer Flächendichte von 0,5%. Die Ergebnisse zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit der Risszähigkeit von der Ausrichtung der eckigen Pins. Die Werte für G_{IC} der längs ausgerichteten eckigen Pins sind in etwa 5 bis 8% höher als die der runden Pins, wohingegen die Werte der quer ausgerichteten Pins ca. 15% niedriger sind. Die Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass die Oberfläche und die Kontaktzone zwischen z-Pin und Laminat die Risszähigkeit beeinflussen. Aufgrund dessen wurden zusätzlich z-Pin Auszugsversuche in Anlehnung an die Versuche von DAI ET AL. [41] durchgeführt.

5.4 Pin-Auszugsverhalten

Die z-Pin Auszugsversuche haben gezeigt, dass die Auszugskraft bei eckigen Pins um ca. 10% höher ist als bei runden. Infolge dessen erhöht sich der Ausnutzungsgrad der eckigen Pins, indem die dabei wirkende Zugspannung in etwa um den Faktor 2.5 gegenüber den runden z-Pins erhöht wird. DAI ET AL. [41] führten ebenfalls Pin-Auszugsversuche mit runden z-Pins und einem Durchmesser von 0,28 mm und 0,51 mm durch. Die zum Auszug notwendige Kraft war bei beiden z-Pin Durchmessern identisch. Die Zugspannung erhöhte sich bei den dünneren Pins um den Faktor 3 gegenüber den z-Pins mit größerem Durchmesser.

Die in der Schicht zwischen z-Pin und Laminat wirkende Schubspannung im Ablösungszeitpunkt erhöht sich bei eckigen Pins um ca. 30% gegenüber runden Pins. In Einzelfaser-Ausdruckversuchen (Single fiber pushout test) haben FU ET AL. [93] herausgefunden, dass mit kleiner werdendem Durchmesser die Schubspannung im Interface zunimmt. Eine weitere mögliche Theorie zur Erhöhung der z-Pin Auszugskraft folgt aus der Kontaktfläche zwischen den Längsseiten der eckigen Pins und dem Grundlaminat, bzw. der kurzen Seiten, die mit dem unverstärkten Harz des Harzauges in Kontakt stehen. An den Bruchflächen der runden Pins war auf den REM-Aufnahmen eine geschlossene Mantelfläche des Harzes zu sehen, was auf ein adhäsives Versagen der z-Pin und Matrix-Anbindung schließen lässt. Demgegenüber zeigten die REM-Aufnahmen der Bruchfläche eckiger z-Pins, dass ein kohäsiver Bruch, bei dem einzelne Filamente des z-Pins an das Laminat gebunden waren, zur Ablösung des Pins geführt hat. Die notwendige Kraft, um ein kohäsives Versagen hervorzurufen ist höher als die bei adhäsivem Versagen, womit sich die höhere Auszugskraft bei rechteckigen z-Pins erklärt.

Eine weitere Ursache der Krafterhöhung beim Pin-Auszug könnte sein, dass an der Längsseite der rechteckigen z-Pins die Abstände zwischen den Fasern des Laminats und den Fasern des Pins äußerst gering sind. Mit Hilfe von Multifaser-Ausdruckversuchen (Multi fiber pushout test) konnten FU ET AL. [93] und ZHOU ET AL. [94] zeigen, dass bei kleiner werdendem Abstand zweier Fasern zueinander die Schubspannung im Ablösungszeitpunkt ansteigt, wodurch ebenfalls die notwendige Auszugskraft ansteigt.

5.5 Impact- und Post-Impact-Eigenschaften

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Schadenstoleranzeigenschaften von CFK-Laminaten die mit z-Pins verstärkt sind, wurden Impactuntersuchungen durchgeführt. Bauteile aus Verbundwerkstoffen können insbesondere im Luftfahrtbereich häufig Impactbelastungen unterliegen. Daher können diese Untersuchungen als reale Betriebslast idealisiert werden und eignen sich dadurch besonders zur Evaluation von 3D-Verstärkungsverfahren. Die Untersuchungen fanden in Anlehnung an die Norm DIN 65561 [85] und der Airbus Prüfvorschrift AITM1.0010 [84] statt.

Die während der Versuchsdurchführung aufgezeichneten Daten der Kontaktkraft können einerseits dazu genutzt werden, um das Eintreten von Schädigungen qualitativ zu bewerten und andererseits um diese zu klassifizieren. Dazu zeigten ZHANG ET AL. [68], dass sinusförmige Schwingungen mit kurzzeitigen, kleinen Amplitudenerhöhungen infolge von Matrixrissen auftreten. Wohingegen sehr hohe Amplituden eine Folge des Delaminationswachstums sind. Bei den untersuchten Prüfkörpern, die mit der niedrigsten Impactenergie von 17,5 J getestet wurden, verlaufen die Kurven der verstärkten und unverstärkten Proben bis 1 ms nahezu identisch. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass z-Pins die Schadensinitiierung infolge einer Impactbelastung nicht beeinflussen. Diese Schlussfolgerung erscheint vor dem Hintergrund plausibel, dass PARTRIDGE ET AL. [66] diese Behauptung bereits verifizieren konnten. Mit steigenden Impactenergien werden die Schwingungsamplituden, insbesondere der unverstärkten Prüfkörper, zunehmend größer. Im Vergleich dazu ist bei den verstärkten Prüfkörpern eine deutliche Dämpfung der Amplituden ersichtlich. Diese wird mit steigender Flächendichte größer, wobei die Kurven der Proben mit eckigen Pins einer stärkeren Dämpfung unterliegen als die der runden Pins. Die Größe der Amplitude steht damit im Zusammenhang zur z-Pin Flächendichte. Diese werden kleiner, wenn der Anteil an z-Pins im Laminat steigt. ZHANG ET AL. [68] konnten bei ihren Untersuchungen den gleichen Zusammenhang feststellen.

Aus den Kraft-Zeit-Verläufen lassen sich qualitative Aussagen zur Delaminationsfläche im Laminat treffen. Als direkte Folge der niedrigsten Schwingungsamplituden ist die Delaminationsfläche der Proben mit eckigen Pins über alle getesteten Impactenergien am kleinsten. Mit zunehmender Impactenergie nimmt die Delaminationsfläche bei allen Prüfserien gleichermaßen zu. Die relativen Abweichungen der Delaminationsflächen verstärkter Proben bezogen auf die Referenzprobe ist nahezu konstant über alle Impactenergien. Die

Delaminationsfläche der Proben mit eckigen Pins reduziert sich im Durchschnitt um 61% bei einer Flächendichte von 1,0% gegenüber der Referenzprobe. Demgegenüber konnte bei den Proben mit runden Pins und einer Flächendichte von 1% nur eine mittlere Reduktion um 41% festgestellt werden. Im Vergleich dazu konnten FREITAS ET AL. [39] eine Reduktion um 50% und CHILDRESS ET AL. [96] um 30 bis 50% bei Flächendichten von 2,0% und z-Pin Durchmessern von 0,28 mm messen. CARTIÉ [44] untersuchte vergleichend die Delaminationsfläche mit unterschiedlichen z-Pin Durchmessern bei gleicher Flächendichte. Die Reduktion der Delaminationsfläche verdoppelte sich bei einer Verdoppelung des Durchmessers durch die höhere Anzahl an z-Pins. Vergleichend wurden daher Prüfserien mit runden und eckigen Pins mit demselben Pin-zu-Pin Abstand hergestellt. Die Delaminationsfläche reduzierte sich dabei durch eckige Pins um 30% und bei runden Pins um 20%.

Die Restdruckfestigkeit nach einer Impactbeanspruchung wird unmittelbar von der Delaminationsfläche im Laminat beeinflusst. Beim Einsatz von eckigen z-Pins mit einer Flächendichte von 1,0% fällt die relative Verbesserung der Restdruckfestigkeit mit steigender Impactenergie marginal von 26% bei der Niedrigsten auf 22% bei der Höchsten ab. Bei den Proben mit runden Pins ist der Verlauf umgekehrt, dabei steigt die Verbesserung von 15% auf ca. 20% an. Die gemessenen Restdruckfestigkeiten übertreffen damit die Werte von ISA ET AL. [67], die eine Erhöhung der Restdruckfestigkeit um 23% bei einer Flächendichte von 4% und einem z-Pin Durchmesser von 0,28 mm gemessen hatten. Wohingegen ZHANG ET AL. [68] eine Erhöhung der Restdruckfestigkeit zwischen 35 und 47%, abhängig von der Laminatdicke und der Flächendichte, ermitteln konnten. Außergewöhnlich sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse der Proben in der die Anzahl eckiger Pins mit denen runder bei einer Flächendichte von 0,5% übereinstimmt. Die prozentuale Verbesserung der Restdruckfestigkeit bei eckigen Pins liegt geringfügig über den Werten der Proben mit runden Pins und einer Flächendichte von 1,0%. Demnach haben halb so viele eckige im Vergleich zu runden Pins denselben Effekt auf die Restdruckfestigkeit. Der Sachverhalt könnte auf eine geringere mikromechanische Beeinflussung durch die wenigen eckigen Pins zurückzuführen sein. ISA ET AL. [67] beobachteten denselben Effekt bei einer Impactenergie von 8 J. Die Restdruckfestigkeit der mit 4% verpinnten Proben war nach der Impactbelastung niedriger als bei unverstärkten Proben. Sie führten die Ergebnisse ebenfalls auf die mikromechanischen Störungen zurück.

5.6 Schlussfolgerung

In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss von eckigen z-Pins auf die mechanischen Eigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen untersucht. Das Spektrum der Untersuchungen wurde begrenzt auf die Ermittlung der Steifigkeit und Festigkeit, der interlaminaren Risszähigkeit G_{IC} und der Impact- und Post-Impact-Eigenschaften.

Verbundwerkstoffe, die mit runden z-Pins dreidimensional verstärkt werden, unterliegen einer Herabsetzung des Elastizitätsmoduls und der Festigkeit in der xy-Ebene. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eckige Pins, bei denen die Längsseite parallel zur Faserorientierung eingebracht ist, bis zu einer Flächendichte von 1,0% keine Degradation des Elastizitätsmoduls zur Folge haben. Bei eckigen Pins, die quer zur Faserlängsrichtung eingebracht wurden, ist die Reduktion des E-Moduls in etwa äquivalent zu runden Pins. Die Festigkeit der zuvor genannten Konfiguration wird durch eckige Pins zwar um maximal 11% reduziert, im Relation zu den Ergebnissen runder Pins entspricht dieser Wert jedoch einer Verbesserung um 40%.

Die interlaminare Risszähigkeit G_{IC} unter Mode I Belastung kann durch die Einbringung von z-Pins signifikant verbessert werden. Bei äquivalenten Flächendichten von eckigen und runden Pins haben längs ausgerichtete eckige Pins eine deutliche Verbesserung von G_{IC} gegenüber den Proben mit runden Pins zur Folge. Quer ausgerichtete Pins führen hingegen mindestens zur selben Verbesserung wie runde. Um den Einfluss der Anzahl der eingebrachten Pins auf die Risszähigkeit auszuschließen, resultierend aus unterschiedlichen Pin-zu-Pin Abständen bei gleicher Flächendichte, wurden ebenfalls Proben beider z-Pin Geometrien mit gleichem Pin-zu-Pin Abstand hergestellt. Dabei wiesen eckige, längs ausgerichtete Pins eine um ca. 8% höhere Risszähigkeit gegenüber den Proben mit runden z-Pins auf.

Anhand der Ergebnisse der Pin-Auszugsversuche konnten die Ursachen der Risszähigkeitserhöhung durch eckige z-Pins bei Mode I Belastung ergründet werden. Auf Grund der größeren Kontaktfläche zwischen z-Pin und Grundlaminat und einem kohäsivem Versagensverhalten beim Herausziehen konnte die Auszugskraft eckiger Pins um ca. 10% gegenüber runden Pins erhöht werden. Die Erhöhung der Auszugskraft hat, bedingt durch die kleinere Ober- und Querschnittsfläche der eckigen Pins, eine Erhöhung der Schubfestigkeit im Interface von über 30% zur Folge. Die dabei im z-Pin wirkende Zugspannung kann als

Maßstab zur Ausnutzung der Pins genutzt werden. Diese erhöht sich infolge der höheren Auszugskraft und kleineren Querschnittsfläche um den Faktor 2,6 im Vergleich zu runden Pins. Während der reibungsbehafteten Auszugsphase steigerte sich ebenfalls die dabei dissipierte Energie um 15% gegenüber den Proben mit runden Pins.

Die Impactuntersuchungen dienten der Evaluation der Leistungsfähigkeit von z-Pins unter komplexer mechanischer Belastung. Dabei zeigte sich, dass eckige Pins bei gleicher Flächendichte eine signifikante Verbesserung der Größe der Delaminationsfläche und der Restdruckfestigkeit nach Impactbeanspruchung gegenüber runden z-Pins aufweisen. Selbst bei gleicher Anzahl an Pins im Laminat, was einer Halbierung der Flächendichte entspricht, sind die durch eckige Pins erzielten Ergebnisse besser als die der runden z-Pins.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die dreidimensionale Verstärkung von Verbundwerkstoffen ist, insbesondere für impactgefährdete Bauteile, von großem Interesse. Dabei wird Verstärkungsmaterial senkrecht zur Plattenebene eingebracht, um die interlaminare Risszähigkeit und die Impacteigenschaften zu verbessern. Durch ihre Einbringung werden infolge von Faserumlenkungen und Faserbrüchen jedoch die in-plane Eigenschaften reduziert. Eines dieser Verstärkungsverfahren ist das z-Pinning. Dabei werden CFK-Nadeln mit kreisrundem Querschnitt senkrecht in die Laminatoberfläche eingebracht. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss rechteckiger z-Pins auf die mechanischen Eigenschaften von dreidimensional verstärkten Verbundwerkstoffen zu charakterisieren. Der Kreis als geometrische Form besitzt den kleinsten Umfang bei größtem Flächeninhalt. In Bezug auf die mikromechanischen Störungen des Laminats folgt, dass diese, bei gleichzeitig kleinster Kontaktfläche zum Laminat, bei runden Pins am Größten sind. Demgegenüber sind die Störungen bei rechteckigen z-Pins in eine Vorzugsrichtung geringer. Die Kontaktfläche zwischen Pin und Fasern des Laminats ist, bezogen auf die Querschnittsfläche, ebenfalls deutlich größer. Daher wird sowohl eine Verbesserung der bruchmechanischen als auch der Impact-Eigenschaften erwartet.

Zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit wurden drei mechanische Eigenschaften ermittelt; die Zugeigenschaften, die interlaminare Risszähigkeit G_{IC} und die Impact-Eigenschaften. Zur Evaluation der Zugeigenschaften sind unidirektionale Laminataufbauten mit beiden z-Pin Geometrien verstärkt worden. Die rechteckigen Pins werden längs und quer zur Faserorientierung des Laminats eingebracht, um den Einfluss der z-Pin Orientierung zu ermitteln.

Der Elastizitätsmodul und die Festigkeit unterliegen durch das Einbringen von z-Pins einer signifikanten Reduktion. Runde z-Pins reduzieren den E-Modul um 8% und die Festigkeit um 18%. Eckig, quer ausgerichtete z-Pins haben eine geringfügig höhere Herabsetzung des E-Moduls, jedoch identische Festigkeitswerte wie runde Pins zur Folge. Demgegenüber

konnte bei eckig, längs ausgerichteten Pins keine Reduktion des E-Moduls, jedoch eine um 10% geringere Festigkeit, im Vergleich zur unverpinnten Probe, ermittelt werden.

Die interlaminaire Risszähigkeit G_{IC} wurde an DCB-Proben mit unidirektionalem Laminataufbau ermittelt. Neben den Flächendichten von 0,5 und 1,0% wurde für die Proben mit eckigen z-Pins eine weitere Serie mit 0,26% Anteil hergestellt. Selbst bei einer Flächendichte von 0,26% eckiger z-Pins war G_{IC} um 6% höher als bei runden mit einem Anteil von 0,5% Pins. Bei einer Flächendichte von 0,5% erhöht sich die interlaminaire Risszähigkeit bei eckigen Pins um 20% gegenüber runden Pins. Durch eine Verdoppelung der Flächendichte auf 1,0% steigerte sich der Vorteil der eckigen Pins auf 30%. Zur Ermittlung der Ursachen, die der Verbesserung durch eckige Pins zu Grunde liegen, wurden Pin-Auszugsversuche durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Auszugskraft, die Schubfestigkeit und der Anteil der dissipierten Energie während des reibungsbehafteten Auszugs bei eckigen z-Pins höher ist als bei runden, und damit G_{IC} positiv beeinflussen.

Zur Charakterisierung der Impacteigenschaften wurde die Delaminationsfläche, die Restdruckfestigkeit und die Bruchdehnung nach der Impactbelastung an quasi-isotropen Laminataufbauten ermittelt. Die Reduzierung der Delaminationsfläche konnte bei eckigen z-Pins gleicher Flächendichte um 50% gegenüber runden verbessert werden. Unter Einbeziehung der Energiedissipation zeigte sich, dass bei eckigen z-Pins weniger Energie zum Delaminationswachstum aufgewendet wird als bei runden Pins. Die Restdruckfestigkeit konnte im Vergleich zu den unverpinnten Proben um 23%, und in Bezug auf die runden z-Pins, um ca. 30% erhöht werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können wie folgt zusammengefasst werden: Eckige z-Pins, die parallel zur Belastungsrichtung ausgerichtet sind, haben im Vergleich zu runden Pins eine signifikante Verbesserung der in-plane Eigenschaften zur Folge. Zusätzlich können sowohl die interlaminaire Risszähigkeit G_{IC} als auch die Impact-Eigenschaften gegenüber runden z-Pins erheblich verbessert werden. Bei einer Halbierung der Flächendichte eckiger Pins konnten noch mindestens die gleichen Risszähigkeiten G_{IC} und Impacteigenschaften gemessen werden wie bei den runden Pins.

Zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeit sollte sich auf die Automatisierung des Fertigungsverfahrens konzentrieren. In dieser Arbeit wurde das Laminat im Handlaminierverfahren hergestellt, händisch mit z-Pins verstärkt und anschließend verpresst. Um eine Anwendung in der Serienproduktion zu ermöglichen, ist die robotergestützte Einbringung

von z-Pins unerlässlich. Dabei ist die Verstärkung von trockenen Faserhalbzeugen interessant, da insbesondere im Luftfahrtsektor der Trend weg von Bauteilen aus Prepregs hin zu Bauteilen, die über Infusionsprozesse hergestellt werden können, geht.

Aus Sicht der Grundlagenforschung ist eine Adaption nicht kreisrunder z-Pins auf das Prepreg/Autoklavverfahren sinnvoll, da ein Großteil der bisher publizierten wissenschaftlichen Fachliteratur auf diesem Herstellungsverfahren basiert. Zusätzlich könnten weitere z-Pin Geometrien untersucht werden. Sternförmige Pins bieten vielfältige Möglichkeiten zur Erhöhung der Oberfläche. Wohingegen ovale z-Pins die Ausbildung der harzreichen Zonen gänzlich unterbinden könnten. Um Schwächungen der Bindung zwischen z-Pin und Matrixmaterial zu unterbinden, könnten ebenfalls z-Pins genutzt werden, bei denen chemisch das Matrixmaterial herausgelöst wurde. Beim Einbringen der Pins und Tränken der Fasern würden sich die Hohlräume im Pin mit Harz füllen und ein nahezu perfekter Verbund zwischen Laminat und z-Pin entstehen.

Bezüglich der Ergebnisse dieser Arbeit sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Verbesserungen unter Impactbelastungen zu erklären. Andere mechanische Eigenschaften, wie z.B. Druck- und Biegeeigenschaften oder Kennwerte unterschiedlicher reiner und vermischter Bruchmodi müssten ebenfalls ermittelt werden, um eine ganzheitliche Bewertung zu ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] HACHENBERG, D.: The Role of Advanced Numerical Methods in the Design and Certification of Future Composite Aircraft Structures. In: *5th World Congress on Computational Mechanics*. Wien, Österreich, 7 - 12 Juli 2002
- [2] CHANG, P.: *The Mechanical Properties and Failure Mechanisms of Z-Pinned Composites*, RMIT University, PhD, 2006
- [3] TONG, L. ; OAKELEY, A. S. ; TONG, L.: *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*. Elsevier Science and Technology, 2002. – ISBN 0080439381
- [4] CHOI, I. H. ; AHN, S. M. ; YEOM, S. H. ; HWANG, I. H. ; LEE, D. S.: Manufacturing of z-pinned composite laminates. In: *Proceedings of ICCM-17 Conference*. Edinburg, Schottland, 2009
- [5] LEFÈBURE, P.: Assembly of dry carbon preforms by a z-pinning technology. In: *Proceedings of SAMPE Europe Technical Conference*. Toulouse, Frankreich, 2006
- [6] STEEVES, C. A. ; FLECK, N. A.: In-plane properties of composite laminates with through-thickness pin reinforcement. In: *International Journal of Solids and Structures* 43 (2006), Nr. 10, S. 3197–3212. ISBN 0020–7683
- [7] MOURITZ, A. P.: Review of z-pinned composite laminates. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38 (2007), dec, Nr. 12, S. 2383–2397. ISBN 1359–835X
- [8] SWEETING, R. D. ; THOMSON, R. S.: The effect of thermal mismatch on Z-pinned laminates composite structures. In: *Composite Structures* 66 (2004), S. 189 – 195
- [9] MOURITZ, A.P. ; CHANG, P.: Tension fatigue of fibre-dominated and matrix-dominated laminates reinforced with z-pins. In: *International Journal of Fatigue* 32 (2010), S. 650–658
- [10] MOURITZ, A. P.: Design dilemma for z-pinned composite structures. In: *27th International Congress of the Aeronautical Sciences*. Nizza, F, 19 - 24 September 2010
- [11] VAIDYA, U. K. ; DUNCAN, B. ; KOPACZ: Affordable processing and characterization of multi-functional z-pin reinforced VARTM composites. In: *Proceeding of the 13th ICCM*. Peking, China, 25 - 29 Juni 2001
- [12] GRASSI, M. ; ZHANG, X. ; MEO, M.: Prediction of stiffness and stresses in z-fibre reinforced

- composite laminates. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33 (2002), dec, Nr. 12, S. 1653–1664. ISBN 1359–835X
- [13] LANDER, J. K.: *Designing with z-pins: locally reinforced composite structures*. Cranfield, Cranfield University, Diss., 2009
- [14] MOURITZ, A. P.: Compression properties of z-pinned composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 67 (2007), dec, Nr. 15-16, S. 3110–3120. ISBN 0266–3538
- [15] CHANG, P. ; MOURITZ, A. P. ; COX, B. N.: Flexural properties of z-pinned laminates. In: *Composites Part A* 38 (2007), S. 224 – 251
- [16] GRASSI, M.: *Numerical modelling of composite laminates with through-thickness-reinforcements*, Cranfield University, PhD, 2003
- [17] AZTEX: Preliminary lamina, laminate and sub-element test results for Z-Fiber reinforced IM7/997-3 unidirectional tape and fabric. In: *Composites Science and Technology* V1.3 (1998)
- [18] STEEVES, G. A. ; FLECK, N. A.: Z-pinned composite laminates: knockdown in compressive strength. In: *DFC Conference*. London, UK, 18 - 19 März 1999
- [19] O'BRIEN, T. K. ; KRUEGER, R.: Influence of Compression and Shear on the Strength of Composite Laminates with Z-Pinned Reinforcement. In: *Nasa Bericht* TM-2005-213768 (2005)
- [20] STEEVES, C. A.: *Mechanics of Failure in Composite Structures*, University of Cambridge, PhD, 2001
- [21] POLAHA, J. J.: Effect of interfacial ply orientation on the fracture toughness of a laminated graphite/epoxy composite. In: *35th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structure, Structural Dynamics and Materials Conference and Exhibit*. Long Beach, USA, 1994
- [22] TAY, T. E.: Characterization and analysis of delamination fracture in composites: An overview of developments from 1990 to 2001. In: *Applied Mechanics* 56 (2003)
- [23] RICHARDSON, M. O. W. ; WISHEART, M. J.: Review of low-velocity impact properties of composite materials. In: *Composites Part A* 27 (1996), S. 1123–1131
- [24] GRANPAYEH, C.: *Konstruktion einer Versuchsvorrichtung zur Durchführung von Mode II- und Mixed-Mode-Versuche an End Notched Flexure Proben und Untersuchungen des Verformungsverhaltens geklebter Verbindungen mittels der Methode der Finiten Elemente*, Technische Universität Braunschweig, Studienarbeit, 1999
- [25] PARIS, I. ; POURSATIP, A.: Delaminations under pure Mode II loading show significant local Mode I behavior. In: *12th International Conference on Composite Materials*. Paris, F, 1999

-
- [26] MARTIN, R. H.: Evaluation of the split cantilever beam for mode III delamination testing. In: *Composite Materials: Fatigue and Fracture 3* (1991), S. 243 – 266
- [27] MOURA, M. ; CAMPILHO, R. ; AMARO, A. M. ; P.REIS: Interlaminar and intralaminar fracture characterization of composites under mode I loading. In: *Composite Structures* 92 (2010), S. 144 – 149
- [28] TROULIS, E.: *Effect of Z-Fiber pinning on the mechanical properties of carbon fibre/epoxy composites*, Cranfield University, PhD, 2003
- [29] CHOI, N. S. ; KINLOCH, A. J. ; WILLIAMS, J. G.: Delamination fracture of multidirectional carbon-fiber/epoxy composites under mode I, mode II and mixed-mode I/II loading. In: *Journal of Composite Materials* 33 (1999), S. 73 – 100
- [30] TAO, J. ; SUN, C. T.: Influence of ply orientation on delamination in composite laminates. In: *Journal of Composite Materials* 32 (1998), S. 1933 – 1947
- [31] DAVIDSON, B. D. ; KRÜGER, R. ; KÖNIG, M.: Effect of stacking sequence on energy release rate distributions in multidirectional DCB and ENF specimens. In: *Engineering Fracture Mechanics* 55 (1996), S. 557 – 569
- [32] KNAUPP, M. ; SCHARR, G.: Einsatz von z-Pins zur Modifikation der Festigkeit schlag- und stoßbelasteter Verbundstrukturen. In: *Konstruktion* 4 (2012), S. 77 – 82
- [33] MOURITZ, A. P. ; BANNISTER, M. K. ; FALZON, P. J. ; LEONG, K. H.: Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 30 (1999), dec, Nr. 12, S. 1445–1461. ISBN 1359–835X
- [34] YAN, W. ; LIU, H.-Y. ; MAI, Y.-W.: Numerical study on the mode I delamination toughness of z-pinned laminates. In: *Composites Science and Technology* 63 (2003), S. 1481 – 1493
- [35] CUI, H. ; YULONG, L. ; KOUSSIOS, S. ; ZU, L. ; BEUKERS, A.: Bridging micromechanisms of Z-pin in mixed mode delamination. In: *Composites Structures* 93 (2011), S. 2685 2695
- [36] CARTIÉ, D. D. R. ; TROULIS, M. ; PARTRIDGE, I. K.: Delamination of Z-Pinned carbon fibre reinforced laminates. In: *Composites Science and Technology* 66 (2006), S. 855 – 861
- [37] PARTRIDGE, I. K. ; CARTIÉ, D. D. R.: Delamination resistance laminates by Z-Fiber pinning: Part I manufacture and fracture performance. In: *Composites Part A* 36 (2005), S. 55 – 64
- [38] CARTIÉ, D. D. R. ; PARTRIDGE, I. K.: Delamination Behaviour of Z-Pinned Laminates. In: *Proceedings of the 2nd European Structural Integrity Society Technical Committee 4 Conference*. Les Diablerets, CH, September 1999
- [39] FREITAS, G. ; MAGEE, G. ; DARDZINSKI, P. ; FUSCO, T.: Fibre insertion process for improved damage tolerance in aircraft laminates. In: *Journal of Advanced Materials* 25 (1994), S. 36 – 43

- [40] LIU, H.-Y. ; ZHOU, L.-M. ; MAI, Y.-W.: On fibre pull-out with a rough interface. In: *Philosophical Magazine A* 70 (1994), S. 359 – 372
- [41] DAI, S.-C. ; YAN, W. ; LIU, H.-Y. ; MAI, Y.-W.: Experimental study on z-pin bridging law by pullout test. In: *Composites Science and Technology* 64 (2004), S. 2451 – 2457
- [42] COX, B. N.: Snubbing Effects in the Pullout of a Fibrous Rod from a Laminate. In: *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 12 (2005), S. 85 – 98
- [43] VASQUEZ, J. T. ; CASTANIÉ, B. ; BARRAU, J.-J. ; SWIERGIEL, N.: Multi-level analysis of low-cost Z-pinned composite joints Part 1: Single Z-pin behavior. In: *Composites Part A* 41 (2011), S. 2070 – 2081
- [44] CARTIÉ, D. D. R.: *Effect of Z-Fibers on the Delamination Behaviour of Carbon Fibre-Epoxy Laminates*, Cranfield University, PhD, 2000
- [45] CARTIÉ, D. D. R. ; COX, B. N. ; FLECK, B. N.: Mechanisms of crack bridging by composite and metallic rods. In: *Composites Part A* 35 (2004), S. 1325 – 1336
- [46] YAN, W. ; LIU, H.-Y. ; MAI, Y.-W.: Mode II delamination toughness of z-pinned laminates. In: *Composites Science and Technology* 64 (2004), S. 1937 – 1945
- [47] SJÖBLOM, P. O. ; HARTNESS, J. T. ; CORDELL, T. M.: On low-velocity impact testing of composite materials. In: *Journal of Composite Materials* 22 (1988), S. 30 – 52
- [48] SHIVAKUMAR, K. N. ; EIBER, W. ; ILLG, W.: Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates. In: *AIAA Journal* 23 (1985), S. 442–449
- [49] CANTWELL, W. J. ; MORTON, J.: The impact resistance of composite materials - a review. In: *Composites* 22 (1991), S. 347 – 362
- [50] ABRATE, Serge: *Impact on Composite Structures*. Cambridge University Press, 1998. – ISBN 0521473896
- [51] LIU, D. ; MALVERN, L.E.: Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates. In: *Journal of Composite Materials* 21 (1987), S. 594 – 609
- [52] JOSHI, S. P. ; SUN, C. T.: Impact-induced fracture initiation and detailed dynamic stress field in the vicinity of impact. In: *American Society of Composites, 2nd Tech. Conf.*, 1987
- [53] REID, S. R. ; ZHOU, G.: *Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures*. Woodhead Publishing Limited, 2000. – ISBN 1855734230
- [54] CANTWELL, W. J. ; MORTON, J.: Geometrical effects in the low velocity impact response of CFRP. In: *Composites Structures* 12 (1989), S. 39 – 59
- [55] TENG, J. ; ZHUANG, Z. ; BINTAI, L.: A study on low-velocity impact damage of Z-pin

- reinforced laminates. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 21 (2007), S. 2125 – 2132
- [56] WU, H.-Y. T. ; SPRINGER, G. S.: Measurement of matrix cracking and delamination caused by impact on composite plates. In: *Journal of Composite Materials* 22 (1988), S. 518 – 532
- [57] CUI, W. ; WISNOM, M. R.: A combined stress-based and fracturemechanichs-based model for predicting delamination in composites. In: *Composites* 24 (1993), S. 467 – 474
- [58] TAKEDA, N. ; SIERAKOWSKI, R. L. ; MALVERN, L. E.: Microscopic observations of cross sections of impacted composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 4 (1982), S. 40 – 44
- [59] RAZI, H. ; KOBAYASHI, A. S.: Delamination in cross-ply laminated composites subjected to low-velocity impact. In: *AIAA Journal* 31 (1993), S. 1498 – 1502
- [60] LIU, D.: Impact-induced delamination - a view of bending stiffness mismatching. In: *Journal of Composite Materials* 22 (1988), S. 674 – 692
- [61] SELA, N. ; ISHAI, O.: Interlaminar fracture toughness and toughening of laminated composite materials: a review. In: *Composites* 20 (1989), S. 423 – 435
- [62] PETIT, S. ; BOUVET, C. ; BERGEROT, A. ; BARRAU, J.-J.: Impact and compression after impact experimental study of a composite laminate with a cork thermal shield. In: *Composites Science and Technology* 67 (2007), S. 3286 – 3299
- [63] DICKINSON, L. C. ; FARLEY, G. L. ; HINDERS, M. K.: Translaminar reinforced composites: a review. In: *Journal of Composites Technology* 21 (1999), S. 3 – 15
- [64] ZHANG, X. ; HOUNSLOW, L. ; GRASSI, M.: Improvement to low-velocity impact and compression-after-impact performance of z-fibre pinning. In: *Proceedings of the 13th international conference on composite materials*. San Diego, USA, July 2003
- [65] PARTRIDGE, I. K. ; CARTIE, D.D.R. ; BONNINGTON, T.: *Manufacture and performance of z-pinned composites*. CRC Press LLC
- [66] PARTRIDGE, I. K. ; CARTIE, D.D.R. ; TROULIS, M. ; GRASSI, M. ; ZHANG, X.: Evaluating the mechanical effectiveness of z-pinning. In: *Proceedings of the SAMPE technical conference*. Seattle, USA, September 2004
- [67] ISA, M. D. ; FEITH, S. ; MOURITZ, A. P.: Compression fatigue properties of z-pinned quasiisotropic carbon/epoxy laminate with barelay visible impact damage. In: *Composite Structures* 93 (2011), S. 55 – 64
- [68] ZHANG, X. ; HOUNSLOW, L. ; GRASSI, M.: Improvement of low-velocity impact and compression-after-impact performance by z-fibre pinning. In: *Composites Science and Technology* 66 (2006), Nr. 15, S. 2785 – 2794

- [69] DOREY, G.: Impact damage in composites - development, consequences and prevention. In: *Proceedings of the ICCM 6 and ECCM 2*. London, GB, 1987
- [70] DAVIES, G. A. O.: Aircraft structures. In: *Aeronautical Journal* 100 (1996), S. 523 – 529
- [71] ZHANG, X.: Impact damage in composite aircraft structures - experimental testing and numerical simulation. In: *Mechanical Engineering* 212 (1998), S. 245 – 249
- [72] *Delivery Specification: Torayca T700SC-12000-50C High Performance Carbon Fiber*. 2007
- [73] *Technisches Datenblatt: Epoxyd-Laminierharz-System LR 385 mit den Härtern LH385 und LH386*. 2010
- [74] *Material Properties: DPP high performance micro-pultrusion profiles*. 2012
- [75] Norm ISO 527 1997. *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften*
- [76] NAIK, R. A.: TEXCAD - Textile Composite Analysis for Design. In: *NASA Report NAS1-19399* (1995), S. 587 – 596
- [77] HINDERS, M. ; DICKINSON, L.: Trans-Laminar-Reinforced (TLR) Composites. In: *NASA Report NAG-1-1647* (1997)
- [78] Norm ISO 15024 1995. *Fibre-reinforced plastic composites - Determination of mode I interlaminar fracture toughness, G_{IC} , for unidirectionally reinforced materials*
- [79] ZHONG, S.L. ; TONG, L.: Bending effect analysis of metallic z-pins on mode I delamination toughness of DCB specimen. In: *18th International Conference On Composite Materials*. Jeju Island, Korea, 21 - 26 August 2009
- [80] LIU, H.-Y. ; YAN, W. ; YU, X.-Y. ; MAI, Y.-W.: Experimental study on z-pinned DCB Mode I Delamination. In: *Proceedings of the International Conference Structural Integrity and Fracture*. Brisbane, Australien, 26 - 29 September 2004
- [81] SONG, M. C. ; SANKAR, B. V. ; SUBASH, G. ; YEN, C. F.: Analysis of mode I delamination of z-pinned composites using a non-dimensional analytical model. In: *Composites: Part B* 43 (2012), S. 1776 – 1784
- [82] LIU, H.-Y. ; YAN, W. ; YU, X.-Y. ; MAI, Y.-W.: Experimental study on effect of loading rate on mode I delamination of z-pin reinforced laminates. In: *Composites Science and Technology* 67 (2007), S. 1294 – 1301
- [83] VAZQUEZ, J. T.: *Identification et modélisation du comportement des structures composites assemblées par cloutage*, Université de Toulouse, PhD, 2009
- [84] Norm AITM-0010 2005. *Fibre Reinforced Plastics - Determination of Compression Strength After Impact*

-
- [85] Norm DIN 65561 2001. *Faserverstärkte Kunststoffe - Prüfung von multidirektionalen Laminaten; Bestimmung der Druckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung*
- [86] PAPANICOLAOU, G. C. ; BLANAS, A. M. ; POURNARAS, A. V. ; STAVROPOULOS, C. D.: Impact Damage and Residual Strength of FRP Composites. In: *Key Engineering Materials* 141 - 143 (1998), S. 127 – 148
- [87] SANCHEZ-SAEZ, S. ; BARBERO, E. ; ZAERA, R. ; NAVARRO, C.: Compression after impact of thin composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 65 (2005), S. 1911–1919
- [88] CHANG, P. ; MOURITZ, A. P. ; COX, B. N.: Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension. In: *Composites Part A* 37 (2006), S. 1501–1513
- [89] DICKINSON, L. C. ; FARLEY, G. L. ; HINDERS, M. K.: Prediction of effective three-dimensional elastic constants of translaminar reinforced composites. In: *Journal of Composites Technology* 33 (1999), S. 1002 – 1029
- [90] FLEMMING, M. ; ZIEGMANN, G. ; ROTH, S.: *Faserverbundbauweisen, Halbzeuge und Bauweisen*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1996. – ISBN 1855734230
- [91] MOURITZ, A. P. ; CHANG, P. ; KONG, H. ; COX, B. N.: Tensile properties of z-pinned polymer composites. In: *Proceedings of the 27th international SAMPE Europe Conference*. Paris, F, 27 - 29 März 2006
- [92] GRASSI, M. ; ZHANG, X.: Finite element analyses of mode I interlaminar delamination in z-fibre reinforced composite laminates. In: *Composites Science and Technology* 63 (2003), S. 1815 – 1832
- [93] FU, S.-Y. ; YUE, C.-H. ; HU, X. ; MAI, Y.-W.: Analyses of the micromechanics of stress transfer in single- and multi-fiber pull-out tests. In: *Composites Science and Technology* 60 (2000), S. 569 – 579
- [94] ZHOU, L.-M. ; MAI, Y.-W.: A new model for evaluating of the interfacial friction coefficient and residual clamping stress in a fibre-push-out test. In: *Philosophical Magazine Letters* 68 (1993), S. 5 – 11
- [95] KIM, J. K. ; MAI, Y.-W.: Stress transfer in the fibre fragmentation test Part II Multiple fibre composites. In: *Journal of Materials Science* 30 (1995), S. 3024 – 3032
- [96] CHILDRESS, J. J. ; FREITAS, G.: Z-Direction pinning of composite laminates for increased survivability. In: *Proceedings of the AIAA aerospace design conference*. Irvine, California, Februar 1992

Danksagung

Ich möchte ganz herzlich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Gerhard Scharr, bedanken. Seine Hilfe machte das Schreiben der vorliegenden Arbeit erst möglich. Während dieser Zeit möchte ich ebenfalls für seine guten Ratschläge, die Unterstützung und viele hilfreiche, anregende Diskussionen danken.

Den Gutachtern Herrn Prof. Dr. Martin Maier und Herrn Prof. Dr. Michael Heine danke ich für ihre Zeit zum Lesen der Arbeit und erstellen des Gutachtens.

Herrn Prof. Seitz und seinen Mitarbeitern, insbesondere den Herren Philipp Drescher, Sebastian Spath und Mathias Cornelsen, danke ich für die viele Hilfe und Unterstützung zur Herstellung der gefrästen Preformen und zur mechanischen Prüfung.

Mein Dank gilt weiterhin allen Mitarbeitern vom Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau und CAD. Vor allem bei meinen ehemaligen wissenschaftlichen Hilfskräften, Masteranden und Diplomanden, Felix Baudach, Johannes Franck, Christoph Politz und Andreas Groß möchte ich mich für ihre Unterstützung und anregenden Diskussionen bedanken.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Frau und meiner Familie, die mir stets zur Seite standen und mich durchweg unterstützt und motiviert haben.

Rostock, 18.09.2013

Matthias Knaupp