

eingereicht/handed in: 01.12.2022

angenommen/accepted: 16.01.2023

**Tim Luplow¹, Richard Protz², Linus Littner³, Jonas Drummer⁴, Eckart Kunze²,
Sebastian Heimbs¹, Peter Horst¹, Maik Gude², Marc Kreuzbruck³, Bodo Fiedler⁴**

¹Institut für Flugzeugbau und Leichtbau (IFL), Technische Universität Braunschweig

²Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK), Technische Universität Dresden

³Institut für Kunststofftechnik (IKT), Universität Stuttgart

⁴Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe (IPC), Technische Universität Hamburg

Herausforderungen dickwandiger, duroplastischer Faser-Kunststoff-Verbunde in der Herstellung sowie mechanischen und zerstörungsfreien Prüfung - Ein Review

Dieser Artikel gibt einen umfassenden, ganzheitlichen Überblick über das Problem der Dickenskalierung von Faser-Kunststoff-Verbunden. Beleuchtet wird dabei neben der Herstellung und den damit einhergehenden Herausforderungen, die mechanische Prüfung unter verschiedenen Beanspruchungsarten. Das Hauptaugenmerk der experimentellen, zerstörenden Untersuchungen liegt auf dem sogenannten Größeneffekt, also der vergleichenden Untersuchung von dünnwandigen und dickwandigen Laminaten sowohl unter quasistatischer, Impact- als auch Ermüdungsbelastung. Zusätzlich wird ein Einblick in die in diesem Themenkomplex relevanten zerstörungsfreien Prüfverfahren gegeben.

Challenges of thick-walled fibre-reinforced thermosets in manufacturing, destructive and non-destructive testing - A review

This article provides a comprehensive, holistic overview of the problem of scaling fibre composites in thickness direction. In addition to the manufacturing and associated problems, the destructive testing under different load types is covered. One of the main focuses of the experimental investigations is the so-called size effect, i.e., the comparative examination of thin-walled and thick-walled laminates. In addition, an insight into the non-destructive testing methods relevant to this topic is given.

Herausforderungen dickwandiger, duroplastischer Faser-Kunststoff-Verbunde in der Herstellung sowie mechanischen und zerstörungsfreien Prüfung - Ein Review

Luplow, T., Protz, R., Littner, L., Drummer, J., Kunze, E., Heimbs, S., Horst, P., Gude, M., Kreutzbruck, M., Fiedler, B.

1 EINLEITUNG

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) bieten aufgrund ihrer herausragenden dichtespezifischen mechanischen Eigenschaften und der Möglichkeit der Orientierung der lasttragenden Fasern an die Lastrichtung ein sehr hohes Leichtbaupotenzial und sind als Konstruktionswerkstoff für Strukturbauteile in vielen Bereichen etabliert. Ein FKV-Laminat ist dabei aus mehreren einzelnen Faserlagen aufgebaut, die unterschiedliche Orientierungen haben können. Idealerweise sind die Fasern mit ihren hohen Steifigkeiten und Festigkeiten in Lastrichtung ausgerichtet. Dabei geht der Trend in den verschiedenen Ingenieurs- und Leichtbaudisziplinen (Flugzeugbau, Windkraft, u.v.m.) dahin, auch wesentliche lasttragende Elemente in Faserverbundbauweise mit erhöhter Wandstärke auszulegen. Beispiele hierfür sind in Bild 1.1 dargestellt.



Bild 1.1: Ausgewählte Beispiele für dickwandige FKV-Bauteile am ILK, Schwerlastgelenkwelle mit Wanddicken bis 20 mm (links) und Hydraulikblasenspeicher mit Wanddicken bis 30 mm (rechts)

Mit zunehmender Laminatdicke steigen auch die Herausforderungen bei der Herstellung, der zerstörungsfreien sowie zerstörenden Prüfung. Während die Schwierigkeit bei der Herstellung darin besteht, die Fertigungsqualität auf dem Niveau dünnwandiger Lamine zu gewährleisten, besteht die Anstrengung bei der Konstruktion und dem Design dickwandiger FVK darin, mögliche Abschläge in den mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit zu berücksichtigen. Bisher wird dieser Einfluss in vielen Herstellungsrichtlinien und Prüfnormen nicht berücksichtigt und muss daher in Form von Sicherheitsfaktoren einbezogen werden. Dies mindert das Leichtbaupotenzial. Darüber hinaus ist die Mindestwanddicke, ab welcher FKV-Lamine als dickwandig bezeichnet werden, von verschiedenen Faktoren (wie z.B. der Belastungsart) abhängig und in der Literatur nicht immer konsistent. So werden Lamine unter quasistatischer Druckbelastung bereits ab 4 mm Wanddicke [2, 3] und unter Zugbelastung ab einer Wanddicke von 10 mm [4, 5] als dickwandig bezeichnet. Ferner rangieren in der Fachwelt sogenannte ultradicke Lamine, wobei die dafür notwendige Laminatdicke unterschiedlich angegeben wird. So wird diese nach [6] bereits bei einer Wanddicke von 30 mm erreicht, während in [7] 60 mm erwähnt werden und [8] nur den Wurzelbereich des Blades mit über 100 mm Wanddicke als ultradick bezeichnet.

Dieser Artikel soll daher einen umfassenden Überblick über die Besonderheiten und Herausforderungen bei der Herstellung und Charakterisierung dickwandiger FKV-Lamine liefern.

2 HERSTELLUNG UND QUALITÄTSÜBERWACHUNG VON DICKWANDIGEN FKV

Dickwandige FKV-Lamine stellen eine Herausforderung bei der Herstellung und der Qualitätsüberwachung dar. So können Dickeneffekte auftreten, die in der Fachwelt als statistischer Größeneffekt und als technologischer Größeneffekt bezeichnet werden. Als Ursache für den statistischen Größeneffekt wird angenommen, dass in einem größeren beanspruchten Bauteilvolumen statistisch gesehen die Wahrscheinlichkeit für Fehlstellen größer ist und die Festigkeit daher geringer als in einem kleinen Bauteilvolumen. Der technologische Größeneffekt ist auf Unterschiede in der Herstellung von dickwandigen im Vergleich zu dünnwandigen FKV-Laminen zurückzuführen [9]. Dickeneffekte können während der Herstellung von dickwandigen Laminen mit duroplastischer Matrix in den Prozessschritten Faserablage, Faserimprägnierung und Aushärtung des Laminats entstehen und sich in Form von Faserfehlstellungen in der Laminebene und in Dickenrichtung, Faltenbildungen und harzreichen Bereichen innerhalb und zwischen Filamentbündeln (Rovings) [10, 11] auch in Abhängigkeit der Laminatdicke [9, 12] zeigen. Im FKV-Laminat können sich diese Fertigungseffekte lokal aber auch global ausbilden und zu variierenden

mechanischen Eigenschaften führen [3]. Ob es sich bei den Effekten um Fertigungseffekte oder Fertigungsdefekte handelt, hängt dabei neben der Anzahl, dem Ort ihres Auftretens und der Größe von den lokalen Steifigkeits- und Festigkeitsreserven des Bauteils sowie von der Anwendungsbranche ab [12]. In der Luftfahrtindustrie sind die erlaubten Grenzen sehr eng, während in der Automobilindustrie zu Gunsten kurzer Zykluszeiten ein Kompromiss aus Fertigungseffekten und Prozessstabilität gefunden werden muss.

2.1 Herstellungsverfahren

Basierend auf der Faserablage und -imprägnierung mit duroplastischer Matrix können die etablierten FKV-Fertigungsverfahren insbesondere zur Herstellung dickwandiger Lamine in folgende drei Gruppen unterteilt werden:

- In der ersten Gruppe werden Verfahren zusammengefasst, bei denen die Faserablage trocken mit anschließender Faserimprägnierung durch Flüssigimprägnierverfahren erfolgt. Die Aushärtung erfolgt nach der vollständigen Fasertränkung.
- Der zweiten Kategorie können Verfahren zugeordnet werden, bei denen die Faserablage vorimprägnierter bzw. nasser Fasern auf einer Ablageform erfolgt. Die Aushärtung erfolgt nach vollständiger Faserablage.
- In die dritte Gruppe werden Verfahren eingeordnet, bei denen die Reihenfolge bzw. die Prozessschritte von Faserablage und Fasertränkung nicht eindeutig zuzuordnen sind.

Bei allen Verfahren folgt als letzter Schritt die Aushärtung. Unabhängig vom Herstellungsverfahren ist die Aushärtung dickwandiger Lamine problematisch durch die bei der chemischen Reaktion entstehende Exothermie. Dicke Lamine dem vom Hersteller empfohlenen Aushärtezyklus für dünne Bauteile zu unterziehen führt zu Fertigungsfehlern [13, 14]. Die Reaktionswärme kann durch die große Laminatdicke und geringe Wärmeleitfähigkeit des Verbunds schlecht abgeleitet werden und führt zu Laminatüberhitzung sowie mitunter zu thermischer Schädigung der Matrix. Um dies zu verhindern, muss die Härtungstemperatur abgesenkt werden, ansonsten kann das Bauteil nur schrittweise in Schichten hergestellt werden [7]. Beide Maßnahmen vergrößern die Herstellungszeit. Um eine Laminatschädigung durch exothermiebedingte Temperaturspitzen und verringerte Wärmeabfuhr zu verhindern, kann die Temperatur bis zum Erreichen der maximalen Härtungstemperatur stufenweise angehoben werden [15, 16]. Ein weiterer Ansatz ist die numerische Optimierung der Härtungszyklen. Ein zweiter Gesichtspunkt sind Temperatur- und Aushärtegradienten in dicken Laminen, die zu Verzug [9], Poren [15] und bei Laminen insbesondere mit über 100 Lagen zu Faservolumengehaltsänderungen [13] führen können. Weiterhin bewirken Temperaturgradienten das Auftreten von Eigenspannungen, die durch eine lokal unterschiedliche

Aushärtung über der Laminatdicke hervorgerufen werden [17, 18] und im schlimmsten Fall zu Delaminationen führen [4]. Auch bei der Abkühlung auf Raumtemperatur am Ende des Aushärtezyklus können Eigenspannungen aufgrund von Temperaturgradienten entstehen [13].

2.1.1 Ablage trockener Fasern in Kombination mit Flüssigimprägnierverfahren

Bei der Verarbeitung trockener Fasern wird das vor der Infiltration in die Kavität einzulegende Verstärkungsmaterial üblicherweise in einem vorgelagerten Preformprozess hergestellt. Für flächige Bauteile erfolgt dazu ein Zuschnitt von Geweben oder Gelegen, die zur Preform umgeformt und mittels Pulver-Bindertechnologie fixiert werden. Auf Faserdeformationen aus der Umformung textiler Halbzeuge gehen [19] und [20] ein. Für Hohlstrukturen, wie beispielsweise Antriebswellen, werden die Flechttechnik oder das Trockenwickeln vielfach als effiziente Direktpreforming-Verfahren genutzt, Bild 2.1.

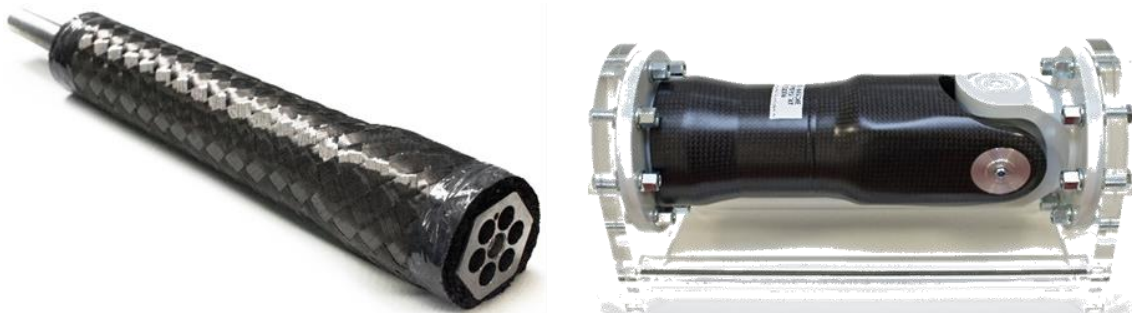


Bild 2.1: Dickwandig geflochtene und im RTM-Verfahren infiltrierte Antriebswelle (links) und Antriebswelle mit integrierter Kardangelenkgebel (rechts) des ILK

Mittels Flechttechnik können Verstärkungsfasern wie Kohlenstofffasern und Glasfasern mit sehr hoher Geschwindigkeit auf den Flechtkern trocken abgelegt werden [1]. Dabei ist die Faserrichtung entlang der Bauteilachse variabel einstellbar und so auch an die lokal variierenden Beanspruchungen des Bauteils anpassbar [21]. Faserwelligkeiten in Dickenrichtung stellen ein Problem bei der Ablage der trockenen Fasern im Flecht- oder Wickelprozess dar [22]. Beim konventionellen Flechten treten Verdichtungen des Laminats durch das Ineinanderlegen von Oberflächenwelligkeiten (sogenannte *Nesting-Effekte*) auf, die einerseits harzreiche Stellen an Kreuzungspunkten vermeiden, andererseits aber den Faservolumengehalt beeinflussen, da die Dicke aller abgelegten Flechtlagen kleiner als die Summe aller Einzelflechtlagen ist. Außerdem tritt bei Geflechtem je nach Flechtmuster eine Ondulation in Dickenrichtung ähnlich wie bei Geweben auf, was sich als Faserwelligkeit negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt. In [23] wird ein

Flechtprozess beschrieben, bei dem ein uniaxiales Geflecht aus Verstärkungsrovings und Haltefäden (wie ein Unidirektional-Gewebe) auf dem Kern abgelegt und die Ondulation fast vollständig vermieden wird. Bei letztgenanntem Prozess kann kaum Nesting auftreten. Die Preform wird anschließend mit dem Kern in das Infiltrationswerkzeug eingelegt, infiltriert und konsolidiert. Nach oder während der Entformung aus dem Werkzeug erfolgt auch die Entformung des Kerns.

Die Flüssigimprägnierverfahren zur Tränkung trockener Preforms können in folgende zur Herstellung dickwandiger Lamine etablierte Unterverfahren gegliedert werden: Zum einen in Verfahren mit einseitig fester Werkzeughälfte, z.B. das VARI- (*vacuum assisted resin infusion*) [7, 24, 25] und VAP-Verfahren (*vacuum assisted process*) [26] oder in Verfahren mit geschlossenem Werkzeug. Bei Verfahren mit geschlossenen Werkzeugen kann weiter nach dem Dosiervorgang in vakuumgestützte Verfahren, z.B. VARTM (*vacuum assisted resin transfer molding*) [8], in Niederdruckdosierverfahren, z.B. RTM (*resin transfer molding*) [18, 24] (mittels Drucktopf oder Niederdruckdosieranlage) oder in Hochdruckdosierverfahren (HD-RTM) [27, 28] unterschieden werden. Findet während der Imprägnierung ein Werkzeughub statt, sodass eine Tränkung der Verstärkungsfasern in Dickenrichtung forciert wird, so ist zusätzlich das *Compression-RTM* (C-RTM) [29] zu nennen. Beim C-RTM befindet sich die Faserstruktur im Werkzeug. Die Harzinjektion mittels Dosiermaschine erfolgt beim C-RTM in ein 0,5 mm bis 2 mm [30] geöffnetes Werkzeug, um den Vorteil eines geringeren Fließwiderstandes bei einer weniger starken Kompaktierung der Fasern zu nutzen. Die vollständige Imprägnierung findet durch den kurzen finalen Schließhub statt.

Damit beim Niederdruck-RTM-Verfahren eine vollständige Tränkung der Preform gewährleistet ist, müssen langsamhärtende Harze verwendet oder die Werkzeugtemperatur abgesenkt werden. Dies führt insbesondere bei dicken Laminen zu langen Prozesszeiten. Aus diesen Gründen wird das Niederdruck-RTM-Verfahren nur in Kleinst- und Kleinserien angewendet. Weiterhin erhöht sich mit steigendem Fülldruck der Werkzeuginnendruck, gegen den die Niederdruckpumpen nur begrenzt nachregeln können. Daraufhin ändert sich jedoch ihre Förderleistung, was zu Abweichungen des Mischungsverhältnisses und zu schwankenden Prozessparametern führt. Dadurch ist eine Reproduzierbarkeit der Fertigung nicht mehr gewährleistet. Zur Verkürzung der Taktzeit und damit zur Ermöglichung der großserientauglichen Herstellung von Strukturbauteilen gewinnt das Hochdruck-RTM-Technik zunehmend an Bedeutung, da hier ein volumengesteuerter Austrag erfolgt und die maximale Austragleistung gegenüber der Niederdruck-RTM-Technik deutlich höher liegt. Dabei sind sowohl Epoxid- als auch Polyurethanharze mit sehr kurzer Topfzeit verarbeitbar. Durch den Einsatz von schnellhärtenden Harzsystemen mit einer Viskosität <100 mPas sind auch dickwandige FKV-Strukturen mit einer hohen Anzahl von Einzellagen zügig infiltrierbar [28]. Bei einer Harzinjektion mit hohen

Austragsraten können allerdings Faserverschiebungen während der Formfüllung auftreten, wobei dickwandige Preformen stärker betroffen sind als dünnwandige. In [19] sind weitere Fertigungseffekte für Flüssigimprägnierverfahren zusammengefasst.

2.1.2 Ablage vorimprägnierter oder nasser Fasern

In diese Gruppe fallen Herstellverfahren bei denen vorimprägnierte Fasern (Prepregs) in eine Form abgelegt und nachfolgend bei Raumtemperatur oder in einem Ofen gegebenenfalls auch unter Druck (Autoklav) aushärten. Für die Herstellung dickwandiger Laminare werden insbesondere das Handlaminieren [15], Nasswickeln [15, 31, 32], das Prepreg-Autoklav-Verfahren [4, 16, 33] und das *Sheet-Molding-Compound*-Pressen (SMC-Pressen) eingesetzt [34].

Handlaminieren und Fasersprühen stellen trotz des geringen erzielbaren Faservolumengehalts von 20 bis 35 % immer noch sehr weitverbreitete Verfahren bei der Herstellung dickwandiger Laminare für bspw. Tanks oder Flanschanschlüsse dar. Hier werden Schichtdicken von maximal 12 bis 15 mm in einem Arbeitsdurchgang hergestellt. Nach einer Wartezeit und dem Abklingen der exothermen Reaktionswärmespitze kann der Laminiervorgang fortgesetzt werden. Ein weiterer Effekt, besonders bei dicken Bauteilen, ist die Gefahr von Einfallstellen aufgrund von Harzschwindung [15].

Im vakuumgestützten Prozess mit einseitig offenem Werkzeug gibt es den Ansatz, Bauteile mit großer Wanddicke in zwei oder mehr Infiltrationsschritten zu infiltrieren. Der erste Teil des Laminats wird vorgehärtet und anschließend darauf wieder ein Vakuumaufbau für die Aushärtung in Infiltration der nächsten Schicht durchgeführt [7].

In [14] und [13] wird die Herstellung von Laminaten von 31,5 respektive 100 mm im Prepreg-Verfahren beschrieben. Druckbehälter mit dickwandigen Segmenten, bspw. bis 74 mm [35], werden üblicherweise im Nasswickelverfahren gefertigt. Die Festigkeit der Tanks wird durch (Fertigungs-)Parameter wie Ablagereihenfolge, Faserspannung, Fertigungsdauer, Harzviskosität und Faserspannungsgradient beeinflusst [32, 36]. Eine höhere Faserspannung sowie eine kürzere Fertigungsdauer während das Harz noch niedrigviskos ist, führen zu höheren Faservolumengehalten im abgelegten Laminat [32]. In [35] werden Delaminationen untersucht, die während der Aushärtung dickwandiger Laminare entstehen und die Eigenspannungen im Laminat mittels Dehnungsmesstreifen (DMS) beim Abtrennen von Umfangsegmenten bestimmt.

2.1.3 Verfahren mit simultaner Faserablage und Fasertränkung

Die Pultrusion ist ein etabliertes Verfahren zur effizienten Herstellung von dickwandigen Faserverbundprofilen. Problematisch sind auch hier, in dickwandigen Laminaten, Temperaturgradienten durch die Exothermie, die zu Eigenspannungen während der Aushärtung führen [37]. Zudem zeigt [38], dass eine nicht-uniforme Faservolumenverteilung bei Pultrusionsprofilen

(Querschnitt $19,5 \times 19,5 \text{ mm}^2$) auftritt, wobei ein geringerer Faservolumengehalt im Kern im Vergleich zu den Randlagen festgestellt wurde. Mit einer Modellierung auf Mesoebene unter Berücksichtigung der lokalen Faservolumengehaltsunterschiede und der Reaktionskinetik können die Eigen-spannungen für unidirektionale (UD) Pultrudate simuliert werden. Das Nasspressen zählt zu den Flüssigimprägnierverfahren, wird aber hier aufgelistet, da während des Pressvorgangs gleichzeitig die Formgebung der Fasern sowie die Tränkung stattfindet. Aufgrund der vornehmlichen Tränkung in Dickenrichtung ist das Nasspressen durch den Effekt der hydrodynamischen Kompaktierung eher ungeeignet für dickwandige Lamine.

2.2 Prozessüberwachung und Qualitätsuntersuchung bei der Herstellung dickwandiger FKV

Zur durchgängigen Überwachung der Fertigung und Gewährleistung der Produktionsqualität von FKV-Bauteilen wird zunehmend ein in-situ Prozessmonitoring auf Basis zerstörungsfreier Prüfmethoden genutzt [39]. Jedoch steckt diese bei der Herstellung dickwandiger FKV und schnellen Verarbeitungsprozessen noch weitgehend im Forschungsstadium. Ein Schwerpunkt der Forschung liegt hierbei auf der Detektion der Matrixfließfront während des Infiltrationsprozesses im HD-RTM-Verfahren und der Erkennung von Faserfehlorientierungen. Für die Harzfließfrontdetektion am Anguss wurden in den vergangenen Jahren schon einige Arbeiten durchgeführt. So konnten in [40] mithilfe von kapazitiver Messtechnik an verschiedenen Stellen im HD-RTM-Werkzeug die Fließfronten detektiert werden. In [41] und [42] konnte mit Kontaktultraschall in Transmission (durch die komplette Dicke des RTM-Werkzeugs) durch Messung der Signalamplitude und Schallgeschwindigkeit die Fließfront geortet werden. Diese Methode kann allerdings nicht eingesetzt werden, wenn nur ein einseitiger Zugang zum Werkzeug oder komplex geformte Werkzeuge zum Einsatz kommen. Eine Möglichkeit die Fließfront innerhalb eines komplexen Werkzeuges dennoch zu detektieren, ist die Untersuchung der mehrfachen Reflexion einer Longitudinalwelle mithilfe eines Linienarrays. Hierbei werden eine große Anzahl an Piezoelementen zu einem *Phased-Array*-Prüfkopf gebündelt, mit dem durch Sendeverzögerungen der Einzelelemente das Schallfeld gerichtet und fokussiert werden kann [43]. Durch eine entsprechende Ansteuerung der entlang einer Linie angeordneten Sendeelemente im Prüfkopf kann der Ultraschall auf beliebige Bereiche im Fasermaterial fokussiert werden. Aufgrund der größeren Abmessungen eines Linienprüfkopfs gegenüber einem Einzelschwinger können Mehrfachreflexionen an unterschiedlichen Stellen des Werkzeugs simultan detektiert werden. Je nach Infiltrationsgrad kann dadurch eine fortschreitende Fließfront detektiert werden. Durch die Impuls-Echo Methode ergibt sich hierbei nicht nur die Möglichkeit den Füllgrad in der Ebene, sondern auch in Dickenrichtung zu ermitteln. Mithilfe von Einzelschwingern wurde eine solche Füllgradbestimmung schon in mehreren Arbeiten realisiert (siehe beispielsweise [44]).

Bei der Herstellung dickwandiger FKV gilt es zu beachten, dass mit zunehmendem Laminatvolumen die Gefahr des Auftretens von Fehlstellen im Laminat ansteigt [45]. Dies wird unter anderem in [46] auf der Werkstoffebene an Probekörpern mit unterschiedlichen Dimensionen und in [47, 48] auf der Bauteilebene an FKV-Rotorblättern von Windenergieanlagen nachgewiesen. Zu diesen fertigungsbedingten Defekten zählen Poren, Einschlüsse, Oberflächenfehler, Faserfehlorientierungen sowie harzreiche und harzfreie Bereiche [45]. Neben den bekannten Faserfehlorientierungen in der Laminebene, den Faserwelligkeiten (Bild 2.2) bilden sich mit zunehmender Schichtenanzahl in dickwandigen FKV auch Faserfehlorientierungen im Laminatquerschnitt aus, den Ondulationen.

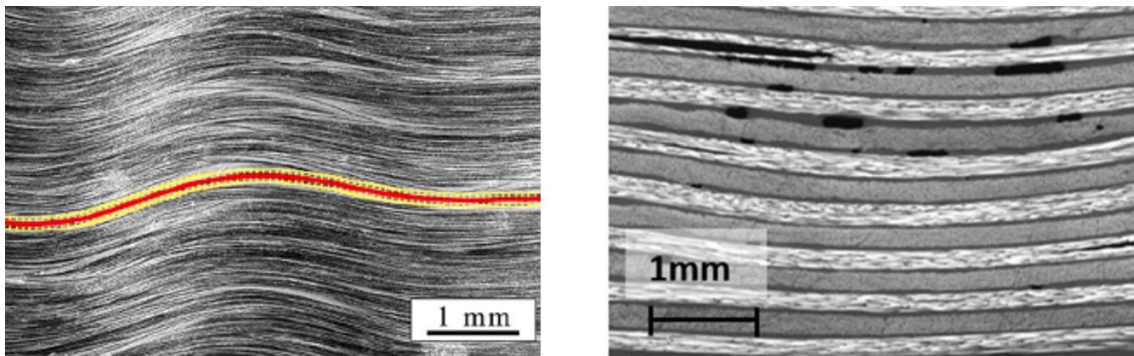


Bild 2.2: *Unidirektional kohlenstofffaserverstärktes Epoxidharz mit Faserwelligkeiten (in der Laminebene, li.) [49] und Ondulationen (in Dickenrichtung, re.) [50]*

Zur Detektion und Analyse derartiger Faserfehlorientierungen bieten sich Schliffbildanalysen, Röntgenverfahren und die Einbettung optischer Fasern [51] an.

Die Ursachen für die Ausbildung von Ondulationen sind vielfältig und u. a. in [12] detailliert beschrieben. Dabei geht der Autor nicht explizit auf dickwandige Lamine ein.

Bei dickwandigen Mehrschichtverbunden entstehen Faserfehlorientierungen beim Flecht-verfahren, da die innen liegenden Lagen einen unebenen Untergrund für die folgenden Schichten bilden [52]. Eine prozessbedingt inhomogene Fadenverteilung entsteht auch beim Ablegen mehrerer Lagen unterschiedlicher Orientierung (englisch: *nesting*) [53]. Darüber hinaus entstehen Faserfehlorientierungen beim Einlegen der Preform in geometrisch komplexe Werkzeuge. Dabei werden lokale Drapierereffekte wie Überlappungen, Faserklaffungen und Ondulationen erzeugt, die in variierenden Faserorientierungen und Faservolumenanteilen des FKV resultieren [54]. Zudem werden die einzelnen Lagen unterschiedlich komprimiert, und es entsteht dadurch ein unterschiedliches Reibverhalten zwischen den Schichten [50]. Neben den durch die textile Verarbeitung verursachten Verbundimperfektionen werden

Faserverschiebungen auch durch Infiltrationsvorgänge hervorgerufen [55]. Insbesondere im HD-RTM-Verfahren können infolge der hohen Harzfließgeschwindigkeiten während der Tränkung Faserverschiebungen [56], harzreiche Regionen und Poren in dünnwandigen Laminaten beobachtet werden [57]. Der Durchfluss des niedrigviskosen Harz-Härter-Gemisches durch die in der Kavität befindliche Faserstruktur kann im Sinne der Strömungsmechanik mit der Strömung einer Newtonschen Flüssigkeit durch ein poröses Medium verglichen werden [58]. Mathematisch kann der Fließvorgang mit dem *Gesetz von Darcy* beschrieben werden. Es beschreibt die Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Viskosität des Harzgemisches, der Permeabilität des Halbzeuges und des Druckgradienten zwischen Anguss und Steiger. Als Permeabilität wird die Durchlässigkeit der Faserstruktur gegenüber dem durchströmenden Fluid bezeichnet. Sie ist u. a. von der Art und Architektur der Textilien und deren Verpressung in der Kavität abhängig [59]. Für die realitätsnahe Beschreibung des Tränkungsverhaltens in dickwandigen FKV ist vor allem die Permeabilität in Dickenrichtung von zentraler Bedeutung [60, 61].

Eine weitere Ursache für die Entstehung von Faserfehlstellungen ist die Schwindung, die durch Abkühlung und chemische Vernetzungsreaktion der duromeren Matrix hervorgerufen wird. Untersuchungen zeigen, dass diese zum Stauchen und Verformen der Fasern führen [62] kann und Eigenspannungen [8, 63] induziert. Dieser Effekt tritt verstärkt bei dickwandigen Laminaten auf, da die Reaktionswärme verhältnismäßig schlecht abgeführt wird. Hieraus resultiert eine ungleichmäßige Temperaturverteilung sowie eine inhomogene Aushärtung [64]. Bei größeren Wanddicken und damit verbundenen größeren Matrixmengen haben die prozessbedingten Infiltrations- und Aushärteparameter (Temperatur, Druck) einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden Materialeigenschaften. Es treten zunehmend dreidimensionale Spannungszustände mit nicht vernachlässigbaren Druckbeanspruchungen, quer zur Laminatenebene auf [65, 66]. Der Forschungsstand zur Definition geeigneter Aushärtezyklen bei der Herstellung dickwandiger FVK-Laminat ist in [67, 68] beschrieben. Zusammenfassend werden die Glasübergangstemperatur, der Faservolumenanteil sowie der Vernetzungsgrad als wesentliche Parameter zur optimalen Aushärtung herausgearbeitet [69]. Zudem ist im Gegensatz zu dünnwandigen Laminaten bei größeren Matrixmengen aufgrund der exothermen Harz-Härter-Reaktion eine homogene Temperaturverteilung innerhalb des Laminates nur bedingt möglich. In den Arbeiten [13, 70] sind diese inhomogenen Temperaturverläufe für Prepregsysteme beschrieben und wurden anhand experimenteller Untersuchungen der mechanischen in-plane Zug- und Druckfestigkeiten bewertet.

Die Auslegung dickwandiger Laminat kann demnach nicht nach der klassischen Laminattheorie erfolgen, da die „Störspannungen“ in Form von Normalspannungen sowie interlaminaren Schubspannungen in Dickenrichtung eine aufwändigere Spannungs- und Festigkeitsanalyse notwendig machen [71].

3 WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG MITTELS ZERSTÖRENDE PRÜFUNG

Die Bewertung des Dickeneinflusses und fertigungsbedingter Imperfektionen erfolgt vielfach anhand mechanischer Untersuchungen unter quasistatischer, dynamischer und zyklischer Belastung und wird in der Literatur unter dem Begriff Größeneffekt (englisch: *size effect*) zusammengefasst. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Proben- bzw. Bauteilgröße einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Materials, allen voran deren Festigkeit, hat und hinterfragt, ob die Kennwertübertragung von genormten (dünnwandigen) Prüfkörpern auf andere Größenskalen ohne weiteres möglich ist [72]. Während sich in der Nachkriegszeit eingehende Arbeiten zum Thema des Größeneffekts und dessen Beschreibung zu verschiedensten spröden Materialien finden, sind mit dem aufkommenden Interesse an Faserverbundwerkstoffen für lasttragende Elemente auch seit Beginn der 1990er-Jahre vermehrt Forschungsarbeiten zu diesem Themenkomplex vorhanden. Dabei wird in aller Regel unter dem Größeneffekt ein Dickeneinfluss verstanden. Bei der Erklärung eines entsprechenden Effekts haben sich zwei Theorien zur Begründung aus dem Versagensverhalten spröder Werkstoffe (weiter-) entwickelt:

- Statistischer Größeneffekt: Grundlage dieser Theorie ist das *Weakest-Link*-Prinzip, das auf einer zufälligen, statistischen Verteilung von Materialfestigkeiten in einem Körper basiert (hauptsächlich unter Anwendung eines Weibull-Modells [73]).
- Bruchmechanischer Größeneffekt: Das maßgeblich von Bažant geprägte Maßstabsgesetz beruht auf einem Ungleichgewicht zwischen freigesetzter im Körper gespeicherter Dehnungsenergie an der Rissfront und der zur Rissausweitung benötigten Bruchenergie [74].

Nicht unerwähnt soll an dieser Stelle bleiben, dass natürlich eine Vielzahl von Faktoren (oder sogar eine Kombination aus ihnen) das Versagen dickwandiger Lamine ungünstig beeinflussen kann. Nicht zuletzt sind in diesem Zusammenhang

- der Einfluss von Fertigung (s. Kapitel 1),
- Prüfbedingungen wie Einspannung und Lasteinleitung,
- Randeffekte im Fall variierender Lagenorientierung (englisch: *free edge effect*),
- Spannungsgradienten unter Biegebeanspruchung und
- Selbsterwärmungseffekte bei zyklischer Belastung

zu nennen.

3.1 Quasistatisches Verhalten

Der Großteil der experimentellen Arbeiten auf diesem Gebiet behandelt das Verhalten unter quasistatischer Belastung. Unter anderem sind hier die frühen Arbeiten in [75–78], [79–82], und [83–85] zu nennen. Eine gute Zusammenfassung über die Arbeiten dieser Dekade finden sich in [86], einem vielzitierten Aufsatz zu diesem Thema. Aufgrund dieser und einiger anderer, umfassender Literatur-Zusammenfassungen (z.B. [87] und [88]), soll dabei auf die einzelnen Arbeiten aus dieser Zeit nicht weiter eingegangen werden. Es ist jedoch resümierend festzuhalten, dass der Größeneffekt hier unabhängig von Belastungsrichtung (Zug, Druck und Biegung) und der Versagensform auftritt und deren Vorhandensein im Wesentlichen durch statistische Phänomene und Modelle erklärt und beschrieben wird. Überwiegend Weibull-Verteilungen beschreiben das Materialverhalten im Großteil der Arbeiten hinreichend genau [89]. Insbesondere bei Druckversuchen sind erhebliche Abschläge in der Festigkeit erwartbar [79, 90], was nicht zuletzt auf die allgemein bekannten, komplexen Randbedingungen bei der Druckprüfung zurückzuführen ist [3].

Dabei werden sinnvolle Probekörpergeometrien mit entsprechenden Einspannungs- bzw. Lasteinleitungsbereichen in verschiedenen der im weiteren Verlauf genannten Veröffentlichungen für dickwandige Lamine diskutiert. Prinzipiell sind Proben nach DIN EN ISO 527-4 bzw. 14126 bis 10 mm Dicke für Zug- und Drucktests definiert. Eine Übersicht vorhandener Normen ist in Tabelle 3.1 gegeben. Es wird jedoch deutlich, dass diese bei dickwandigen Laminen nicht allein zu guten Ergebnissen führen werden [91]. Bei Druckprüfungen sind bereits für dünnwandige Lamine große Unterschiede durch die Prüfeinrichtung und Probenform zu erwarten. Gute Beispiele hierfür sind in [92] enthalten. Ähnliche Lösungen werden z.B. in [93] diskutiert, wobei dort in Bezug auf die Einspannungsproblematik von der recht bekannten ICSTM-Belastungseinheit für Druckproben (siehe [94]) ausgegangen wird.

Belastungsart	Norm	Wanddicken in mm
Zug	ISO 527-4 [95]	2 - 10
	ISO 527-5 [96]	1 - 2 (UD)
Druck	ISO 14126 [97]	2 - 10
Biegung (3- und 4-Punkt)	ISO 14125 [98]	2 - 4
Schub (45°-Zugversuch)	ISO 14129 [99]	2

Tabelle 3.1: Übersicht zu den Standardnormen und den darin festgelegten maximalen Wanddicken

Zu den vielzitierten Arbeiten auf experimentellem Gebiet aus dem aktuellen Jahrtausend gehören die Studien in [3, 91, 100]. Es zeigt sich auch hier, dass bei Druckbelastung dickwandige Lamine vergleichsweise hohe Abschlüsse in den Festigkeiten aufweisen und dass diese z.B. stark von dem benutzten Lagenaufbau abhängen. Ursachen, wie u.a. die Faserwelligkeit und herstellungsbedingt größere Fehlstellenanteile werden hier als Gründe genannt. Jedoch ist derzeit der Grad an Faserfehlstellungen und dessen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften quantitativ nur schwer vorhersagbar [62]. Statische Zug- und Druckbelastungen werden auch in [101] diskutiert. Es lässt sich auch bei Zugbelastung für bestimmte Lagenaufbauten ein Dickeneffekt zeigen. Dabei beträgt die maximale untersuchte Laminatdicke 4 mm. Leider ist aus der Veröffentlichung [102], die die Grundlage für die dort besprochenen Ergebnisse bildet, nicht ersichtlich, inwieweit die statistische Absicherung geht. Es zeigt sich bereits bei den Proben, die in [102] intensiver untersucht werden, dass selbst mit optimierten Proben sehr viele Versagensorte nahe an den Lasteinleitungselementen, d.h. der Einspannung zu finden sind. Aktuellere Untersuchungen zeigen jedoch an bis zu 20 mm dicken Proben keinen signifikanten Abfall der Festigkeit unter Zug- und Druckbelastung bei vergleichbaren Faservolumengehalten in UD-Proben [103].

Bei der Untersuchung einer Größenabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von FKV ist es daher oft nicht klar, ob es sich um einen tatsächlichen Größeneffekt des Werkstoffs [102, 104] bzw. der Struktur [105] handelt oder ob andere Einflussfaktoren, wie eine Reduktion der Fertigungsqualität mit zunehmender Dicke, eine Rolle spielen [86].

Auch zum quasistatischen Verhalten dickwandiger Lamine unter Biegebelastung ist eine große Anzahl an Untersuchungen zu finden (z.B. in [104, 106, 107]). Die Ergebnisse zeigen deutlich, wie unterschiedlich sich UD-, Kreuzlaminat-, quasi-isotrope und $\pm 45^\circ$ -Biegeproben bezüglich des Dickeneinflusses verhalten. So ist bei den UD-Laminen kein eindeutiger Einfluss sichtbar, während in den drei anderen Mehrschichtverbunden die Biegefestigkeiten deutlich degradieren. Dagegen wird in [104] bei den untersuchten, biegebeanspruchten Testreihen der Grund in einem probabilistischen Effekt gesehen.

Neuere Studien untersuchen den Größeneffekt unter interlaminaren Versagen. Hierfür vergleichen sie das Verhalten unterschiedlich dicker Proben unter Mode-I- und Mode-II-Belastung [107]. Auch hier zeigt sich ein erheblicher Abfall der Bruchenergie, der sich mit Hilfe der Linearelastischen Bruchmechanik hinreichend genau abbilden lässt.

3.2 Ermüdungsverhalten

Im Vergleich zu dem Verhalten unter quasistatischer Belastung ist die Datenlage zum Ermüdungsverhalten dickwandiger FKV nicht so umfangreich, insbesondere in Hinblick auf einen direkten Vergleich dünn- und dickwandiger Strukturen. Im folgenden Abschnitt werden die Erkenntnisse aus Untersuchungen an dickwandigen Laminaten an sich und der vergleichenden Untersuchung von Laminaten mit variierender Dicke wiedergegeben.

3.2.1 Untersuchungen an dickwandigen Laminaten

Im Allgemeinen ist eine ganze Reihe an Literatur über zyklische Untersuchungen dickwandiger Lamine vorhanden. So fasst der Autor in [108] den Status Quo zusammen und beschreibt die Schwierigkeiten und Einflussfaktoren, die bei der Prüfung ebendieser Lamine auftreten [109]. Es ist bekannt, dass die Versagensphänomenologie sich z.T. erheblich von der in dünnwandigen FKV-Laminaten unterscheidet, da in dickwandigen Laminaten mit beträchtlichen Normal- und Schubbelastungen orthogonal zur Laminebene zu rechnen ist, weshalb Delaminationen häufig dominant sind. Auch der, aufgrund der im Allgemeinen schlechten Wärmeleitfähigkeit von Faserverbundwerkstoffen, schlechte Wärmetransport, trägt zu einem abweichenden Versagensbild bei [110]. Vor allem bei Zug- und Druckbelastungen ist schon bei geringen Belastungsfrequenzen mit einer erheblichen Temperaturerhöhung in dickwandigen Laminaten zu rechnen [111].

Es zeigt sich zudem, dass weder bei dünnwandigen FKV etablierte *Fatigue Life Models* noch *Progressive Damage Models* oder empirische Modelle die Schadensentwicklung und Lebensdauer adäquat vorhersagen können. In [112] wird zu diesem Thema ein hybrides Modell mit guter Übereinstimmung experimenteller und theoretischer Daten unter Biegebelastung vorgestellt.

Weitere Untersuchungen werden in [113] beschrieben, in der die Autorin umfangreich das Ermüdungsverhalten von UD-Proben aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) bei Biegeschwellbeanspruchung darstellt. Hier ist zwar nicht direkt der Dickeneinfluss beschrieben, aber es handelt sich mit einer Laminatdicke von ca. 6 mm um dickere Proben und es sind hier verschiedene sehr sinnvolle Aussagen zur Verbesserung der Probenform mit Blick auf 3D-Effekte (z.B. antiklastische Biegung) zu erkennen. Darüber hinaus enthält die Arbeit sehr viele weitere Anregungen zur Verbesserung des Verständnisses von dickwandigen Biegeproben. Ermüdungsversuche unter Biegebelastung finden sich auch in [114] an gewebten GFK-Laminaten mit einer Wanddicke von 15 mm. Dabei zeigt sich das die Verformung und der Steifigkeitsabfall über einen langen Zeitraum stetig zunehmen und erst kurz vor dem Versagen sehr stark ansteigen. Die auf die Ausgangssteifigkeit normalisierte Steifigkeit fällt nahezu linear über der Lastspielzahl ab.

Ferner wird auch das Ermüdungsverhalten von dickwandigen Laminaten aus kohlefaserverstärkten Kunststoff (CFK) mit zähen Zwischenschichten bei

Belastung in der Dickenrichtung untersucht [115]. Allerdings ist auch hier kein Vergleich mit Daten von dünnwandigen Laminaten vorhanden, der eine Bewertung des potenziellen Einflusses der Wanddicke auf das Ermüdungsverhalten erlaubt.

Die Faserarchitektur im Allgemeinen beeinflusst wesentlich die Ermüdungseigenschaften von FKV [116], aber vor allem Faserfehlstellungen setzen die Lebensdauer herab [117].

3.2.2 Vergleichende Untersuchungen an Laminaten mit variierender Wanddicke

Eine der ersten vergleichenden Untersuchungen ist schon sehr früh zu finden. Bereits 1979 werden in [118] erste probabilistische Überlegungen zu Skalierungseffekten von *Open-Hole*-CFK-Proben unter zyklischer Druckbelastung angestellt, ohne allerdings dabei experimentelle Ergebnisse zu dickwandigen Laminaten zu präsentieren.

1988 wird in [119] in ersten experimentellen Untersuchungen festgestellt, dass unter zyklischer Biegebelastung ($R = 0,1$; $f = 1,2 \dots 3$ Hz) eine Abnahme der Biegefestigkeit verschieden dicker Lamine (bis 20 mm) vorhanden ist. Eine Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse ist in Bild 3.1, links gezeigt. Es zeigt sich dabei eine Verschiebung der Wöhlerlinien nach links unten, bei der die Autoren eine näherungsweise gute Vorhersage des Dickeneinflusses mit einem einfachen Weibull-Modell erzielen.

Unerwartete Resultate werden in [120] bei der Untersuchung des Schädigungsverhaltens unter Wechsellast ($R = -1$) vor und nach *Low-Energy-Impact* von Druckproben mit skaliertem Stacking ($[0/45/90/-45]_{ns}$ mit $n = 2,4,6$; wobei $t_{n=1} = 1$ mm) erzielt. Interessanterweise zeigen hier nicht nur die vorgeschädigten, dickwandigen Proben, sondern auch die ungeschädigten Proben bei den Ermüdungsversuchen ein resilienteres Verhalten (vgl. Bild 3.1 rechts). Eine Begründung zu diesem unerwarteten Ergebnis wird nicht gegeben. Das Ergebnis überrascht vor allem unter Berücksichtigung der vergleichsweise hohen Versuchsfrequenz, die für alle Versuche unisono $f = 10$ Hz beträgt. Hier dürfte bereits ein beträchtlicher Selbsterwärmungseffekt vorhanden sein [121].

Weiterhin wird in [122] das Ermüdungsverhalten von 32 mm dicken Laminaten überprüft. Es werden hier große Aufwendungen erwähnt, um die Einspannungsproblematik zu umgehen. Die Ergebnisse für Proben unter reiner Zug-Schwell-Belastung ergeben bei höheren Beanspruchungen den Eindruck, dass ein Dickeneffekt vorhanden ist, bei niedrigeren Belastungsniveaus ist dieser offenbar nicht zu finden.

In einer kürzlich veröffentlichten Studie wird der Größeneinfluss bei verschiedenen Belastungsverhältnissen an UD-Laminaten verschiedener Länge unter 0° -, 10° - und 90° -Belastungsrichtung ($f = 5$ Hz) untersucht [123]. Dabei scheinen die Proben gut mit einer auf das Volumen bezogene Weibull-Verteilung zu korrelieren.

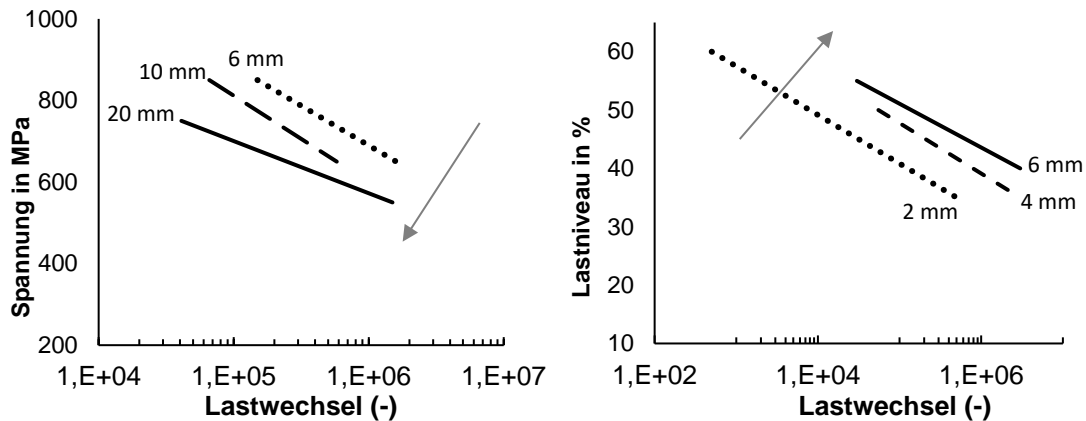


Bild 3.1: Exemplarischer Verlauf der Wöhlerlinien bei variierender Probendicke nach [119] (links) und [120] (rechts)

In keinem der oben zitierten Werke wird jedoch der Einfluss der Selbsterwärmung als beeinflussender Faktor betrachtet. Dabei wird in verschiedenen Publikationen darauf hingewiesen, dass es bei Ermüdungsbeanspruchung Hinweise auf eine starke Erwärmung der inneren Lagen bereits bei niedrigsten Belastungsfrequenzen gibt [121, 124, 125]. Eine Reihe an Daten zum Größeneffekt unter zusätzlicher Betrachtung der Selbsterwärmung findet sich vor allem in [111, 126–128] zu UD-Proben unter schwellender Zug- und Druckbelastung. Dabei wurde das Versagensverhalten bei drei verschiedenen Wandstärken (4, 10 und 20 Millimeter) getestet, dabei wurde versucht, den Einfluss der Selbsterwärmung durch eine geringere Testfrequenz (10, 5 und 2 Hz, respektive) zu berücksichtigen und über diesen Weg eine bessere Aussage zum reinen Größeneffekt zu erhalten. Der Abschlag der Wöhlerlinie ist dabei im ersten Wandstärkenanstieg deutlich geringer als beim zweiten, Bild 3.2.

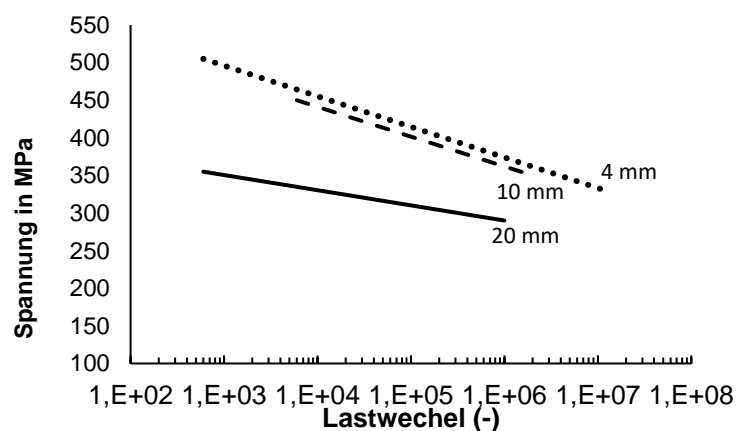


Bild 3.2: Schematischer Verlauf der Wöhlerlinien bei variierender Probendicke und Testfrequenz nach [111]

Als Grund hierfür wird eine verringerte Herstellungsqualität der 20 mm dicken Lamine vermutet. Ferner wird in [124] ein FE-Modell zur Vorhersage der Selbsterwärmung vorgeschlagen. Unter Verwendung dieses Modells ergeben sich näherungsweise gute Ergebnisse im Vergleich zu den im Versuch aufgezeichneten Temperaturanstiegen aus [111]. Es ist jedoch anzumerken, dass diese sehr hoch (deutlich über $\Delta T = 10^\circ \text{C}$) sind. Zwar sind die Aussagen zum Größeneffekt in dem Sinne konsistent, ein Einfluss auf das Versagensverhalten im Allgemeinen ist hier dennoch zu vermuten.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass es konkrete Studien zur Selbsterwärmung an Faserverbundwerkstoffen gibt, die auch vergleichende Untersuchungen an unterschiedlichen Probendicken anstellen (z.B. [121]). Da diese allerdings ausnahmslos den Selbsterwärmungseffekt isoliert betrachten und das Ermüdungsverhalten z.T. auf die maximal ertragene Lastspielzahl normiert ist, lässt sich hieraus keine Aussage zum Größeneffekt ableiten.

Abschließend lässt sich festhalten, dass dickwandige FKV auch unter zyklischer Belastung die Tendenz zu einem vorzeitigen Versagen zeigen. Die reine Extraktion des Größeneffekts ist jedoch aufgrund der Bandbreite an Einflussfaktoren problematisch. Im Wesentlichen ist hier die Selbsterwärmung zu nennen, die zu den aus quasistatischen Versuchen bekannten Randbedingungen hinzukommt. Aus den Ergebnissen der vorhandenen Literatur zeigt sich, dass eine exklusive Betrachtung nur eines dieser Effekte kaum möglich ist. Ein Ausweichen auf so niedrige Belastungsfrequenzen, dass der Selbsterwärmungseffekt keinen Einfluss hat, ist unpraktikabel und wird dem spezifischen Anwendungsfall in der Regel nicht gerecht. So lässt sich das Ermüdungsverhalten dickwandiger Faserkunststoffverbunde nur als Kombination dieser beiden Faktoren sicher und zuverlässig beschreiben. Einige Versuche wurden in dieser Hinsicht unternommen, wobei eine ganzheitliche Beschreibung beider Effekte zum aktuellen Zeitpunkt nur bedingt vorliegt.

3.3 Impactverhalten

Impactversuche werden klassisch in Low-Velocity, High-Velocity und Hyper-Velocity-Impacts unterschieden. Der Begriff Low-Velocity beschreibt nach [129] Aufprallgeschwindigkeiten des Impactors auf dem Prüfkörper bzw. Bauteil von $v < 10 \text{ m/s}$, High-Velocity von $v < 1000 \text{ m/s}$ und Hyper-Velocity von $v > 1000 \text{ m/s}$.

3.3.1 Low Velocity Impact

Es gibt eine Vielzahl an Studien die Low Velocity Impacts (LVI) an FKV-Proben unterschiedlicher Dicke durchführen [130–137]. Bei der Untersuchung des Dickeneinflusses auf das Impactverhalten wird je nach Studie auf zwei verschiedene Weisen vorgegangen; einige Veröffentlichungen [133, 134, 138] nutzen eine konstante Impactenergie, die unabhängig von der Prüfkörperdicke

ist. Alternativ wird eine Impactenergie pro Dicke des Prüfkörpers festgelegt [130, 139–141].

Wie intuitiv erwartbar, sind bei LVI mit einer konstanten Impactenergie die Schäden, Delaminationen, Faserbrüche, etc., in dicken Laminaten geringer als in dünnwandigen. Des Weiteren wird eine höhere Anzahl an wiederholten Impacts benötigt, um denselben Schaden zu verursachen. In den Studien wird keine genauere Korrelation zwischen Probendicke und Schadensgröße bei gleichbleibender Impactenergie aufgestellt [133, 134, 138].

Für eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Bauteildicke, Impactenergie und Schadensbild werden in vielen Studien Impactenergien pro Lage bzw. pro mm verwendet. Nach einer Auswertung von rund 500 LVI stellen die Autoren in [142] fest, dass der Zusammenhang zwischen der kritischen Schadensinitiierungskraft P_{cr} und der Bauteildicke t in Form von $t^{3/2}$ abhängt; dieser Zusammenhang wurde von mehreren Studien bestätigt [139, 140, 143, 144].

Die zunehmende Schadenstoleranz mit steigender Probendicke lässt sich durch eine Änderung der Schädigungsphänomene beschreiben. Bei dünnen Platten, die im Allgemeinen weniger steif sind, entsteht durch den Impact eine global auftretende Biegung. Durch diese Biegung entstehen Zugbeanspruchungen auf der Unterseite und Druckbeanspruchungen auf der Oberseite. Durch die hohen Biegemomente weisen die unteren Lagen zumeist Zugbrüche auf, während sich auf der Oberseite ein Druck- oder Schubversagen ausbildet. Die Schadensentwicklung in der Probe erfolgt in diesem Falle von der Rückwand zur Vorderwand des Laminats.

Bei dickwandigen Proben entsteht, aufgrund der höheren Steifigkeit, durch die Impactbelastung eine größere Kontaktkraft. Jedoch tritt kein globales, sondern nur ein lokales Biegemoment in den oberen Lagen auf. Durch die so entstehenden Spannungen bilden sich in den oberen Lagen Matrixbrüche, auch bekannt als Scherbrüche, die schräg zu der Mittellage angeordnet sind, und Delaminationen. Die Schäden wachsen anschließend von oben nach unten in der Probe [140].

Das Schadenswachstum ist somit für dickwandige Proben umgekehrt zu dünnen Proben. Ein Vergleich über das unterschiedliche Schadenswachstum findet sich in Bild 3.3. Bei anschließenden *Compression-After-Impact* (CAI)-Versuchen knickt bei dünnen Proben die unterteste Lage aufgrund der Delamination schnell aus, was zu einer drastischen Senkung der Restfestigkeit führt [136].

Bei dickeren Proben treten zwar über die gesamte Materialbreite gleichmäßig Delaminationen auf, diese werden aber zumeist bei den Grenzflächen von zwei verschiedenen Lagenorientierungen gestoppt [136, 137, 140]. Deshalb sind bei einem CAI-Test größere Sublamine vorhanden, welche die entstehenden Kräfte aufnehmen können, was zu einer erhöhten Restfestigkeit führt [136].

Über das unterschiedliche Schadensverhalten hinaus kann gesagt werden, dass Ungleichheiten im Material bei dünnen Proben einen deutlich stärkeren negativen Einfluss auf das Impactverhalten haben, als in dicken Proben [135]. Des Weiteren hat die Probendicke einen größeren Einfluss auf das Impactverhalten als die anderen Probekörperdimensionen [145].

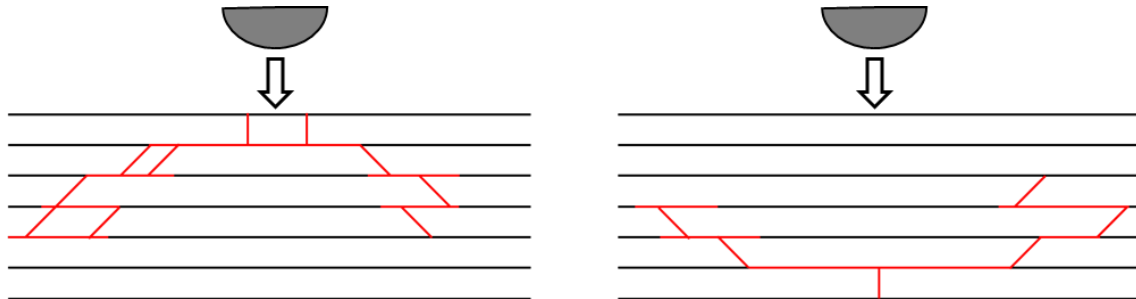


Bild 3.3: Schematische Darstellung unterschiedlicher Impactschäden (in Rot dargestellt) nach [132]

Links: dickwandige Proben, rechts: dünnwandige Proben

3.3.2 High Velocity Impact

Der Zusammenhang zwischen Probendicke und Impactverhalten bei High oder Hyper Velocity Impacts wurde bisher wenig erforscht [146].

Die meisten Studien in diesem Bereich [147–151] stimmen überein, dass bei gleichbleibender Impactenergie, eine Erhöhung der Probendicke zu einer höheren maximalen Energieaufnahme pro Lage führt. Lediglich in [152] wird dieses Verhalten nur für Teile der Messreihen festgestellt.

Die Verbesserung des Impactverhaltens lässt sich über eine Änderung des Schadensverhaltens begründen. Bei Proben, die dicker als 10 mm sind, kann das Schädigungsverhalten in mehrere Schritte unterteilt werden (siehe hierfür Bild 3.4).

Zunächst bilden sich durch den Aufprall des Projektils Delaminationen über die Prüfkörperdicke. Anschließend dringt das Projektil, ohne größere Ablenkungen in den Prüfkörper ein, bis sich an einer der Delaminationsflächen ein Sublaminat bildet. Das Sublaminat erfährt daraufhin eine Biegebelastung und versagt ganz oder zu einem Teil auf Zug. In dünnen Proben entstehen durch den Aufprall des Projektils Delaminationen, weil sie aufgrund ihrer geringen Dicken keine Sublamine ausbilden können, versagen sie anschließend auf Biegung [147].

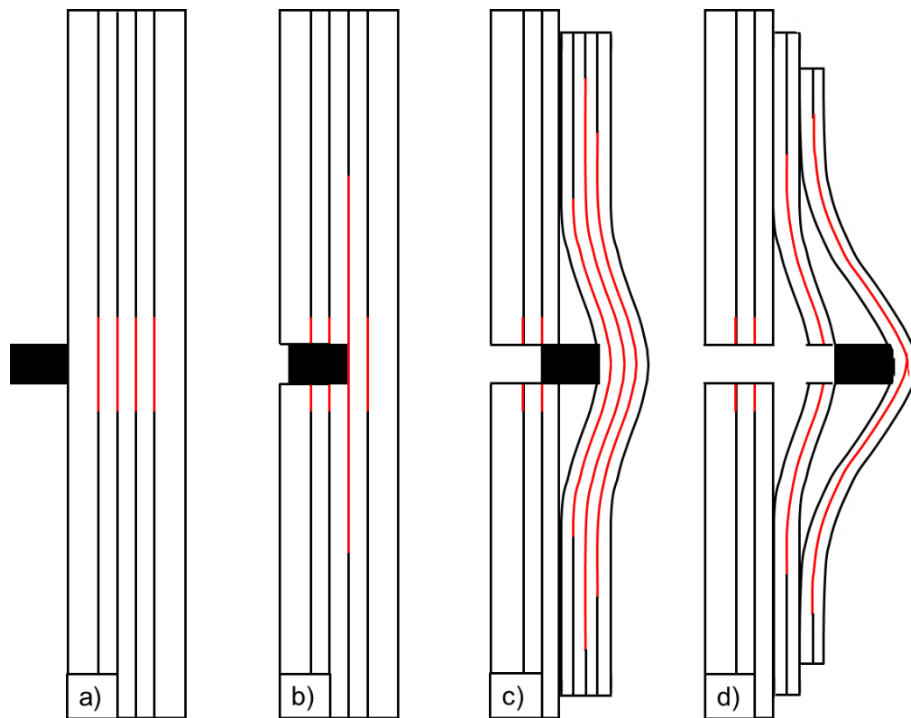


Bild 3.4: Schadensmechanismen von dickwandigen Proben während eines *High Velocity Impacts* nach [147]
 a) Delaminationen, b) Eindringen des Projektils,
 c) Bildung von Sublaminaten, d) Versagen unter Biegebelastung

4 WERKSTOFFCHARAKTERISIERUNG MITTELS ZERSTÖRUNGSFREIER PRÜFUNG

Während in vielen Bereichen die zerstörende Prüfung von vergleichbaren Bauteilen für eine Beurteilung der Zuverlässigkeit ausreicht, wird gerade im Bereich des Transportwesens (Bahn, Luft- und Raumfahrt) eine vollumfängliche zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) aller sicherheitsrelevanter Bauteile vorgeschrieben. Um dies zu gewährleisten, gibt es verschiedene ZfP-Verfahren, die je nach Defekt und zu prüfendem Werkstoff auszuwählen sind. Welche Verfahren dabei für einen spezifischen Fall einzusetzen sind, ist weitestgehend normativ festgelegt. Ein weiterer Überblick über die bestehenden Forschungsansätze wurde bereits von verschiedenen Autoren in Übersichtsartikeln zur ZfP [153, 154] sowie zum *Structural Health Monitoring* (SHM) [155] zusammengetragen.

Der grundlegende Wirkmechanismus in der zerstörungsfreien Prüfung liegt in der Interaktion einer einfallenden Welle mit den intrinsischen Strukturen des Werkstoffes. Die Welle kann sowohl akustischer als auch elektromagnetischer Natur sein und die Werkstoffstruktur wird beispielsweise durch Grenzflächen,

Gefügestrukturen oder auch Materialschäden geprägt. Die eingeleitete Welle erfährt durch Interaktionseffekte wie Reflexion, Transmission, Streuung, Brechung oder Absorption eine Änderung ihrer Amplitude oder Phase. Dies wird anhand des austretenden Signals quantifiziert und mit Hilfe einer geeigneten Signal- und Bildverarbeitung quantifiziert. Dadurch können die Werkstoffeigenschaften abgeleitet, der Werkstoffaufbau beschrieben und mögliche Defekte detektiert werden.

Die zerstörungsfreie Prüfung von dünnwandigen FKV stand in den letzten Jahrzehnten im Fokus zahlreicher Forschungsfragen, um die Bildgebung beispielsweise bei der Ultraschallprüfung auch für die stark ausgeprägte Anisotropie sicher zu stellen [156]. Die durch den heterogenen Aufbau des FKV bedingte erhöhte Dämpfung erschwert gerade bei hohem Anisotropiegrad die Prüfung sehr dickwandiger Lamine. Während aus strukturmechanischer Sicht ein FKV-Laminat spätestens ab einer Wanddicke von 10 mm als dickwandig bezeichnet wird, ist diese Definitionsgrenze aus Sicht der ZfP deutlich schwieriger festzusetzen. Ende der 1980er erschienen die ersten Veröffentlichungen zu ZfP an dickwandigen FKV. In [157] wird auf die Untersuchung von glasfaserverstärkten Kunststoffen mit einer Dicke von 50 mm Bezug genommen. Eine klare Grenze wird dabei nicht aufgeführt. Ein pragmatischer Ansatz wird in [158] vorgeschlagen. Hier gilt ein Prüfkörper als dickwandig, sobald das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) einer gegebenen ZfP-Methode unter einen willkürlich gewählten Wert fällt. Das Problem bei diesem Ansatz ist, dass ein Prüfkörper je nach Prüfmethode und Dämpfung des Werkstoffes sowohl als dickwandig als auch dünnwandig eingestuft werden kann. Da dies aus strukturmechanischer Sicht sehr irreführend sein kann, soll im Kontext dieses Reviews ein Überblick darüber geschaffen werden, welche Wanddicken mit den gängigsten Verfahren der ZfP untersucht werden können. Dabei spiegelt sich auch die eben erwähnte Definitionsproblematik wider, da sich die hier vorgestellten Studien je nach Prüfmethode und zu detektierendem Defekt mit Prüfkörpern zwischen 3 mm und 150 mm befassen.

Generell werden die ZfP-Verfahren in Oberflächen- und Volumenverfahren eingeteilt, was bereits eine grobe Abschätzung der Prüfbarkeit von dickwandigen Bauteilen zulässt [159]. Für dickwandige FKV eignen sich vor allem die Volumenverfahren, zu denen die Ultraschallprüfung und die Durchstrahlungsprüfung gehören und in zahlreichen unterschiedlichen Methodenansätzen angewandt werden. Es sei aber an dieser Stelle auch die aktive Infrarot Thermografie als Oberflächenverfahren genannt, da durch Anpassung der Prüfzeiten auch eine erhöhte Eindringtiefe erzielt werden kann.

4.1 Thermografie

Der große Vorteil der Infrarot Thermografie (TT) liegt in der berührungslosen, nicht-invasiven, trockenen, sicheren und schnellen Durchführung sowie an der direkten bildgebenden Darstellung der Prüfergebnisse [159]. Sie wird in der Regel bei großflächigen Prüfobjekten eingesetzt. Hierbei wird die Temperaturentwicklung an der Bauteiloberfläche eines thermisch oder mechanisch belasteten Bauteils mittels Infrarotkamera untersucht. Durch lokal unterschiedliche Wärmeableitung, welche in den erzeugten Temperaturbildern als Hot Spots zu erkennen sind, können Schädigungen im Bauteil lokalisiert werden. Eine allgemeine Faustregel besagt dabei, dass diese Schädigungen nur dann vollständig aufgelöst werden können, wenn die laterale Ausdehnung dieser Schädigung mindestens ihrer Tiefenlage im Prüfkörper entspricht.

Bei der aktiven TT wird eine externe thermische Anregungsquelle wie z.B. gepulste Halogenlampen [160] oder Laser [161] eingesetzt. Die thermische Energie kann aber auch mechanisch durch die Ultraschallanregung oder elektromagnetisch durch Induktion eingeleitet werden [162]. Hierbei ist der Vorteil, dass die Wärme direkt an den Materialfehlern entsteht. In [163] werden die numerischen und experimentellen Ergebnisse von aktiven TT-Untersuchungen gegenüber gestellt und gezeigt, dass bei bereits 3 mm dicken FKV-Laminten die Vorhersagemöglichkeit der Tiefenlage einer Delamination in zunehmender Tiefe erschwert wird. In [164] befasst sich der Autor mit der theoretischen Grenze, bis zu welcher Tiefe luftgefüllte Fehler in bis zu 15 mm dicken Graphit/Epoxid-Verbundwerkstoffen detektiert werden können. Weiterführende Untersuchungen [165] zeigen die Anwendung von transienten Methoden an 5, 10 und 15 mm dicken CFK-Schalen, wobei die Prüfbarkeit der 15 mm dicken Prüfkörper aufgrund des geringen SNR in Frage gestellt wird. Während es in [166] nicht gelungen ist, erfolgreiche Messungen an einem 30 mm dicken CFK-Bauteil durchzuführen, konnten die Autoren in [167] die Prüfbarkeit von bis zu 30 mm dicken GFK-Laminaten nachweisen, indem die Erwärmung der Sonne genutzt wurde, um Defekte in realen Windturbinenblättern darzustellen. Dieser Effekt wird auch in [168] eingesetzt, um verschiedene Defekte wie Flachbodenbohrungen und Luftpolsterfolie-Einlagen bis zu einer Tiefe von 10 mm zu detektieren.

Es sei hier aber auch erwähnt, dass gegenwärtig eine sehr rege Forschungsaktivität zu erkennen ist, die oben genannte Daumenregel für den Fehlernachweis durch neue Ansätze zu unterschreiten und die Nachweisempfindlichkeit bei der TT zu verbessern.

Ein Ansatz ist das virtuelle Wellenkonzept, welches die thermische Wellenausbreitung als diffusiven Prozess in eine Art akustische Welle überträgt, so dass die aus dem Ultraschall bekannten Rekonstruktionsalgorithmen auf die Thermografie übertragen werden können [169]. Die Ergebnisse zeigen, dass auch in der TT Defekte kleiner der Tiefenlage noch mit konventioneller Prüftechnik detektierbar sind. Da das virtuelle Wellenkonzept aber das Lösen des inversen Problems bedarf und dies

mit einem erheblichen Rechenaufwand verknüpft ist, scheint der Black-Box Ansatz mittels KI für die Praxis die elegantere Lösung zu sein. Auch hier existieren bereits erste Ergebnisse [170], die belegen, dass in den Prüfdaten weit mehr Informationen vorhanden sind, als durch die klassischen Auslesemethoden tatsächlich genutzt werden. Ein weiterer Ansatz ist die angepasste Anregung, in dem räumlich und zeitlich nicht homogen, sondern angepasst angeregt wird. Die das Antwortbild verzerrenden lateralen Wärmeströme können hierdurch gezielt eliminiert und damit das räumlich Auflösungsvermögen in der TT deutlich gesteigert werden [171]. Zwar ist hierbei noch nicht der Beleg für dickwandige FKV demonstriert worden, allerdings gibt es keine grundsätzlichen Bedenken an der Übertragbarkeit der publizierten Algorithmen auf dickwandige Bauteile.

4.2 Ultraschall

Aufgrund der Anforderungsprofile im normativ geregelten Bereich der Qualitätssicherung ist die Ultraschallprüfung (UT) ein Standardverfahren der ZfP. Während Normen oftmals den Einschallwinkel, die Prüffrequenzen und weiteres für bestimmte Bauteile vorgeben, ist dies im Bereich der FKV noch nicht vollumfänglich der Fall. Insbesondere bei sehr dickwandigen FKV-Laminaten können die existierenden Normen und Richtlinien nur mit Vorsicht angewandt werden. Die hohe Anzahl der Grenzflächen in einem dickwandigen FKV-Laminat führen zu einem deutlichen Verlust der Schallenergie durch Reflexion und Streuung. Dadurch nimmt die innere Dämpfung gerade bei hohen Frequenzen stark zu. Aus diesem Grund werden in der Praxis üblicherweise Frequenzen zwischen 0,5 - 5 MHz eingesetzt, abhängig von der Dicke, dem Lagenaufbau und dem Faservolumengehalt des zu untersuchenden FKV-Prüfkörpers. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass mit einer Prüffrequenz von 0,5 MHz glasfaserverstärkte Kunststoffe bis zu einer Dicke von etwa 50 mm geprüft werden können [172, 173].

Der Anteil der an einer Grenzfläche reflektierten Schallenergie ist abhängig von den akustischen Eigenschaften der aneinandergrenzenden Medien. Bei einer Grenzfläche von FKV zur Luft ergibt sich ein besonders hoher Anteil reflektierten Schallenergie, weshalb die UT besonders gut geeignet ist, Defekte mit Lufteinschlüssen (Poren und Delaminationen) zu detektieren [174]. Daraus abgeleitet ergibt sich das Problem, dass bei dickwandigen FKV, bei denen durch die fertigungstechnischen Herausforderungen die Porendichte höher als bei dünnwandigen FKV ist, die Durchschallbarkeit erschwert wird [175]. In [176] wird dieser Effekt genutzt, um den Grad der Porosität in einer 11 mm dicken CFK-Probe zu untersuchen. Die Problematik der hohen Dämpfung wurde auch in [177] untersucht und die Detektionsgrenze von verschiedenen großen Delaminationen in einer Tiefe von bis zu ca. 110 mm bestimmt (vgl. Bild 4.2).

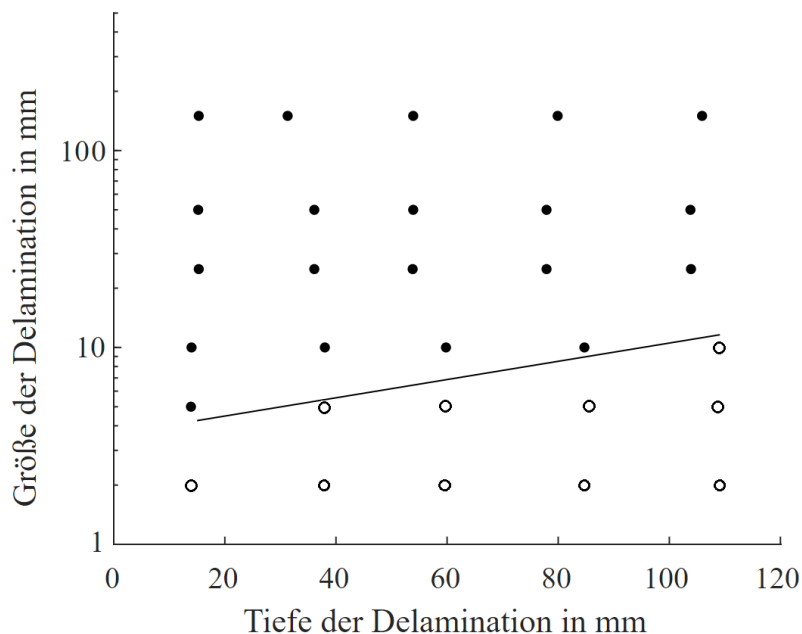


Bild 4.1: Diagramm mit der Nachweisgrenze von Delaminationen in verschiedenen Tiefenlagen nach [177]. Ausgefüllte Punkte stellen detektierbare Delaminationen dar. Die diagonale Linie stellt die vom Autor vorgeschlagene Nachweisbarkeitsgrenze dar

Neben der hohen Dämpfung ergeben sich bei der Ultraschallprüfung auch durch den großen Anisotropiegrad des FKV entsprechende Herausforderungen. Die Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit führt gerade bei der Schrägeinschallung zu komplexen Auswertungsansätzen, um die Lage von Defekten zu bestimmen. Die Charakterisierung dieses anisotropen Verhaltens bietet aber auch die Möglichkeit auf den inneren Aufbau eines FKV zurückzuschließen. So werden in [178] geführte Wellen eingesetzt, um die in-plane Faserorientierung eines 10,5 mm dicken CFK-Prüfkörpers zu untersuchen. Durch die Betrachtung unterschiedlicher Moden konnte zudem eine tiefenaufgelöste Auswertung der Steifigkeit durchgeführt werden. Auch die Autoren in [179] befassen sich mit der Problematik der zunehmenden Faserwelligkeit in dickwandigen FKV. Sie zeigen einen simulativen Ansatz, in welchem geführte Wellen eingesetzt werden, um die Lokalisierung und Schweregradbewertung von Faserwelligkeiten in der Laminebene und Ondulationen in Dickenrichtung in einer 7 mm dicken CFK-Platte durchzuführen. Zwar fehlt hier der experimentelle Nachweis dieses Ansatzes, allerdings zeigt diese Arbeit die Aktualität der Thematik.

Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, können Rekonstruktionsalgorithmen eingesetzt werden. So stellt [180] einen Ansatz mit der *Total-*

Focusing-Method-(TFM-) vor, bei dem anisotropen Schallgeschwindigkeiten eines FKV angepasst werden. Das Signal-Rausch-Verhältnis konnte dadurch bis zu einer Defekttiefe von 16 mm um etwa 15 dB verbessert werden.

Da die Schallabschwächung in dickwandigen FKV-Laminaten mit steigender Prüffrequenz zunimmt [181], gibt es verschiedene Untersuchungen zum Einsatz von luftgekoppeltem Ultraschall. Hierbei handelt es sich um ein berührungsloses Prüfverfahren, bei dem spezielle, an die Luft angepasste Schallwandler eingesetzt werden. Um trotz der berührungslosen Anwendung ein ausreichendes SNR zu erhalten, werden die Prüfköpfe mit einer deutlich höheren Energie sowie mit Frequenzen unterhalb der üblichen UT betrieben (25 - 500 kHz). Diese niedrigeren Frequenzen führen zu einer verringerten Schallabschwächung im Prüfkörper, wie [182] beschreibt. Hierfür werden CFK-Prüfkörper bis zu einer Dicke von 50,8 mm mit einer Prüffrequenz von 200 kHz untersucht, dabei wurde eine Amplitudenabschwächung von ca. 80 % festgestellt. Auch in [172] wird die Prüfbarkeit von 50 mm dicken GFK Laminaten mit 400 kHz und 120 kHz nachgewiesen, wobei sich mit der niedrigeren Prüffrequenz bessere Ergebnisse erzielen lassen.

4.3 Röntgenprüfung und Röntgen-Computertomografie

Die Röntgenprüfung (RT) zählt ebenfalls zu den Volumenverfahren der zerstörungsfreien Prüfung. Hierbei wird eine Röntgenstrahlungsquelle auf den Prüfkörper gerichtet und die Intensität der transmittierenden Strahlung mittels eines Detektors erfasst. Unterschiedliche Abschwächungseffekte im Prüfkörper, bedingt durch unterschiedliche Materialien sowie Durchstrahlungslängen, verursachen einen Kontrast im Röntgenbild und ermöglichen Rückschlüsse auf den inneren Aufbau, die Faserorientierung sowie das Vorhandensein von Defekten wie Rissen oder Delaminationen.

Um den Detailgrad bei der RT zu verbessern, ist es wichtig, den Kontrast einer Röntgenaufnahme zu maximieren. Bei der Prüfung von dickwandigen FKV ist dies ein wichtiges Detail, da durch die zunehmende Wanddicke eines Prüfkörpers eine zunehmende Verschlechterung des Kontrasts stattfindet. Um dem entgegen zu wirken, ist es von besonderer Bedeutung, die Röhrenspannung bzw. den Röhrenstrom für einen spezifischen Prüffall zu optimieren [183]. Zudem ermöglicht der Einsatz von hochabsorbierenden Kontrastmitteln eine weitere Verbesserung der Defekterkennung. So wird z.B. in [184] eine Zinkjodid-Lösung eingesetzt, um den Kontrast von vertikal orientierten Rissen an 4,1 mm und 6,1 mm dicken CFK-Prüfkörpern zu verbessern.

Ähnlich wie beim Ultraschall ermöglichen Rekonstruktionsansätze eine optimierte Darstellung der Prüfergebnisse. Im Falle der RT ermöglicht die computertomografische (CT) Auswertung eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse. Hierzu werden in definierten Winkelschrittweiten mehrere Einzelaufnahmen eines rotierenden Prüfkörpers aufgenommen. Durch

Bildrekonstruktionsalgorithmen werden diese Einzelbilder zu einer 3D-Karte, bestehend aus Volumenelementen (Voxel), rekonstruiert. Jedes Voxel hat dabei einen charakteristischen Grauwert, welcher mit Abschwächungskoeffizienten an dieser Stelle korreliert. Mit dieser Methode konnte die Ausdehnung von Impactschäden in einem 43,18 mm dicken GFK-Prüfkörper festgestellt werden [185]. Allerdings muss festgehalten werden, dass die Auswertung von Volumen wie beispielsweise Poren oder Delaminationen stark vom gewählten Grenzwert (Threshold) abhängen, durch den bestimmt wird, ab welchem Grauwert ein Voxel zu einem Defekt gezählt wird. In [186] konnten hierzu in einem porösen CFK Laminat für verschiedene Grenzwerte eine Schwankungsbreite der berechneten Porosität zwischen 3,8 % bis 8,3 % berechnet werden.

Die CT-Technologie bietet durch angepasste Brennfleckgrößen und hochauflösende Detektoren prinzipiell die Möglichkeit, einzelne Fasern im Verbund aufzulösen. Die Größe eines Voxels sollte hierfür je nach Faserdurchmesser nicht weit über 2 μm liegen [187, 188], was gleichzeitig die Limitierung einer solchen Auswertung aufzeigt. In [188] wird hierzu unter Berücksichtigung der heutzutage üblichen Detektoren festgehalten, dass zur Auflösung von Einzelfasern die Prüfkörpergröße auf etwa 6 mm begrenzt ist. Daraus geht hervor, dass die CT für die Einzelfaserdetektion realer FKV-Bauteile keine geeignete zerstörungsfreie Prüfmethode darstellt. Um diese Grenze zu erweitern, wird in [189] der Einsatz von Synchrotronstrahlung in der Laminographie (SRCL) untersucht und mit der μCT -Methode verglichen. Hierbei wurde mit der SRCL eine $150 \times 100 \times 4,5 \text{ mm}^3$ CFK-Prüfplatte ohne die bei der μCT notwendige zerstörende Entnahme der Region von Interesse geprüft und eine Verbesserung der Auflösung um den Faktor 6 gegenüber der μCT -Ergebnisse festgestellt. Ein weiterer Vorteil der SRCL ist die Prüfbarkeit des kompletten Prüflings. Die für die μCT notwendige zerstörende Probensegmentierung entfällt.

4.4 Akustische Emission

Die akustische Emissionsprüfung (AT) ist im Vergleich zu den anderen hier vorgestellten Prüfmethoden ein passives Prüfverfahren, bei dem elastische Spannungswellen im Ultraschallbereich, die durch eine externe Belastung bedingte Spannungskonzentrationen und Rissinitiierungen bzw. Rissausbreitungen entstehen, registriert werden. Die elastischen Spannungswellen treten dabei in Form von Volumen-, Rayleigh-, und Lamb-Wellen auf. Durch die konzentrische Ausbreitung dieser Wellen um den entstehenden Defekt kann dieser unter der Verwendung mehrerer piezoelektrischer Empfänger durch die Anwendung von Rekonstruktionsalgorithmen klassifiziert und geortet werden. Die Prüfkörperdicke spielt dabei eine entscheidende Rolle, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die Amplitude und die Phasengeschwindigkeit der bei flächigen Bauteilen entstehenden Lamb-Moden hat. Diese zu kennen ist für die Auswertung von besonderer Bedeutung, da die unterschiedlichen Moden (symmetrisch und asymmetrisch) eine unterschiedliche Dämpfung aufweisen [190]. Zudem wird in [191] eine Abhängigkeit der entstehenden Lamb-Moden zur Defekttiefe aufgezeigt, wobei ein linearer Abfall des Verhältnisses zwischen asymmetrischer und symmetrischer Lamb-Mode mit zunehmender Defekttiefe festgestellt wurde.

Ein großer Einsatzbereich der AT ist die Rotorblattprüfung von Windkraftanlagen (WTB). Für diese Anwendung gibt es Vielzahl von Veröffentlichungen, die sich mit der Anwendung, Optimierung und verbesserten Rekonstruktionsanalyse der AT befassen. So wurde von den Autoren in [192] eine experimentelle Studie über die Überwachung des Betriebszustands von WTB durchgeführt und durch Anpassungen des Auswertalgorithmus eine Lokalisierung von Rissen bereits in einem frühen Stadium festgestellt. Da bei der AT durch den komplexen Prüfaufbau mit mehreren Sensoren über einen langen Zeitraum viele Daten ermittelt werden, wird in [193] ein statistischer Auswertungsansatz zum Vergleich der quadratischen Mittelwerte einer Messung mit den Modalparametern der WTB vorgestellt. Mit 200 Messpunkten und betrachteten 10 Schwingungsmoden konnten so die Orte für drei untersuchte Defektpositionen bestimmt werden. Ähnlich wie bei der konventionellen Ultraschallprüfung gibt es auch bei der AT die Möglichkeit zur berührungslosen Prüfung. In [194] wird hierfür ein Testaufbau mit einem *Array* aus 48 Mikrofonen aufgebaut um damit Löcher und Risse in einem WTB zu detektieren.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Dickwandige Faser-Kunststoff-Verbunde bringen eine Reihe an Herausforderungen sowohl bei der Herstellung als auch der mechanischen und zerstörungsfreien Prüfung mit sich. Dabei ist das Verhalten von Dickeneinflüssen in vielen Bereichen gut erforscht.

Während bei der Herstellung sich im Wesentlichen die Herausforderung stellt, den Qualitätsverlust so gering wie möglich zu halten, besteht die Schwierigkeit in der mechanischen Charakterisierung darin, den Einfluss weiterer Wechselwirkungsmechanismen, die einen eventuellen Größeneffekt überlagern, zu minimieren.

Dabei wird in der bestehenden Literatur deutlich, dass es nur unter Betrachtung aller Einflussfaktoren möglich ist, eine konsistente Aussage über Dickeneffekte und deren zugrundeliegende Mechanismen zu treffen. Neben den Unsicherheiten aus Prüfbedingung und Randeffekten können auch Spannungsgradienten bei Biegebeanspruchung und die Selbsterwärmung unter zyklischer Belastung einen Einfluss auf die dickenabhängigen mechanischen Eigenschaften von FKV haben. Es ist in der Hinsicht nicht verwunderlich, dass bei der Vielzahl der Einflussfaktoren, sowohl in der quasistatischen als auch der dynamischen Prüfung, z.T. konträre Forschungsergebnisse in der Literatur anzutreffen sind.

Gerade in Anbetracht der Schwierigkeiten bei der Herstellung und mechanischen Prüfung können zerstörungsfreie Prüfverfahren helfen, dickwandige FKV-Lamine zu charakterisieren. Eine Reihe verschiedener ZfP-Methoden eignen sich sowohl zur Strukturaufklärung als auch zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften. Dabei ist keine repräsentative Grenze der prüfbareren Laminatdicke in den einzelnen Verfahren auszumachen. Es zeigt sich jedoch, dass insbesondere die Ultraschall- und Röntgenprüfungen in der Lage sind, Schädigungen in großen Laminattiefen mit guter Auflösung zu detektieren.

Schließlich wird deutlich, dass trotz erheblicher Fortschritte in den letzten 30 Jahren die Beschreibung dieser Thematik nicht abgeschlossen ist. Insbesondere die Modell- und Methodenentwicklung für ein ganzheitliches Verständnis des Größeneinflusses bei Faser-Kunststoff-Verbunden sollte Teil zukünftiger Forschungsarbeiten sein.

Danksagung

Dieses Review-Paper entstand im Rahmen des Paketprojektes PAK 988 mit den Teilprojekten 428326921, 428328210, 428323347 und 428324840 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Der DFG wird an dieser Stelle für ihre finanzielle Unterstützung gedankt.

Literatur

- [1] A. Gruhl, "Beitrag zur beanspruchungsgerechten Gestaltung und technologischen Umsetzung neuartiger Flechtmuster für Faserverbundstrukturen," Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der Technischen Universität Dresden, 2019.
- [2] P. Zahlen, "Beitrag zur kostengünstigen industriellen Fertigung von haupttragenden CFK-Großkomponenten der kommerziellen Luftfahrt mittels Kernverbundbauweise in Harzinfusionstechnologie (Band 6)," Logos Verlag Berlin GmbH, 2013.
- [3] J. Lee und C. Soutis, "Thickness effect on the compressive strength of T800/924C carbon fibre-epoxy laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 36, Nr. 2, S. 213–227, 2005, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.06.010.
- [4] E. Ruiz und F. Trochu, "Numerical analysis of cure temperature and internal stresses in thin and thick RTM parts," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 36, Nr. 6, S. 806–826, 2005, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.10.021.
- [5] P. M. Schubel, J. J. Luo und I. M. Daniel, "Through-thickness characterization of thick composite laminates," in *SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics 2006*, 2006, S. 1793–1800.
- [6] A. Altmann, R. Taubert, U. Mandel, R. Hinterhoelzl und K. Drechsler, "A continuum damage model to predict the influence of ply waviness on stiffness and strength in ultra-thick unidirectional Fiber-reinforced Plastics," *Journal of Composite Materials*, Jg. 50, Nr. 20, S. 2739–2755, 2016, doi: 10.1177/0021998315612536.
- [7] K. Zimmermann, D. Zenkert und M. Siemietzki, "Testing and analysis of ultra thick composites," *Composites Part B: Engineering*, Jg. 41, Nr. 4, S. 326–336, 2010, doi: 10.1016/j.compositesb.2009.12.004.
- [8] G. Struzziero und J. J. E. Teuwen, "Residual Stresses Generation in Ultra-Thick Components for Wind Turbine Blades," *Procedia CIRP*, Jg. 85, S. 8–12, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.09.002.
- [9] W.R. Broughton, "Thick Composites," *NPL Report*, Jg. MAT Report 24, 2008.
- [10] K. Potter, B. Khan, M. Wisnom, T. Bell und J. Stevens, "Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 39, Nr. 9, S. 1343–1354, 2008, doi: 10.1016/j.compositesa.2008.04.016.
- [11] E. Kunze, S. Galkin, R. Böhm, M. Gude und L. Kärger, "The Impact of Draping Effects on the Stiffness and Failure Behavior of Unidirectional Non-Crimp Fabric Fiber Reinforced Composites," *Materials (Basel, Switzerland)*, Jg. 13, Nr. 13, 2020, doi: 10.3390/ma13132959.

- [12] M. Thor, M. G. R. Sause und R. M. Hinterhoelzl, "Mechanisms of origin and classification of out-of-plane fiber waviness in composite materials—a review," *Journal of Composites Science*, Jg. 4, Nr. 3, S. 130, 2020, doi: 10.3390/jcs4030130.
- [13] P. Olivier und M. Cavarero, "Comparison between longitudinal tensile characteristics of thin and thick thermoset composite laminates: influence of curing conditions," *Computers & Structures*, Jg. 76, 1-3, S. 125–137, 2000, doi: 10.1016/S0045-7949(99)00161-3.
- [14] T. E. Twardowski, S. E. Lin und P. H. Geil, "Curing in Thick Composite Laminates: Experiment and Simulation," *Journal of Composite Materials*, Jg. 27, Nr. 3, S. 216–250, 1993, doi: 10.1177/002199839302700301.
- [15] W.R. Broughton, "Thick Composites," *NPL Report*, Jg. CMMT(A) 263, 2001.
- [16] W. Zhang, Y. Xu, X. Hui und W. Zhang, "A Multi-Dwell Temperature Profile Design for the Cure of Thick CFRP Composite Laminates," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Jg. 117, Nr. 3, 2021, Art. Nr. 1133–1146, doi: 10.1007/s00170-021-07765-1.
- [17] O. Yuksel, I. Baran, N. Ersoy und R. Akkerman, "Investigation of transverse residual stresses in a thick pultruded composite using digital image correlation with hole drilling," *Composite Structures*, Jg. 223, S. 110954, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.110954.
- [18] Á. R. Gil, "Manufacturing of thick-walled composites," PhD Thesis, TU Delft, 2010.
- [19] S. Konstantopoulos, C. Hueber, I. Antoniadis, J. Summerscales und R. Schledjewski, "Liquid composite molding reproducibility in real-world production of fiber reinforced polymeric composites: a review of challenges and solutions," *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Jg. 5, Nr. 3, S. 85–99, 2019, doi: 10.1080/20550340.2019.1635778.
- [20] S. Galkin, E. Kunze, L. Kärger, R. Böhm und M. Gude, "Experimental and Numerical Determination of the Local Fiber Volume Content of Unidirectional Non-Crimp Fabrics with Forming Effects," *Journal of Composites Science*, Jg. 3, Nr. 1, S. 19, 2019, doi: 10.3390/jcs3010019.
- [21] A. Gruhl, R. Böhm und M. Gude, "Faserverbundbauteile auf Basis neuartiger Flechtmuster," *Lightweight Design*, Jg. 9, Nr. 2, S. 38–43, 2016, doi: 10.1007/s35725-016-0007-y.
- [22] Z. M. Khan, D. O. Adams und S. Anas, "The Influence of Multiple Nested Layer Waviness on the Compression Strength of Double Nested Wave Formations in a Carbon Fiber Composite Laminate," *Mechanics of Composite Materials*, Jg. 51, Nr. 6, S. 751–760, 2016, doi: 10.1007/s11029-016-9546-7.
- [23] G. Gardiner, "Airbus A350 Update: BRaF & FPP," *CompositesWorld*, Feb. 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.compositesworld.com/articles/airbus-a350-update-braf-fpp>
- [24] L. Mishnaevsky, K. Branner, H. N. Petersen, J. Beauson, M. McGugan und B. F. Sørensen, "Materials for Wind Turbine Blades: An Overview,"

- Materials (Basel, Switzerland)*, Jg. 10, Nr. 11, 2017, doi: 10.3390/ma10111285.
- [25] R. Stewart, "Wind turbine blade production - new products keep pace as scale increases," *Reinforced Plastics*, Jg. 56, Nr. 1, S. 18–25, 2012, doi: 10.1016/S0034-3617(12)70033-4.
- [26] S. Czichon, K. Zimmermann, P. Middendorf, M. Vogler und R. Rolfes, "Three-dimensional stress and progressive failure analysis of ultra thick laminates and experimental validation," *Composite Structures*, Jg. 93, Nr. 5, S. 1394–1403, 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2010.11.009.
- [27] M. Neitzel, "Handbuch Verbundwerkstoffe," in *Handbuch Verbundwerkstoffe*, M. Neitzel, P. Mitschang und U. Breuer, Hg., München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014, S. I–XXI. Doi: 10.3139/9783446436978.fm
- [28] W. Siebenpfeiffer, "Leichtbau-Technologien im Automobilbau," Springer, 2014. Doi: 10.1007/978-3-658-04025-3
- [29] A. Vita, V. Castorani und M. Germani, "Manufacturing, process simulation and mechanical tests of a thick component produced by compression-RTM process," in *Eccm18-18th European conference on composite materials*, 2018, S. 24–28.
- [30] P. Rosenberg, "Entwicklung einer RTM Prozessvariante zur kavitätsdruckgeregelten Herstellung von Faserverbundstrukturbauteilen," Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018.
- [31] E. A. Kempner und H. Hahn, "Effect of radial stress relaxation on fibre stress in filament winding of thick composites," *Composites Manufacturing*, Jg. 6, Nr. 2, S. 67–77, 1995, doi: 10.1016/0956-7143(95)99646-A.
- [32] D. Cohen, "Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 28, Nr. 12, S. 1035–1047, 1997, doi: 10.1016/S1359-835X(97)00073-0.
- [33] O. A. Ekuase, N. Anjum, V. O. Eze und O. I. Okoli, "A Review on the Out-of-Autoclave Process for Composite Manufacturing," *Journal of Composites Science*, Jg. 6, Nr. 6, S. 172, 2022, doi: 10.3390/jcs6060172.
- [34] L. M. Martulli, T. Creemers, E. Schöberl, N. Hale, M. Kerschbaum, S. V. Lomov und Y. Swolfs, "A thick-walled sheet moulding compound automotive component: Manufacturing and performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 128, S. 105688, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105688.
- [35] S. K Ha und J. Y Jeong, "Effects of winding angles on through-thickness properties and residual strains of thick filament wound composite rings," *Composites science and technology*, Jg. 65, Nr. 1, S. 27–35, 2005, doi: 10.1016/j.compscitech.2004.05.019.
- [36] M. Azeem, H. H. Ya, M. A. Alam, M. Kumar, P. Stabla, M. Smolnicki, L. Gemi, R. Khan, T. Ahmed, Q. Ma, M. R. Sadique, A. A. Mokhtar und M. Mustapha, "Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review," *Journal of Energy Storage*, Jg. 49, S. 103468, 2022, doi: 10.1016/j.est.2021.103468.

- [37] M. Volk, O. Yuksel, I. Baran, J. H. Hattel, J. Spangenberg und M. Sandberg, “Cost-efficient, automated, and sustainable composite profile manufacture: A review of the state of the art, innovations, and future of pultrusion technologies,” *Composites Part B: Engineering*, Jg. 246, S. 110135, 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110135.
- [38] O. Yuksel, M. Sandberg, J. H. Hattel, R. Akkerman und I. Baran, “Mesoscale Process Modeling of a Thick Pultruded Composite with Variability in Fiber Volume Fraction,” *Materials (Basel, Switzerland)*, Jg. 14, Nr. 13, 2021, doi: 10.3390/ma14133763.
- [39] S. Konstantopoulos, E. Fauster und R. Schledjewski, “Monitoring the production of FRP composites: A review of in-line sensing methods,” *Express Polymer Letters*, Jg. 8, Nr. 11, 2014, doi: 10.3144/expresspolymlett.2014.84.
- [40] B. Yenilmez und E. M. Sozer, “A grid of dielectric sensors to monitor mold filling and resin cure in resin transfer molding,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 40, Nr. 4, S. 476–489, 2009, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.01.014.
- [41] E. Schmachtenberg, J. zur Schulte Heide und J. Töpker, “Application of ultrasonics for the process control of Resin Transfer Moulding (RTM),” *Polymer testing*, Jg. 24, Nr. 3, S. 330–338, 2005, doi: 10.1016/j.polymertesting.2004.11.002.
- [42] M. Rath, J. Döring, W. Stark und G. Hinrichsen, “Process monitoring of moulding compounds by ultrasonic measurements in a compression mould,” *NDT & e International*, Jg. 33, Nr. 2, S. 123–130, 2000, doi: 10.1016/S0963-8695(99)00029-8.
- [43] B. W. Drinkwater und P. D. Wilcox, “Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review,” *NDT & e International*, Jg. 39, Nr. 7, S. 525–541, 2006, doi: 10.1016/j.ndteint.2006.03.006.
- [44] T. Stöven, F. Weyrauch, P. Mitschang und M. Neitzel, “Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fibre preform,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 34, Nr. 6, S. 475–480, 2003, doi: 10.1016/S1359-835X(03)00059-9.
- [45] R. Protz, “Zum Einfluss von Defekten auf das dehnratenabhängige Werkstoffverhalten von Faser-Kunststoff-Verbunden,” Dissertation, Technische Universität Dresden, 2021.
- [46] T. K. O'Brien, A. D. Chawan, K. DeMarco und I. Paris, “Influence of specimen preparation and specimen size on composite transverse tensile strength and scatter,” 2001.
- [47] D. A. Griffin, “WindPACT Turbine Design Scaling Studies Technical Area 1- Composite Blades for 80- to 120-Meter Rotor,” 2001. doi: 10.2172/783406. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.osti.gov/biblio/783406>
- [48] E. K. Gamstedt und S. I. Andersen, “Fatigue degradation and failure of rotating composite structures-Materials characterisation and underlying mechanisms,” Risoe National Lab., Roskilde (Denmark). Materials Research Dept., 2001.

- [49] E. T. Krämer, W. J. B. Grouve, S. Koussios, L. L. Warnet und R. Akkerman, "Real-time observation of waviness formation during C/PEEK consolidation," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 133, S. 105872, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105872.
- [50] J.-H. Belnoue, O. J. Nixon-Pearson, A. J. Thompson, D. S. Ivanov, K. D. Potter und Hallett, SR, "Consolidation-driven defect generation in thick composite parts," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Jg. 140, Nr. 7, 2018, doi: 10.1115/1.4039555.
- [51] L. G. Melin, K. Levin, S. Nilsson, S. J. Palmer und P. Rae, "A study of the displacement field around embedded fibre optic sensors," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 30, Nr. 11, S. 1267–1275, 1999, doi: 10.1016/S1359-835X(99)00036-6.
- [52] D. Barfuss, C. Garthaus und M. Gude, "Advanced waviness modelling of thermoplastic tape braids," *Proceedings ICCM20, Copenhagen*, S. 19–24, 2015.
- [53] S. V. Lomov, I. Verpoest, T. Peeters, D. Roose und M. Zako, "Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate," *Composites science and technology*, Jg. 63, Nr. 7, S. 993–1007, 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(02)00318-4.
- [54] R. Böhm, E. Kunze, S. Geller und M. Gude, "Experimental analysis of draping process generated material imperfections in textile preforms," *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials Athens, Greece, 24-28th June 2018*, 2018.
- [55] M. Bodaghi, P. Simacek, S. G. Advani und N. C. Correia, "A model for fibre washout during high injection pressure resin transfer moulding," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Jg. 37, Nr. 13, S. 865–876, 2018, doi: 10.1177/0731684418765968.
- [56] A. Hautefeuille, S. Comas-Cardona und C. Binetruy, "Consolidation and compression of deformable impregnated fibrous reinforcements: Experimental study and modeling of flow-induced deformations," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 131, S. 105768, 2020.
- [57] M. Bodaghi, C. Cristóvão, R. Gomes und N. C. Correia, "Experimental characterization of voids in high fibre volume fraction composites processed by high injection pressure RTM," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 82, S. 88–99, 2016. Doi: 10.1016/j.compositesa.2015.11.042
- [58] R. S. Pierce und B. G. Falzon, "Simulating resin infusion through textile reinforcement materials for the manufacture of complex composite structures," *Engineering*, Jg. 3, Nr. 5, S. 596–607, 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.04.006.
- [59] N. V. Padaki, R. Alagirusamy, B. L. Deopura und R. Figueiro, "Compression and permeability properties of multiaxial warp-knit preforms," *Journal of the Textile Institute*, Jg. 99, Nr. 4, S. 287–294, 2008, doi: 10.1080/00405000701414733.

- [60] D. Becker, "Transversales Imprägnierverhalten textiler Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde," Dissertation, TU Kaiserslautern, 2015.
- [61] A. Nabovati, E. W. Llewellyn und A. C. M. Sousa, "Through-thickness permeability prediction of three-dimensional multifilament woven fabrics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 41, Nr. 4, S. 453–463, 2010, doi: 10.1016/j.compositesa.2009.11.011.
- [62] J. Bröckel, "Untersuchungen zum Einfluss gezielt nicht geradlinig eingebrachter Faser-verstärkungen auf die mechanischen Eigenschaften einer nachgiebigen Polymermatrix," Dissertation, Universität Rostock, Rostock, 2007.
- [63] C. Brauner, "Analysis of process-induced distortions and residual stresses of composite structures (Band 8)," Logos Verlag Berlin GmbH, 2013.
- [64] M. Gude, R. Schirner, M. Müller, N. Weckend, M. Andrich und A. Langkamp, "Experimental-numerical test strategy for evaluation of curing simulation of complex-shaped composite structures," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Jg. 47, Nr. 11, S. 1072–1086, 2016, doi: 10.1002/mawe.201600632.
- [65] A. Andrich, "Analyse des Schädigungs- und Verformungsverhaltens dickwandiger textilverstärkter Kunststoffverbunde bei Druckbelastung in Dickenrichtung. Dissertation," Dissertation, Technische Universität Dresden, 2013.
- [66] R. Jakobi, "Zur Spannungs-, Verformungs- und Bruchanalyse an dickwandigen, rohrförmigen Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden," Dissertation, Gesamthochschule Kassel, 1987.
- [67] S. Anandan, G. S. Dhaliwal, Z. Huo, K. Chandrashekhara, N. Apetre und N. Iyyer, "Curing of thick thermoset composite laminates: multiphysics modeling and experiments," *Applied Composite Materials*, Jg. 25, Nr. 5, S. 1155–1168, 2018, doi: 10.1007/s10443-017-9658-9.
- [68] G. Struzziero und A. A. Skordos, "Multi-objective optimisation of the cure of thick components," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 93, S. 126–136, 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.11.014.
- [69] Dmitriev, O., Barsukov A., Dmitriev A., Hg., "Technological preparation to the manufacturing of thick-walled polymer composite products," 2019. Doi: 10.12783/dteees/peems2019/33962
- [70] J. M. Balvers, "In situ strain & cure monitoring in liquid composite moulding by fibre Bragg grating sensors," TU Delft, 2014.
- [71] VDI 2014 Blatt3, "Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund Berechnungen," *Verein Deutscher Ingenieure*, 2006.
- [72] Z. P. Bažant und J. Planas, "Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials," Routledge, 2019. Doi: 10.1201/9780203756799
- [73] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability," *J. Appl. Mech*, 1951. Doi: 10.1115/1.4010337

- [74] Z. P. Bažant, "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal," *Journal of Engineering Mechanics*, Jg. 110, Nr. 4, S. 518–535, 1984, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1984)110:4(518).
- [75] M. R. Wisnom und M. R. Maheri, "Tensile strength of unidirectional carbon fibre-epoxy from tapered specimens," *2nd European Conf. on Composites Testing and Standardisation, Hamburg*, S. 239–247, 1994.
- [76] M. R. Wisnom, "Relationship between strength variability and size effect in unidirectional carbon fibre/epoxy," *Composites*, Jg. 22, Nr. 1, S. 47–52, 1991, doi: 10.1016/0010-4361(91)90102-M.
- [77] M. R. Wisnom und J. W. Atkinson, "Reduction in tensile and flexural strength of unidirectional glass fibre-epoxy with increasing specimen size," *Composite Structures*, Jg. 38, 1-4, S. 405–411, 1997, doi: 10.1016/S0263-8223(97)00075-5.
- [78] M. R. Wisnom, "The effect of specimen size on the bending strength of unidirectional carbon fibre-epoxy," *Composite Structures*, Jg. 18, Nr. 1, S. 47–63, 1991, doi: 10.1016/0263-8223(91)90013-O.
- [79] E. T. Camponeschi, "Compression testing of thick-section composite materials," *IN: Composite materials: Fatigue and fracture*, Jg. 3, S. 439–456, 1991. Doi: 10.1520/STP17731S
- [80] E. T. Camponeschi, J. W. Gillespie und D. J. Wilkins, "Kink-Band Failure Analysis of Thick Composites in Compression," *Journal of Composite Materials*, Jg. 27, Nr. 5, S. 471–490, 1993, doi: 10.1177/002199839302700502.
- [81] E. T. Camponeschi, "Compression response of thick-section composite materials," University of Delaware, 1990.
- [82] E. T. Camponeschi, "Lamina waviness levels in thick composites and its effect on their compression strength," *Composites*, 1991.
- [83] K. E. Jackson und Tabiei A, "Symposium on structural similitude and size effects," *ASME Winter Meeting*, 1997.
- [84] K. E. Jackson, S. Kellas und J. Morton, "Scale Effects in the Response and Failure of Fiber Reinforced Composite Laminates Loaded in Tension and in Flexure," *Journal of Composite Materials*, Jg. 26, Nr. 18, S. 2674–2705, 1992, doi: 10.1177/002199839202601803.
- [85] K. E. Jackson, "Scaling effects in the flexural response and failure of composite beams," *AIAA journal*, Jg. 30, Nr. 8, S. 2099–2105, 1992, doi: 10.2514/3.11186.
- [86] M. R. Wisnom, "Size effects in the testing of fibre-composite materials," *Composites science and technology*, Jg. 59, Nr. 13, S. 1937–1957, 1999, doi: 10.1016/S0266-3538(99)00053-6.
- [87] L. S. Sutherland, R. A. Shenoi und S. M. Lewis, "Size and scale effects in composites: I. Literature review," *Composites science and technology*, Jg. 59, Nr. 2, S. 209–220, 1999, doi: 10.1016/S0266-3538(98)00065-7.
- [88] C. Zweben, "Size effect in composite materials and structures: Basic concepts and design considerations," *Scaling Effects in Composite Materials and Structures*, S. 197–217, 1994.

- [89] Z. P. Bažant, "Size effect," *International Journal of Solids and Structures*, Jg. 37, 1-2, S. 69–80, 2000, doi: 10.1016/S0020-7683(99)00077-3.
- [90] C. Soutis, P. T. Curtis und N. A. Fleck, "Compressive failure of notched carbon fibre composites," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, Jg. 440, Nr. 1909, S. 241–256, 1993, doi: 10.1098/rspa.1993.0014.
- [91] J. Lee und C. Soutis, "A study on the compressive strength of thick carbon fibre-epoxy laminates," *Composites science and technology*, Jg. 67, Nr. 10, S. 2015–2026, 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.12.001.
- [92] J. M. Hodgkinson, "Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites," Woodhead Publishing, 2000. Doi: 10.1533/9781855738911
- [93] J. Dogra, J. M. Hodgkinson, P. Robinson und S. T. Pinho, "Development of a compression test for thick composite laminates: finite element analysis," *elastic*, Jg. 300, S. 914, 2007.
- [94] J. G. Häberle und F. L. Matthews, "An improved technique for compression testing of unidirectional fibre-reinforced plastics; development and results," *Composites*, Jg. 25, Nr. 5, S. 358–371, 1994, doi: 10.1016/S0010-4361(94)80006-5.
- [95] DIN EN ISO 527-4, "Kunststoffe—Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe," *Deutsches Institut für Normung*, 1997.
- [96] DIN EN ISO 527-5, "Kunststoffe-Bestimmung der Zugeigenschaften-Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe," *Deutsche Fassung, Ausgabe Januar*, 2010.
- [97] DIN EN ISO 14126, "Faserverstärkte Kunststoffe: Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene," *Deutsche Norm*, 2000.
- [98] DIN EN ISO 14125, "Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften," *Deutsche Norm*, 2011.
- [99] DIN EN ISO 14129, "Faserverstärkte Kunststoffe - Zugversuch an 45°-Laminaten zur Bestimmung der Schubspannungs/Schubverformungskurve des Schubmoduls in der Lagenebene," *Deutsche Norm*, 1998.
- [100] C. Soutis, J. Lee und C. Kong, "Size effect on compressive strength of T300/924C carbon fibre-epoxy laminates," *Plastics, Rubber and Composites*, Jg. 31, Nr. 8, S. 364–370, 2002, doi: 10.1179/146580102225006459.
- [101] M. R. Gower, R. M. Shaw und W. R. Broughton, "Thick Composites: Part I: Mechanical Test Review, Part II: Cure Optimisation," 2008.
- [102] J. Niklewicz und G. D. Sims, "Size effects in composite materials," 2002.
- [103] F. Lahuerta, R. P. Nijssen, F. P. van der Meer und L. J. Sluys, "Thickness scaled compression tests in unidirectional glass fibre reinforced composites in static and fatigue loading," *Composites science and technology*, Jg. 123, S. 115–124, 2016, doi: 10.1016/j.compscitech.2015.12.008.
- [104] Z. P. Bažant, Y. Zhou, D. Novák und I. M. Daniel, "Size effect on flexural strength of fiber-composite laminates," *J. Eng. Mater. Technol.*, Jg. 126, Nr. 1, S. 29–37, 2004.

- [105] R. Protz, N. Kosmann, D. Fritsch, P. Fey, W. Essig, K. Dietrich, M. Gude, P. Horst, M. Kreuzbruck, K. Schulte, G. Busse, W. Hufenbach und B. Fiedler, "Influence of voids and impact damage on the fatigue behaviour of large scale composites: Einfluss von Poren und Schlagschäden auf das Ermüdungsverhalten von Großstrukturen," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Jg. 47, Nr. 11, S. 1058–1071, 2016, doi: 10.1002/mawe.201600631.
- [106] D. P. Johnson, J. Morton, S. Kellas und K. E. Jackson, "Size effects in scaled fiber composites under four-point flexure loading," *AIAA journal*, Jg. 38, Nr. 6, S. 1047–1054, 2000. Doi: 10.2514/2.1066
- [107] M. Salviato, K. Kirane, Z. P. Bažant und G. Cusatis, "Mode I and II Interlaminar Fracture in Laminated Composites: A Size Effect Study," *J. Appl. Mech*, Jg. 86, Nr. 9, 2019, doi: 10.1115/1.4043889.
- [108] A. Vassilopoulos, "Fatigue life prediction of composites and composite structures," 2019.
- [109] R. Ganesan, "Fatigue behavior of thick composite laminates," in *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures*, Elsevier, 2020, S. 239–267. Doi: 10.1016/B978-0-08-102575-8.00007-3
- [110] A. Katunin, "Influence of the Self-Heating Effect on Fatigue of Polymeric Laminates," *no. June*, S. 24–28, 2012.
- [111] Francisco Lahuerta, "Thickness effect in composite laminates in static and fatigue loading," Doktorarbeit, TU Delft, Delft, 2017.
- [112] H. Hamidi, S. V. Hoa und R. Ganesan, "Material Characterization for Implementation of Hashin Tri-Axial Fatigue Failure Criteria for Unidirectional Composite Laminates," *Mechanical Behavior of Thick Composites*, 2016.
- [113] D. Feldten, "Beitrag zur Steigerung der Werkstoffausnutzung von UD-GFK bei Biegeschwellbeanspruchung," Shaker, 2014.
- [114] L. Yao, Q. Rong, Z. Shan und Y. Qiu, "Static and bending fatigue properties of ultra-thick 3D orthogonal woven composites," *Journal of Composite Materials*, Jg. 47, Nr. 5, S. 569–577, 2013, doi: 10.1177/00219983124431.
- [115] A. Hosoi, S. Sakuma, S. Seki, Y. Fujita, I. Taketa und H. Kawada, "Effect of stress ratio on fatigue characteristics in the out-of-plane direction of thick cfrp laminates with toughened interlaminar layers," in *Proceedings of the 20th International Conference on Composite Materials*. URL: <http://iccm20.org/fullpapers/file>, 2015.
- [116] J. Z. Hansen und R. Østergaard, *The effects of fibre architecture on fatigue life-time of composite materials*. DTU Wind Energy, 2013.
- [117] M. Draskovic, U. I. Galappathithi, A. K. Pickett, M. Capellaro und P. Middendorf, "Influence of ply waviness on residual strength and fatigue degradation of composite wind turbine blades," *ICCM19*.
- [118] P. C. Chou und R. Croman, "Scale effect in fatigue of composite materials," *Journal of Composite Materials*, Jg. 13, Nr. 3, S. 178–194, 1979, doi: 10.1177/002199837901300301.

- [119] M. F. Crowther und M. S. Starkey, "Use of Weibull statistics to quantify specimen size effects in fatigue of GRP," *Composites science and technology*, Jg. 31, Nr. 2, S. 87–95, 1988, doi: 10.1016/0266-3538(88)90084-X.
- [120] N. H. Tai, C. C. Ma, J. M. Lin und G. Y. Wu, "Effects of thickness on the fatigue-behavior of quasi-isotropic carbon/epoxy composites before and after low energy impacts," *Composites science and technology*, Jg. 59, Nr. 11, S. 1753–1762, 1999, doi: 10.1016/S0266-3538(99)00037-8.
- [121] A. H. Mirzaei und M. M. Shokrieh, "Simulation and measurement of the self-heating phenomenon of carbon/epoxy laminated composites under fatigue loading," *Composites Part B: Engineering*, Nr. 223, 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109097.
- [122] A. van Wingerde, "Evaluation on the effect of thick laminates wp10," *Knowledge centre WMC, Wieringerwerf NL, Tech. Rep*, 2006.
- [123] H. Liu, A. Ojha, Z. Li, C. C. Engler-Pinto Jr, X. Su, Q. Sun, H. Kang, W. Wen und H. Cui, "Fatigue modeling for carbon/epoxy unidirectional composites under various stress ratios considering size effects," *International Journal of Fatigue*, Jg. 120, S. 184–200, 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.11.009.
- [124] F. Lahuerta, T. Westphal und R. P. Nijssen, "Self-heating forecasting for thick laminates testing coupons in fatigue," *The Science of Making Torque from Wind, Torque*, 2012.
- [125] A. Katunin, "Criticality of the self-heating effect in polymers and polymer matrix composites during fatigue, and their application in non-destructive testing," *Polymers*, Jg. 11, Nr. 1, S. 19, 2018, doi: 10.3390/polym11010019.
- [126] F. Lahuerta, T. Westphal, R. P. Nijssen, F. P. van der Meer und L. J. Sluys, "Static and fatigue performance of thick laminates test design and experimental compression results," *ECCM-16th, Seville, Spain*, 2014.
- [127] F. Lahuerta, R. P. Nijssen, F. P. van der Meer und L. J. Sluys, "Experimental-computational study towards heat generation in thick laminates under fatigue loading," *International Journal of Fatigue*, Jg. 80, S. 121–127, 2015. Doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.05.014
- [128] F. Lahuerta, "Thickness scaled compression tests in unidirectional glass fibre reinforced composites in static and fatigue loading," *Composites science and technology*, Jg. 123, S. 115–124, 2016, doi: 10.1016/j.compscitech.2015.12.008.
- [129] S. Heimbs, "Foldcore Sandwich Structures and Their Impact Behaviour: An Overview," in *Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures*, Springer Netherlands, 2012, S. 491–544.
- [130] C. Evcı, "Thickness-dependent energy dissipation characteristics of laminated composites subjected to low velocity impact," *Composite Structures*, Jg. 133, S. 508–521, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.07.111.
- [131] F. Islam, R. Caldwell, A. W. Phillips, N. A. St John und B. G. Prusty, "A review of relevant impact behaviour for improved durability of marine

- composite propellers,” *Composites Part C: Open Access*, Jg. 8, S. 100251, 2022, doi: 10.1016/j.jcomc.2022.100251.
- [132] M. Pinnell und P. Sjoblom, “Low-Velocity Impact Testing of Thermoplastic and Thermoset Matrix Composite Materials,” Wright Research and Development Center, Wright-Patterson AFB OH, 1990.
- [133] W. A. de Morais, S. N. Monteiro und J. R. M. d’Almeida, “Effect of the laminate thickness on the composite strength to repeated low energy impacts,” *Composite Structures*, Jg. 70, Nr. 2, S. 223–228, 2005, doi: 10.1016/j.compstruct.2004.08.024.
- [134] C. Atas, B. M. Icten und M. K  c  k, “Thickness effect on repeated impact response of woven fabric composite plates,” *Composites Part B: Engineering*, Jg. 49, S. 80–85, 2013, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.01.019.
- [135] G. Belingardi und R. Vadori, “Influence of the laminate thickness in low velocity impact behavior of composite material plate,” *Composite Structures*, Jg. 61, 1-2, S. 27–38, 2003, doi: 10.1016/s0263-8223(03)00027-8.
- [136] E. Guynn und T. Obrien, “The influence of lay-up and thickness on composite impact damage and compression strength,” in *26th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1985. Doi: 10.2514/6.1985-646
- [137] M. Duan, Z. Yue und Q. Song, “Investigation of damage to thick composite laminates under low-velocity impact and frequency-sweep vibration loading conditions,” *Advances in Mechanical Engineering*, Jg. 12, Nr. 10, 168781402096504, 2020, doi: 10.1177/1687814020965042.
- [138] C. Breen, F. Guild und M. Pavier, “Impact damage to thick carbon fibre reinforced plastic composite laminates,” *Journal of Materials Science*, Jg. 41, Nr. 20, S. 6718–6724, 2006, doi: 10.1007/s10853-006-0208-3.
- [139] F.J. Yang und W.J. Cantwell, “Impact damage initiation in composite materials,” *Composites science and technology*, Jg. 70, Nr. 2, S. 336–342, 2010, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.11.004.
- [140] S. Agrawal, K. K. Singh und P. K. Sarkar, “Impact damage on fibre-reinforced polymer matrix composite \textendash A review,” *Journal of Composite Materials*, Jg. 48, Nr. 3, S. 317–332, 2013, doi: 10.1177/0021998312472217.
- [141] Y. Aoki, H. Samejima, H. Suemasu und Y. Nagao, “Effect of thickness on impact damage and CAI behavior,” in *Proceedings of ICCM-17 17th International Conference on Composite Materials, Edinburgh, UK*, 2009.
- [142] G. A. Schoeppner und S. Abrate, “Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 31, Nr. 9, S. 903–915, 2000, doi: 10.1016/s1359-835x(00)00061-0.
- [143] Y. Aoki, H. Samejima, H. Suemasu und Y. Nagao in *Effect of thickness on impact damage and CAI behavior. ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2009.

- [144] G. Riegert, T. Keilig, R. Aoki, K. Drechsler und G. Busse, "Schädigungscharakterisierung an NCF-Laminaten mittels Lockin-Thermographie und Bestimmung der CAI-Restfestigkeiten," *Eisenbach, CD (Hrsg.)*, Jg. 19, 2005.
- [145] D. Liu, B. Raju und X. Dang, "Size effects on impact response of composite laminates," *International Journal of Impact Engineering*, Jg. 21, Nr. 10, S. 837–854, 1998, doi: 10.1016/s0734-743x(98)00036-0.
- [146] S. Safri, M. Sultan, N. Yidris und F. Mustapha, "Low velocity and high velocity impact test on composite materials - A review," *International Journal of Engineering and Sciences*, Jg. 3, S. 50–60, 2014.
- [147] L. H. Nguyen, S. Ryan, S. J. Cimpoeru, A. P. Mouritz und A. C. Orifici, "The effect of target thickness on the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite," *International Journal of Impact Engineering*, Jg. 75, S. 174–183, 2015. Doi: 10.1016/j.ijimpeng.2014.07.008
- [148] K. Siva Kumar und T. Balakrishna Bhat, "Response of composite laminates on impact of high velocity projectiles," in *Key Engineering Materials*, Bd. 141, 1998, S. 337–348. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.141-143.337
- [149] R. S. Sikarwar, R. Velmurugan und V. Madhu, "Experimental and analytical study of high velocity impact on Kevlar/Epoxy composite plates," *Central European Journal of Engineering*, Jg. 2, Nr. 4, S. 638–649, 2012. Doi: 10.2478/s13531-012-0029-x
- [150] E. P. Gellert, S. J. Cimpoeru und R. L. Woodward, "A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites," *International Journal of Impact Engineering*, Jg. 24, Nr. 5, S. 445–456, 2000. Doi: 10.1016/S0734-743X(99)00175-X
- [151] M. V. Hosur, U. K. Vaidya, C. Ulven und S. Jeelani, "Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading," *Composite Structures*, Jg. 64, 3-4, S. 455–466, 2004. Doi: 10.1016/j.compstruct.2003.09.046
- [152] Diantang Zhang, Ying Sun, Li Chen, Sanliang Zhang und Ning Pan, "Influence of fabric structure and thickness on the ballistic impact behavior of Ultrahigh molecular weight polyethylene composite laminate," *Materials & Design (1980-2015)*, Jg. 54, S. 315–322, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.074.
- [153] B. Wang, S. Zhong, T.-L. Lee, K. S. Fancey und J. Mi, "Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review," *Advances in Mechanical Engineering*, Jg. 12, Nr. 4, 168781402091376, 2020, doi: 10.1177/1687814020913761.
- [154] S. Gholizadeh, "A review of non-destructive testing methods of composite materials," *Procedia Structural Integrity*, Jg. 1, S. 50–57, 2016, doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.008.
- [155] D. M. Amafabia, D. Montalvão, O. David-West und G. Haritos, "A Review of Structural Health Monitoring Techniques as Applied to Composite

- Structure,” *Structural Durability & Health Monitoring*, Nr. 11, S. 91–147, 2017.
- [156] I. Solodov, Y. Bernhardt, L. Littner und M. Kreuzbruck, “Ultrasonic Anisotropy in Composites: Effects and Applications,” *Journal of Composites Science*, Jg. 6, Nr. 3, S. 93–115, 2022, doi: 10.3390/jcs6030093.
- [157] R. Teti und G. Caprino, “NDE of Thick GFRP Composites Through Ultrasonic Waveform Detection,” in *Developments in the Science and Technology of Composite Materials*, A. R. Bunsell, P. Lamicq und A. Massiah, Hg., Springer, 1989, S. 793–800. Doi: 10.1007/978-94-009-1123-9_108
- [158] A. R. Bunsell, P. Lamicq und A. Massiah, Hg. *Developments in the Science and Technology of Composite Materials*. Springer, 1989. Doi: 10.1007/978-94-009-1123-9
- [159] B. Purna Chandra Rao, “Non-destructive Testing and Damage Detection,” in *Aerospace Materials and Material Technologies* (Indian Institute of Metals Series), N. E. Prasad und R. Wanhill, Hg., Springer, 2017, S. 209–228. Doi: 10.1007/978-981-10-2143-5_11
- [160] P. Myrach, C. Maierhofer, M. Rahammer und M. Kreuzbruck, “Parameters in lock-in thermography of CFRP laminates,” *Materials Testing*, Jg. 58, Nr. 1, S. 31–35, 2016, doi: 10.3139/120.110814.
- [161] T. Li, D. P. Almond und D. A. S. Rees, “Crack imaging by scanning laser-line thermography and laser-spot thermography,” *Measurement Science and Technology*, Jg. 22, Nr. 3, S. 35701, 2011, doi: 10.1088/0957-0233/22/3/035701.
- [162] I. Solodov, M. Rahammer und G. Busse, “A local defect resonance for linear and nonlinear ultrasonic thermography,” in *Proceedings of the 2012 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, 2012*, doi: 10.21611/qirt.2012.385.
- [163] N. Rajic, “Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures,” *Composite Structures*, Jg. 58, Nr. 4, S. 521–528, 2002, doi: 10.1016/S0263-8223(02)00161-7.
- [164] V. Vavilov, *Determining Limits of Thermal NDT of Thick Graphite/Epoxy Composites*. 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 2006.
- [165] S. G. Zacharia, A. O. Siddiqui und J. Lahiri, “In situ thermal diffusivity determination of anisotropic composite structures: Transverse diffusivity measurement,” *NDT & e International*, Jg. 48, S. 1–9, 2012, doi: 10.1016/j.ndteint.2012.01.009.
- [166] M. R. Jolly, A. Prabhakar, B. Sturzu, K. Hollstein, R. Singh, S. Thomas, P. Foote und A. Shaw, “Review of non-destructive testing (NDT) techniques and their applicability to thick walled composites,” *Procedia CIRP*, Jg. 38, S. 129–136, 2015. Doi: 10.1016/j.procir.2015.07.043
- [167] T. Worzewski, R. Krankenhagen, M. Doroshtnasir, M. Röllig, C. Maierhofer und H. Steinfurth, “Thermographic inspection of a wind turbine rotor blade segment utilizing natural conditions as excitation source, Part I:

- Solar excitation for detecting deep structures in GFRP,” *Infrared Physics & Technology*, Jg. 76, S. 756–766, 2016, doi: 10.1016/j.infrared.2016.04.011.
- [168] L. Reocreux, Z. Yu, S. Arnould und H. Pron, “Passive thermography for delamination detection in GFRP of Wind Turbine Blade,” in *Proceedings of the 2020 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, 2020, doi: 10.21611/qirt.2020.036.
- [169] P. Burgholzer, G. Mayr, J. Gruber und G. Stockner, “Thermografische Rekonstruktion von internen Wärmequellen mittels virtueller Schallwellen,” *Materials Testing*, Jg. 60, Nr. 6, S. 600–606, 2018, doi: 10.3139/120.111192.
- [170] J. Rittmann und M. Kreuzbruck, “3D-Thermografie mittels künstlicher Intelligenz,” DGZfP Jahrestagung 2022, Kassel, Germany, 2022.
- [171] N. Holtmann, “Auswertung und Anregung eindimensionalen Wärmeflusses in der zerstörungsfreien Bauteilprüfung mittels optisch angeregter Lockin-Thermografie,” Dissertation, Universität Stuttgart, 2015.
- [172] K. Borum, “Evaluation of the Quality of Thick Fibre Composites Using Immersion and Air-Coupled Ultrasonic Techniques,” 9th European Conference on NDT, Berlin, Germany, 2006.
- [173] C. M. Teller und C. M. Fortunko, “NDE Requirements for Thick Marine Composites,” in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson und D. E. Chimenti, Hg., Boston, MA: Springer US, 1991, S. 1599–1606. Doi: 10.1007/978-1-4615-3742-7_60
- [174] C. Scarponi und G. Briotti, “Ultrasonic technique for the evaluation of delaminations on CFRP, GFRP, KFRP composite materials,” *Composites Part B: Engineering*, Jg. 31, Nr. 3, S. 237–243, 2000, doi: 10.1016/S1359-8368(99)00076-1.
- [175] G. F. Hawkins, P. M. Sheaffer und E. C. Johnson, “NDE of Thick Composites in the Aerospace Industry — An Overview,” in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson und D. E. Chimenti, Hg., Boston, MA: Springer US, 1991, S. 1591–1597. Doi: 10.1007/978-1-4615-3742-7_59
- [176] R. A. Roberts, “Porosity Characterization in Fiber-Reinforced Composites by Use of Ultrasonic Backscatter,” in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson und D. E. Chimenti, Hg., Boston, MA: Springer US, 1987, S. 1147–1156. Doi: 10.1007/978-1-4613-1893-4_131
- [177] A. P. Mouritz, C. Townsend und M. Z. Shah Khan, “Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics,” *Composites science and technology*, Jg. 60, Nr. 1, S. 23–32, 2000, doi: 10.1016/S0266-3538(99)00094-9.
- [178] I. Solodov, D. Döring, M. Rheinfurth und G. Busse, “Ultrasonic NDT of in-plane stiffness anisotropy in metals and composites,” 10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow, 2010.
- [179] J. Thalapil, S. Sawant, S. Tallur und S. Banerjee, “Guided wave based localization and severity assessment of in-plane and out-of-plane fiber

- waviness in carbon fiber reinforced composites,” *Composite Structures*, Jg. 297, S. 115932, 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115932.
- [180] C. Li, D. Pain, P. D. Wilcox und B. W. Drinkwater, “Imaging composite material using ultrasonic arrays,” *NDT & e International*, Jg. 53, S. 8–17, 2013, doi: 10.1016/j.ndteint.2012.07.006.
- [181] C. M. Fortunko und D. W. Fitting, “Apropriate Ultrasonic System Components for NDE of Thick Polymer-Composites,” in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson und D. E. Chimenti, Hg., Boston, MA: Springer US, 1991, S. 2105–2112. Doi: 10.1007/978-1-4615-3742-7_126
- [182] D. K. Hsu, “Inspecting Composites with Airborne Ultrasound: Through Thick and Thin,” in *AIP Conference Proceedings*, 31 July-5 August 200, S. 991–998, doi: 10.1063/1.2184633.
- [183] M. Vopálenský, D. Vavřík und I. Kumpová, “Optimization of the X-ray tube voltage with respect to the dynamical resolution in radiography and tomography,” 8th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria, 2018.
- [184] K. T. Tan, N. Watanabe und Y. Iwahori, “X-ray radiography and micro-computed tomography examination of damage characteristics in stitched composites subjected to impact loading,” *Composites Part B: Engineering*, Jg. 42, Nr. 4, S. 874–884, 2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.01.011.
- [185] K. Weight, “An Overview of NDE Methods for Thick Composites and a Proposal for Analysis of Computed Technology Data,” 1994. [Online]. Verfügbar unter: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ada288733>
- [186] J. Kastner, B. Plank, D. Salaberger und J. Sekelja, “Defect and Porosity Determination of Fibre Reinforced Polymers by X-ray Computed Tomography,” 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, 2010.
- [187] M. J. Emerson, K. M. Jespersen, A. B. Dahl, K. Conradsen und L. P. Mikkelsen, “Individual fibre segmentation from 3D X-ray computed tomography for characterising the fibre orientation in unidirectional composite materials,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 97, S. 83–92, 2017, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.12.028.
- [188] S. C. Garcea, Y. Wang und P. J. Withers, “X-ray computed tomography of polymer composites,” *Composites science and technology*, Jg. 156, S. 305–319, 2018, doi: 10.1016/j.compscitech.2017.10.023.
- [189] D. J. Bull, L. Helfen, I. Sinclair, S. M. Spearing und T. Baumbach, “A comparison of multi-scale 3D X-ray tomographic inspection techniques for assessing carbon fibre composite impact damage,” *Composites science and technology*, Jg. 75, S. 55–61, 2013, doi: 10.1016/j.compscitech.2012.12.006.
- [190] M. G. R. Sause und S. Horn, “Quantification of the Uncertainty of Pattern Recognition Approaches Applied to Acoustic Emission Signals,” *J Nondestruct Eval*, Jg. 32, Nr. 3, S. 242–255, 2013, doi: 10.1007/s10921-013-0177-9.

- [191] B. Kelke, "On the influence of source depth and source-to-sensor distance on the acoustic emission signatures of damaging events in cross-ply carbon fibre-reinforced plastics," Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2020.
- [192] J. Tang, S. Souza, C. Mares und T.-H. Gan, "An experimental study of acoustic emission methodology for in service condition monitoring of wind turbine blades," *Renewable Energy*, Jg. 99, S. 170–179, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.06.048.
- [193] Ł. Doliński, M. Krawczuk und A. Żak, "Damage Detection in the Wind Turbine Blade Using Root Mean Square and Experimental Modal Parameters," in *Wahab, M. (eds) Proceedings of the 13th International Conference on Damage Assessment of Structures*, Springer, 2020, S. 728–742. Doi: 10.1007/978-981-13-8331-1_57
- [194] P. Poozesh, K. Aizawa, C. Niezrecki, J. Baqersad, M. Inalpolat und G. Heilmann, "Structural health monitoring of wind turbine blades using acoustic microphone array," *Structural Health Monitoring*, Jg. 16, Nr. 4, S. 471–485, 2017, doi: 10.1177/1475921716676871

Bibliography

DOI 10.3139/O999.02022023
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics
Technology 19 (2023) 2; page 73–117
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Stichworte:

Faserkunststoffverbunde, Größeneffekt, Herstellung, zerstörungsfreie Prüfung

Keywords:

Composites, size effect, manufacturing, non-destructive testing

Autor / author

Tim Luplow (1. Autor)
Institut für Flugzeugbau und Leichtbau
TU Braunschweig
Hermann-Blenk-Str. 35
38106 Braunschweig

E-Mail: s.heimbs@tu-braunschweig.de
Webseite: www.tu-braunschweig.de/ifl
Tel.: +49 (0) 531/391 9901

Herausgeber / Editors**Europa / Europe**

Prof. Dr.-Ing. habil. Bodo Fiedler
Institut für Kunststoffe und Verbundwerkstoffe
Technische Universität Hamburg
Denickestr. 15 (K)
21073 Hamburg
Deutschland
Tel.: +49 (0)40 42878 3038
E-Mail: fiedler@kunststofftech.com

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schiffers
Institut für Produkt Engineering
Universität Duisburg-Essen
Lotharstr. 1, MA 222
47057 Duisburg
Deutschland
Tel.: +49 (0)203 379 2500
E-Mail: schiffers@kunststofftech.com

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Tel.: +1 608 263 9538
E-Mail: osswald@enr.wisc.edu

Verlag / Publisher

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
Jo Lendle, Oliver Rohloff
Geschäftsführer
Kolbergerstraße 22
81679 München
Germany
Tel.: +49 (0)89 99830 0
E-Mail: info@hanser.de

Redaktion / Editorial Office

Dr.-Ing. Eva Bittmann
Janina Mittelhaus, M.Sc.
E-Mail: redaktion@kunststofftech.com

Beirat / Advisory Board

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter
www.kunststofftech.com / www.plasticseng.com