

Eine transparente Deckschicht als visueller Indikator für die Rissentwicklung in CFK

vorgelegt von:
Diplom-Ingenieur
Hans-Peter Ortwein
geb. in Frankfurt am Main

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
an der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Vorsitzender:
Prof. Dr.-Ing. Christian Oliver Paschereit

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Thorbeck
Prof. Dr.-Ing. Volker Trappe

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 20.April.2015

Berlin, 2016

Übersicht

Eine transparente Deckschicht als visueller Indikator für die Rissentwicklung in CFK

Die Arbeit beschäftigt sich mit Matrixrissen in Faserkunststoffverbunden, deren Auswirkungen auf die Festigkeit und Lebensdauer sowie deren zerstörungsfreier Darstellung.

In den meisten langfaserverstärkten Faserkunststoffverbunden treten frühzeitig Zwischenfaserrisse auf. Über ihre Entstehung, ihr Wachstum und ihre Zunahme existiert bereits umfangreiches Wissen. Die Zunahme der Rissdichte über die Lebensdauer nimmt einen typischen Verlauf, der zur Darstellung des Schädigungszustandes mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren genutzt werden kann. Eine bestechend einfache Methode zu dessen Überwachung ist die direkte optische Beobachtung von transparent gefertigten GFK-Proben. An Lebensdaueruntersuchungen unter Nutzung dieses Verfahrens konnte gezeigt werden, dass die Auswertung der Lichttransmission gute Rückschlüsse auf den Schädigungszustand erlaubt. Die Nutzung dieses einfachen Verfahrens ist aber auf die Anwendung an transparenten GFK-Proben im Labor beschränkt.

Im Folgenden wird eine Möglichkeit untersucht, die Vorzüge der direkten Auswertbarkeit und der Einfachheit dieses Verfahrens auf andere intransparente FKV (CFK) zu übertragen. Eine Indikatorschicht aus dünnem Glasfasergewebe kann die Rissbildung im Verlauf der Werkstoffermüdung sichtbar machen.

Die Interaktion zwischen einer solchen Schicht und dem Grundlaminat wird untersucht und es zeigt sich, dass die feine Gewebestruktur der Schicht bei der Darstellung von Rissen im Substrat durch gut reflektierende Metadelaminationen eine wichtige Rolle spielt. Die Schwingversuche zeigen vergleichbare Verläufe der Rückstrahlung, was eine Nutzung als einfaches Lebensdauerüberwachungsverfahren anregt.

Die Ergebnisse legen nahe, den Einsatz einer dünnen Glasfaserschicht als Schädigungsindikator zum praxistauglichen Verfahren weiter zu entwickeln, mit dem kritische Entwicklungen der Zwischenfaserrisse frühzeitig erkannt werden können. Das einfache Messprinzip erlaubt einen großflächigen Einsatz und eine Weiterentwicklung zu automatisierter Messung an schwer zugänglichen Orten und teilweise autonome Auswertung bei geringem Zusatzgewicht.

Abstract

A Transparent Top-Layer as a Visual Indicator for Crack Development in CFRP

This thesis deals with matrix-cracks in fiber reinforced plastics, their effect on strength and life expectancy as well as the nondestructive evaluation of the cracks.

In most long fiber reinforced plastics inter-fiber-cracks occur at an early stage. About their formation, their growth and increase profound knowledge exists. The increase in crack density shows a typical chronological sequence. This can be used to represent the damage state by non-destructive test methods. One elegant and easy method for the monitoring of degradation is to directly evaluate the transparency of glass-fiber-reinforced-plastic-specimen. With Fatigue tests including this method it could be shown, that the evaluation of light transmission allows good conclusions about the damage state. This easy to handle method, however, is limited to transparent laminates in laboratory scale.

Below a strategy is investigated, to transfer the advantages of direct evaluability and straightforwardness of this approach to other non-transparent laminates. An indicator layer of glass fiber fabric can make the crack density evolution in the course of material fatigue visible.

The interaction between such layer and the base laminate is examined and it is found that the fine structure of the fabric layer plays an important role in the representation of cracks in the substrate by well-reflective micro-delaminations. Fatigue tests show comparable sequences of reflectivity. This encourages the use of this principle as a simple, straightforward structural health monitoring method.

The results of the investigation suggest to further develop the use of a thin glass-fiber layer as a utilizable method for the early identification of crucial developments in inter-fiber failure. The uncomplicated principle allows examination of big surfaces and further evolution will allow automatic recording in difficult to access places as well as partly automated evaluation at low extra structural weight.

"There is a crack in every thing - that's how the light gets in"; Anthem, Leonard Cohen

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit im Fachbereich Mechanik der Polymerwerkstoffe der Abteilung Werkstofftechnik der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Viele Menschen haben mich auf verschiedenste Weise bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt, wofür ich mich bedanken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorbeck danke ich für die Übernahme des Hauptberichtes und die Unterstützung bei der Entscheidung den Fokus der Arbeit auf die Idee „Indikator-schicht“ zu legen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Volker Trappe von der BAM Berlin danke ich für die Betreuung und Zusammenarbeit. Besonders dankbar bin ich für die nötigen Freiheiten, die Idee zu dieser Arbeit überhaupt erst erproben und weiterentwickeln zu können.

Danken möchte ich auch Herrn Dr.-Ing. habil. Jürgen Bohse. In den Projekten, in denen wir die Schallemissionsmessung nutzten, durfte ich viel über dieses ZfP-Verfahren lernen, das an dieser Arbeit aber nur noch einen geringen Anteil hat.

Herzlichen Dank an alle meine Kollegen des Fachbereichs „Mechanik der Polymerwerkstoffe“. Nur dank ihrer Unterstützung war es möglich, die vielen Herausforderungen bei Probenfertigung und Versuchen gemeinsam zu meistern. Auch mit dem Arbeitsbereich „Druckgeräte - Druckgefäße; Treibgasspeichersysteme“ bestand eine gute Zusammenarbeit, die durch gemeinsame Forschungsprojekte begründet war und darüber hinaus ging.

Auch den Kollegen der anderen Abteilungen der BAM gilt mein besonderer Dank. Die gegenseitige Hilfe mit Werkzeugen, Methoden und Erfahrung macht viele Dinge erst möglich.

Vorarbeiten, Anregungen und Teilergebnisse stammen aus geförderten Projekten. Einerseits aus dem im Rahmen der BAM-Innovationsoffensive finanzierten Projekt „Degradationsverhalten von Compositen (PMC) für Druckbehälter“, andererseits aus dem im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes 1466 geförderten Projekt „Untersuchung zur Dauerfestigkeitsgrenze in FVK durch zerstörungsfreie Bestimmung mikrostruktureller Versagensprozesse mittels Röntgenrefraktionstopographie unter schwingender Beanspruchung“ geleitet von Professor Trappe. Meine Arbeit an der BAM wurde auch durch das zentrale Doktorandenprogramm der BAM und aus Mitteln der Abteilung Werkstofftechnik finanziert, wofür ich mich insbesondere bei Herrn Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Christian Marotzke (Leiter des Fachbereichs Mechanik der Polymerwerkstoffe) und Herrn Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Pedro Dolabella Portella (Leiter der Abteilung Werkstofftechnik) für wertvolle zusätzliche Monate an der BAM bedanke.

Übersicht	I
Abstract	II
Danksagung	IV
1. Einleitung	1
1.1. Problemkreis	1
1.2. Zielstellung	3
1.3. Struktur dieser Arbeit	4
2. Grundlagen und Stand der Technik	6
2.1. Faserkunststoffverbunde	6
2.1.1. Wirkung der Faserverstärkung	6
2.1.2. Lamine aus Faserkunststoffverbunden	7
2.2. Versagensverhalten von Faserkunststoffverbunden	8
2.2.1. Schädigung in Faserkunststoffverbunden	8
2.2.2. Entwicklung der Schädigung in Laminaten	11
2.3. Festigkeitsberechnung in Laminaten	23
2.3.1. Schichtweise Spannungs- und Dehnungsberechnung	23
2.3.2. Schichtweise Festigkeitsanalyse	25
2.3.3. Lebensdauerberechnung in FKV	26
2.4. Übersicht zu Verfahren zur Messung von Schädigungen in FKV	31
3. Eingesetzte Untersuchungsmethoden	37
3.1. Messverfahren	37
3.1.1. Röntgenrefraktionsmessung	37
3.1.2. Schallemissionsmessung	39
3.1.3. Darstellung der Matrixrisse mit sichtbarem Licht	40
3.2. Konzept der rissanzeigenden Indikatorschicht	44
3.3. Experimente zur Untersuchung des Konzeptes	46
3.3.1. Mechanische Werkstoffuntersuchungen – Versuche	47
3.3.2. Werkstoffe und Eigenschaften	49
3.3.3. Probenherstellung	51
4. Ergebnisse der Untersuchungen	54
4.1. Röntgenrefraktions- und Schallemissionsmessung am Grundlaminat	54
4.1.1. Stufenzugversuche	54
4.1.2. Schwingversuche	55
4.2. Schädigung und Lichttransmission an GFK	60
4.2.1. Reihenfolgeeinfluss der Last auf die Lebensdauer	60
4.2.2. Einfluss der Rissfortschrittrate der Matrix auf die Lebensdauer	63
4.2.3. Transmission von Licht unter Langzeitschwingbelastung	65

4.3.	Optisches Verhalten der Indikatorschicht.....	67
4.3.1.	<i>Zugversuche an der Indikatorschicht</i>	67
4.3.2.	<i>Schwingende Belastung an der Indikatorschicht</i>	76
4.3.3.	<i>Belastete Indikatorschicht unter dem Mikroskop</i>	77
4.4.	Rissdarstellung in der applizierten Indikatorschicht	81
4.4.1.	<i>Lichtmikroskopische Untersuchung der Rissübertragung</i>	81
4.4.2.	<i>Modellierung der Lastübertragung in die Indikatorschicht</i>	91
4.4.3.	<i>Einfluss der Beleuchtung</i>	95
4.5.	Indikatorschicht zur Bestimmung der Schädigung	98
4.5.1.	<i>Verlauf der Remission über die Lebensdauer</i>	99
4.5.2.	<i>Vergleich mit Röntgenrefraktionsmessungen</i>	104
5.	Diskussion und Ausblick	105
5.1.	Diskussion der Ergebnisse.....	105
5.1.1.	<i>Rissbildung in den untersuchten Basis-Laminaten aus CFK</i>	105
5.1.2.	<i>Zwischenfaserrissentwicklung als Zustandsanzeiger</i>	106
5.1.3.	<i>Lichtremission in der Indikatorschicht als Schädigungsvariable</i>	107
5.1.4.	<i>Übertragung zwischen Grundlaminat und Indikatorschicht</i>	109
5.1.5.	<i>Verhalten der Indikatorschicht bei Schwingbelastung</i>	110
5.2.	Einordnung der Ergebnisse.....	113
5.2.1.	<i>Diskussion wesentlicher Vor- und Nachteile des Konzeptes</i>	113
5.2.2.	<i>Konzept für die Anwendung am Bauteil</i>	115
5.3.	Ausblick.....	118
5.4.	Zusammenfassung	120
	Literaturverzeichnis	122
	Abkürzungsverzeichnis.....	141
	Symbolverzeichnis.....	142
	Abbildungsverzeichnis	143
	Tabellenverzeichnis	149
	Anhang	150

1. Einleitung

Faserkunststoffverbunde (FKV) sind wegen ihrer vielen guten - im Folgenden beschriebenen - Eigenschaften bereits weit verbreitet und erobern weitere neue Einsatzfelder. Ob in Sportgeräten, Rotoren von Windkraftanlagen oder Drehflüglern, in Segelflugzeugen bis hin zum Verkehrsflugzeug oder in leichten Druckbehältern, in vielen Bereichen sind sie der ideale Werkstoff. Sie sind sehr flexibel in der geometrischen Gestaltung und in ihren mechanischen Eigenschaften richtungsabhängig einstellbar. Selbst die vergleichsweise schweren Glasfasern bieten ein großes Leichtbaupotential, das von den steifen und festen Kohlenstofffasern noch weit übertroffen wird. Auch die Betriebsfestigkeitseigenschaften sind gut. Im Segelflugzeugbau sind FKV seit über 50 Jahren erfolgreich im Einsatz. Einige der ersten Konstruktionen sind auch seitdem – in reiner FKV-Bauweise in allen Last tragenden Teilen – unter dynamischen Belastungen im Einsatz. Sie haben sich als äußerst robust erwiesen. Auch in Rotoren an Drehflüglern zeigen sie sich hinsichtlich der Lebensdauer den ursprünglichen Metallkonstruktionen überlegen [Bans07]. Die Rotoren von Windkraftanlagen der ersten Generationen überschreiten vielfach gerade die vorgesehene Einsatzdauer von 20 Jahren [Dibt04, Germ09, Germ10] und haben in dieser Zeit unter schwierigen Einsatzbedingungen ein Vielfaches an Lastwechseln durchlaufen, als für die meisten der eingesetzten Werkstoffe in Werkstoffversuchen nachgewiesen worden ist. So ist die Lebensdauerberechnung von FKV noch immer eine Herausforderung. Zu viele Variationen aus verschiedenen Komponenten, zu viele verschiedene interagierende Schadensmechanismen, zu viele Fehlerquellen in der Produktion und zu viele Faserorientierungen wirken zusammen, um mit den Methoden der klassischen Betriebsfestigkeitsvorhersage sichere Aussagen machen zu können. Daraus folgen entweder hohe Sicherheitsfaktoren oder umfangreiche experimentelle Werkstoff- oder Bauteilfestigkeitsnachweise. Eine vielversprechende Ergänzung und Sicherheitsverbesserung ist eine kontinuierliche Lebensdauerüberwachung. Die Entwicklung verschiedener Schadensmechanismen über die Lebensdauer der FKV im Gegensatz zum Einzelrisswachstum in isotropen Werkstoffen bietet dafür tendenziell gute Möglichkeiten.

1.1. *Problemkreis*

FKV fordern vom Entwickler ein besonderes, an den Werkstoff angepasstes Denken, dass der Verbundwerkstoffwissenschaftler TSAI einmal wohl prägnant mit dem Wortspiel „Think composite!“ einforderte. Anders als in isotropen, duktilen Werkstoffen ist nicht ein Einzelriss Ausgangspunkt für das Versagen, sondern eine besondere Schadensakkumulation und/oder ungünstige Anhäufung von Fehlern. Wenn diese Stellen gut zu detektieren sind, so sind FKV sogar leichter zu überwachen, da dem Versagen meist ein langer Zeitraum mit langsamer Anhäufung von Schädigung vorangeht. In der Praxis ist dies dadurch erschwert, dass viele verschiedene komplexe Mechanismen vorkommen, die unterschiedlich gefährlich sind. In vielen sicherheitskritischen Bereichen ist bereits das erste Auftreten von Matrixrissen ein Kriterium zum Austausch des Teils.

Mit zunehmender Verwendung von FKV auch in sicherheitskritischen Bauteilen steigt der Bedarf an günstigen und zuverlässigen Lebensdauervorhersage- und Überwachungskonzepten. Die in den letzten Jahrzehnten erfolgte Einführung von FKV in Strukturbauteilen der kommerziellen Luftfahrt verlangt nach einer parallel dazu verlaufenden Entwicklung von Prüfmethoden (und auch Reparaturmethoden). Es ist hierbei neben der Anpassung bewährter Prüfverfahren auch ein besonderes Interesse an der Integration von Sensorik in das Bauteil oder sogar den Werkstoff selbst vorhanden. Sollten sich die Kosten für die integrierte Sensorik im Rahmen dessen bewegen, was an Zeit- und Materialaufwand für mit anderer Prüftechnik ebenso aussagekräftige Untersuchungen ausgegeben werden muss, so wird die Einführung von integrierter Sensorik auch kommerziell erfolgen. Selbst bei der aktuell verbreiteten „No growth“-Design-Philosophie, bei der Matrixrisse im Betrieb prinzipiell nicht vorkommen sollen, ist die Kontrolle der Bauteile auf Schäden unabdingbar. Gründe für die vermeintlich niedrige Ausnutzung von FKV in der Luftfahrt liegen einerseits an den Reserven, die nötig sind, um auch nach Einschlagereignissen oder großen – in den Zulassungsvorschriften und Lastenheften berücksichtigten – Überlasten tragfähig zu bleiben. Andererseits bietet eine bessere Erkennbarkeit von Schäden und Fehlern die Möglichkeit den Werkstoff besser auszunutzen, indem weniger Reserven für das „Überleben“ bis zur nächsten Inspektion vorgehalten werden müssen.

Auch in der Windkraftbranche werden integrierte Überwachungskonzepte zunehmend interessanter [Gras14]. Hier ist die Überwachung besonders schwierig, da Rotorblätter im Einsatz nur für Industriekletterer erreichbar sind. Kosteneffizientere Fertigung und meist geringe unmittelbare Gefahr von Personenschäden im Falle eines Versagens erlauben größere Streuung in der Fertigungsqualität und etwas weniger strenge Überwachungsvorschriften als in der Luftfahrt. Auch hier ist die Aufgabenstellung die gleiche: Effektiv und zuverlässig an mitunter schwer zugänglichen Stellen die Ermüdung oder akute Schädigung an FKV zu detektieren.

Lange Zeit spielte die Ermüdung durch schwingende Beanspruchung eine eher untergeordnete Rolle bei der Auslegung von Strukturen aus FKV, was Faserkunststoffverbunden zu einem guten Ruf hinsichtlich Betriebsfestigkeit verhalf. Die Gründe dafür sind nicht nur in der relativ großen Streuung der Eigenschaften, der schwierigen Berechenbarkeit und der daraus resultierenden Überdimensionierung zu suchen. Je nach Anwendungsfall sind andere Kriterien als die verbliebene Festigkeit oder die verbliebene Lebensdauer bei Lasten in Hauptbelastungsrichtung ausschlaggebend. In einigen Fällen ist die Integrität der Matrix für die Funktion des Werkstoffs unabdingbar. Beispiele hierfür sind Strukturen, die flüssige oder gasförmige Medien halten müssen. Auch in vielen anderen Auslegungskonzepten wird „kein Risswachstum“ als Auslegungsgrenze genutzt. Ein anderer Grund für die meist geringen zulässigen Dehnungen sind die kritischen Lastfälle, die häufig statischer Natur sind, wie zum Beispiel die teilweise auslegungsbestimmend drastisch verringerte Festigkeit in Druckrichtung nach Einschlägen. Dies und die hohe Steifigkeit von CFK, die zu geringen Dehnungen und damit guter Schwingfestigkeit führt, sind Gründe, die zu der Einschätzung geführt haben, dass Ermüdung für Faserkunststoffverbunde keine bedeutende Rolle spielt. Dennoch waren Mutmaßungen einiger Experten [Harr03a] auf dem Gebiet der Ermüdung der Faserverbundwerkstoffe begründet, dass der Absturz

von Flug AA 587 im November 2001, wenn auch nur teilweise mit der Ermüdung von CFK zusammenhängen könnte. Die heftigen Ruderausschläge, die der Copilot des Airbus A300 nach dem Durchfliegen einer Wirbelschlepe machte, waren aber späteren Untersuchungen zufolge [Nati04] auch regulär außerhalb der Betriebsgrenzen des Luftfahrzeuges.

Grundsätzlich ist jedoch das Verständnis der Schädigungsentwicklung von entscheidender Bedeutung, wenn es darum geht die Möglichkeiten des Werkstoffs weiter auszunutzen. Obwohl bisher oft andere Gründe gegen eine weitere Erhöhung der Betriebslasten bei Faserverbundwerkstoffen sprachen, werden Reserven im Abbau von zu hohen Sicherheitsfaktoren gesehen, die in Defiziten in der Lebensdauervorhersage begründet liegen.

1.2. Zielstellung

Der Aufbau und das Ermüdungsverhalten von FKV machen andere als die für Metalle bewährten Lebensdauerüberwachungskonzepte nötig. Wenn auch bisher Verbundwerkstoffe aus verschiedenen Gründen bei Lasten eingesetzt werden, die eine Ermüdung durch Schwingbelastung unkritisch machen, so werden – bereits aktuell, sicher aber mit fortschreitender Entwicklung von Werkstoffen – Berechnungsmethoden für Lebensdauerfragen auch bei FKV immer wichtiger werden. Hierzu sind insbesondere einfache Prüfverfahren und Überwachungskonzepte sinnvoll. Die rechnerische Lebensdauervorhersage wird aufgrund der Vielfalt an Kombinationsmöglichkeiten immer kompliziert und mit Unsicherheiten behaftet bleiben. Daher sind sie mit geeigneten Prüf- und Monitoringverfahren zu unterstützen. Sowohl diese Parameter, als auch viele weitere beim Aufbau des Werkstoffs, von der molekularen, mikrostrukturellen bis zur Bauteilebene, erschweren die Vorhersage.

In dieser Arbeit wird der Blick auf Matrixrisse und deren Überwachung als Maß für Schädigung gelenkt. Anhand von Literaturwissen und eigenen Ergebnissen soll zunächst die Bedeutung von Matrixrisen in endlosfaserverstärkten Kunststoffverbunden dargestellt werden. Die Nutzbarkeit von Zwischenfaser- und Matrixrisen als Schadensparameter wird diskutiert und es wird aufgezeigt unter welchen Bedingungen diese anwendbar sind. Verschiedene Möglichkeiten diese Schädigung darzustellen und zu quantifizieren werden verglichen und bewertet. Besonderes Augenmerk wird auf die optische Auswertung von Matrixrisen gelegt. Leicht optisch auswertbar sind Risse und Rissdichte in fast transparent gefertigten Laminaten aus Glasfasern und Epoxidharzen. Dies wird einerseits in der grundlegenden Werkstoffforschung genutzt um Rissdichten zu beobachten. Es ist andererseits auch im etwas größeren Stil in der Sportgeräte- und Leichtflugzeugwerkstatt bei der Reparatur von GFK-Strukturen gängig. Dort werden Stellen die „weiß“ sind bzw. „Weißbruch“ zeigen, als beschädigt identifiziert. Dies nutzt man nicht nur im Sportgerätebereich, sondern auch im sicherheitstechnisch gut überwachten Leichtflugzeugbau. Diese Vorgehensweise hat selbstverständlich ihre Grenzen, wo undurchsichtige Lamine vorliegen– etwa aus Kohlenstofffasern oder Aramidfasern. Dort ist die Schadensdetektion bedeutend aufwändiger und unter Umständen auch unzuverlässiger. Die dafür zurzeit zur Verfügung stehenden Verfahren und Laborergebnisse werden vorgestellt und bewertet. Es ist wünschenswert, die Einfachheit der optischen Darstellung von Rissen im Laminat

auch an undurchsichtigen Verbundwerkstoffen nutzen zu können. Als Innovation wird dem Problem der undurchsichtigen Lamine daher mit einer dünnen Indikatorschicht statt einer durchsichtigen tragenden GFK-Struktur begegnet. Die Bewertung der Grenzen und Möglichkeiten dieser Schicht erfolgt anhand von theoretischen Überlegungen und mittels fraktographischer Untersuchungen, sowie dem Vergleich mit anderen Messverfahren. Die Eignung einer solchen Indikatorschicht als einfaches und günstiges Lebensdauerüberwachungsverfahren unter Ausnutzung der Rissdickentwicklung wird an Werkstoffproben untersucht und bewertet.

1.3. Struktur dieser Arbeit

Zielstellung dieser Arbeit ist die Untersuchung der Eigenarten, Grenzen und Möglichkeiten einer vorgeschlagenen Indikatorschicht zur Rissdarstellung und Schädigungszustandsbegutachtung an undurchsichtigen Faserkunststoffverbunden (FKV). Abbildung 1 zeigt die Struktur der Arbeit: Nach der Zusammenstellung relevanter Grundlagen zu FKV – deren typischen Eigenschaften und zur Schädigungsentwicklung und Berechnung – zu Beginn, werden mögliche Messverfahren für Schädigung vorgestellt. Darauf folgend werden die zur Untersuchung eingesetzten Messverfahren genauer erläutert. Basierend auf diesen Grundlagen wird das Konzept der rissanzeigenden Indikatorschicht vorgestellt. Nach der Darstellung der mechanischen Versuchskonzepte sowie der Werkstoffe und deren Herstellung folgen die Ergebnisse der Untersuchungen zu den fünf Hauptfragen.

1. Die Untersuchung der Grundlamine aus CFK mit der Röntgenrefraktionsmessung und der Schallemissionsmessung soll zeigen, dass die Rissentwicklung in diesen erwartungsgemäß als Schädigungsindikator dienen kann.
2. An transparenten GFK-Laminaten soll die prinzipielle Eignung der Eintrübung als Schädigungsmaß belegt werden.
3. Für die Untersuchung der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den Fall einer hinsichtlich Lichtremission statt -transmission ausgewerteten Indikatorschicht auf intransparentem Material wird zunächst die Indikatorschicht für sich untersucht.
4. In der lichtmikroskopischen Auswertung von Schliffen vorgeschädigter Werkstoffproben und der numerischen Modellierung eines Querrisses mit Indikatorschicht werden wesentliche Mechanismen und Einflussgrößen identifiziert. Lokale Delaminationen zwischen Indikatorschicht und Metadelaminationen in der Indikatorschicht werden näher betrachtet.
5. Dass die Lichtremission der Indikatorschicht ebenso wie die Lichttransmissionsauswertung bei transparentem GFK einen typischen Verlauf über die Lebenszeit zyklisch belasteter Proben hat, soll mit Ergebnissen der Schwingversuche von beschichteten CFK-Laminaten gezeigt werden. Die Schädigungsanzeige durch die Indikatorschicht eilt etwas nach. Ob die Indikatorschicht also auch Eigenschaften einer Stellvertreterschicht hat, was durch Anpassung und Kalibrierung berücksichtigt werden muss, ist ebenfalls zu betrachten.

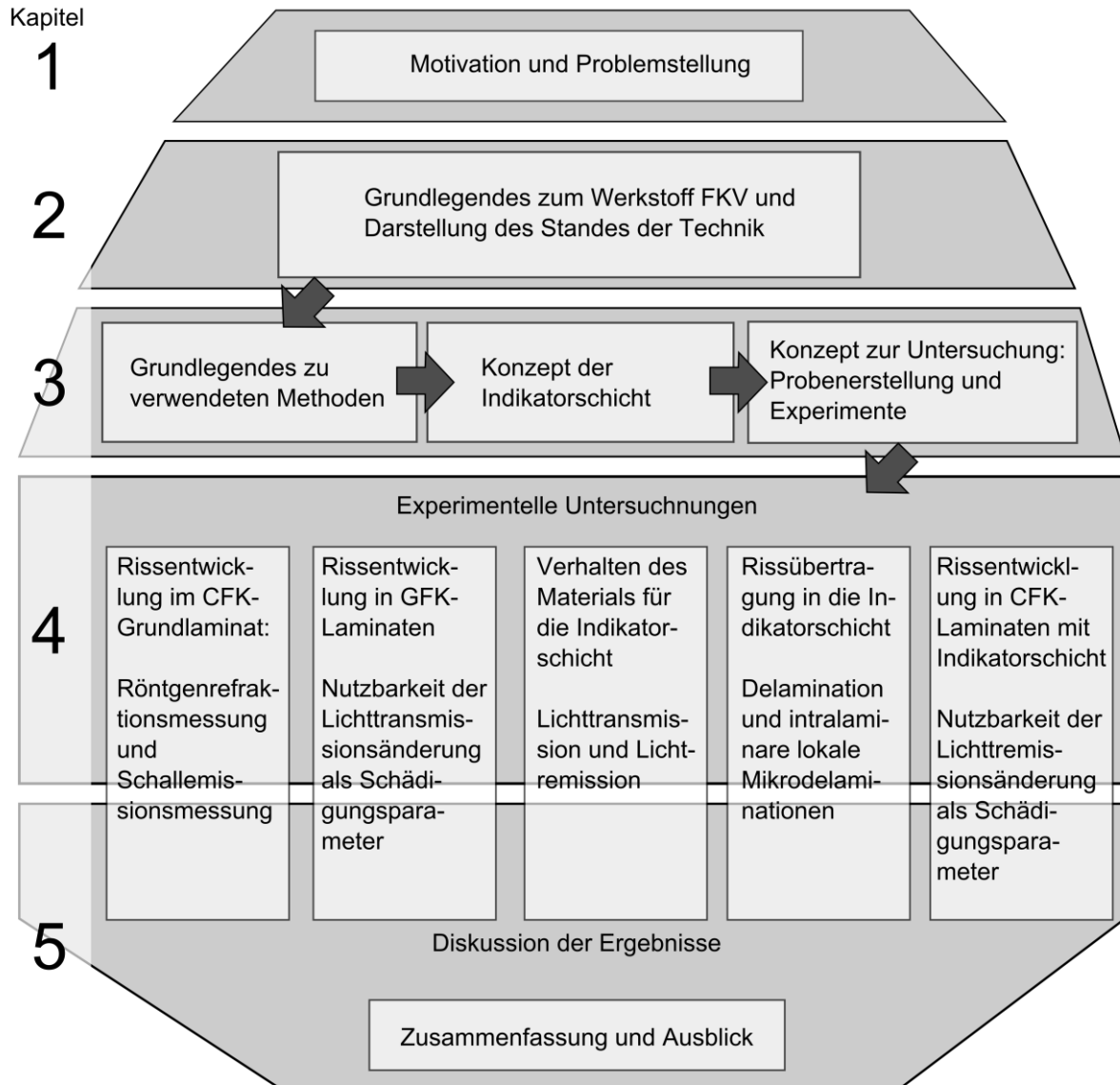


Abbildung 1 Übersicht über die Kapitel der Arbeit

2. Grundlagen und Stand der Technik

Faserverbundwerkstoffe (FVW) weisen gegenüber klassischen, meist metallischen Konstruktionswerkstoffen einige Besonderheiten auf, die für viele Anwendungsfälle besondere Gestaltungs- und Leichtbaumöglichkeiten bereithalten, aber auch besondere Herausforderungen für Konstruktion und Berechnung darstellen. Zur Erklärung des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes zur Überwachung von FVW mittels einer rissanzeigenden Deckschicht werden allgemeine Grundlagen des Werkstoffes zusammengestellt. Auf für das Verhalten dieser Schicht besonders relevante Aspekte des Werkstoffes wird detaillierter eingegangen.

Zur Einordnung als Messverfahren wird eine Auswahl möglicher Methoden vorgestellt, die ebenfalls zur Prüfung und Überwachung von FKV eingesetzt werden

2.1. *Faserkunststoffverbunde*

Inhomogenität und Anisotropie sowohl hinsichtlich der Steifigkeit, als auch der Festigkeit in FVW bringen besondere Möglichkeiten wie auch Herausforderungen mit sich. Grundsätzlich werden unter dem Begriff FVW alle faserverstärkten Werkstoffe zusammengefasst. Die Abgrenzung zu natürlichen FVW ist fließend. Die Idee der Faserverstärkung ist keine originär menschliche Erfindung, sondern – wie in zahlreichen Beispielen aus der Biologie erkennbar – ein natürliches Konstruktionsprinzip. Von faserverstärkter Keramik, Stahlbeton über Verbundwerkstoffe mit metallischer Matrix bis hin zu kurz-, lang-, oder endlosverstärkten Kunststoffen gibt es verschiedene Konzepte. Diese Arbeit beschäftigt sich mit endlosfaserverstärkten Epoxidharzkunststoffen. Endlosfaserverstärkte Faserkunststoffverbunde (FKV) werden bevorzugt als Stab- und/oder Flächentragwerke konzipiert. Die Vorteile der Faserverstärkung können bei Massivbauteilen oft entweder nicht ausreichend ausgenutzt oder nicht zufriedenstellend berechnet und gefertigt werden. Die Nachteile von faserverstärkten Werkstoffen hinsichtlich Druckfestigkeit und Stabilitätsversagen sind ein weiterer Grund dafür. Die Lösungen aus klassischen Leichtbauprinzipien eignen sich besonders um die werkstofflichen Besonderheiten von FVW zu berücksichtigen.

2.1.1. **Wirkung der Faserverstärkung**

Die besonderen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe beruhen auf scheinbar paradoxen Zusammenhängen, die man als die 4 Paradoxe der Materialwissenschaft beschreiben kann [Vank84]:

- Paradox der festen Stoffe [Zwic29]: Die physikalisch-theoretische Festigkeit ist um eine bis drei Größenordnungen geringer als die gemessene.
- Paradox der Faserform[Grif21]: Ein Werkstoff in Faserform hat eine vielfach höhere Festigkeit als dasselbe Material in anderer Form. Je dünner die Faser, umso größer die Festigkeit.
- Paradox der Anspannlänge: Die gemessene Festigkeit einer Faser ist umso größer, je kleiner die freie Anspannlänge ist.

- Paradox der 2-Phasen-Systeme: Im Composite kann die stärkere Komponente (im Allgemeinen die Faser) einen viel höheren Anteil der theoretischen Festigkeit erreichen, als alleine.

Alle 4 Paradoxe haben den Ursprung in den allgegenwärtigen Strukturfehlern fester Stoffe. FKV können dem ersten Paradox mittels der drei weiteren einiges an zusätzlicher Festigkeit „abringen“. Dies geht einher mit einem hohen Grad an Inhomogenität und Anisotropie.

Um die Vorteile aus den 4 Paradoxen in die Praxis zu überführen, werden die Fasern im Falle von FKV in eine Kunststoffmatrix eingebettet. Zunächst ist also zu betrachten, welche Aufgaben die Matrix in einem FKV (vgl.[Schü08]) hat:

- Die Matrix stützt die feinen Fasern vor dem Ausknicken bei Druckbeanspruchung
- Die Matrix stellt die richtige Ausrichtung der Fasern sicher und verhindert schädigende Reibbewegungen zwischen den Fasern.
- Die Matrix schützt die Fasern vor Umwelteinflüssen.
- Die Matrix leitet Kräfte in die Fasern ein und überträgt Kräfte zwischen den Fasern und Laminatschichten.
- Die Matrix nimmt Kräfte auf, die nicht in Faserrichtung gehen.
- Die Matrix stellt Mediendichtigkeit oder andere sekundäre Anforderungen sicher.

Aufgabe der Fasern ist es im Wesentlichen, möglichst hohe Lastanteile in ihrer Längsrichtung zu übernehmen. Gerade bei der Konstruktion und Berechnung, wo viel Aufmerksamkeit auf die Lasteinleitung in Faserrichtung gelenkt wird, treten die Aufgaben der Matrix leicht temporär in den Hintergrund. Dabei funktioniert ein FKV auch bei rein faserparalleler Belastung nur wegen des Zusammenspiels von Faser und Matrix. Diese speziellen Funktionen von Faser und Matrix sind insbesondere für die Diskussion der verschiedenen Schädigungsarten relevant.

2.1.2. Laminate aus Faserkunststoffverbunden

Der Anisotropie bei faserverstärkten Werkstoffen wird häufig mit einem geschichteten Aufbau begegnet. Es werden in einem Laminat verschiedene Faserorientierungen, aber auch Werkstoffe, variiert, um jedem Lastfall mit Faserverstärkung in der richtigen Orientierung begegnen zu können. Vorteile dieses bewährten Vorgehens sind:

- Rissstoppwirkung der verschiedenen Lagen.
- Die Fasermenge ist in jeder Richtung an die Belastung anpassbar.
- Eine einfache lokale Verstärkung durch zusätzliche Lagen.
- Verschiedene Fasern für verschiedene Aufgaben, z.B. steife Fasern für Betriebsbelastung und dehnfähige Fasern für Crashlasten.
- Biegesteifigkeit und Zugsteifigkeit sind individuell anpassbar – insbesondere bei Sandwichlaminaten.

Es ergeben sich allerdings auch Nachteile. Schon in der Dimension der Faserdurchmesser ist der Werkstoffverbund inhomogen. Die nächste Ebene der Inhomogenität

resultiert aus der Kombination verschieden steifer und fester Schichten mit unterschiedlichen Querkontraktionsverhalten. Nachteilig sind:

- Geringe Belastbarkeit in der Kunststoffmatrix und damit in Dickenrichtung der Lamine.
- Unterschiedliche Steifigkeiten und Querkontraktionen und damit interlaminare Spannungen insbesondere an den Rändern des Laminates.
- Möglichkeit der Delamination der Schichten, oft beginnend an Rissen der Nachbarschichten oder an freien Rändern.
- Geringere Robustheit bezüglich Belastungen aus unerwarteten Richtungen, z.B. Querkzug- oder Schubbelastung auf unidirektionale Schalen.

Insgesamt überwiegen aber die Vorteile. Ein Bruch kann sich bei vielen Laminaten kaum schlagartig durch den gesamten Verbundwerkstoff fortpflanzen (Rissstoppwirkung) und kündigt sich vorher in verschiedenen Schädigungsmechanismen an, die in frühen Stadien vor allem die Matrix betreffen. Dies ist als Herausforderung und Chance zu verstehen, da so zwar einerseits etablierte moderne Lebensdauerüberwachungskonzepte nicht mehr ohne weiteres zur Verfügung stehen. Als Beispiel seien solche unter Nutzung der Bruchmechanik des Einzerrisses genannt. Andererseits sind aber das Verständnis und die Beobachtung der verschiedenen Schadensmechanismen zur Bestimmung der Schädigung nutzbar. Auch unter diesem Aspekt ist eine angepasste Herangehensweise unter Nutzung von neu zu bewertenden ZfP-Verfahren angebracht. Wie sich bei detaillierterer Betrachtung der Schädigungsmechanismen von FKV zeigt, sind insbesondere Matrix-dominierte Mechanismen meist gut beobachtbar und zur Werkstoffüberwachung geeignet.

2.2. Versagensverhalten von Faserkunststoffverbunden

Um das Versagensverhalten von FKV und die Auswirkungen auf die Konstruktion einzuordnen, ist ein Vergleich mit dem klassischen Konstruktionswerkstoff der letzten Jahrhunderte nützlich: Metall. Vor diesem Hintergrund sollen die wichtigsten Schädigungsarten betrachtet werden. Dies sowohl im statischen Fall, als auch im Verlauf des Bauteillebens unter wechselnden Beanspruchungen.

2.2.1. Schädigung in Faserkunststoffverbunden

Die Schädigungsmechanismen in Verbundwerkstoffen unterscheiden sich deutlich (siehe Abbildung 2) von denen der Metalle. Bei (typischen, makroskopisch isotropen und homogenen) Metallen weiß man, dass Inhomogenitäten und mikrostrukturelle Anrissvorgänge auf der Größenebene der Kristallgitter und Korngrenzen zu Mikrodefekten führen. Diese wachsen unter Belastung gemeinsam mit bereits vorhandenen Defekten auf der Mesoebene stabil weiter. Effektiv technisch beobachtbar wird die Schädigung mit dem technischen Anriss. Das stabile Wachstum des Risses kann dann mathematisch beschrieben und in vielen Fällen zuverlässig vorhergesagt werden. Somit lässt sich durch das Aufspüren und Beobachten des Rissfortschrittes aller technischen Anrisse die Lebensdauer eines solchen Werkstoffes vielfach sehr gut vorhersagen.

Das Versagen von Verbundwerkstoffen ist auch mit einer langen Phase des Risswachstums verbunden. Allerdings kann ein Verbundwerkstoff mitunter eine beachtliche verteilte Rissdichte auf Mikro-, Meso- und Makroebene akkumulieren, bevor ein Einzelriss dominant wird. Beim Verbundwerkstoff ist also die Interaktion vieler Risse auf verschiedenen Ebenen noch augenscheinlicher. Es gibt dabei außerdem eine abhängig von Laminataufbau, Umwelteinflüssen, Komponenten und Belastungsart weit größere Anzahl möglicher lokaler Versagensmechanismen als in Metallen. Dies steht im Gegensatz zu isotropen Werkstoffen, wo die Spannungen mittels Festigkeitshypothesen auf Hauptspannungen zurückführbar sind. Anisotropie und Inhomogenität auf Faser- und Laminebene dominieren das Schädigungsverhalten von FKV.

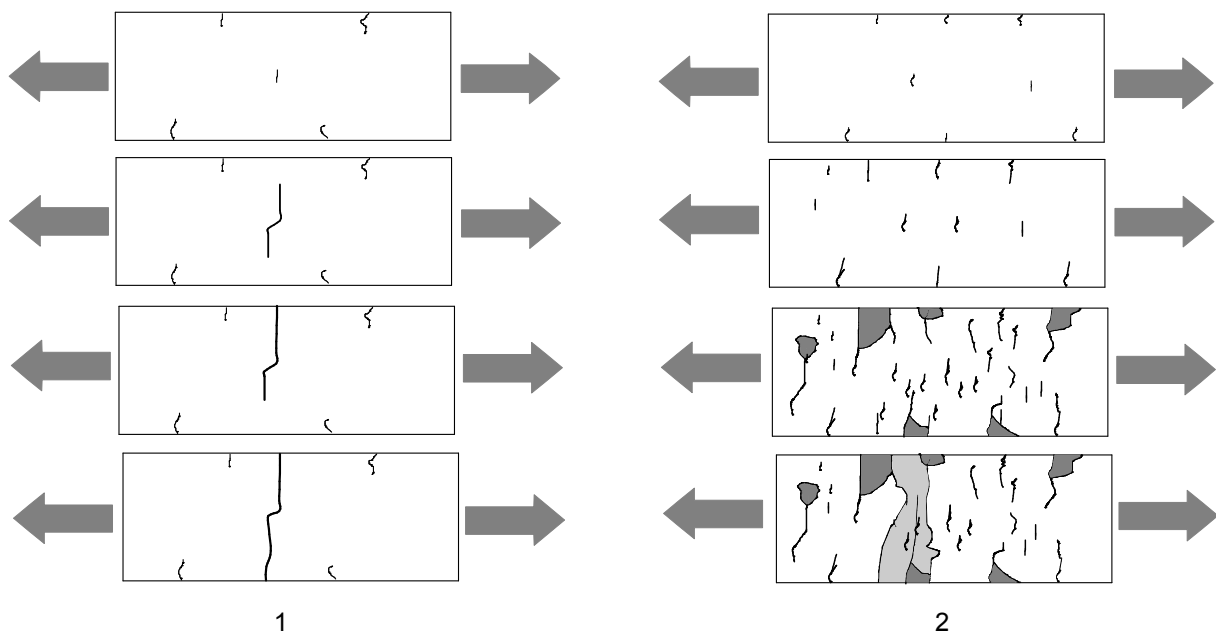


Abbildung 2 Einzelriss in Metallen (1) und Rissakkumulation in FKV (2) nach [EhPo07]

Betriebsfestigkeit von FKV

Wie bereits erwähnt, genießen FKV einen guten Ruf bezüglich ihrer Betriebsfestigkeitseigenschaften. Um die Besonderheiten, Herausforderungen und Möglichkeiten von FKV hinsichtlich ihrer Ermüdung herauszustellen, werden sie mit den klassischen metallischen Konstruktionswerkstoffen verglichen. Bekannte Unterschiede sind:

- Eine früher technisch beobachtbare Schädigungsentwicklung bei FKV [MaSR92, Schu92, VaDe01] gegenüber einer lange schwer messbaren Schädigung bei Metallen.
- Mikroschädigungsbeginn als Querrisse und faserparallele Risse in den entsprechend orientierten Schichten bei FKV im Vergleich zu Mikroschädigung auf Kristall- und Korngrenzenebene durch Plastizität und daraus resultierenden Anrissen in typischen Metallen [Bath06].
- Oft deutlicher Steifigkeitsverlust über die Lebensdauer in Verbundwerkstoffen verglichen mit oft verschwindend geringer Steifigkeitsänderung in Metallen.

- Verschiedene über die Lebensdauer interagierende Mechanismen (siehe Abbildung 3) in Kompositmaterial gegenüber Einzelrisswachstum als beobachtbarer Schädigung im klassischen isotropen Werkstoff.

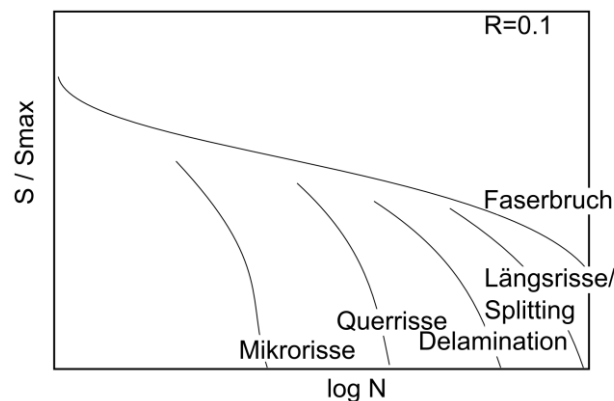


Abbildung 3 Verschiedene überlagerte Mechanismen schematisch eingezeichnet in Wöhlerdiagramm [nach ChHa93]

- Faserverbundwerkstoffe sind inhomogen per Definition mit zusätzlichen Eigenschaftsschwankungen trotz guter Qualitätssicherung. Dem gegenüber steht eine jahrhundertelange Erfahrung in der Herstellung möglichst homogener Eigenschaften beispielsweise für Stähle. Inhomogenität kann in beiden Fällen die Lebensdauer beeinflussen.
- Es wird vielfach über einen lebensdauerverringern den Reihenfolgeeinfluss bei FKV berichtet [Bam08, Bath06, Epaa06, GaSj02, PIMD10, VaDe02]. Bei vielen Metallen dagegen kann man einen günstigen Einfluss von Überlast für Autofrettage nutzen. Dieser Effekt sorgt dafür, dass eine Lebensdauerberechnung nach linearer Schadensakkumulation für viele plastische Konstruktionswerkstoffe meist konservativ ist [Mine45, Palm24], was für FKV nicht der Fall sein muss.
- Während eine größere Empfindlichkeit gegenüber Schub- und Druckbelastung bei FKV zu beachten ist, hat man gleichbleibend gute Eigenschaften bei Schub- und Druckbelastung in isotropem Material [Bath06, Harr03a, MaSR92, Schu92].
- Druckanteile in der Schwingbelastung bei FKV wirken besonders schädigend. In metallischen Werkstoffen kann dagegen eine größere Lebensdauer bei geringen Zuganteilen erreicht werden – erklärbar durch geringere Rissbildung und -öffnung [Bath06, Schu92].
- Trotz zunächst guter Crash- und Impacteigenschaften findet man bei FKV langfristig eine größere Empfindlichkeit hinsichtlich der Lebensdauer nach Einschlagschäden, wohingegen bei verbeulten Metallkonstruktionen meist noch gute Festigkeitsreserven zu erwarten sind. Diese Beulen sind weiterhin leicht zu erkennen und zu begutachten, was bei FKV bei kleineren Einschlagschäden oft nicht der Fall ist.
- Von BATHIAS [Bath06] wird auch angeführt, dass in Metallen bei größerer Festigkeit, im allgemeinen keine größere Betriebsfestigkeit zu erwarten sei. Bei FKV sei dies aber der Fall. Gemeint ist dabei aber wohl die steifigkeitsbe-

dingt geringere Dehnung bei Verwendung von CFK statt GFK, die geringere Schädigung bewirkt. Dass eine höhere statische Festigkeit auch bei FKV nicht zwingend mit besserer Betriebsfestigkeit einhergeht, zeigen unter anderem die Daten von TRAPPE und HARBICH [TrHa06].

Einfluss der Fertigung auf die Streuung der Betriebsfestigkeitseigenschaften

Eine Besonderheit, die insbesondere auf die Streuung der Eigenschaften großen Einfluss hat, ist die Tatsache, dass der fertige Verbundwerkstoff erst beim Anwender während der Bauteilerstellung entsteht. Die Eigenschaften streuen dabei sowohl räumlich im jeweiligen Produkt, als auch zwischen verschiedenen Einzelexemplaren. Viele Parameter wie Temperaturen, Luftfeuchtigkeit und stets korrekte Faserorientierung müssen während der Fertigung optimiert und konstant gehalten werden. Dies stellt hohe Anforderungen an das Qualitätsmanagement. Selbst kleine Nachbesserungen im Produktionsablauf können gravierende Folgen haben (Lufttuchtigkeitsanweisungen, LTAs oder Airworthiness Directives ADs in der Luftfahrt, Rückrufaktionen im Automotivebereich). Um die Qualität der Endprodukte zu sichern, gibt es verschiedene Ansätze in der Industrie. Die Möglichkeit, durch Spezialisierung und große Chargen bestimmte Prozesse zu optimieren, wird beispielsweise in der Prepregtechnologie genutzt. Der qualitätsbestimmende Tränkvorgang wird in der kontrollierten Fertigungsumgebung spezialisierter Betriebe durchgeführt, die vorgetränkten Halbzeuge erst später in der Endfertigung zusammengestellt und ausgehärtet. Umfangreiche Vorversuche und lückenlose Überwachung der Produktionsschritte sind bei allen Produktionsverfahren unabdingbar. Beispielsweise ist ein Wegfließen von Fasern, wie es der Druck des einfließenden Harzes auf das noch ungetränkte Faserhalbzeug im Vakuuminjektionsverfahren verursachen kann, schon bei geringen Änderungen des Prozesses möglich. Das Herausquetschen des Harzes aus den inneren Lagen beim Nasswickeln von rotationssymmetrischen Objekten ist ein weiteres Beispiel für zu beachtende Herausforderungen bei der Produktion. Effektive zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) sind also nicht erst zur Beobachtung der Bauteilschädigung während des Betriebs, sondern auch schon aus Qualitätssicherungsaspekten nötig. Eine größere Streuung der Eigenschaften betrifft auch die Betriebsfestigkeit. Dem kann mit optimalen Qualitätssicherungsverfahren oder mit großen Sicherheitsfaktoren begegnet werden. Dennoch werden manche Schwachstellen im Werkstoff nicht erkannt oder nicht von dafür vorgesehenen Sicherheitsmargen abgedeckt. Eine Bauteilüberwachung kann dann Schlimmeres verhindern. Ist die Bauteilüberwachung ausreichend zuverlässig, so ist denkbar sich stärker auf diese zu verlassen, um bei besserer Werkstoffausnutzung und verringerten Sicherheitsmargen trotzdem hohe Ausfallsicherheit zu erreichen.

2.2.2. Entwicklung der Schädigung in Laminaten

Es existieren in FKV-Laminaten mehrere wichtige Schädigungsarten, die unter verschiedenen Belastungen und bei verschiedenen Schädigungsgraden auftreten. Diese kann man in interlaminare und intralaminare unterteilen. Interlaminare Schädigung tritt zwischen zwei Schichten auf. Interlaminare Schädigung beinhaltet verschiedene

Arten und Ausprägungen der Schichtdelamination. Intralaminare Schädigung – also innerhalb einer Schicht des Laminats – lässt sich in Faserbruch und diverse Zwischenfaserbrucharten unterscheiden (siehe Abbildung 4). Dort sind von links nach rechts faserparalleler Zug ($\sigma_{\parallel}^{(+)}$) und Druck ($\sigma_{\parallel}^{(-)}$), fasersenkrechter Zug ($\sigma_{\perp}^{(+)}$) und Druck ($\sigma_{\perp}^{(-)}$), sowie fasersenkrechte $\tau_{\perp\perp}$ und faserparallele $\tau_{\parallel\perp}$ Schubbelastung dargestellt.

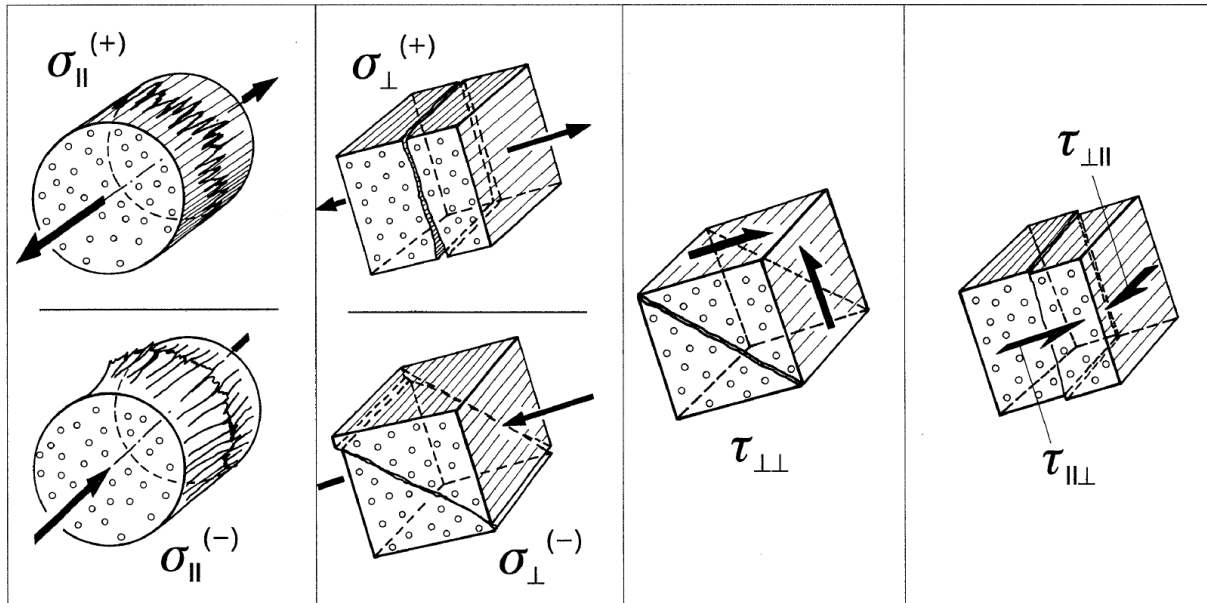


Abbildung 4 Beanspruchungen und Schädigungen in der Einzelschicht [Puck96]

Die Charakteristika und Randbedingungen der verschiedenen Schädigungsarten lassen sich am besten an Laminaten aus UD-Schichten studieren.

Als Beispiel sind Cross-Ply-Laminat geeignet, da diese einen nahezu in jedem Verbund vorkommenden Fall repräsentieren. Schädigungsarten hier sind Querrisse, Delaminationen, Spaltung längs der Fasern und der Belastungsrichtung, Mikrorisse, Faserrisse, Querrisse, Splitting und Delamination. Man kann bei Laminaten mit Längs- und Querlagen (Cross-Ply-Laminaten) mit zunehmender Zugdehnung mit einem typischen Verhalten rechnen, das ähnlich überall in der Fachliteratur beschrieben wird [Harr03a, Puck92, Reif91, Schü08, Schu92, Talr94].

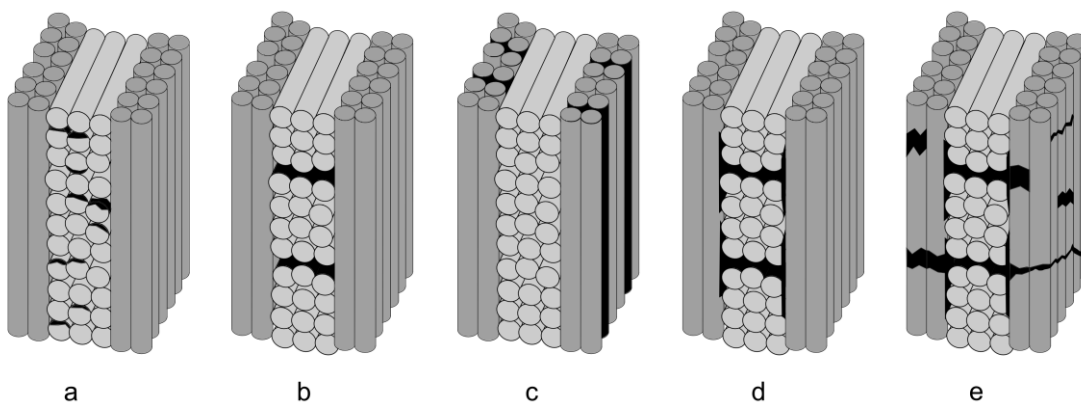


Abbildung 5 Schädigungsarten in Kreuzlaminate: a) Mikrorisse, b) Querrisse, c) Splitting, d) Delamination, e) massiver Faserbruch

Zunächst werden Eigenspannungen und Spannungsüberhöhungen aus Inhomogenitäten ausgeglichen. Dabei reißen bereits einzelne Fasern und einzelne kleine Faser-Matrix-Ablösungen sowie Matrixrisse (Abbildung 5 a) treten auf. Diese Mikrorisse können nur mit besonders fein auflösenden Prüfverfahren dargestellt werden. Dass diese Phänomene tatsächlich deutlich vor der klassischen Zwischenfaserbruchgrenze auftreten, zeigen Trappe und Harbich [TrHa06] mit der Röntgenrefraktionstechnik an Rohr- und Flachproben aus CFK und GFK.

Bei größer werdender Belastung treten im Bereich der Querkzugbelastbarkeit der Querschichten größere Zwischenfaserbrüche (Abbildung 5 b) auf, die diese auch komplett durchlaufen und trennen. Dies ist die Grenzspannung bzw. -dehnung die in der schichtweisen Festigkeitsanalyse als Zwischenfaserbruchgrenze definiert wird. Eine Berechnung dieser Grenze aus den Querkzugfestigkeiten gelingt im Allgemeinen recht zuverlässig. Im Zugversuch ist das Versagen der Querschicht durch einen leichten Abfall der Steifigkeit erkennbar – das „PUCKsche Knie“ [Puck67]. Mit Hilfe von zerstörungsfreien Prüfverfahren ist dies leichter nachzuweisen [Bohs04, OrBT11, SHKS09, TrHS08]

Unter Umständen treten auch in Längsschichten Risse längs zur Faser (Abbildung 5 c) auf. Dieses „splitting“ wird von den Querkontraktionsunterschieden der Schichten initiiert. Bei CFK kann die Dehnungsdifferenz von Quer- zu Längsschicht bis zu 25% der Längsdehnung des gesamten Laminates unter Zuglast betragen.

Bei Betriebsbelastung, aber auch schon im Zugversuch, können aus den Querrissen lokale Delaminationen an der interlaminaren Schichtgrenze entstehen. Delaminationen (Abbildung 5 d) entstehen auch an den freien Rändern der Proben, wo die physikalische Randbedingung „keine Spannungen am freien Rand“ und die unterschiedliche Querkontraktion zu Spannungen führen.

Die Spannungsspitzen durch Querrisse an der interlaminaren Schichtgrenze können bei guter Anbindung außerdem zu Faserrissen (Abbildung 5 e) in den angrenzenden Längsschichten [Reif91] führen. Dies lässt sich nicht nur unter dem Mikroskop nachweisen: Bei einer Nutzung von Kohlenstofffasern als Dehnungssensoren [MüHR13] wurde die Entstehung von einzelnen Faserrissen auch als Fehlerquelle für die Dehnungsmessung identifiziert. Dies ist nur ein Beispiel für den Nachweis frühzeitiger Faserbrüche. Andere Nachweise können mit Schallemissionsmessungen und – bei entsprechender Präparation – auch mikroskopisch erfolgen. Wird die Restfestigkeit der Längsschichten überschritten, so versagt das ganze Laminat durch Faserbruch (Abbildung 5 e unten)

Im Falle eines zugbelasteten Kreuzlaminates erscheinen – angesichts der bis kurz vor dem Versagen kaum betroffenen Restfestigkeit – die Querrisse auf den ersten Blick als nicht sonderlich bedeutungsvoll für die Degradation der Zugeigenschaften. Die Schubfestigkeit (bedeutsam bei nicht idealer Zugbelastung) und die Druckfestigkeit werden aber stark vermindert. Außerdem sind die Querrisse Ausgangspunkt für Delaminationen und Faserbrüche in den Längsschichten. Deshalb wird in vielen Fällen auch ein gewisser Grad an Matrixschädigung oder sogar deren erstes Auftreten schon als Kriterium für Werkstoffversagen gewählt. Die Beobachtung dieser Schädigung ist also für die Lebensdauerabschätzung nützlich und sinnvoll (siehe auch: [Trap02, TrHa06]). Im schubbelasteten $\pm 45^\circ$ -orientierten Kreuzlaminat ist insbeson-

dere der Abfall der Druckfestigkeit in der druckbelasteten Schicht (Zuglast auf die +45°-Schicht, Drucklast in der -45°-Schicht) restfestigkeitsmindernd.

Arten der Schädigung in Laminaten und ihre Wirkung

Bei der Auslegung von FKV wird sinnvollerweise immer darauf geachtet, die Lasten in Faserrichtung einzuleiten. Die Matrix dient also idealerweise nicht zur direkten Kraftübertragung. In einem Laminat erfahren aber alle Schichten die gleichen Dehnungen, so dass auch im Regelfall Schub-, Querkzug- und Querdrukbelastungen in der Einzelschicht auftreten.

Mikrorissbildung

Schon beim Abkühlen von der Aushärtetemperatur und beim Entformen können **Mikrorisse** entstehen. Lokale Enthftung der Faser-Matrix-Grenzfläche und kleine Matrixrisse bauen die entstandenen Eigenspannungen teilweise ab. Diese Mikrorisse (Abbildung 6) und die verbliebenen Eigenspannungen bestimmen den Verlauf der später entstehenden Risse mit, die den energetisch günstigsten Weg nehmen. Die Untersuchung und Beschreibung der Mikromechanik erfordert besondere miniaturisierte Messtechnik und Präparationstechniken. Die Ermittlung von Materialkennwerten der Grenzflächen für kontinuumsmechanische Beschreibungen der Mikromechanik gestaltet sich schwierig, da diese von den makroskopisch messbaren abweichen und mikroskopisch schwer zu messen sind [HaKS94, HLKS99, KaLH97, MuCK04].

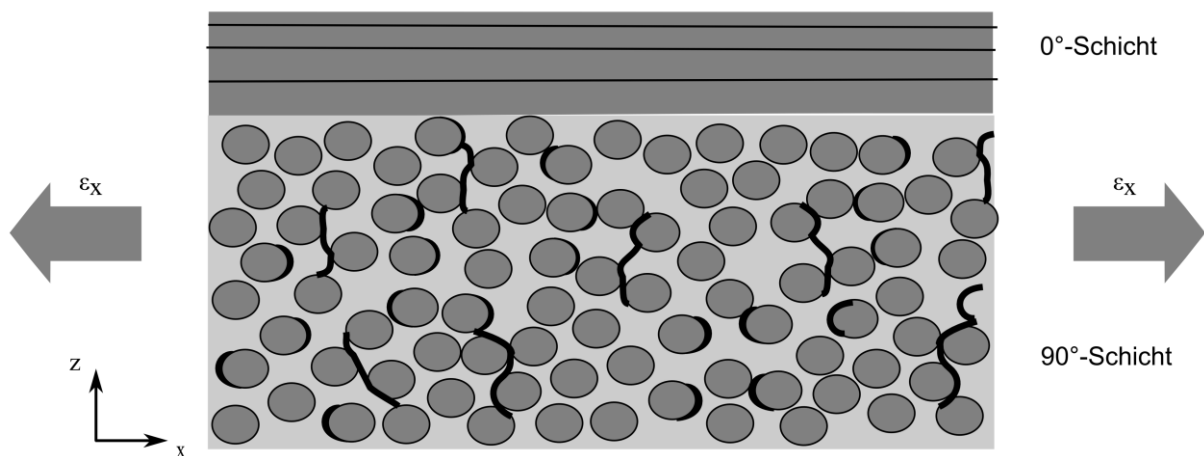


Abbildung 6 Mikrorisse in Querschicht

Querrisse – Entstehung und Wirkung

Die Kombination von rechtwinklig zueinander angeordneten Schichten im Laminat tritt in der Konstruktionspraxis häufig auf. Diese Laminare werden dann jeweils in einer der Faserrichtungen belastet. **Querkzugrisse** sind daher oft ein erster beobachtbarer Schadensmechanismus. Sie entstehen an Mikrorissen und Zonen erhöhter Matrixspannung und wachsen zügig durch die Schichten hindurch, bis sie auf Hindernisse – wie etwa Längsschichten – treffen. Unterscheiden sich die Faserrichtungen der benachbarten Schichten nur wenig, so überwinden die Querrisse auch leicht Schichtgrenzen.

Die Ausbildung von Querrissen ist von der Dicke der Querschicht abhängig. Mit zunehmender Schichtdicke sinkt die Dehnung bei der Querrissbildung einsetzt [PaB-a78]. Der typische Rissabstand ist ebenfalls von der Schichtdicke abhängig. Die Querrissdichte innenliegender Lagen unterscheidet sich von der außenliegender [Harr03a, S.5, NaHu92, NaHu94, Reif80, SmBG98].

Anhand der Querzugrisse wird deutlich, warum – neben der für andere Belastungen wichtigen Schubsteifigkeit – eine hohe Zähigkeit der Matrix und hohe Bruchdehnung gefordert wird. Der Effekt der Dehnungsüberhöhung erklärt die geringe Querbruchdehnung von FKV. Während ein typisches Epoxidharz Bruchdehnungen von 5% und mehr erreichen kann, liegen die Querbruchfestigkeiten von GFK und CFK mehrheitlich unter 0,5%. Dies erklärt sich grundsätzlich mit den enormen Steifigkeitsunterschieden zwischen Matrix und Faser.

Eine einfache Näherung der Dehnungsverhältnisse ergibt sich nach dem PUCK-schen Scheibchenmodell (Abbildung 7 links). Man führt hierzu gedanklich einen Schnitt durch eine idealisierte querzugbelastete Einzelschicht, der ein dünnes Scheibchen heraustrennt das Matrix- und Faseranteile enthält. Das Kräftegleichgewicht ergibt gleiche Spannungen in allen Teilsegmenten. Aus den Steifigkeitsverhältnissen und Längenverhältnissen (entsprechend des Faseranteils des Schnittes) erhält man die Dehnungen. Die Dehnungsverteilung in der Matrix ergibt unmittelbar die Spannungsverteilung. In Abbildung 7 rechts sind die Spannungsverteilungen in einem spannungsoptischen Querschnittsmodell dargestellt. Die charakteristischsten Unterschiede zwischen CFK und GFK ergeben sich aus der Anisotropie der Kohlenstofffasern, die quer zur Faser eine geringere Steifigkeit als Glasfasern aufweisen. Querrisse treten in GFK also bei geringeren Dehnungen auf als in CFK (und auch AFK) [Schü08, S.203], was beim Vergleich der Querzugeigenschaften zu beachten ist. Entstehung und Verlauf von Querrissen werden hiervon entscheidend beeinflusst.

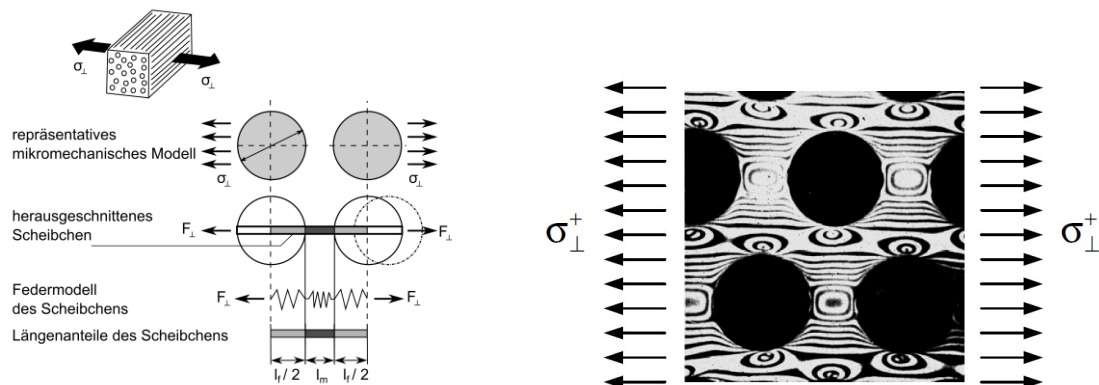


Abbildung 7 Scheibchenmodell für die Dehnungsüberhöhung [Schü08, S.380] (li.) und spannungsoptisch dargestellte Dehnungsüberhöhung [Puck67] (re.)

Der Querrissbeginn in Cross-Ply-Laminaten kann im Laborversuch unter anderem anhand eines leichten Steifigkeitsabfalls identifiziert werden. Weitere Möglichkeiten werden im Kapitel 2.4 besprochen. Im Einsatz am Bauteil sind durch den Zwischenfaserbruch mehrere Aufgaben der Matrix nicht mehr vollständig gewährleistet. Zwar verhindert die Matrix immer noch Reibbewegungen zwischen den einzelnen Fasern, die Reibung zwischen den neuen Grenzflächen ist aber meist – außer zur Energie-

aufnahme im Crashfall – ebenfalls unerwünscht. Der Schutz vor Umwelteinflüssen ist vermindert. Risse sind vergrößerte Angriffsfläche für physikalische, chemische und biologische Alterungsmechanismen. Mediendichtigkeit ist bei Querrissbildung nicht mehr gewährleistet. Die Anstrengungen Hochdruck-Composite-Druckbehälter ohne „Liner“ zu bauen, dokumentieren dies. Bei besonders hoch belasteten Druckbehältern wird zurzeit noch mit hochfesten aber – trotz großer Fortschritte zwangsläufig – wenig zähen Matrixwerkstoffen gearbeitet. Deshalb, und aufgrund der hohen Diffusionsfähigkeit von Erdgas und insbesondere Wasserstoff, kann auf eine Innenschicht, einen „Liner“ nicht verzichtet werden. Bereits der Prüfdruck der Qualitätskontrolle führt zu einer gewissen Rissdichte in der Matrix, die sich in ersten Undichtigkeiten zeigen könnte. In der hydraulischen Prüfung von Testbehältern ohne Liner treten dann frühzeitig tränenartig Tropfen des Prüfmediums aus, das sogenannte „weeping“.

Auch die Aufgabe der Matrix, Kräfte zwischen den Fasern und Laminatschichten zu übertragen, wird mit zunehmender Zwischenfaserrissdichte stark vermindert. Die Spannungen an der Risssspitze sind wiederum Ausgangspunkt für weitere Schädigung. Reifsnider (vgl. Abbildung 8) und andere [Jami85] konnten zeigen, dass Querrisse in der benachbarten Schicht Faserrisse initiieren. Faserrisse sind schwer zu beobachten, so liegen dafür nur Ergebnisse aus schwingender Belastung vor. Wahrscheinlich ist aber, dass eine Kombination von in der Nähe befindlichen Querrissen, Faserondulation, schlechter Faserverteilung oder -festigkeit auch beim quasistatischen Bruch das Restbruchverhalten bestimmt.

Eine Erklärung kann man durch die Betrachtung des Spannungszustandes in der Nähe von Querrissen in Abbildung 8 finden. Die kombinierte Zug- und Schubspannung an der Risssspitze kann zwei Arten weiterer Schädigung begünstigen. Die unter Zugspannung stehenden Fasern der benachbarten Längsschicht werden mit zusätzlicher Last aus der Schubspannung an der Risssspitze belastet. Die Längsschicht übernimmt dort den Anteil der lokal durchtrennten Querschicht. Außerdem werden die Fasern durch die Zugspannungsspitzen in Dickenrichtung beansprucht. Dies erklärt die Begünstigung der Faserrissbildung an der Risssspitze. Außerdem beanspruchen die Spannungen die interlaminare Grenze stark. So werden vielfach Delaminationen (siehe Abbildung 9) entstehen.

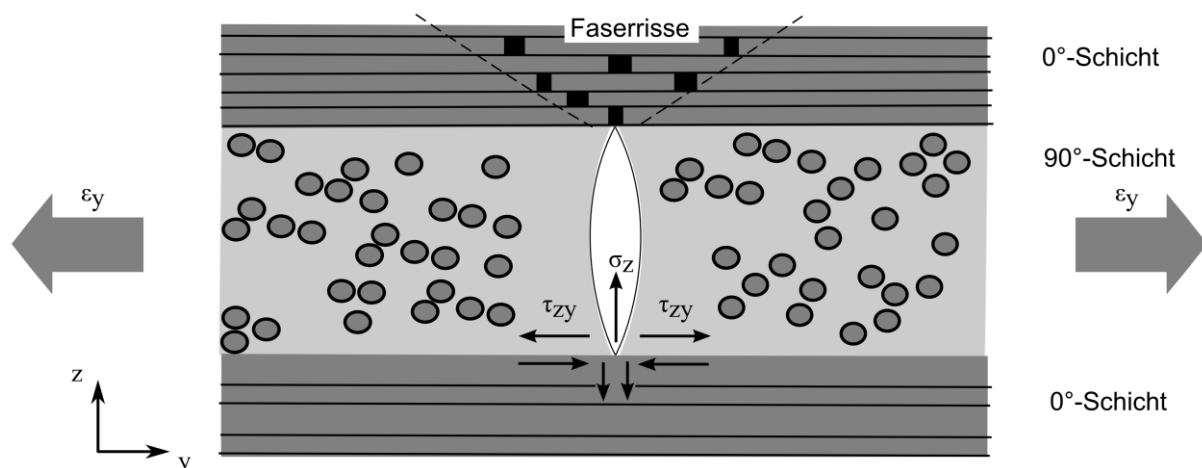


Abbildung 8 Spannungen an der Querrisssspitze in 0°/90°/0°-Laminat

Querrisse haben zwangsläufig auch einen großen Einfluss auf die Schubsteifigkeit von Cross-Ply-Laminaten, da diese allein von der Matrix bestimmt wird. Sie nimmt stärker ab, als die faserdominierte Längssteifigkeit [KaSo05, LuVa06]. Die Wirkung von Querrissen auf die Schubsteifigkeit ist in vielen Details vergleichbar mit der Wirkung von Querrissen in Winkellagen.

Querrisse in Winkellagen, also beispielsweise 45°-Lagen, unterscheiden sich mit zunehmender Winkeldifferenz von solchen in Querlagen, denn in ihnen herrscht eine Schub-Zug-Belastung vor. Analog zur Querszugrissbildung gibt es bei Schubbelastung in der Schicht auch eine – durch die unterschiedlichen Steifigkeiten bedingte – Dehnungsüberhöhung. Ebenso wie den Dehnungsvergrößerungsfaktor dort, kann man hier einen Schiebungsvergrößerungsfaktor definieren. Der Entstehung dieser Querrisse geht eine Bildung von Querrissen (quer zur größten Hauptzugspannung in der Schicht) voraus, also quer zur Probenlängsrichtung bei +/-45°-Proben. Diese Querrisse wachsen schnell zu faserparallelen Schubrissen zusammen [Schü08, S.378]. Hinweise auf diesen Prozess liefern sägezahnartige, Shear-Hackle genannte Bruchflächen [Schü08, S.368], die man an solchen Bruchstellen unter dem Mikroskop finden kann. Da bei Winkellagen die Schädigung mehrfach an Grenzflächen gestoppt und umgelenkt wird, Risse größtenteils unter Schubbelastung entstehen und die Scherbewegung der Fasern Reibbewegungen begünstigt, ist die Matrixschädigung im Allgemeinen diffuser und vielfältiger als bei reinem Querszug [LaLM06].

Mikrodelamination

Nicht nur unter schwingender Belastung besser zu beobachten ist das von Querrissen ausgehende **lokale Delaminationswachstum**. Für die Rissdichte, die eine Querschicht akkumuliert, wird von einem Grenzwert, dem Characteristic Damage State (CDS) ausgegangen. Der CDS ist eine laminattypische Querrissdichte, die sowohl im quasistatischen Versuch, als auch unter Betriebsbelastung asymptotisch erreicht wird [CaRe03].

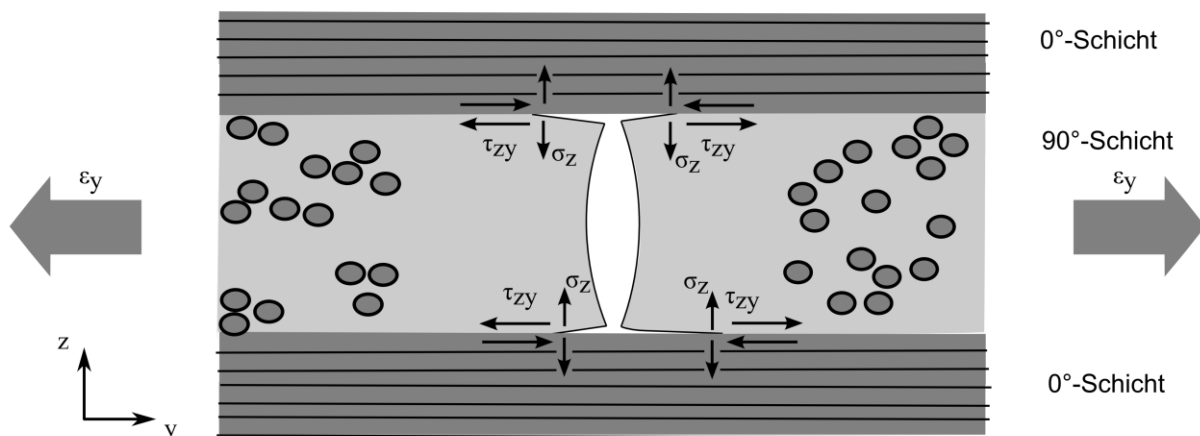


Abbildung 9 Mikrodelamination an Querriss in 0°/90°/0°-Laminat

Ursache des Delaminationswachstums an den Rissen in der Querschicht ist der Spannungszustand an der Risspitze. Um die Dehnung aus der Längsschicht in die Querschicht zu übertragen, sind interlaminaire Schubspannungen nötig, deren Betrag

leicht über die Festigkeiten der Schichten hinausgeht. Weiterhin ergibt sich aus dem Spannungszustand um den Riss ein abschälender Effekt (siehe Abbildung 9).

Delaminationen vom freien Rand

Bezogen auf die Belastungsrichtung haben alle Schichten eines Laminates unterschiedliche Querkontraktionszahlen. Um im intakten Verbund auf die gleichen Dehnungen zu kommen, entstehen an freien Rändern interlaminare Schubspannungen, die schnell abklingen und im Inneren eines Bauteils verschwinden. Dies ist prinzipiell mit den Spannungsverhältnissen am Querriss vergleichbar. In Abbildung 10 ist dies für eine $90^\circ/0^\circ/90^\circ$ -Laminat skizziert.

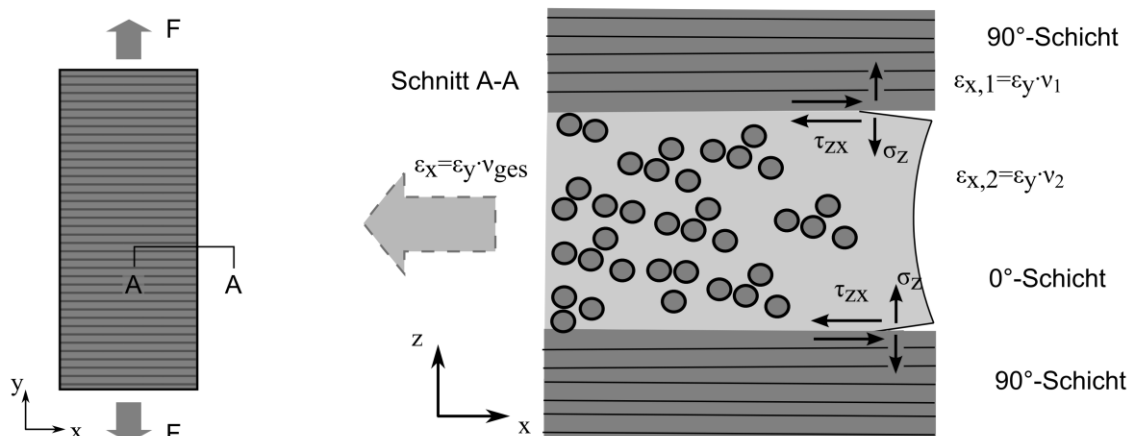


Abbildung 10 Freier-Rand-Delaminationen an Querriss in $90^\circ/0^\circ/90^\circ$ -Laminat

Faserbruch

Die Kerbwirkung von Querissen auf benachbarte Längsschichten unter Zugbelastung ist bereits in Abbildung 8 dargestellt. Die Delaminationen und Querisse vermindern auch die **Stützwirkung** gegen Schubknicken der Fasern (siehe Abbildung 11) unter faserparalleler Druckbelastung weiter deutlich.

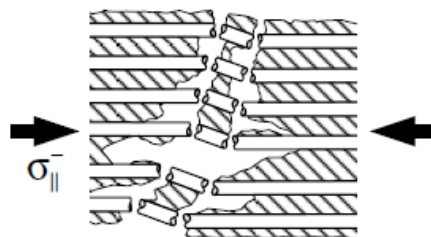


Abbildung 11 Schubknicken [Schü08]

An der Matrix vorgeschädigte Laminat zeigen deutlich geringere Druckfestigkeiten auf. Diese Tatsache hat zu einem Werkstoffqualifizierungsversuch insbesondere für die Luftfahrt geführt, der diesen Festigkeitsverlust nach einem Einschlagereignis prüft. Compression after Impact Versuche (CAI) bewerten die Restdruckfestigkeit von Schalen- oder Plattenprüfkörpern – oft Sandwichstrukturen – nach Einschlägen mit bestimmter Energie.

Die Festigkeit von Luftfahrzeugstrukturen unter Brandlast hat ebenfalls als kritischen Fall das Versagen von Schalen unter Drucklast. Der Erforschung des Verhaltens von

(Sandwich-)Faserverbundstrukturen unter Brand- und Drucklast dient ein neuer Prüfstand an der BAM im Rahmen von „Structural Integrity in Fire“ [THTS14].

Auch der Einfluss von fertigungsbedingten Ondulationen auf Festigkeit und Lebensdauer ist erheblich [SRHB12a]. Schon geringe Abweichungen der Faserausrichtung oder auch der Belastungsrichtung führen zu weiteren großen Zusatzbelastungen auf die Matrix [Knop03, S.120].

Besonderheiten in Gewebelaminaten

Trotz bester Faserausrichtung sind UD-Lamine nicht immer die ideale Konfiguration. In Bezug auf Betriebsfestigkeit, Robustheit gegenüber Einschlägen, Schadenstoleranz und Toleranz gegen nicht faserparallele Belastung können **Gewebe, Gestricke, Geflechte und gesteppte Halbzeuge** Vorteile bieten. Fertigungserleichterungen spielen ebenfalls eine Rolle. Dies wird durch Einbußen in Faserlängsrichtung erkaufte. Durch die Umschlingung verschieden orientierter Fasern wird die Tragfähigkeit der Faser-Matrix-Verbindung unterstützt. Die Fadenumlenkung verkompliziert die Art und Abfolge verschiedener Schädigungsmechanismen und erschwert so die Beschreibung des Verhaltens von Gewebelaminaten.

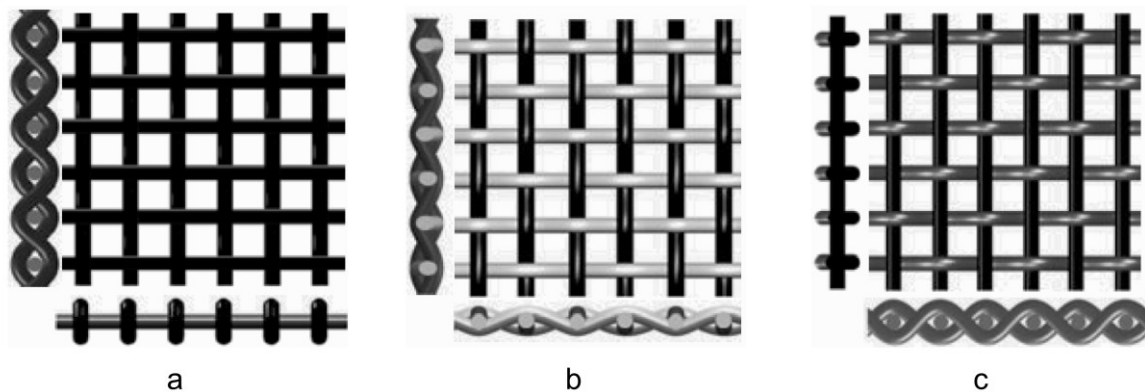


Abbildung 12 Schnittdarstellungen von Leinwandgeweben mit (a) geringer Schusseinarbeitung, (b) ausgewogenem Einarbeitungsverhältnis und (c) hoher Schusseinarbeitung [Cher11]

Im Allgemeinen wird bei der Textilfertigung [Cher11] angestrebt, die Fadenspannung derart anzupassen, dass die sogenannte Einarbeitung (engl. Crimp) für Kette und Schuss gleich ist. Die Fadenspannung lässt sich aber in gewissen Grenzen einstellen, so dass eine Vorzugsrichtung mit geringeren Faserondulationen (siehe Abbildung 12) realisierbar ist. Beim unsachgemäßen Abrollen von Geweben kann in der Produktion ungewollt die Einarbeitung verändert werden. Die Einarbeitung wird neben dem Einfluss auf die Steifigkeit auch das Schädigungsverhalten der Lamine verändern. Die grundlegenden Mechanismen und Abläufe bleiben aber ähnlich.

Betrachtet man einen Schnitt entlang eines Faserbündels (siehe Abbildung 13), hier eines Kettfadens, so erkennt man die Fehlausrichtung der Faser und harzreiche Regionen zwischen den querliegenden Fasersträngen. In diesen drei Hauptteilen des Schnittes treten verschiedene Schädigungsmechanismen auf. Alle Mechanismen laufen prinzipiell gleichzeitig ab, zunächst dominieren jedoch Matrixschädigungen. Dies sind Querrisse in der Harztasche, Querrisse im Schussfaden und Schubrisse im

Kettfaden. Der Faden soll in diesem Zusammenhang den gesamten und harzgetränkten Rovingstrang bezeichnen. Durch die Ondulation bedingt, wird die Querrissbildung im Schussfaden am Übergang zur Harztasche erleichtert. Auch der Start einer lokalen Delamination ist hier wahrscheinlich. Massiv auftretende Querrisse in den Harztaschen verringern die Stützwirkung der Matrix gegen Aufbiegen der Kettfäden. Beim Strecken der längs belasteten Kettfäden können auch Gleitungen innerhalb der Faserbündel zur Verringerung der Fasertragfähigkeit beitragen, so dass am Ende ein Versagen der durch die anderen Schädigungsmechanismen geschwächten Kettfäden zum Schichtbruch führt.

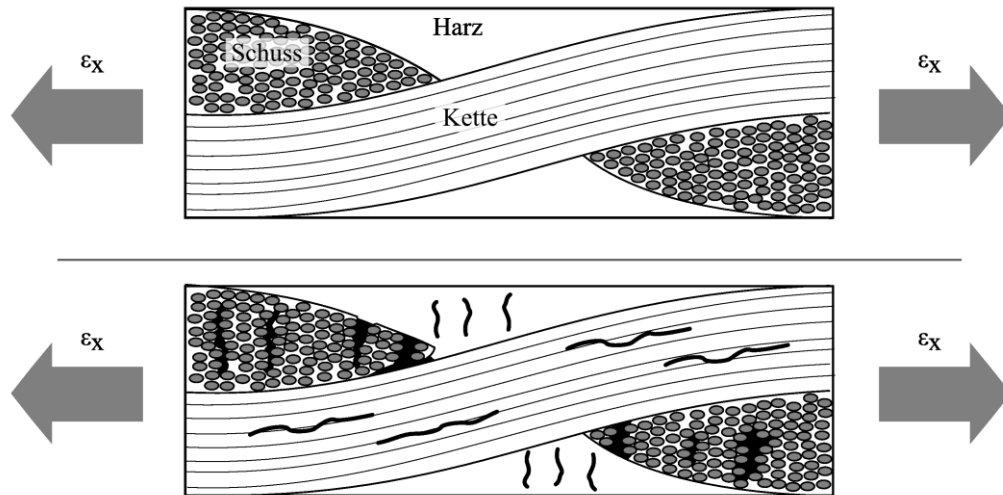


Abbildung 13 Querriss- und Delaminationsentwicklung in Geweben

Matrixschädigung und Betriebsfestigkeit – Besondere Aspekte

Wie die allgemeine Beschreibung der Schädigung verdeutlicht hat, ist über weite Bereiche der Schädigungsentwicklung Matrixschädigung vorherrschend. Unter schwingender Belastung ist dies noch deutlicher, wie Abbildung 14 zeigt. Dort ist der Steigigkeitsabfall für ein Cross-Ply-Laminat für verschiedene Schwingamplituden dargestellt. Im Bereich mittlerer und großer Lebensdauern dominieren – nicht nur den Erkenntnissen BEAUMONTs zufolge – Querrisse und sich daraus entwickelnde Delaminationen. Nur im Kurzzeitfestigkeitsbereich ist die Schädigung faserdominiert. Auch andernorts [MaSC02] werden verschieden dominante Schädigungsarten identifiziert. MANDELL et. al. stellten anhand der Wöhlerliniensteigung einen Übergang von matrixdominiertem zu faserdominiertem Verhalten fest, wenn die Matrix in den Querschichten weitgehend vollständig geschädigt ist. Für gewebebasierte Lamine wird beobachtet, dass diese zwar im statischen Versuch faserdominiertes Versagensverhalten zeigen, im Schwingversuch aber eher einer für matrixdominiertes Verhalten typischen Wöhlerliniensteigung folgen [MaSR92].

Die Matrixschädigung, Delaminationen und die Degradation der Faser-Matrix-Bindung sind also für eine Überwachung der Lebensdauer oder Beurteilung von Konstruktionen besonders relevant. Daher – und weil sie relativ gut analytisch beschreibbar ist – ist auch die Entwicklung der Querrissbildung unter schwingender Beanspruchung häufig Forschungsgegenstand. LADEVEZE [LaLV06] unterteilt die Rissentwicklung noch feiner. Auf diffuse Querrissbildung/Mikrorisse folgen schicht-

trennenden Querrisse und schließlich diffuse Delamination. Diffuse Delamination beschreibt hierbei die an der Grenze von Querrissen an anderen Schichten entstehenden lokalen Delaminationen (Abbildung 9), die andernorts auch mit Mikrodelamination benannt werden.

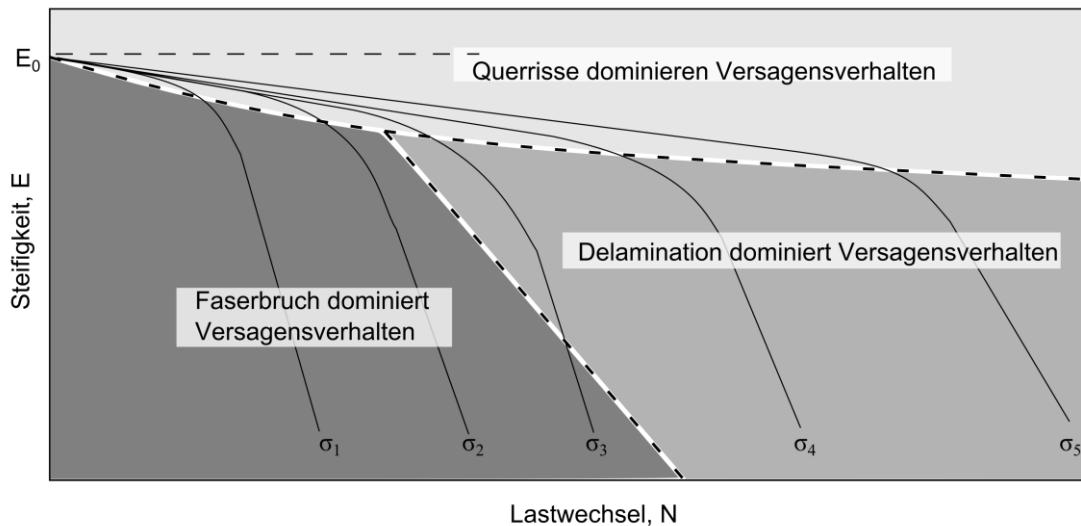


Abbildung 14 Steifigkeitsverlauf an Schwingversuchen an 0°/90°-Laminaten und dominierende Schädigungsmechanismen [nach Poursartip in [Beau03]]

Im Allgemeinen wird eine Sättigung der Querschichten mit Rissen beobachtet, die dann nur noch wenig zunehmen und wachsen. Dieser charakteristische Schädigungszustand (CDS) stellt sich früh in der Lebensdauer der Laminaten ein. Die weitere Zunahme der Querrissdichte ist zwar flach, aber messbar. Wie in Abbildung 14 skizziert, kann davon ausgegangen werden, dass in der Phase des geringen Wachstums andere Schädigungsmechanismen initiiert werden, die dann den kurzen steilen Degradationsverlauf vor Probenversagen dominieren.

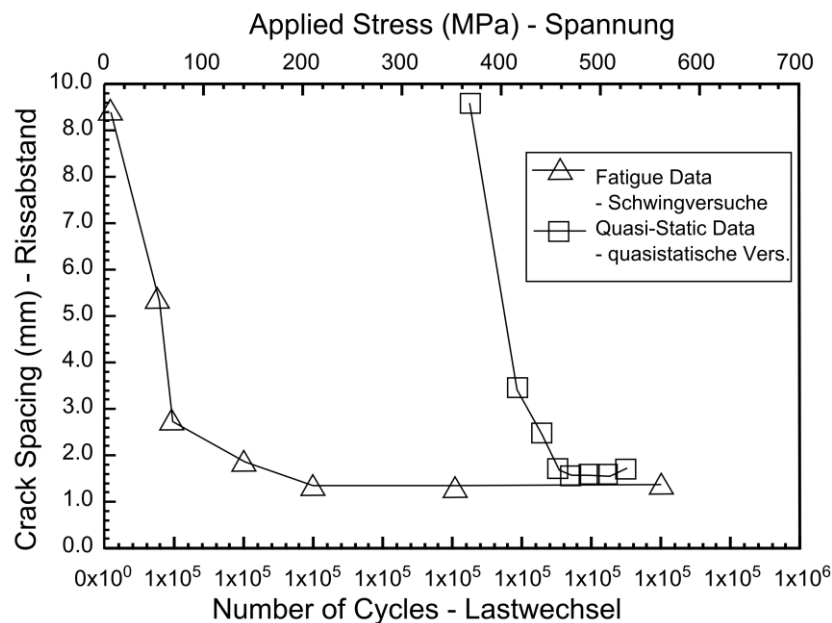


Abbildung 15 Erreichen eines Characteristic Damage State in statischer und Ermüdungsbelastung (Grafik nachgezeichnet und mit Übersetzungen ergänzt [CaRe03])

Wie in Abbildung 15 zu erkennen, ist der CDS für quasi-statische und dynamische Belastung vergleichbar und für den Laminataufbau und die Halbzeuge typisch. Insbesondere die Dicke der Schichten ist ein wichtiger Parameter für Rissabstand und -dichte [GaBa77, Talr94]. Dicke Querlagen korrelieren mit großen Rissabständen [GaBa77], der Querrissbeginn erfolgt bei ähnlichen Dehnungen. Schulte berichtet [Schu92] ebenfalls von größerem Rissabstand bei dickeren Querschichten. Er beobachtete aber einen früheren Beginn der Rissbildung in dickeren Schichten. Dort [Schu92, S.204] sind auch Daten zu finden, die bei schwingender Last dann eine größere erreichbare Rissdichte an Cross-Ply-Laminaten zeigen, wenn die Amplitude größer ist.

Besonders kritisch ist eine durch Betriebsbelastung rissgesättigte Matrix wenn fasersenkrechte und Schub-Belastungen auftreten. Deshalb ist neben der Untersuchung der Druckbelastbarkeit von Laminaten nach Einschlägen auch die Untersuchung der Schubfestigkeit sinnvoll. Für die Restschubfestigkeit nach Schwingbeanspruchung in Cross-Ply-Richtung liegen modellbasierte Ergebnisse vor [KaSo05, LuVa06]. Sie zeigen, dass Schubsteifigkeit und -festigkeit wesentlich empfindlicher auf Rissakkumulation reagieren als die zumeist standardmäßig beobachteten Werte in Zugrichtung.

Zur Untersuchung der Restfestigkeiten und -steifigkeiten nach Schubbeanspruchung eignen sich Rohrproben besonders gut. An in einer Zug/Druck-Torsions-Prüfmaschine zunächst unter Schub/Zug-Belastung ermüdeten Rohrproben mit $\pm 45^\circ$ -Faserorientierung wurden von TRAPPE die Steifigkeitsentwicklung und die Restfestigkeit untersucht [Trap02, S.91ff]. Der Steifigkeitsabfall in Torsionsrichtung – also in fasergerechter Belastung – ist sehr gering. Der Steifigkeitsabfall in Zug/Druck-Richtung – entsprechend Schub/Zug-Belastung oder Schub-Druck-Belastung im Laminat – ist deutlich größer.

Für die Restfestigkeiten in Torsionsrichtung nach jeweils nominell gleicher Schädigung unter Schub/Zug-Belastung ergibt sich dennoch ein Abfall von bis zu 30%, je nach Matrixsystem und Faserhalbzeug. Die Festigkeit in fasergerechter Belastungsrichtung ist also hier stark vom Zustand der Matrix abhängig. Erklärbar ist dies durch die lokale Belastung der Einzelschichten. Während etwa die $+45^\circ$ -Schicht faserparallel auf Zug belastet ist, tritt in der -45° -Schicht faserparallele Druckbelastung auf. Die Schädigung der Matrix führt zu einer Reduzierung der Querkzugfestigkeit der biaxial, querkzug- und längsdruckbelasteten Schicht. Bei Erreichen der Querkzugfestigkeit werden die Fasern nicht mehr gestützt und die -45° -Schicht versagt. Der Schädigungszustand der Matrix hat also trotz ideal faserparalleler Belastung großen Einfluss auf die Festigkeit des Laminates.

Im Vergleich des Schubversagenverhaltens von Gewebelaminaten mit Gelegelaminaten [LiWG13] beobachtet man ein wesentlich längeres Resttragverhalten nach dem ersten Auftreten von Matrixschäden bei Gewebe. Insbesondere im Schub-Zug-Test kann durch die Webkreuzungspunkte viel länger die Übertragung zwischen Fasern in $+45^\circ$ - zu solchen in -45° -Richtung gewährleistet werden. In Laminaten aus UD-Schichten muss dies über interlaminare Spannungen geschehen, wobei die Schichten frühzeitig großflächig delaminieren und getrennt werden.

Mit dem Einfluss der Fadeneinarbeitung und von Ondulationen auf die Querrissbildung beschäftigen sich wie schon vorher Schulte [Schu92, S.233] auch GAO et al

[GBOS99]. Dort wird von lokalen Delaminationen an Fadenkreuzungspunkten berichtet, die auch als Metadelamination [Pate99, Reif90] bezeichnet werden.

Die Querrissbildung begünstigende Faktoren sind im Allgemeinen [s. a. Schu92, S.242]:

- Wenig duktile Matrix.
- Niedrige Temperaturen im Betrieb.
- Große Eigenspannungen (z.B. durch hohe Aushärtungstemperaturen).
- Geringer Feuchtigkeitsgehalt in der Matrix.
- Schlechte Faser-Matrix-Haftung.
- Dünne Querschichten.

Die Beobachtung von Querrissen und lokalen Delaminationen kann mit geeigneten Mitteln relativ leicht erfolgen. Es existieren Erkenntnisse über Querrisse und lokale Delaminationen und eine Vielzahl an theoretischen Ansätzen zu ihrer Beschreibung. Die Untersuchung weiterer effektiver Möglichkeiten – wie es das Konzept der Indikatorschicht bieten kann – zur Beobachtung von Querrissen und lokalen Delaminationen ist also sinnvoll und daher Gegenstand dieser Arbeit.

2.3. Festigkeitsberechnung in Laminaten

Zur Festigkeitsberechnung von mehrdimensional belasteten isotropen Werkstoffen können Vergleichsspannungshypothesen benutzt werden. Das Problem der Mehrachsigkeit wird durch Umrechnung in eine skalare Vergleichsspannung [GrSe07] gelöst. Für eher zähe Werkstoffe sind die Gestaltänderungsenergiehypothese (auch Huber/von Mises/Hencky) und die Schubspannungshypothese (nach Tresca) verbreitet. Bei eher spröden Werkstoffen setzt man oft die Hauptnormalspannungshypothese ein. Für Polymere und zur Darstellung von Bodenmechanik nutzt man allgemeinere Formulierungen, die eine unterschiedliche Behandlung von Druck- und Zuganteilen beinhalten. Für die Berechnung von anisotropen Werkstoffen mit unterschiedlichen Druck-, Zug- und Schubfestigkeiten existieren andere Versagenshypothesen. Eine Umrechnung in eine Vergleichsspannung ist dann nicht möglich oder sinnvoll. Es müssen die Festigkeiten für jede Richtung bekannt sein. Ein einzelner Zugversuch genügt nicht. Auch jede beliebige Kombination der einzelnen Spannungskomponenten müsste untersucht werden. Man kann davon ausgehen, dass die physikalischen Ursachen für Interaktionen zwischen den Spannungskomponenten für alle FKV ähnlich sind. Daher kann man für diese Bereiche Festigkeitshypothesen aufstellen. Es ist zwar möglich solche Festigkeitshypothesen auch für komplette Laminat aufzustellen und anzupassen, angesichts der Variabilität des Laminataufbaus hat sich die schichtweise Berechnung als sinnvoll erwiesen.

2.3.1. Schichtweise Spannungs- und Dehnungsberechnung

Die Berechnung der statischen Festigkeiten und Steifigkeiten erfolgt also in vielen Fällen mit der Klassischen Laminattheorie (KLT) und der Schichtweisen Festigkeitsanalyse (SFA). Ein alternatives einfacheres Werkzeug zur Vorauslegung ist die Netztheorie, die nur die Faserfestigkeiten berücksichtigt. Um in der KLT verschiede-

ne Faservolumenanteile oder auch verschiedene Faser-Matrix-Kombinationen schnell berücksichtigen zu können, bedient man sich verschiedener Mischungsregeln. Für die Faserrichtung funktionieren diese so gut, dass sowohl für die Festigkeit, als auch für die Steifigkeit kaum Versuche nötig sind und diese Werte aus Werten der Faser und Matrix direkt ermittelbar sind. Für andere Belastungsrichtungen werden die Mischungsregeln zuverlässig zur Extrapolation von experimentell ermittelten Werten eingesetzt. Die Eigenschaften von Faser und Matrix in der Einzelschicht werden als ein Kontinuum betrachtet. In Abbildung 16 ist das Vorgehen bei der KLT schematisch dargestellt. Nach der Ermittlung der Steifigkeiten der Einzelschicht werden diese mit den Informationen über die Orientierung der Einzelschicht im Laminat in das Koordinatensystem des Laminates transformiert. Mit der Abfolge und Schichtdicke der Einzelschichten wird die Steifigkeit des gesamten Laminates berechnet. Je nach Dicke des Laminates, Einsatzrandbedingungen und benötigten Informationen können hierbei eine einfache Scheibentheorie oder kompliziertere Plattentheorien eingesetzt werden. Die KIRCHHOFFsche Plattentheorie berücksichtigt einfache Biegung, andere Plattentheorien bieten auch Ansätze [Pien08] für die Schubverformung. Mit den bekannten oder angenommenen Lasten werden dann die Verzerrungen des gesamten Laminates errechnet. Diese Verzerrungen werden danach in Schichtkoordinaten rücktransformiert und über die Steifigkeiten der jeweiligen Einzelschicht in Schichtspannungen umgerechnet. Die Spannungen oder Dehnungen der Einzelschicht können dann mittels Festigkeitshypothesen bewertet werden.

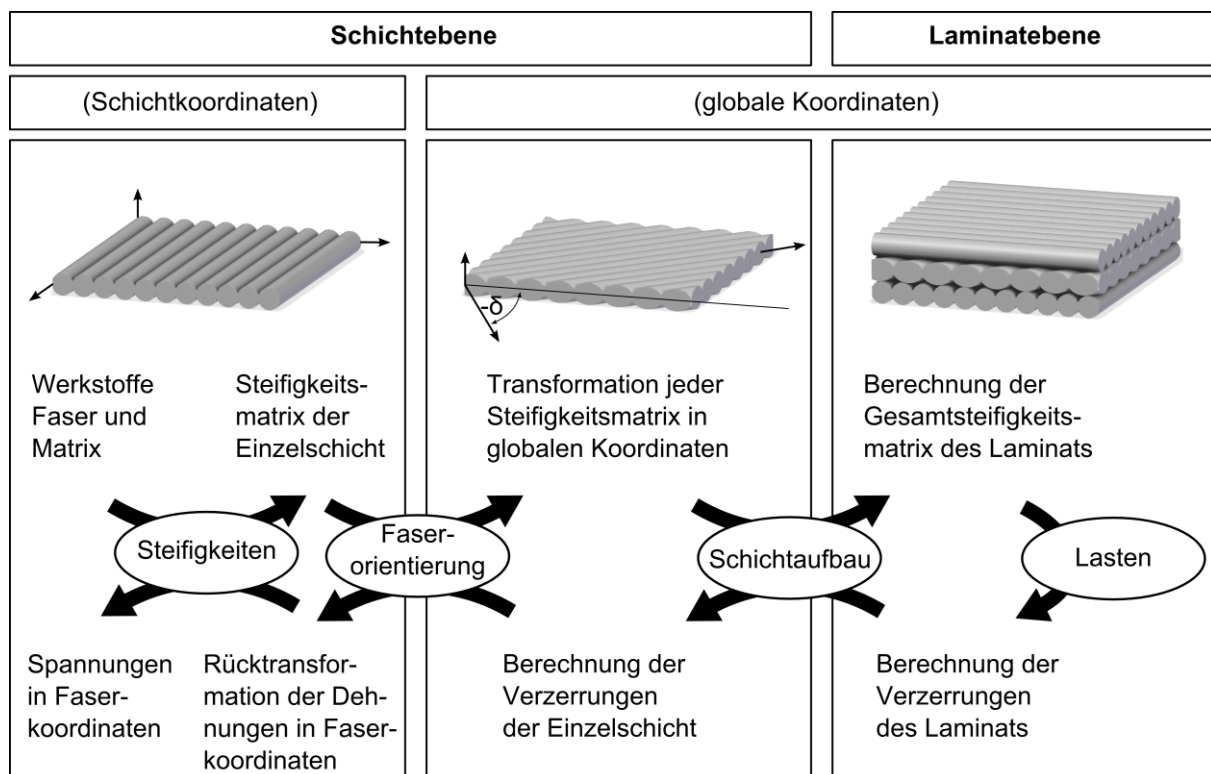


Abbildung 16 KLT - schematisch, Darstellung nach [Knop03]

Die Laminattheorien werden – oft zusammen mit Festigkeitshypothesen – als analytische Programmpakete [FiMP09, Webe09a] umgesetzt. Auch in gängigen Finite-Element-Methode-Systemen (FEM) sind Laminattheorien implementiert.

2.3.2. Schichtweise Festigkeitsanalyse

Wenn die Spannungen und Dehnungen der Einzelschichten bekannt sind, ist mittels Festigkeitshypothesen ihre Wirkung ermittelbar.

Eine Bruchfunktion

$$F \sigma_i / R_i = 1$$

Gleichung 1

vergleicht die Spannungen σ_i mit den Festigkeiten R_i . Sie sollte alle Interaktionen erfassen. Bei Erreichen von $F = 1$ versagt der Werkstoff. Man kann zwischen Global-Festigkeitskriterien [TsWu71] und differenzierten Festigkeitskriterien unterscheiden. Globale Festigkeitskriterien bedienen sich einer einzigen Funktion zur Vorhersage des Versagens einer Schicht. Am bekanntesten ist das TSAI-WU-Kriterium [TsWu71]. Ursprünglich nur vorgesehen, dem Konstrukteur eine einfache mathematische Formulierung bereitzustellen, fehlt ihnen die Unterscheidung zwischen Faserbruch und Zwischenfaserbruch. Da in Einzelschichten aber schon vor dem Laminatversagen Zwischenfaserbruch auftritt, ist eine Identifizierung dieser Schädigungsarten sinnvoll. Nur so ist eine Optimierung des Laminates effektiv möglich, weshalb differenzierte Kriterien entwickelt wurden [HaRo73, Puck69]. Die physikalischen Vorgänge beim spröden Bruchverhalten von Hochleistungs-FKV versucht beispielsweise PUCK [Puck96] noch besser zu beschreiben. Mit dem wirkebenenbezogenen Bruchkriterium können auch Fälle wie das z. B. in [Kopp00] beschriebene Druckversagen durch keilförmig die umgebenden Schichten zerstörendes Zwischenfaserbruchversagen einer querdruckbelasteten Schicht vorhergesagt werden.

Weiterhin ist es auch möglich, Grenzdehnungen statt -spannungen als Kriterium festzulegen. Dies ist bisher in der Großluftfahrt erfolgreich zur Vorauslegung eingesetzt worden. Wenn, wie dort, oft quasiisotrope Lamine ähnlichen Aufbaus ($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$) eingesetzt werden, sind die Schadensmechanismen bei gleichen Dehnungen gleich und die Verwendung von Grenzdehnungen bietet sich an [Hsb06]. Dabei wird nicht zwischen Faserbruch und Zwischenfaserbruch unterschieden. Es handelt sich also um ein globales Festigkeitskriterium.

Allen, auch den weitentwickelten differenzierten Festigkeitskriterien, die eine schichtweise Festigkeitsanalyse benutzen, ist gemein, dass sie Interaktionen der Schädigungsarten zwischen verschiedenen Schichten nur bedingt berücksichtigen. Sie werden, wenn überhaupt, nur über Steifigkeitsänderungen berücksichtigt.

Die Ergebnisse des Worldwide-Failure-Exercise [HiKS02a, HiKS02b, HiKS98] – eines Vergleichs verschiedener Festigkeitskriterien – zeigen, dass das ideale Kriterium noch nicht gefunden ist. Es muss sicherlich immer ein Kompromiss zwischen Exaktheit und Einfachheit gesucht werden. Dabei müssen die Stärken und Schwächen der verschiedenen Methoden beachtet werden.

Die Degradation der nach und nach versagenden Schichten kann iterativ durch Steifigkeitsminderung der versagenden Schichten berechnet werden. Es existieren einige aktuellere Arbeiten, die hierzu neue Lösungen vorschlagen [Basa11, Knop03, Webe09b].

Delaminationen behandeln alle schichtweisen Festigkeitsanalysen prinzipbedingt nicht. Es gibt jedoch Ansätze [BeLe00, KaSo05, Kief12, LaLM06, Pien08] die die interlaminaren Spannungen berücksichtigen. Bei der analytischen Beschreibung von

interlaminarer Schädigung wird in der englischsprachigen Literatur oft von shear-lag-analysis [Nair97, NaMe01] gesprochen. Eine Übersicht über die Entstehung des Begriffs liefert Knops [Knop03, S.24]. Dieser Begriff resultiert aus der Erkenntnis, dass einfache Biegetheorien die Verformung von FKV-Biegebalken nicht exakt beschreiben können. Die reale Verformung entspricht nicht der berechneten, sie „hinkt nach“ (engl.: to lag). Der Begriff „shear-lag-analysis“ wird im erweiterten Sinne für die Einführung einer analytischen, künstlichen Schubübertragungszone zwischen den Schichten eines Laminates und auch Faser-Matrix-Grenzflächen genutzt. Damit werden etwa die Effekte von Querissen auf die Steifigkeit [GaBa77, LeDa90] analytisch berechnet und die Umgebung der Querrisse in Hinblick auf Delaminationswachstum [KaSo00] dargestellt. Mechanisch ist dieses Vorgehen nicht nur durch die Modellbildung unexakt, es liefert auch kontinuumsmechanisch unzulässige Detailergebnisse, wie Schubspannungen, die an den Rissufern nicht zu Null werden [Hash96]. Dennoch wird es erfolgreich eingesetzt. Weitere Ansätze zur Behandlung von Delaminationen basieren auf anderen analytischen Ansätzen wie den „variational mechanics“ (bei denen der Spannungszustand des ungeschädigten Laminates mit einer Störungsfunktion überlagert und dann mit Energiefreisetzungsrate, Randbedingungen und innerer Energie bestimmt wird) [Hash86, NaHu92] oder FEM.

2.3.3. Lebensdauerberechnung in FKV

Schon vor einer Lebensdauerberechnung gibt es verschiedene grundsätzliche Konzepte, um Strukturen sicher auszulegen. Man kann Strukturen

- dauerhaft auslegen,
- auf eine bestimmte Betriebszeit (Safe-Life) zuverlässig auslegen,
- nach dem Fail-Safe-Prinzip konstruieren, oder
- schadenstolerant auslegen (Damage Tolerance).

Eine dauerhafte Auslegung widerspricht dem Leichtbaugedanken, der ja meist der Wahl von Faserkunststoffverbunden zugrundeliegt.

Für eine Safe-Life-Auslegung ist besonders gute Vorhersagepräzision nötig. Da die so ausgelegten Bauteile über ihre gesamte Einsatzzeit ausfallsicher sein müssen, müssen bei Unsicherheiten die Sicherheitsfaktoren erhöht werden oder die erlaubte Einsatzdauer verringert werden. Nach Ablauf dieser Zeit (oder einer Anzahl Lastspiele/Einsätze/Landungen) werden die Teile ohne Rücksicht auf ihren tatsächlichen Zustand ausgetauscht.

Fail-Safe ausgelegte Strukturen sehen mehrere Lastpfade vor, so dass beim Ausfall eines Elementes noch eine ausreichende Resttragfähigkeit besteht und die aktuelle Aufgabe abgebrochen und sicher beendet werden kann. Die nötige Differenzierung der Komponenten kann – muss aber nicht – dem Leichtbaugedanken entgegenstehen.

Schadenstoleranz liegt vor, wenn kleinere Schäden im Bauteil vorliegen und auch weiter wachsen dürfen, ohne dass das Bauteil außer Betrieb genommen werden muss. Die Schäden müssen entdeckt, begutachtet, überwacht und repariert werden. Die Auswirkung und das Wachstum der Schäden müssen so gut bekannt, verstanden und berechenbar sein, dass daraus im Inspektionsintervall mit hinreichend gro-

ßer Wahrscheinlichkeit kein Ausfall zu erwarten ist. Bei Flugzeugen aus Aluminiumlegierungen sind für verschiedene Bauteile bestimmte Risslängen und ein Wachstum zwischen den Inspektionen zulässig, bevor Bauteile ersetzt oder repariert werden. Für FKV könnte man analog eine bestimmte diffuse Schädigung entsprechend überwachen, wenn diese zuverlässig zu ermitteln ist. Viele Berechnungsmodelle zur Schädigung bieten mit Steifigkeitsänderungen oder Rissdichten hierfür geeignete Parameter. Eine Möglichkeit zur Darstellung wird mit der in dieser Arbeit betrachteten Indikatorschicht untersucht.

Bei der Lebensdauerberechnung gibt es verschiedene Ebenen der Modellbildung. Ziel der Lebensdauerberechnung ist es, mit hinreichend großer Sicherheit vorherzusagen, wie lange ein Bauteil in der Lage ist, die im Einsatz auftretenden Lasten und Umwelteinflüsse zu ertragen. Zunächst müssen die Lasten so angenommen und modelliert werden, dass alle Fälle der Realität erfasst werden.

Dann muss das Verhalten des Werkstoffs unter Einwirkung der Belastungen/Umwelteinflüsse dargestellt werden. Das Modell muss verschiedene Lasten (Schub, Zug/Druck, Temperatur, Feuchte) und Lastverhältnisse berücksichtigen und als Ergebnis mindestens eine Restlebensdauer ausgeben. Eingangsdaten sind die aufbereiteten Daten über die Last und Daten über das Material. Zusätzlich zu den Aufgaben der statischen Festigkeitshypothesen müssen Modelle zur Lebensdauerermittlung um die Dimension Zeit erweitert werden, also zyklische Lasten und/oder Zeitstandfestigkeit darstellen. Die Bruchfunktion ist also von Spannungen, Festigkeiten und deren zeitlichen Verlauf abhängig:

$$F(\sigma_i, R_i, t) = 1$$

Gleichung 2

Sendeckyj teilt die Konzepte zur Modellierung der Schädigung in 4 Gruppen ein [Send91, S. 431–484]:

- Empirische Modelle.
- Restfestigkeitsdegradationsmodelle.
- Steifigkeitsdegradationsmodelle.
- Mikromechanische Modelle.

Rein empirische Modelle sind z. B. parametrische Modelle [HaRo73, Harr03b, PhVa99, Rote94, SaWM09] oder solche auf Basis neuronaler Netzwerke [Harr03b, LeAl03]. Diese funktionieren unabhängig vom jeweiligen Schädigungsmechanismus als „black-box“. Sie müssen immer neu für bestimmte Laminaten verifiziert werden. Die Anpassung geschieht gestützt auf Wöhlerlinien des Werkstoffes, die beispielsweise genutzt werden, um ein Goodmandiagramm anzupassen. So ist teilweise die Übertragung von verschiedenen Lastverhältnissen untereinander möglich, um den experimentellen Aufwand einigermaßen überschaubar zu halten. Diese empirischen Modelle stellen, da sie auf Materialproben des tatsächlichen Laminates basieren, indirekt alle Schädigungsmechanismen richtig dar. Bei Änderungen am Laminataufbau oder Komponenten müssen alle Tests wiederholt werden.

Restfestigkeitsdegradationsmodelle [ADJR86, Hash85, PBCL06, ReCa02] gehen von der Annahme aus, dass die Festigkeit durch Ansammlung von Schädigung stetig abfällt. Fällt die Restfestigkeit unter die aktuelle Last, so versagt der Werkstoff. Die Restfestigkeit soll dabei statistisch genauso verteilt sein wie die statische Festigkeit

(strength-life-equal-rank-assumption). Umfangreiche experimentelle Daten sind nötig, um die Modelle anzupassen. Problematisch dabei ist natürlich, dass eine Messung der Restfestigkeit mit jeder Probe nur einmal vorgenommen werden kann. Es existieren Konzepte, die den Restfestigkeitsabfall schichtweise, sukzessive bis zur letzten tragenden Schicht, dem „Critical element“ [ReCa02], darstellen. Die dort entwickelten Berechnungswerkzeuge sollen auch um mikromechanische Module erweiterbar und vielfach kommerziell eingesetzt worden sein. In gewissen Grenzen sind damit Parameterstudien möglich, um Variationen des Materials nachträglich zu berücksichtigen. Allgemein ist die Lebensdauerberechnung aufgrund ihrer Komplexität nur unter Nutzung von Software praktikabel. Problematisch bei der Nutzung der Restfestigkeit als Schädigung ist die fehlende Messbarkeit. Der Verlauf ist zunächst flach und zeigt kurz vor dem Versagen einen steilen Abfall der Restfestigkeit. Im Kurzzeitfestigkeitsbereich und bei UD-Schichten auch allgemein ist der Festigkeitsabfall sehr gering, so dass man vom „sudden-death“-Verhalten spricht. Das Versagen kommt „überraschend“. Der als „wear-out“ bezeichnete Rückgang der Festigkeit ist eher im Langzeitfestigkeitsbereich und in komplexeren Laminaten zu beobachten. Die Wechselwirkungen der Festigkeitsabnahme in verschiedenen Richtungen müssen, wie im statischen Fall, durch Festigkeitshypothesen dargestellt werden. Schematisch ist dies in Abbildung 17 dargestellt.

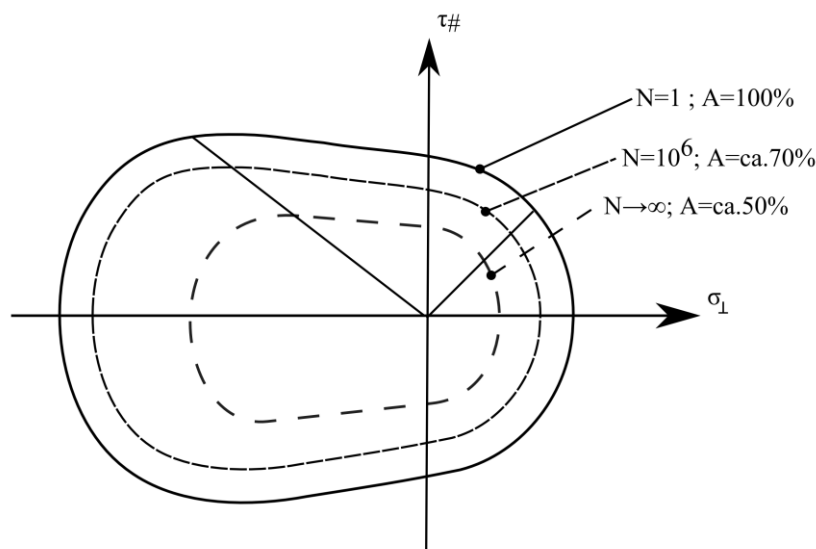


Abbildung 17 Abfall der Restfestigkeit, Modellierung durch „Schrumpfung“ der Festigkeitshypothese

In Steifigkeitsdegradationsmodellen wird als gut messbare Größe [PhVa00] die Änderung der Steifigkeiten als Schädigungsmaß genutzt. Der Steifigkeitsabfall ist in vielen Fällen steiler als der Restfestigkeitsabfall. HASHIN [Hash85] und andere [ShLe03, VaKe11] nutzen beispielsweise einen oft vorhandenen Zusammenhang zwischen Steifigkeitsdegradation und Festigkeitsdegradation (siehe Abbildung 18) aus.

Obwohl letztlich alle Modelle mit einer gewissen Vorstellung und fundierten Erfahrungen über die Schädigungsvorgänge aufgestellt werden, enthalten sie nicht zwangsläufig auch mikromechanische Modellierungen der zugrundeliegenden Vorgänge.

Dies sollen mechanistische Modelle leisten, die die tatsächlichen Schädigungsmechanismen modellieren. Diese werden per FEM oder in analytischen Ansätzen in repräsentativen Volumenelementen (RVE) berechnet. Auch hier können nicht alle Einzelheiten betrachtet und simuliert werden. Ziel ist es aber, von der Mikrostruktur bis zum gesamten Bauteil alle Ebenen zu verstehen und nachzubilden. Dies ermöglicht den Einfluss vieler Parameter frühzeitig zu berücksichtigen, ohne bei Änderungen oder unerwarteten Herausforderungen unter Umständen viele Materialtests erneut durchzuführen, wie dies bei empirischem Vorgehen nötig werden kann. Es entstehen aber äußerst komplexe Modelle mit vielen Parametern und damit Fehlerquellen. Bei jeder Modellbildung besteht die Gefahr, dass das gewählte Modell und die grundlegenden Parameter zwar zum Zeitpunkt der Modellerstellung zutrafen und validiert wurden, sich die Randbedingungen aber unerwartet ändern. Dazu ein Beispiel: Durch Entwicklungsarbeit ist die Festigkeit einer Klebstoffschicht derart gestiegen, dass nun die Querkzugfestigkeit des Substrates entscheidend wird. Ein bewährtes Modell der Klebstoffschicht alleine wird dann nicht sinnvoll anpassbar sein.

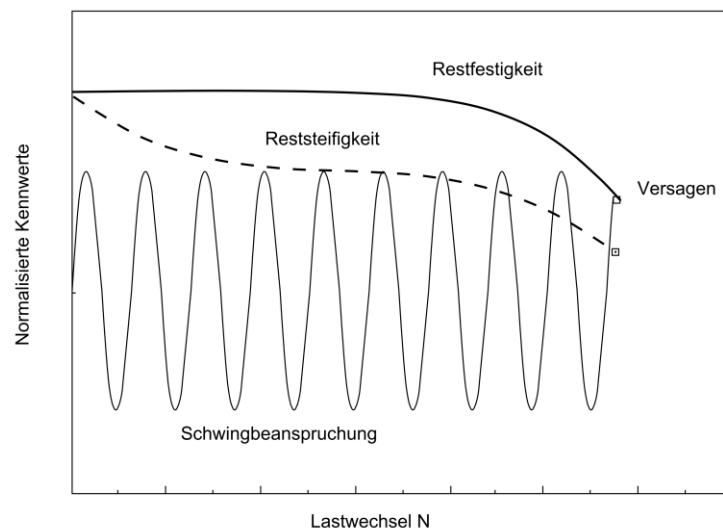


Abbildung 18 Restfestigkeit und Reststeifigkeit (Grafik nachgezeichnet und übersetzt [VaKe11])

Beaumont [Beau03] nutzt mechanistisch basierte empirische Modelle, die mikromechanische Modelle nutzen um zu klären, an welchen Stellen experimentelle Forschung nötig ist, um die Vorhersage zu verbessern. Der typische Ablauf einer Lebensdauervorhersage ist dann:

1. Modellierung des Schädigungswachstums anhand von mikromechanischen Erkenntnissen ergänzt und bestätigt durch Versuche
2. Bewertung der ermittelten Schädigung hinsichtlich der geforderten (Rest-)Festigkeit. Dieses „physical modelling“ beschreiben z.B. Beaumont in [BeDS06] und andere als Mehrskalenmodellierung. Beispiele finden sich in KWON und ALLEN [KwAl08], oder beispielsweise von BLASSIAU für UD-Schichten [BIBT07].

Ein mikromechanisches Modell, das analytisch zweidimensional die Entwicklung der Rissdichte und die Entwicklung der Risslänge von Querrissen simuliert, stellt

BERTHELOT [BeML01] vor. Das Modell ermittelt die Festigkeits- und Steifigkeitsabnahme ebenso wie die Querrissdichte und -länge nach der Kalibrierung durch Testdaten. Ebenso wie bei direkter Beobachtung der Risse bleibt die Herausforderung, festzulegen ab welcher Rissdichte das Ende der Lebensdauer angesetzt werden soll. Weiterhin wird der Übergang zu anderen Schädigungsmechanismen nicht modelliert.

Ein Ansatz zum Querrisswachstum in UD-Laminaten wird von RENARD et. al. [ReFJ93] beschrieben. Als charakteristische Schädigungsvariable wird das Verhältnis der Schichtdicke t zur mittleren Rissdichte h darin als $\alpha = \frac{t}{h}$ eingeführt – wie vorher auch von HARRIS [Harr03a] und TALREJA [Talr94]. Die Schichtdicke wird mit der Risslänge gleichgesetzt, da nur ein kleiner Teil der Querrisse nicht innerhalb kürzester Zeit durch die gesamte Schicht wachse. Um auch die Einflüsse der Querrisse auf die Schubsteifigkeit zu berücksichtigen, wird ein RVE mit FEM berechnet. Die Ergebnisse werden homogenisiert und kontinuumsmechanisch in einem Gesamtenergiewert schichtweise analytisch ausgewertet. Innerhalb dieser Untersuchung [ReFJ93] erwies sich die gewählte Variable α als unabhängig von der Schichtdicke, den angrenzenden Lagen und der Position der Lage innerhalb eines Laminates. Ausnahme ist hierbei die Position als Außenlage. Hier gehen RENARD et al von einer doppelten Rissdichte verglichen mit inneren Lagen aus. Der Ansatz kann sowohl für den quasistatischen Fall, als auch für Ermüdungsbeanspruchungen genutzt werden, wenn man annimmt, dass die Rissgeometrien vergleichbar sind. THIONET und RENARD [ThRe94] untersuchten mit diesem Ansatz auch den Lastreihenfolgeeinfluß bei der schwingenden Beanspruchung von Kreuzlaminaten. In dieser Studie wird keine vollständige Sättigung der Rissdichte beim CDS beobachtet – wie in anderen Ergebnissen auch. Die Ergebnisse zeigen ein weiteres schwächeres Wachstum der Rissdichte auch im zweiten Bereich der Rissdichtenentwicklung. Interpretiert man diesen Übergang von anfänglich schnellem zu langsamem Querrisswachstum als Übergang zu einem oder mehreren anderen Schädigungsmechanismen, so kann man diesen Übergang als Sättigungszustand des ersten Schädigungsmechanismus ansehen.

Einige Ansätze versuchen, die Schädigung „Lastwechsel für Lastwechsel“ exakt zu modellieren. Wenn die Schädigungsmodelle aber jeweils nur für Betriebsbelastungen konstanter Amplitude und konstanten Lastverhältnisses gültig sind, so ist hier weitere Modellbildung nötig. Es werden mehr oder weniger komplexe Schadensakkumulationshypothesen eingesetzt, die auch für die Berücksichtigung der Lastrichtung sorgen müssen. Einfache lineare Schadensakkumulationshypothesen [Mine45, Palm24] berücksichtigen keine Reihenfolgeeinflüsse. Man versucht, dem mit Korrekturfaktoren [HiEZ10] zu begegnen. Mikromechanische, Restfestigkeits- und Reststeifigkeitsdegradationsmodelle bieten teilweise inhärent (aber nicht zwangsläufig) die Möglichkeit, Reihenfolgeeinflüsse darzustellen. Beispiel: Eine bestimmte Spannung wirkt auf einen in der Steifigkeit bereits degradierten Werkstoff stärker schädigend, als zu Beginn der Lebensdauer.

Die Komplexität und die große Zahl der Einflussfaktoren, die auf die Lebensdauer von Faserkunststoffverbunden wirken, verdeutlicht, dass eine Lebensdauervorhersa-

ge ohne weitere Überwachung oft mit großen Unsicherheiten oder Überdimensionierung einhergehen muss. Dabei bietet sich eine Vielzahl an potentiell beobachtbaren Schädigungsindikatoren an. Die meisten basieren auf Degradation der Matrixeigenschaften und der Faser-Matrix-Anbindung. Mit Fragen der Messbarkeit dieser Schädigungsindikatoren beschäftigt sich das folgende Kapitel. Es wird eine Übersicht über verschiedene Messverfahren gegeben, bevor in den weiteren Kapiteln das Konzept „Indikatorschicht“ untersucht und diskutiert wird.

2.4. *Übersicht zu Verfahren zur Messung von Schädigungen in FKV*

Herausforderungen bei der Begutachtung von FKV sind insbesondere in der Inhomogenität des Werkstoffes und in der Vielzahl verschiedener Schadensmechanismen zu sehen.

Die Inhomogenität erschwert die Detektion von Schäden auf verschiedene Weise. Verbundwerkstoffe haben an unterschiedlichen Orten unterschiedliche Materialien und damit Materialeigenschaften. Bei der Prüfung von Werkstoffen ist aber gerade die Änderung dieser Eigenschaften über das Volumen ein Hinweis auf Schäden. In einem an sich inhomogenen Material sind solche „verdächtigen“ Inhomogenitäten schwerer von den natürlichen Schwankungen der jeweiligen Messgröße unterscheidbar.

Die Vielfalt möglicher Schadensmechanismen hat sowohl positive als auch negative Effekte auf die Beurteilung des Werkstoffzustandes. Nachteilig ist, dass viele Messverfahren auf die Erkennung einer Schadensart optimiert sind und somit andere Schadensarten übersehen werden können. Dem muss durch Kombination mehrerer Methoden oder dem Einsatz weniger spezifischer Verfahren begegnet werden. Der Einsatz mehrerer, sich ergänzender Verfahren erhöht den Aufwand und die Kosten. Der Einsatz universellerer Verfahren verringert die Aussagekraft der Ergebnisse– so sie denn auch wirklich alle relevanten Schäden erfassen können.

Die Vielfalt der Schadensmechanismen ist auch vorteilhaft nutzbar, denn viele Zusammenhänge zwischen verschiedenen Schadensmechanismen sind gut untersucht. Ist etwa bekannt, dass eine Art der Schädigung Vorläufer einer anderen ist, so kann man bezüglich der Entwicklung der ersten weniger kritischen Schädigungsart einen Grenzwert definieren, so dass die Entwicklung der zweiten gefährlicheren durch eine frühzeitige Reparatur oder Austausch verhindert werden kann. Hierzu ist allerdings ein genaues Verständnis der Mechanismen nötig. Bei ungenauer Kenntnis der Lasten oder unvorhergesehenen Ereignissen können auch Lastfälle auftreten, die die eigentlich unkritische Schwächung des Werkstoffes betreffen. Dann wird auch ein vermeintlich noch sicheres Bauteil versagen. Die genaue Abwägung aller denkbaren Lastfälle und der Wirkung von Schädigungsarten ist bei der Beurteilung der Einsetzbarkeit von vorgeschädigten Bauteilen also ein zentraler Aspekt. Dennoch ist in vielen Einsatzbereichen Auslegung und Betrieb nach der Maßgabe „frei von Rissen“ nicht sinnvoll. Erste Matrixrisse entstehen schon bei der Produktion der Teile. Auch thermomechanischer Einfluss und Feuchtigkeit erzeugen weitere Risse, so dass ein rissfreies Laminat praktisch kaum existiert.

Die Untersuchung von FKV auf Schädigung ist also von größtem Interesse und befördert die Entwicklung und Anpassung von zerstörungsfreien Prüfverfahren. Diese Prüfverfahren lassen sich nach den Kriterien Messaufwand, Auflösung und zugrundeliegendem Messprinzip (im Folgenden zur Strukturierung gewählt) unterteilen.

Hinsichtlich des Messaufwandes sind oft weniger Fragen der Kosten für die Messtechnik selbst, als vielmehr die Kosten für Zeitaufwand und qualifiziertes Personal entscheidend. Teure Messtechnik und auch teure Spezialisten sind vor allem dann schnell rentabel, wenn Stillstandzeiten, Transport- oder Demontagekosten minimiert werden können. Flexible, mobile Verfahren, die auch am montierten Bauteil eingesetzt werden können, sind daher stark gefragt.

Je nach Zielstellung oder Möglichkeiten des Messprinzips gibt es verschiedene grundsätzliche Herangehensweisen. Es ist möglich, die Schädigung und Werkstoffänderungen auf molekularer oder atomarer Ebene lokal darzustellen oder die Auswirkung auf verschiedene Eigenschaften wie Steifigkeit, Leitfähigkeit oder Wechselwirkung mit elektromagnetischen Wellen integral auszuwerten. Zur zerstörungsfreien Untersuchung der Schädigung in FKV gibt es einige bewährte und weitere vielversprechende Ansätze. Man kann sie nach der der Messung zugrundeliegenden physikalischen Größe einteilen und bewerten.

Steifigkeitsänderung als Messgröße

Mikrorisse, Faser-Matrix-Ablösungen und Delaminationen stellen Schwachstellen dar, die die Steifigkeit des Verbundes beeinflussen. In Laminaten kann diese Steifigkeitsänderung schwer messbar sein. Die Fasern dominieren die Steifigkeit des Werkstoffes, so dass Querrisse die Gesamtsteifigkeit in Hauptlastrichtung mitunter wenig beeinflussen. Dennoch ist eine Auswertung der Steifigkeit oft möglich. Beispiele sind in hochtechnologischen Anwendungen genauso wie im alltäglichen Leben zu finden: Ein bedrohlich biegsamer (biegsamer als bei der letzten Benutzung) Holzsteg über einen Bach wird intuitiv als Hinweis auf eine verminderte Tragfähigkeit gedeutet – vielleicht verursacht durch Ermüdung, Insektenfraß, Sabotage oder Pilzbefall.

Mit einer Protokollierung von Eigenfrequenzen von Bauteilen kann eine Änderung der Steifigkeit gut überwacht werden, wenn die Masse und Massenverteilung unverändert bleibt. Sinnvolle Einsatzgebiete sind Tragflächen von Flugzeugen, Rotorblätter von Windenergieanlagen [GTTS11] oder Drehflüglern, aber auch viele andere Bauteile. Lokale Steifigkeitsänderungen oder steifere Bauteile werden bei höheren Frequenzen ausgewertet. Die Auswertung dieser in vielen Fällen für das menschliche Ohr hörbaren Eigenschwingungen hat ebenfalls eine lange Tradition. Der erfahrene Handwerker erkennt schadhafte Teile oft mit einer Klangprobe. Beim Töpfern, beim Kauf von Geschirr oder Gläsern im Kaufhaus, bei der Klangprobe an Schleifscheiben von Trennschleifern vor der Inbetriebnahme, sogar bei der Qualitätsprüfung von Obst und Gemüse [FGSF10] ist sie nutzbar. Auch beim Testen des Sitzes von Nietverbindungen kann man mit geübtem Ohr oder messtechnischer Unterstützung gut Unregelmäßigkeiten erkennen. Mit aktueller Rechentechnik ist auch ein automatisierter Einsatz in der Qualitätssicherung möglich [Hert03].

Steifigkeitsänderungen können auch durch die Auswertung der Änderung von Verformungsverläufen erkannt werden. Herausforderung ist dabei die Vergleichbarkeit

mit älteren Messungen. Besonders die Anbindung von Dehnungssensoren über längere Zeit ist nicht einfach sicherzustellen. Vielversprechende Ansätze existieren hier mit verschiedenen Varianten faseroptischer Sensorik. Es existieren Varianten mit festen Messstellen – verbreitet ist die Nutzung von Bragg-Gittern [Gras14, GTTS11, ShCh06] – und kontinuierlich messende Fasersensoren [BaFe95, LLKS01]. Eine Dehnungsmessung mit anderen resistiven oder piezoresistiven Dehnungssensoren, und auch faseroptischen Sensoren, die extern appliziert und nicht integriert sind, zeigt oft Probleme mit der dauerhaften Anbindung der Sensoren.

Die Piezoresistivität von isolierten Kohlenstoffaseroovings kann als Dehnungssensor genutzt werden. Sie lassen sich in Laminaten integrieren und werden für einen Einsatz als Sensornetzwerk für Structural Health Monitoring vorgeschlagen. In einer Studie [MüHR13] an 0°/90°-Laminaten zum Zusammenhang von Querrissdichte und Laminatsteifigkeit als Schädigungsmaß wurden eingebettete Kohlenstoffasern zur lokalen Messung der Dehnung eingesetzt.

Elektrische und magnetische Eigenschaften

Die elektrische Leitfähigkeit in CFK als Schädigungsmaß wird erfolgreich im Labormaßstab genutzt [PBSM01, PMMS01, ScBa89, WSKK94]. Herausforderungen sind insbesondere die Kontaktierung und Isolierung der Proben. Sowohl für quasistatische Zugversuche, als auch für Ermüdungsbeanspruchung ist ein Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Schädigung bekannt. Die **elektrischen Widerstandsänderungen** aus Piezoresistivität in Faserrichtung sind verhältnismäßig klein. Der Hauptteil des Messsignals kommt in den in [PBSM01] vorgestellten Versuchen an 0°/90°-Gelegelaminaten aus den 90°-Lagen. Rissbildung in diesen Lagen wird als Hauptursache für die Widerstandsänderung angegeben. Die Rissöffnung unter Last erklärt eine beobachtete Dehnungsabhängigkeit durch den wechselnden Kontakt der Fasern in Querrichtung.

Auch **Wirbelstromprüfverfahren** sind auf leitfähiges Material angewiesen. Mit aktuellen, hochauflösenden Technologien ist die Darstellung von Faserorientierung, Ondulationen, Einschlagschäden, Delaminationen und der Schichtdicke an CFK-Laminaten möglich [HeSc11, KoHH11, Mook01]. Aussagen über den Zustand der Matrix können prinzipbedingt nicht getroffen werden. Das Verfahren eignet sich also sehr gut zur Qualitätskontrolle, denn gleichmäßige und richtige Faserorientierung ist ein wesentliches Qualitätsmerkmal.

Wellenausbreitung im Material

Schallwellen im Festkörper sind der physikalische Hintergrund für verschiedene Messverfahren. Herausfordernd für die Auswertung ist die Anisotropie und damit richtungsabhängige Schallgeschwindigkeiten. Festkörperwellen treten in verschiedenen Moden mit verschiedenen Ausbreitungscharakteristiken und -geschwindigkeiten auf. Naheliegend ist die Untersuchung von Bauteilen mit **Ultraschallverfahren**. Diese unterscheiden sich durch die Art der Anregung/Schalleinkopplung. [Hege07, HoNL11, SRHB12a, TrHa03]. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Ultraschallmesstechnik haben auch die Einsetzbarkeit für FKV verbessert.

Die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von LAMB-Wellen [RSDS11] wurde erfolgreich zur Lebensdauerüberwachung an Rohrproben eingesetzt.

Schallemissionen im hörbaren Bereich als Frühwarnung vor Materialversagen zu nutzen, ist sicher ähnlich alt wie die Menschheit selbst. Verdächtiges Knacken von Holz, typische Geräusche von Eisflächen oder die idealen Schallemissionen, die bei vielen handwerklichen Tätigkeiten erfahrungsgemäß die günstigsten Bedingungen aufzeigen, nutzt der Mensch intuitiv schon immer.

Von mittelalterlichen Zinngießern wird berichtet, sie hätten das „Zinngeschrei“ – hörbare Schallemission beim Biegen von Zinnblechen – zur Qualitätskontrolle des Materials vor dem Gießen genutzt [Tens04]. Das Zinngeschrei entsteht durch interkristalline Reibung und tritt nur bei reinem Zinn auf.

Die messtechnisch fundierte Umsetzung der Schallemissionsmessung folgt seit dem 20. Jahrhundert immer wieder der Entwicklung der elektronischen Möglichkeiten der Speicherung und Analyse der Signale. Die Messtechnik ermöglichte auch erstmals die Verwendung nichthörbarer Frequenzanteile. Pionier war KAISER, der kurz nach dem Zweiten Weltkrieg in München seine Forschung zur Schallemission im Zugversuch an Metall begann [Kais50]. Der KAISER-Effekt wurde in Anerkennung seiner Vorreiterrolle geprägt. Er bezeichnet die sehr geringe Schallemission bei Wiederbelastung bis zum bisher erreichten Lastniveau, gefolgt von deutlicher Emissionszunahme beim Überschreiten dieser Last.

Die Schallemissionsmessung im Kontext anderer Prüfverfahren einzuordnen, wird insbesondere im Hinblick auf das Attribut zerstörungsfrei oft diskutiert [GrOh08]. Im Einsatz während gewöhnlicher Betriebsbelastung kann man tatsächlich von zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) sprechen. Misst man allerdings periodisch mit besonderen Testlasten unter Inkaufnahme einer zusätzlichen Schädigung, um Fehlstellen rechtzeitig zu erkennen, so kann eigentlich nicht von Zerstörungsfreiheit gesprochen werden. Da aber bei Lebensdauerüberwachungsmaßnahmen nur normale Betriebslasten und bei wiederkehrender Prüfung nur mäßig überhöhte Testlasten aufgebracht werden, ist der durch das Verfahren eingebrachte Schädigungsanteil verschwindend gering. Die Zurechnung zum Spektrum der ZfP ist dann begründbar. Im Rahmen der ZfP ist das Verfahren als passives Prüfverfahren eingeordnet. Es wird keine Energie durch die Messtechnik in die Probe eingeleitet. Hinsichtlich der zugrundeliegenden Physik und der Datenverarbeitung bestehen viele Ähnlichkeiten zur Seismologie. Die Schadensdetektion ist immer davon abhängig, ob die bereits vorhandenen Risse auch so belastet werden, dass akustische Emissionen oder neue Risse entstehen. Eine Untersuchung muss also am Bauteil mit den tatsächlichen Lasten oder mit geeigneten Testlasten erfolgen.

Die Schallemissionsmessung an FKV beinhaltet einige Herausforderungen, die beim Einsatz an metallischen Werkstoffen weniger ausgeprägt sind als bei FVW. Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften und stärkere Dämpfung erschweren die Ortung der Schallsignale. Die Fülle verschiedener Schädigungsmechanismen wirft die Frage auf, wie sie akustisch unterschieden werden können. Ausgehend von charakteristischen Merkmalen im Frequenzspektrum der Signale [BoKW92] sind Mustererkennungsverfahren [SHKS09] entwickelt worden, mit denen – mit einiger Vorbereitung – eine gute Trennung von Faserbruch, Matrixbruch und Delamination ermöglicht wird.

Strahlungsreflexion und –transmission

Bezieht man den Begriff Licht auf das gesamte Spektrum elektromechanischer Wellen, so finden sich eine Vielzahl verschiedener Materialprüfverfahren, die mit Lichtremission oder -transmission arbeiten.

Am offensichtlichsten sind **lichtoptische Verfahren**. In der Praxis können Lackrisse auf verborgene Risse hinweisen. Als Laborverfahren zur Identifikation von Dehnungsspitzen wird seit längerer Zeit ein Reißlackverfahren [Tied14] angewandt.

In ihrer Funktion als Schutzschicht gegenüber Umwelteinflüssen werden Lacke aber auf mechanische Beständigkeit und Rissunempfindlichkeit optimiert und zeigen im Idealfall gerade keine Risse. Im Labor wird die mikroskopische Auswertung der polierten Probenkanten vielfach angewendet. Die entstehenden Risse sind dabei nur bei sorgfältig präparierten Oberflächen gut auswertbar. Die Ergebnisse sind durch die Lage am freien Rand durch Freier-Rand-Effekte [BeKr94, HoAK09, Mand70, MiBe06, MiBe08] und durch die Oberflächenpräparation [AlCâ93] beeinflusst. Die Auswertung der Rissdichte an Probenrändern liefert Erkenntnisse zur Rissdichteentwicklung in den verschiedenen Lagen, da alle Schichten des Laminates gleichzeitig zu beobachten sind [Seba12].

Zur effektiven Auswertung der Probenkanten wurde auch erfolgreich die Replikatechnik [ChHa93, MaRe82, SVWV99, TaOK95] eingesetzt, bei der die Proben nicht aus der Prüfmaschine ausgebaut werden müssen, sondern Replikas der Probenkante genommen werden. Diese Replikas bilden die Oberfläche so gut ab, dass sie sich sogar für detaillierte Untersuchungen unter dem Elektronenmikroskop eignen. Selbstverständlich liefert auch die lichtmikroskopische Beobachtung der Probenvorderseite wertvolle Erkenntnisse. Auch hier sind nur bei glatten Oberflächen verwertbare Ergebnisse möglich. Eine besondere Möglichkeit, die Rissentwicklung zu beobachten, bieten porenfrei gefertigte GFK-Proben. Sie können im Durchlicht ausgewertet werden [AdHo06, AdHo10, Bam08, Bam10, Kasu11, Talr94, TrHS08].

Ebenfalls nur an durchsichtigen Proben aus geeignetem Material oder mit besonderen Oberflächenschichten funktioniert die spannungsoptische Auswertung. Hier sind speziell im Durchlicht die Anforderungen an die Transparenz besonders hoch. Spannungsoptik kann prinzipiell sowohl in Durchstrahlung als auch in Rückstrahlung [ShHa11] genutzt werden. Für die Anwendung an undurchsichtigem Material mit Reflexionspolariscope muss eine spannungsoptische Schicht aufgebracht werden [Vish14]. Auswertungsalgorithmen für orthotrope und auch anisotrope Materialien ermöglichen besonders einfach die Anwendung [AgCh82, SuBl87] an glasklarem GFK. Untersucht wurden beispielsweise Spannungsverteilungen an Rissspitzen [ElKh10, KhEW04] und zeitaufgelöste Impactvorgänge [HCZX99] in GFK-Platten.

Andere optisch basierte Messprinzipien nutzen die verschiedenen optischen Felddehnungsmessverfahren. Unter Ausnutzung verschiedener optischer Effekte wird die Verformung der Oberfläche durch den Vergleich von Aufnahmen bei unverformtem und verformtem Zustand ermittelt. Hier sind entweder spezielle Beleuchtung (LASER) und/oder spezielle Lackierungen und teilweise rechenintensive Auswertverfahren vonnöten. Im Labor, wo Fokus und Positionierung des Messbereichs leicht sichergestellt werden können, lassen sich Oberflächenrisse mit digitalen Felddeh-

nungsmessverfahren DIC [DVVD11, OTBH11] oder auch elektronischer Speckle Interferometrie ESPI [LoAV14] vielfach gut darstellen.

Ein am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickeltes Dehnungsmessverfahren [GoSc89] arbeitet mit optischen Gittern, die durch eine speziell strukturierte Harzschicht auf der Probe dargestellt werden. Die optische Dehnungsmessung durch Beugung an Oberflächengittern wurde zur Erkennung von Dehnungsmustern an rissbehafteten FVK-Proben eingesetzt – wie andere optische Feldmessverfahren (ESPI, DIC etc.) auch.

Aktive **Thermographieverfahren** [MMRS14] können ebenfalls zu diesen Verfahren gezählt werden. Langwelliges Licht / Wärme wird auf das Bauteil eingestrahlt. Aus dem zeitlichen Verlauf der Rückstrahlung werden Informationen über die Struktur gewonnen. Punktförmige statt flächige Einstrahlung [Schl12, ScMK12] ermöglicht eine Verbesserung der Auflösung auf Kosten aufwändiger Auswertung. Hier kann nicht nur der zeitliche Verlauf der Wärmeausbreitung in Dickenrichtung, sondern auch der Ausbreitung der eingebrachten Energie in Ebenenrichtung ausgewertet werden. Die weitere Entwicklung wird zeigen, ob dieses Verfahren ebenfalls für die in dieser Arbeit untersuchte Beobachtung der Rissentwicklung in FKV genutzt werden kann.

Auf der anderen Seite des Spektrums elektromagnetischer Wellen sind verschiedene Prüfverfahren mit **Röntgenlicht** angesiedelt. Die einfache Durchstrahlungsprüfung an FKV muss in den meisten Fällen mit Kontrastmitteln [CaRe03, Reif91, Stin86] durchgeführt werden, die in die Risse und Mikrorisse eindringen.

Räumlich auflösende Computertomografie kann je nach Probengröße innere Risse gut darstellen. Mikrorisse lassen sich aber nur bei sehr kleinen Proben [Bans07, RZMR08] auflösen. Die meisten bekannten ZfP-Verfahren auf Basis von Röntgenstrahlung arbeiten mit der Auswertung der Absorption.

Eine Möglichkeit, Informationen über die innere Oberfläche von FKV-Proben zu erhalten, ist die Röntgenrefraktionstopografie. Seit 1987 wird an der BAM die Refraktion an Grenzflächen und inneren Oberflächen zur Analyse von Verbundwerkstoffen [HeHa93, HHLU87] genutzt. Der Aufbau ist aus einem Röntgenkleinwinkelstreuenaufbau abgeleitet. Das Verfahren ist nur im Labor einsetzbar. Weitere Informationen zum auch für diese Arbeit mit eingesetzten Verfahren folgen im Kapitel 3.1.1.

Andere Teile des Spektrums, wie Gigahertzstrahlung oder Terrahertzstrahlung bieten ebenfalls weitere Möglichkeiten.

3. Eingesetzte Untersuchungsmethoden

3.1. Messverfahren

Von den vorgestellten Messverfahren wurde in dieser Arbeit hauptsächlich mit vieren gearbeitet. Neben der mitgemessenen Dehnung, die in Steifigkeitsänderung umrechenbar ist, sind dies die Röntgenrefraktionsmessung, die Schallemissionsmessung und die visuelle Inspektion der Proben. Alle Messverfahren dienen als Hilfsverfahren zur Untersuchung der vorgeschlagenen Rissdarstellung durch eine optische Indikatorschicht.

3.1.1. Röntgenrefraktionsmessung

Prinzip der Messung

Die Röntgenrefraktionsmessung an Faserverbundwerkstoffen zur Bestimmung der Rissdichte basiert auf der Anordnung zur Messung der Röntgenkleinwinkelstreuung (Small Angle X-ray Scattering SAXS). Nach HENTSCHEL [HeHa93] ist die Refraktion proportional zur inneren Oberfläche des Werkstoffes und Diffraktionseffekte sind ihr gegenüber klein. Die innere Oberfläche stellt Grenzflächen zwischen Fasern und Matrix, produktionsbedingte Fehlstellen oder entstandene Risse dar. Eine Zunahme der inneren Oberfläche beschreibt damit also eine Zunahme der Rissdichte, wenn Faserdicke und –art, die Matrix und damit im allgemeinen auch deren für die Röntgenrefraktion und –diffraktion relevanten Stoffeigenschaften gleich bleiben. Die Methode wurde an der BAM entwickelt und erfolgreich eingesetzt [HaHS01, HKLM07, OBTH11, OTBH11, TGHM10, Trap02, TrHa06, TrHS08]. Durch flächiges Abrastern lassen sich Rissdichtenverteilungen aufnehmen. Der durch eine KRATKY-Kamera (siehe Abbildung 20) kollimierte Röntgenstrahl ist etwa 2-3mm breit aber nur 0,05mm hoch.

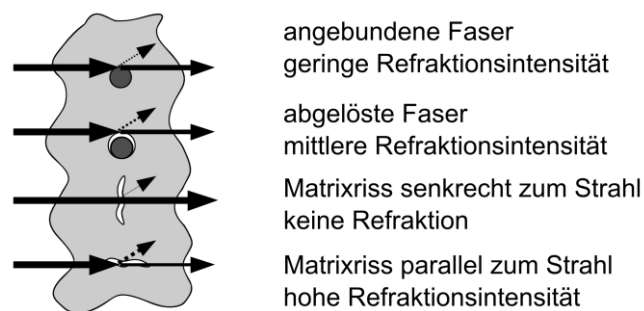


Abbildung 19 Refraktion an Grenzflächen im Faserkunststoffverbund

Beim Durchstrahlen der Probe tritt Refraktion an Grenzflächen auf – an Faser-Matrix-Grenzflächen, Poren und Rissen. Der Refraktionswinkel ist klein und die Strahlstopplende ist so eingestellt, dass der relevante Winkelbereich der Refraktion am Detektor erfasst wird. Der Absorptionsdetektor ist nicht im Primärstrahl (siehe Abbildung 20) angeordnet, da dessen Intensität zu groß wäre. Die Absorptionseigenschaften der Probe werden indirekt durch den transmittierten Primärstrahl bestimmt, indem

dieser teilweise durch eine Streufolie auf einen weiteren Detektor gelenkt wird. Ein Maß für die inneren Oberflächen [TrHS08] ergibt sich aus dem Verhältnis der Intensität von Absorptions- und Refraktionsdetektor I_A und I_R . Mit I_{A0} und I_{R0} als den Nullwerten (also ohne Probe im Messbereich) von Absorptions- und Refraktionsintensität kann man einen Refraktionswert errechnen [HeHa93]

$$C_m = \frac{I_R}{I_A} \frac{I_{R0}}{I_{A0}} - 1 \cdot \frac{1}{d} \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Absorption in der Probe folgt mit der Probendicke d und dem Absorptionskoeffizienten μ dem LAMBERT-BEER'schen Gesetz

$$I_A = I_{A0} \cdot e^{-\mu \cdot d} \quad \text{Gleichung 4}$$

Als von der Probendicke unabhängige Größe wird

$$C_m \mu = \frac{C_m \cdot d}{-\ln(I_A / I_{A0})} \quad \text{Gleichung 5}$$

abgeleitet.

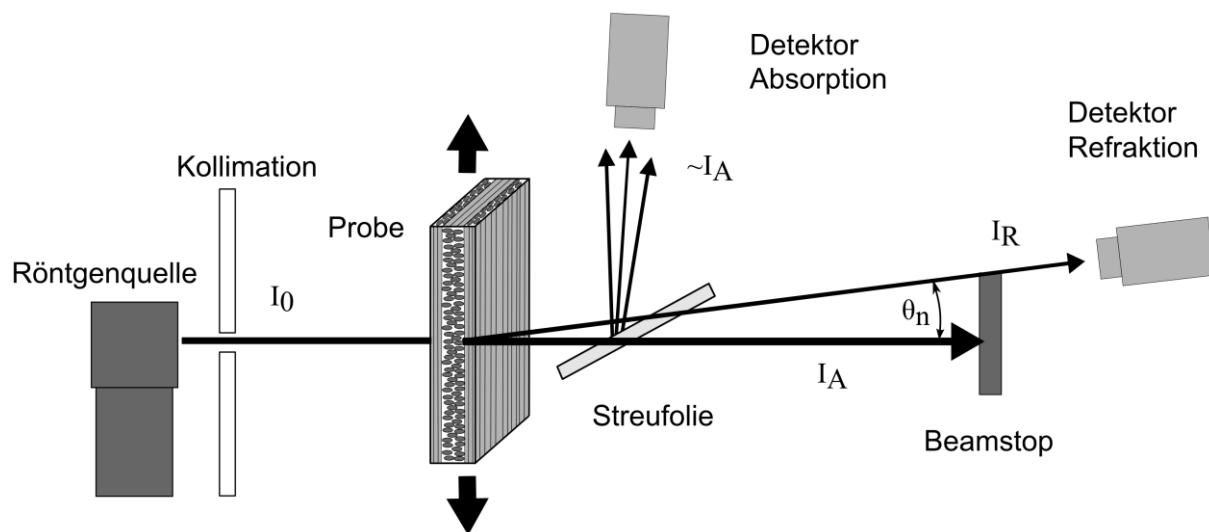


Abbildung 20 Prinzip der Röntgenrefraktionsmessung

Einflussgrößen auf die Röntgenrefraktion

Wie in Gleichungen 3 und 4 ersichtlich spielt die Probendicke eine Rolle sowohl für die Refraktion als auch für die Absorption in der Probe, weshalb eine davon unabhängige Größe gewählt wird.

Weiterhin sind die gewählten Wellenlängen und die dielektrischen Eigenschaften der Materials Einflussgrößen auf Refraktion und Absorption.

Da die Fasern für den Messstrahl Zylinderlinsen darstellen, ist der Refraktionswert – wie auch in Abbildung 19 angedeutet – quer zur Faser am größten. Somit können auch Faserorientierungen zerstörungsfrei dargestellt werden. Dies ergibt sich aus der Ausrichtung der Grenzflächen zum Röntgenstrahl und gilt natürlich auch für jegli-

che andere Flächen - wie etwa Rissoberflächen. Dies ist analog zur Lichtbrechung zu verstehen (Abbildung 25) nur in anderen Winkelbereichen auftretend. Durch die Orientierung des Strahls zur Probe können also bestimmte Oberflächen (Risse, Faser-Matrix-Grenzflächen oder Faserablösungen) hervorgehoben oder ausgeblendet werden.

Die Dicke der Fasern führt bei gleichem Faservolumengehalt zu verschiedenen inneren Oberflächen. Dies kann gut als Validierungsversuch [TrHS08] herangezogen werden.

Der Brechungsindex von Fasern und Matrix bestimmt die Brechungswinkel und damit die nach der Blende gemessene Intensität.

Eingesetzte Messanordnung

Die in Kapitel 4.1 vorgestellten Ergebnisse wurden an einer eigens neu aufgebauten Anlage durchgeführt. Die Besonderheit dabei ist die Integration eines speziell entwickelten Lastrahmens in die Messanlage. Mit ihm können bis zu 200mm lange und 50mm breite Proben unter mechanischer Belastung von bis zu 17kN durchstrahlt werden. Die Röntgenröhre mit Kupferanode ist besonders für CFK geeignet.

3.1.2. Schallemissionsmessung

Prinzip der Messung

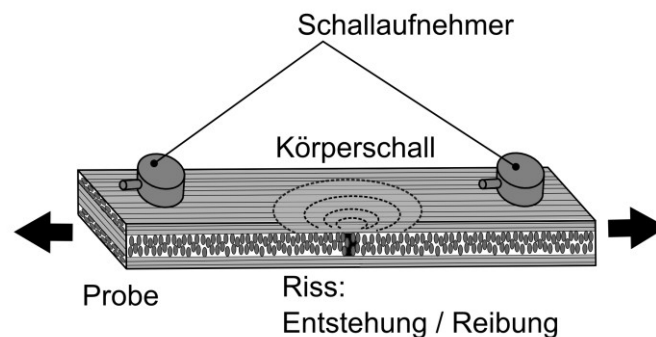


Abbildung 21 Prinzip der Schallemissionsmessung

In Abbildung 21 ist das Prinzip der Schallemissionsmessung an einer zugbelasteten FKV-Probe dargestellt. Das Messsignal entsteht beim Anlegen äußerer Last durch neue entstehende Risse oder durch Reibung der Rissufer bereits vorhandener Risse. Durch den Einsatz mehrerer Sensoren kann über die Laufzeitunterschiede der Entstehungsort der Schallwellen ermittelt werden. Körperschall kann verschiedene Wellenmoden annehmen. In dünnen Strukturen sind dies verschiedene Longitudinal- und Transversalwellen, die LAMB [Lamb17] analytisch beschrieb, weswegen sie auch als LAMB-Wellen bekannt sind. Zur Untersuchung der Rissentwicklung in FKV im Labor wird das Verfahren eingesetzt, um frühzeitig und in Echtzeit Daten zu erhalten. Außerdem vorteilhaft ist die Möglichkeit, parallel zu anderen Verfahren zu messen [AASS12, Beat97, Bohs00, Bohs04, Bohs81, Bohs92, BoKr92, OrBT11].

Eingesetzte Messanordnung

Eingesetzt wurden kleine Piezosensoren PICO der Firma PHYSICAL ACOUSTICS an einem Messsystem desselben Herstellers. Sie konnten nach Überprüfung dieser Vorgehensweise durch Vorversuche einfach und platzsparend mit PVA-Schmelzkleber an die Probe angekoppelt werden. Aufgezeichnet wurden transiente Signale und die klassischen Schallemissionsparameter wie Amplitude, Signalenergie etc. . Ähnlich wie in Abbildung 21 sind die zwei Sensoren an den Enden der Proben nahe der Einspannung angebracht.

3.1.3. Darstellung der Matrixrisse mit sichtbarem Licht

Bei jeder Art von Werkstoffversuchen ist der Experimentator auch nach Möglichkeit im Wortsinn Beobachter der Versuche. Änderungen der optischen Anmutung der Werkstoffe sind die offensichtlichsten Indikatoren für Änderungen der Werkstoffstruktur. So werden Werkstoffoberflächen, Schliffe und Schnitte optisch untersucht wo immer es sinnvoll erscheint.

Prinzip der Messung

Weiße Stellen im GFK-Laminat sind aus der Praxis als einfacher Schadensindikator bekannt. Crazing ist eine Form der Mikrorissbildung in spröden amorphen Kunststoffen. Die Risse haben keine definierten Ränder, sondern werden noch von gestreckten Molekülketten überbrückt. Crazing wird als typisch für schwach vernetzte Kunststoffe angesehen. Stark vernetzte Systeme wie Epoxidharze zeigen eher Scherbandfließen [Meng90, Walt03]. Die Auswertung der Weißfärbung bei der Untersuchung der Zähigkeit einer PVC-Modifikation sei als ein Beispiel genannt [Bohs81]. Weißfärbung in GFK beruht hauptsächlich auf anderen Prozessen. Risse und Faser-Matrix-Ablösungen stellen – ebenso wie die aufgrund von Crazing oder Scherbandfließen eingetrübten Bereiche in anderen Kunststoffen – Grenzflächen dar, an denen sich Dichte und Wellenwiderstand ändern. Damit treten mit elektromagnetischen Wellen Brechung und Streuung auf. Die Wechselwirkung optischer Strahlung mit Grenzflächen in ansonsten transparenten Stoffen führt zu gerichteter Reflexion und Refraktion an Grenzflächen mit sehr geringer Rauigkeit im Verhältnis zur Wellenlänge und zu diffuser Reflexion an Grenzflächen mit größerer Rauigkeit. Je nach Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung werden also Grenzflächen entweder durch die vermehrte Rückstrahlung von Licht oder die Verminderung der Transmission erkennbar.

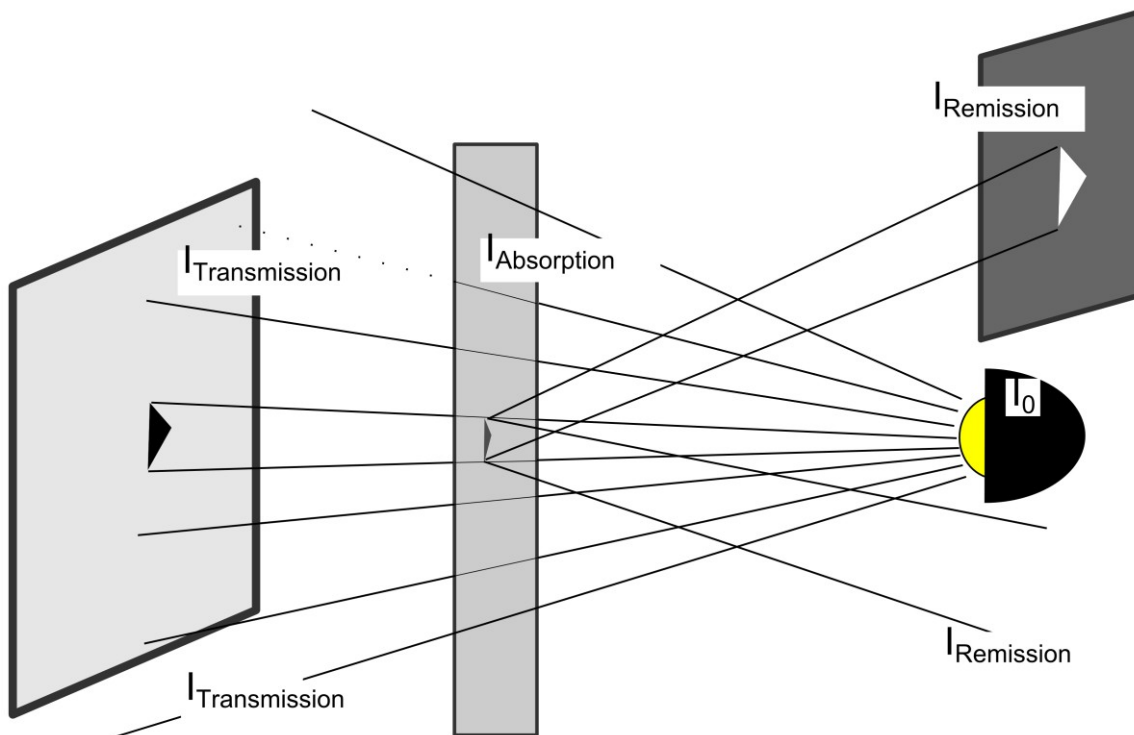


Abbildung 22 Abbildung von Eintrübungen in Transmission und Remission

Die auf eine Fläche eingestrahelte Energie wird durch Remission an Grenzflächen und Absorption im Material in verschiedene Anteile (Abbildung 22) zerlegbar:

$$I_0 = I_{Remission} + I_{Absorption} + I_{Transmission} \quad \text{Gleichung 6}$$

Die Remission setzt sich aus gerichteter und diffuser Reflexion (siehe auch weiter unten) zusammen.

$$I_{Remission} = I_{gerichtete Refl.} + I_{diffuse Refl.} \quad \text{Gleichung 7}$$

Die Absorption von Strahlung im Stoff wird durch das LAMBERT-BEER'sche Gesetz (Gleichung 4) beschrieben. Mit dem Absorptionskoeffizienten μ und der Schichtdicke d ergibt es sich umgeformt von transmittierter zu absorbierte Strahlung ohne Berücksichtigung von Remission zu

$$I_{Absorption} = I_0 \cdot (1 - e^{-\mu d}) \quad \text{Gleichung 8}$$

Der Absorptionskoeffizient μ und auch die Remissionseigenschaften sind im Allgemeinen wellenlängenabhängig.

Diffuse Reflexion

Die ideale diffuse Reflexion (Abbildung 23 a) kann mit dem LAMBERTschen-Cosinusgesetz (Gleichung 9 und Abbildung 24) beschrieben werden.

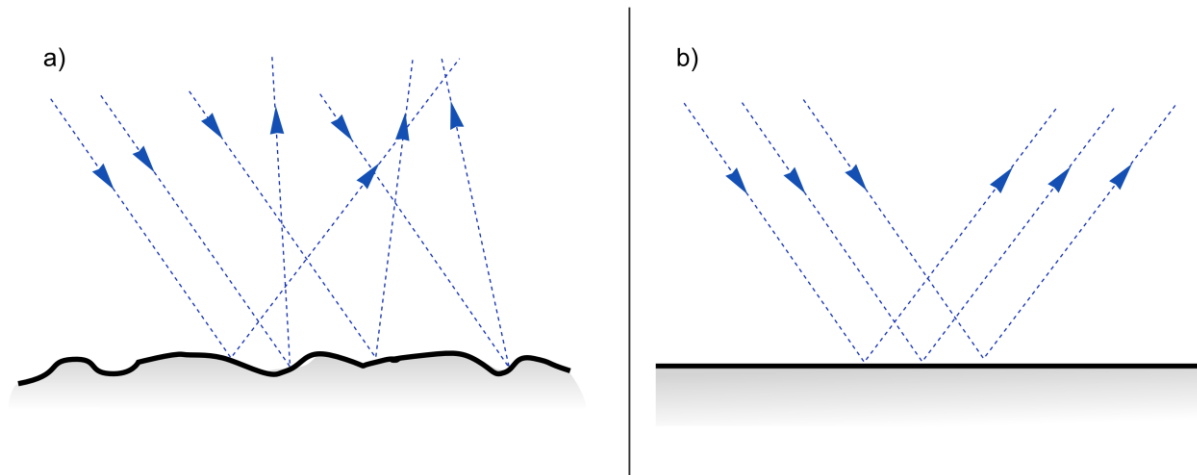


Abbildung 23 Diffuse (a) und gerichtete (b) Reflexion

Es besagt, dass für einen idealen Lambert-Strahler die Strahlintensität bei konstanter Strahldichte kreisförmig verteilt ist.

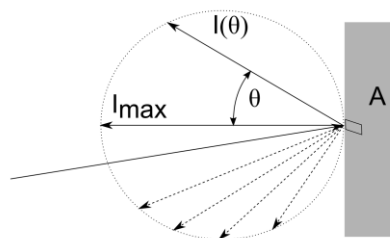


Abbildung 24 LAMBERTsches Cosinus-Gesetz

Für das menschliche Auge erscheint die Fläche von jeder Richtung gleich hell. Schwarze Strahler sind LAMBERT-Strahler. In der Praxis wird dies nie erreicht.

$$I(\theta) \sim A \cdot \cos(\theta)$$

Gleichung 9

Selbst Referenzmaterialien [Pt07] weisen eine gewisse Richtungsabhängigkeit auf. In der Physik und insbesondere der Astronomie wird für das Verhältnis aus remittierter zu eingestrahelter Strahlung der Wert Albedo genutzt. In der Industrie existieren zur Quantifizierung der Remission verschiedene Definitionen des Weißgrades, die vorrangig die physiologische Wahrnehmung der Farbe Weiß berücksichtigen.

Gerichtete Reflexion

Die gerichtete Reflexion ist (Abbildung 23 b) durch das Brechungsgesetz nach SNELLIUS (Gleichung 14) und die FRESNELschen Formeln (Gleichung 11 und Gleichung 12) beschreibbar.

Für einen Riss in GFK mit sehr ähnlichem Brechungsindex von Matrix und Faser oder reinen Matrixrissen kann man vereinfacht von einem Spalt mit näherungsweise parallelen Grenzflächen mit einem Übergang vom Brechungsindex von Epoxidharz zu Vakuum (ca. =Luft) und einem weiteren Übergang zurück zu Epoxidharz oder zur Glasfaser ausgehen. Hierbei wird von einer absolut glatten Bruchfläche ohne Splitter oder Abrieb der Bruchflächen ausgegangen.

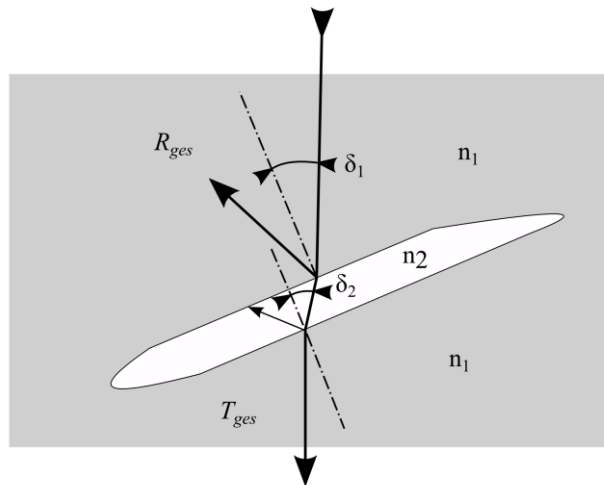


Abbildung 25 Gerichtete Reflexion an Einzeleinschnitt

Nach Abbildung 25 gelten mit δ_1 als Einfallswinkel und δ_2 als Winkel des gebrochenen Strahls, sowie $n_2 = 1$ für Vakuum sowie näherungsweise für Luft und $n_1 = 1.6$ für Epoxidharz die FRESNELSchen Gleichungen. Sie können für den betrachteten Fall dielektrischen Materials und gleicher magnetischer Permeabilität vereinfacht genutzt werden.

Man beschreibt den Transmissionsfaktor der transmittierten Strahlungsamplitude für senkrechte Lichtpolarisation,

$$t_s = \frac{2n_1 \cos(\delta_1)}{n_1 \cos \delta_1 + n_2 \cos(\delta_2)} \quad \text{Gleichung 10}$$

und die für parallele Polarisation:

$$t_p = \frac{2n_1 \cos(\delta_1)}{n_2 \cos \delta_1 + n_1 \cos(\delta_2)} \quad \text{Gleichung 11}$$

Der Transmissionskoeffizient als Verhältnis von transmittierter zu eingestrahelter Energie ergibt sich zu

$$T_s = \frac{n_2 \cos \delta_2}{n_1 \cos \delta_1} t_s^2 \quad \text{Gleichung 12}$$

und für parallele Polarisation

$$T_p = \frac{n_2 \cos \delta_2}{n_1 \cos \delta_1} t_p^2 \quad \text{Gleichung 13}$$

Mit dem SNELLIUSschen Brechungsgesetz

$$n_1 \sin \delta_1 = n_2 \sin \delta_2 \quad \text{Gleichung 14}$$

und der Anwendung der obigen Gleichungen jeweils für den Übergang von Matrix zu Spalt und zurück von Spalt zu Matrix ist für die gesamte transmittierte Energie in Abbildung 26 dargestellter Verlauf zu errechnen.

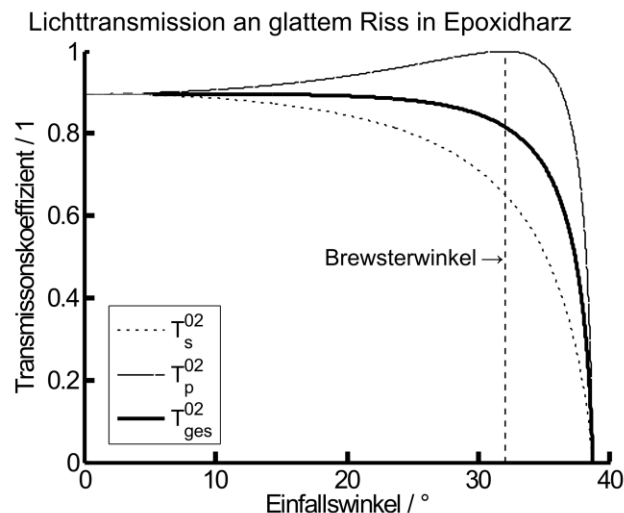


Abbildung 26 Transmittierte Energie bei gerichteter Reflexion

In Abwesenheit von Absorption gilt für die Transmissions- und Reflexionskoeffizienten:

$$1 = T_{ges} + R_{ges}$$

Gleichung 15

Beim BREWSTERwinkel oder Polarisationswinkel von ca. $32,0^\circ$ bei $n_1 = 1.6$ und $n_2 = 1$ hat die Amplitude der Reflexion der parallel zur Einfallsebene polarisierten Strahlung einen Nulldurchgang. Es wird nur senkrecht polarisiertes Licht reflektiert bzw. nur parallel polarisiertes Licht noch teilweise transmittiert. Beim Grenzwinkel von ca. $38,7^\circ$ bei $n_1 = 1.6$ und $n_2 = 1$ tritt Totalreflexion auf. Für die Rissdarstellung sind damit folgende Schlüsse zu ziehen:

In Laminaten treten bevorzugt Risse quer zur Lastrichtung oder Delaminationen auf. Querrisse werden nach obigen Überlegungen durch den Winkel von ca. 90° also Licht vollständig reflektieren. Im Durchlicht sind sie als schwarze Objekte gut erkennbar. Im Auflicht ist die Reflexion zwar auch maximal, durch den flachen Winkel jedoch nicht in Beobachtungsrichtung. Einzelne, glatte Risse unter diesem Winkel reflektieren demnach durch ihre geringen Ausmaße in Beobachtungsrichtung nicht sehr stark. Für Delaminationen mit perfekt glatten Bruchflächen wäre die Transmission groß und damit weder im Durchlicht noch im Auflicht ein großer Messeffekt zu erwarten. Im realen Werkstoff sind diese Delaminationen jedoch rau und zerklüftet und damit gut darstellbar.

3.2. Konzept der rissanzeigenden Indikatorschicht

Die Beobachtung der Rissentwicklung an durchsichtig gefertigtem Probenmaterial wird im Labormaßstab erfolgreich eingesetzt. In Situ ist die Anwendung jedoch kaum möglich. Allenfalls bei der Begutachtung von Bauteilen nach außergewöhnlichen Belastungen – etwa harten Landungen bei Leichtflugzeugen – hat sich die gezielte Suche nach „weißen Stellen“ als effektiv erwiesen. Ansonsten ist die Transparenz – auch von gut gefertigten – GFK-Laminaten meist nicht ausreichend, um entstehende Rissdichte hinreichend gut von fertigungsbedingter Trübung unterscheiden [TGHM10] zu können.

Bei der Verwendung anderer Fasern als der Glasfaser – insbesondere der Kohlenstofffaser – ist Transparenz des Laminates für Licht überhaupt nicht möglich. Die Rissdichtenentwicklung ist aber vergleichbar, was Fotos von Lichtspiegelungen an glatten CFK-Proben für die Oberfläche der Proben oder Röntgenrefraktionsscans für das gesamte Probenvolumen veranschaulichen können.



Abbildung 27 Rissmuster an der Oberfläche einer 0°/90°-Gewebe-Probe nach Schwingbelastung bei schrägem Lichteinfall

Prinzip der Messung

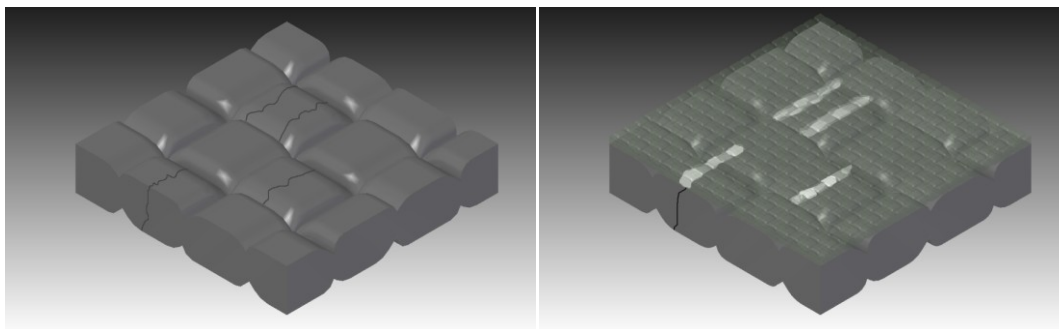


Abbildung 28 Indikatorschicht - schematisch, ohne Schicht (links) und mit Anzeige in der Schicht (rechts)

Ziel ist es, die sichtbaren Vorteile der optischen Beobachtung der Rissentwicklung auch außerhalb des Labors und/oder auch für andere Werkstoffkombinationen Epoxidharz-GFK nutzen zu können. Dazu soll eine dünne, feinere Glasfaser-Kunststoff-Schicht die Alterung der Substratschicht anzeigen. Dies kann über zwei verschiedene Mechanismen geschehen:

- Als **Stellvertreterschicht** erfährt die Glasfaserschicht dieselben Dehnungen und durch angepasste Webart und Faserform auch lokal dieselben Dehnungsüberhöhungen auf der Mikroebene. Beim Einsatz einer Matrix in der Stellvertreterschicht, die dieselben Ermüdungseigenschaften aufweist wie das Grundmaterial oder bei identischer Matrix, kann man an Probenversuchen die Rissbildung in der Stellvertreterschicht mit der Lebensdauer des Substrates korrelieren.
- Als **Indikatorschicht** stellt die Glasfaserschicht Ort und Relevanz von Rissen in der obersten Schicht des Grundwerkstoffes dar. In der Indikatorschicht über einem solchen Riss herrschen besonders hohe Dehnungen vor, die zu einer

Verfärbung der Indikatorschicht führen – wie in Abbildung 28 skizziert. Die Ursache dieser Verfärbung wird in folgenden Kapiteln untersucht.

Beide Varianten sind unter Umständen nicht klar zu trennen, da beispielsweise die Rissbildung über viele Lastwechsel hinweg geschieht oder auch umgekehrt bei beabsichtigter Nutzung als Stellvertreterschicht alle Dehnungsinhomogenitäten des Substrates von der Schicht nachvollzogen werden. Versuche sollen zeigen, ob die Darstellung der Risse eher im Sinne einer Indikatorschicht oder Stellvertreterschicht zuverlässig funktioniert. Außerdem wird der Übertragungsmechanismus von Substrat in die Schicht untersucht und erklärt.

3.3. Experimente zur Untersuchung des Konzeptes

Um die Einsetzbarkeit des Konzeptes „Indikatorschicht“ bewerten zu können, wird zunächst gezeigt, wie die Entwicklung von Matrixrissen als Schädigungsvariable einsetzbar ist. Besonders anschaulich und effektiv ist dies an lichtdurchlässigen GFK-Proben möglich. Dabei ist im Wesentlichen das Messprinzip mit dem Konzept „Indikatorschicht“ vergleichbar, auch wenn in dem einen Fall die Transmission und im anderen die Remission ausgewertet wird.

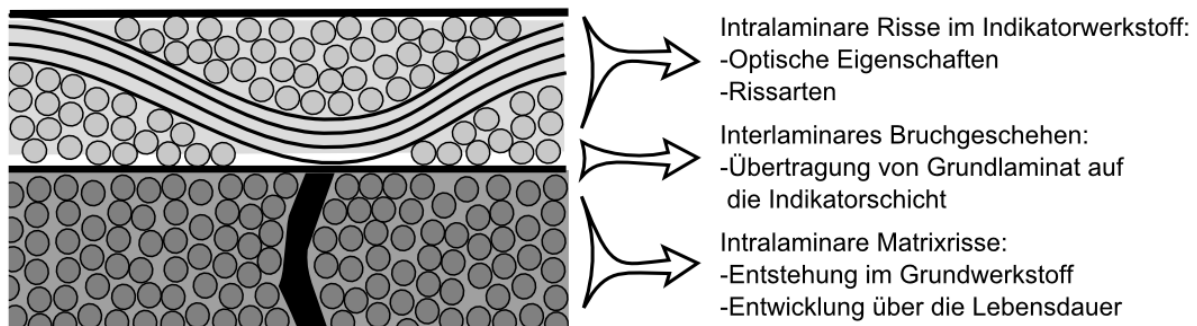


Abbildung 29 Untersuchungen zum Konzept der Indikatorschicht

Für die Rissentwicklung im für die Untersuchung des Konzeptes verwendeten CFK-Laminat liegen Ergebnisse vor, bei denen die Rissentwicklung mit Röntgenrefraktionsmessung und Schallemissionsmessung untersucht wurde. Die Rissentwicklung der isolierten Indikatorschicht wird an Proben aus 36 Lagen dieses Halbzeuges durchgeführt. Im nächsten Schritt wird untersucht, wie sich die Risse in der Probe in der Indikatorschicht abbilden. Hierzu werden Versuche an 0°/90°- und +/-45°-CFK-Proben mit Indikatorschicht lichtmikroskopisch ausgewertet. Die Eignung der Indikatorschicht als Lebensdauersanzeiger sowie das Zusammenwirken der Schicht und des Grundlaminates unter zyklischer Belastung wird durch die Auswertung der Rückstrahlung an Schwingversuchen untersucht.

Das experimentelle Vorgehen wird also – wie in Abbildung 29 dargestellt – nach folgenden Fragen strukturiert:

- Wie verhält sich die Rissbildung in den verwendeten CFK-Proben? (Experimente mit Röntgenrefraktionsmessung und Schallemissionsmessung in Kapitel 4.1)
- Eignet sich die Zwischenfaserrissentwicklung in GFK-Proben als Zustandsanzeiger? (Belastungsexperimente an GFK-Proben im Durchlicht in Kapitel 4.2)

- Wie verhält sich die Rissbildung im Werkstoff der isolierten Indikatorschicht? (Belastungsexperimente und ZfP an Laminaten aus den für die Indikatorschicht verwendeten Materialien siehe Kapitel 4.3)
- Auf welche Art erfolgt die Rissübertragung zwischen Probe und Indikatorschicht? (Untersuchung von CFK-Laminaten mit Indikatorschicht siehe Kapitel 4.4)
- Wie entwickelt sich die Remission der Indikatorschicht bei der schwingenden Beanspruchung von Proben? (Belastungsexperimente an CFK-Laminaten mit Indikatorschicht in Kapitel 4.5)

3.3.1. Mechanische Werkstoffuntersuchungen – Versuche

Die Untersuchungen beschränken sich auf typische Belastungsarten an orthotrop aufgebauten Laminaten (siehe 3.3.2).

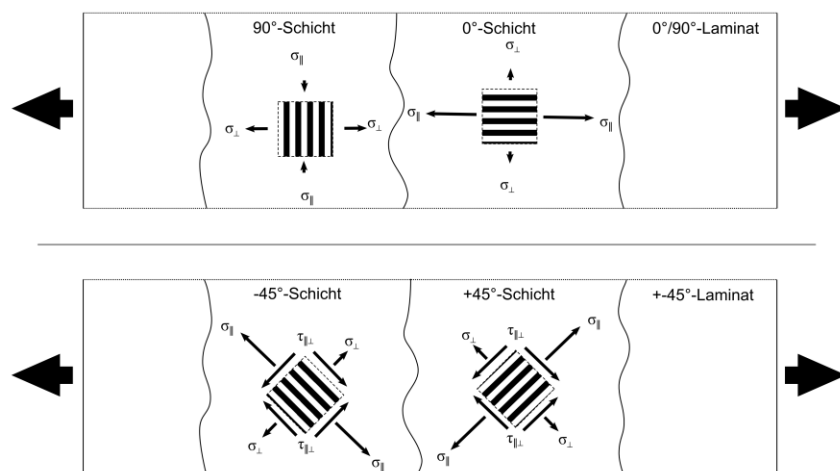


Abbildung 30 Schematische Darstellung der Belastung der Einzelschichten in ausgeglichenen 0°/90°- (oben) und +/-45°-Laminaten (unten) unter Zuglast

Mit Zugversuchen an 0°/90°- und +/-45°-orientierten ergeben sich in den einzelnen Schichten des Laminates Spannungszustände, die viele in realen Bauteilen auftretenden Belastungen gut repräsentieren. Dies sind faserparalleler Zug in Längsschichten und fasersenkrechter Zug in Querschichten von 0°/90°-angeordneten, sowie Schub-Zug-Belastung in +/-45°-orientierten Laminaten. Es werden verschiedene Belastungs-Zeit-Funktionen eingesetzt. Diese werden den Erfordernissen der Prüfverfahren angepasst. Die einfachste ist der zügige Zugversuch.

Zugversuch

Die Belastung auf den Werkstoff wird hierbei üblicherweise mit einer festen Traversengeschwindigkeit bis zum Bruch gesteigert. Die minimale Instrumentierung hierbei ist ein Kraft- und ein Wegsensor, woraus mit den Probenabmessungen die technische Spannung und Dehnung errechnet werden können. Er wird zur Bestimmung von Steifigkeiten und Festigkeiten eingesetzt. Unterstützt von verschiedenen Prüfverfahren – aber auch schon aus dem Spannungsverlauf – kann damit an Verbundwerkstoffen der Versagensbeginn von Einzelschichten ermittelt werden.

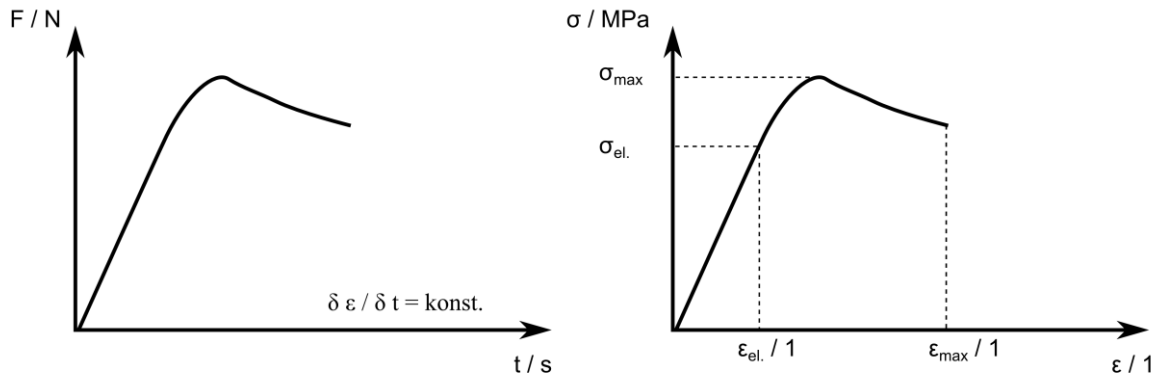


Abbildung 31 Schematische Darstellung des Kraft/Zeit- und des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs eines zügigen Zugversuchs

Für die Untersuchung der Indikatorschicht werden Zugversuche zur Charakterisierung des Grundwerkstoffs, des Indikatorschichtwerkstoffs und zur Untersuchung des Verhaltens des beschichteten Probenmaterials unter zügig aufgebrachttem Zug eingesetzt. Beim Einsatz von lichtoptischen Verfahren ist wegen der kurzen Belichtungszeiten keine Unterbrechung des Versuchs zur Bildaufnahme nötig.

Stufenzugversuch

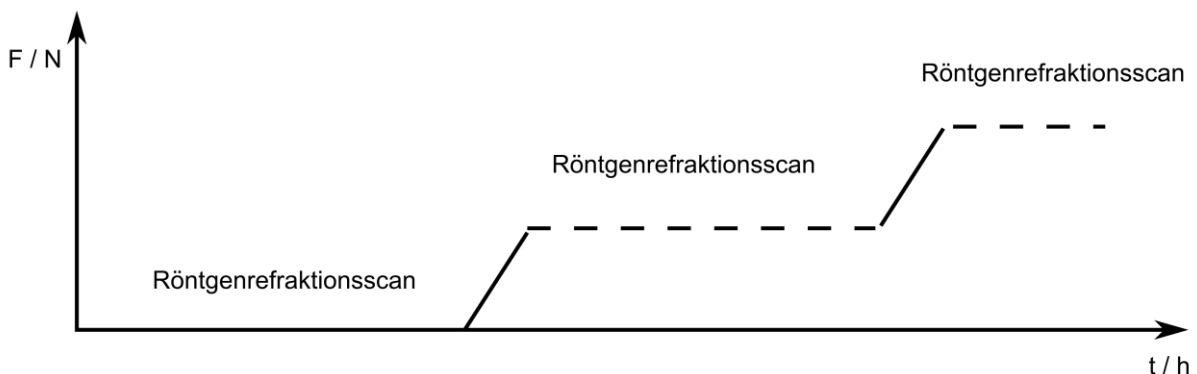


Abbildung 32 Versuchsablauf des Stufenzugversuchs

Für das Röntgenrefraktionsverfahren sind Scanzeiten von mehreren Minuten bis hin zu mehreren Stunden nötig. Deshalb muss der Zugversuch jeweils unterbrochen werden, was eine gestufte Belastungszunahme ergibt. Dies lässt viel Zeit für Lastumlagerungen und nichtlineare Werkstoffreaktionen, so dass die Ergebnisse aus Stufenzugversuchen von denen der zügigen Zugversuche differieren können. Weiterhin ist durch die diskreten Laststeigerungsschritte die Auflösung gröber.

Schwingversuche

Von besonderem Interesse ist das Verhalten der Werkstoffe und insbesondere mit der Indikatorschicht unter schwingender, betriebsähnlicher Belastung. In den Experimenten für die vorliegende Arbeit wurden Flachproben sinusförmig mit Zug- und Druckkräften belastet. Je nach Lastverhältnis/Ruhegrad R liegt die Sinusschwingung stärker im Zug- oder im Druckbereich.

Oberspannung σ_o , Unterlast σ_u und Amplitude σ_a ergeben sich mit:

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad \text{Gleichung 16}$$

also zu

$$\sigma_u = R \cdot \sigma_o \quad \text{Gleichung 17}$$

und

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_o - \sigma_u)}{2} = \frac{(\sigma_o - R \cdot \sigma_o)}{2} \quad \text{Gleichung 18}$$

In den Experimenten wurden $R = -1$ (Wechselast) und $R = 0,1$ (zugschwellende Belastung) verwendet. Dabei ist der angegebene Spannungswert in MPa die Oberspannung σ_o . Während der schwingenden Belastung ist die Datenaufzeichnung aus praktischen Gründen zumeist auf die Aufzeichnung von Minima und Maxima der Prüfmaschinendaten beschränkt. Messungen mit externen optischen Verfahren – etwa dem fotografischen Auswerteverfahren zur Indikatorschicht – werden in kurzen Pausen (etwa an den Zeitmarken t_1 bis t_6 in Abbildung 33 Schwingversuch, schematische Darstellung des Verlaufs der aufgetragenen Spannung) durchgeführt. Für Messungen der Röntgenrefraktion sind längere Messzeiten (z.B. zwischen den Zeitmarken t_3 und t_4 in Abbildung 33) erforderlich. Ohne Nutzung der in die Röntgenanlage integrierten Prüfrahmens muss die Probe aus der Prüfmaschine ausgespannt und in die Röntgenkammer verbracht werden.

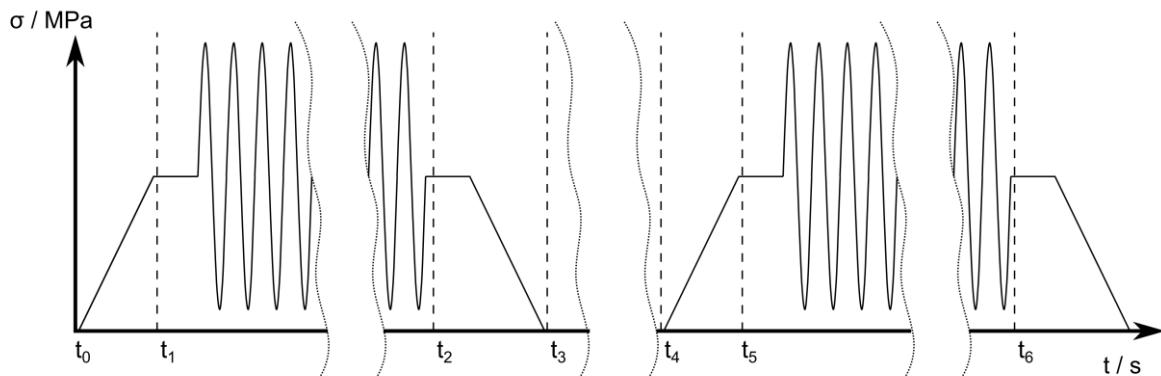


Abbildung 33 Schwingversuch, schematische Darstellung des Verlaufs der aufgetragenen Spannung

3.3.2. Werkstoffe und Eigenschaften

Matrixwerkstoffe

Als Matrix der untersuchten Faserkunststoffverbunde werden am Markt etablierte Epoxidharzsysteme (Tabelle 1) eingesetzt. In den CFK-Laminaten wird Araldite®LY556/ Aradur®917/ DY070 von HUNTSMAN verwendet. Dieses niedrigviskose Standardsystem ist heißhärtend und für Wickelverfahren, Pultrusion und Injektionsverfahren vorgesehen. Mit dem Imidiazol-Beschleuniger DY070 kann die Aushärtezeit angepasst werden. Bei einer gewählten Dosierung von 100/90/1 (Harz/Härter/Beschleuniger) (52,36%/47,12%/0,52%) ergibt sich eine Topf-

zeit von 100h bei Raumtemperatur und 5h bei 40°C, was eine leichte Fertigung ermöglicht.

Tabelle 1 Daten der Matrixwerkstoffe

	Steifigkeit (Quelle)	Zugfestigkeit (Quelle)	Bruchdehnung (Quelle)
LY556/917/070	3,1 – 3,3 GPa [Hunt07]	83 – 93 MPa [Hunt07]	5,0 – 7,0 % [Hunt07]
LR135/LH137	2,9 – 3,2 GPa [Mgs06]	68 – 80 MPa [Mgs06]	7,0–10,0 % [Mgs06]
LR285/LH287	3,0 – 3,3 GPa [Hexi06]	70 – 80 MPa [Hexi06]	5,0 – 6,5 % [Hexi06]

Für Untersuchungen zur Lichttransmission an GFK wurden Ergebnisse mit Werkstoffen aus der Windkraftbranche und dem kalthärtenden Laminierharzsystem Epikote® MGS® LR 135 mit Epikure® MGS® LH 137 von Momentive mit einer Topfzeit von 5h bei Raumtemperatur verwendet. Hier ist die Fertigung im Harzinfusionsverfahren zeitkritisch, aber beherrschbar.

Die Indikatorschicht wurde mit dem einfach zu verarbeitenden Laminierharzsystem Epikote® MGS® LR 285 mit Epikure® MGS® LH 287 von Momentive hergestellt. Auch hier ist die geringe Topfzeit ein bestimmender Faktor in der Probenfertigung.

Faserwerkstoffe und Halbzeuge

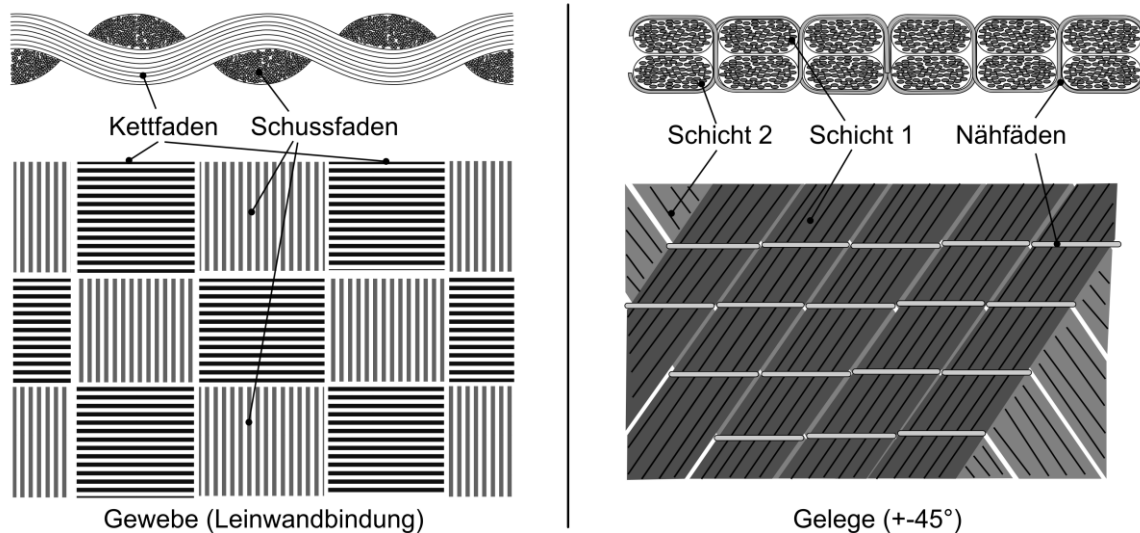
Als Verstärkungsfasern wurden Kohlenstoff- und E-Glasfasern (Tabelle 2) verwendet. Die Kohlenstofffasern der Hersteller TORAY (T700SC) und TOHO-TENAX (HTA40 E13) sind verbreitete Standardfasern mit ausgewogenen Eigenschaften. Die E-Glasfasern unterscheiden sich wenig. Lediglich die Fasern des feinen INTERGLAS-Gewebes IG02034 sind mit 5µm besonders fein.

Die Fasern werden jeweils als Halbzeuge vorbereitet verwendet. Die verschiedenen Fasertypen werden sowohl als Gelege als auch als Gewebe verwendet.

In den experimentellen Untersuchungen (Kapitel 4) werden Gelege- und Gewebelamine untersucht. Die Indikatorschicht besteht aus einem feinen Glasgewebe in Leinwandwebart mit 25g/m² und Finish FK800 (Interglas 02034) (ähnlich Abbildung 34 links) und dem Harzsystem Momentive MGS L285/H287. Für die Ergebnisse in 4.2.1 wurde 600g/m²-Glasfasergelege aus der Windkraft-Rotorblattfertigung verwendet. Die Kohlenstofffaser-Halbzeuge sind aus verschiedenen Fasertypen Toray T700 und Tenax-E HTA40 E13 400 tex. Die T700-Faser lag als nylonvernähtes non-crimp-fabric (NCF) vor (ähnlich Abbildung 34 rechts). Alle anderen Gelege aus Kohlenstofffasern bestehen aus der HTA-Faser.

Tabelle 2 Daten der Faserwerkstoffe

	Filamentdurchmesser	Steifigkeit (Quelle)	Zugfestigkeit (Quelle)	Bruchdehnung (Quelle)
T700SC	7µm [Tora12]	230GPa [Tora12]	4900MPa [Tora12]	2,1 % [Tora12]
HTA40 E13	7µm [ToTe11]	238GPa [ToTe11]	3950MPa [ToTe11]	1,7 % [ToTe11]
E-Glasfaser SearTex	17µm (Messung) / Silan-Finish	73GPa [Schü08]	2400MPa [Schü08]	3,3 – 4,8% [Cher11]
Interglas EC 5 - 5,5 tex	5µm [Pdin11] / FE 800-Finish	73GPa [Schü08]	2400MPa [Schü08]	3,3 – 4,8% [Cher11]


Abbildung 34 Gewebe- und Gelege-Halbzeuge

3.3.3. Probenherstellung

Die Proben konnten in den Werkstätten der BAM hergestellt werden. Im Fachbereich 5.3 existiert ein Sortiment an Methoden und Werkzeugen zur Fertigung von FKV-Proben.

Harzinjektionsverfahren

Um die Lichttransmission als Schädigungsparameter nutzen zu können, ist die Herstellung möglichst transparenter Lamine nötig. Mit dem vakuumunterstützten Harzinjektionsverfahren ist es möglich GFK-Lamine nahezu transparent zu fertigen. Der Einfluss der Prozessparameter ist dabei groß (siehe auch [SRHB12b]). Entsprechende Erfahrung hinsichtlich der Wahl der Prozessparameter vorausgesetzt, ist aber eine nahezu klare, poren- und lunkerfreie Fertigung von GFK-Probekörpern möglich. Genaue Anpassung der Brechungsindizes von Faser und Matrix kann noch weit bessere Ergebnisse liefern, wie Ergebnisse verschiedener

Gruppen zeigen [IbCK02, IbKa98, KAPL13, OCLW14]. Dies ist für die in dieser Arbeit vorgesehenen Untersuchungen aber nicht notwendig. Im Einsatz im Fachbereich 5.3 der BAM sind unter anderem ein Plattenfertigungswerkzeug und ein Rohrprobenfertigungswerkzeug mit fester Aussenform und flexiblem Kern.

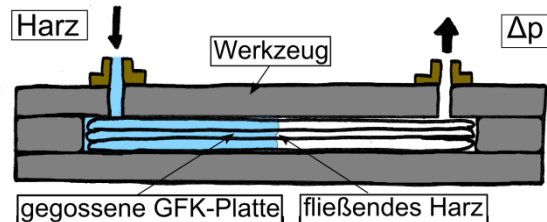


Abbildung 35 Vakuum-Harzinjektionsverfahren

Abbildung 35 zeigt vereinfacht das Verfahren. In ein Werkzeug mit festen Wänden wird das Faserhalbzeug eingelegt. An den Lagenaufbau angepasst wird der Abstand der Wandungen eingestellt. Vor dem Injizieren wird die Kavität evakuiert. Eine Kombination aus leichtem Überdruck (bis max. 1bar) auf der Harzseite und fehlendem Umgebungsdruck im Inneren treibt das Harz porenfrei durch das Faserhalbzeug.

Applikation der Indikatorschicht

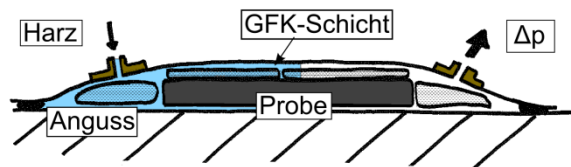


Abbildung 36 Vakuuminjektionsverfahren zur Applikation der Indikatorschicht

Wesentliche Aspekte bei der Fertigung der Indikatorschicht sind eine möglichst perfekte Anbindung an das Substrat und eine möglichst transparente, blasenfreie Durchtränkung. Ein Vakuuminjektionsverfahren bietet diese Möglichkeit. Für Probekörper-Serien im Labor wäre eine Integration der dünnen Schicht bei der Fertigung günstig. Für einzelne Probekörper, für den Einsatz an bauteilnahen Probekörpern oder am Bauteil wird eine einfache Modifikation des verbreiteten Vakuuminfusionsverfahrens mittels Folie und Fließhilfen vorgeschlagen und getestet – wie in Abbildung 36 dargestellt. Auf die durch vorsichtiges anschleifen per Hand angeraute und entfettete Applikationsfläche einer bereits fertigen Probe wurde das Faserhalbzeug der Indikatorschicht trocken aufgelegt. Nicht zu beschichtende Stellen wurden mit Klebefolie maskiert. Nach dem Aufbringen von Polyestervlies als Fließhilfen und Vakuumfolie und abschließendem Abdichten wurde der Zwischenraum evakuiert. Die Harzinjektion erfolgte mit weiter arbeitender Absaugpumpe, so dass der Umgebungsdruck das Harz durch das Faserhalbzeug drückt. Da die Fertigung der Schicht mit im Vergleich zur Schichtdicke relativ grober, biegesteifer Vakuumfolie und nur unter der Wirkung des Umgebungsdruckes (also nicht im Autoklaven o. ä.) erfolgt, ist der Faservolumengehalt φ gering. Dies ist auch günstig für die Forderung nach maximaler Transparenz der Indikatorschicht [IbKa98].

Probenformen und Abmessungen

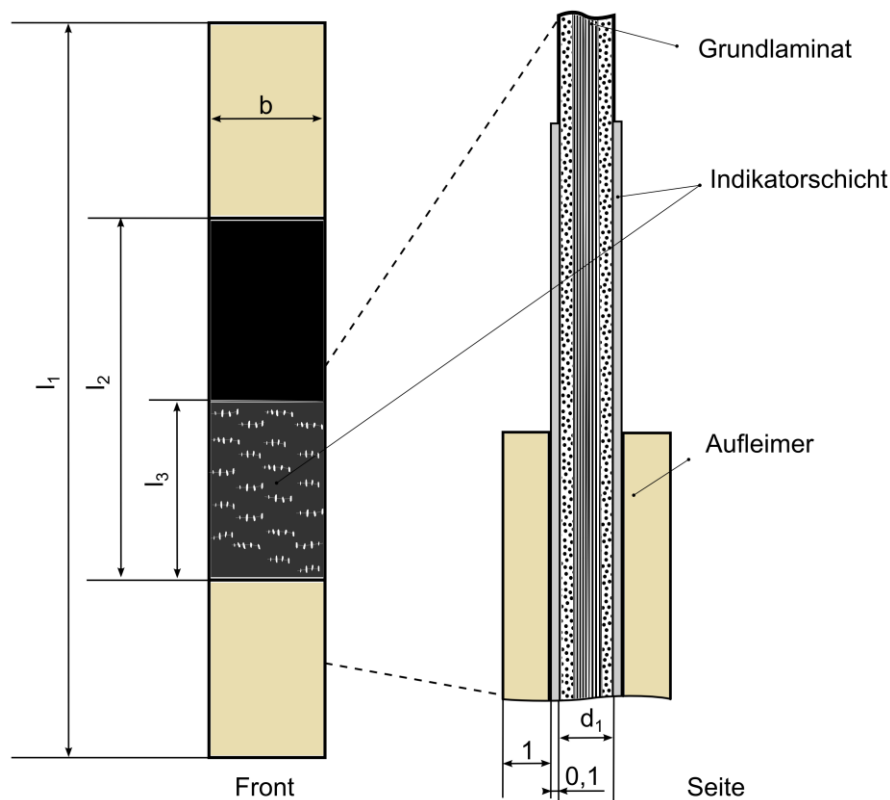


Abbildung 37 Probenabmessungen

Untersucht wurden Flachproben (Abbildung 37) mit und ohne Aufleimer, in $0^\circ/90^\circ$ -Ausrichtung oder $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung, mit Indikatorschicht und ohne, in Dicken d_1 von 1 und 2 mm, sowie Breiten b von 10 bis 20 mm. Die Länge des im Einspannbereich befindlichen Anteils der Indikatorschicht l_3 beträgt entweder die Hälfte der Einspannlänge l_2 (fast alle beschichteten Proben) oder die ganze Probe ist beschichtet (nur die NCF-Proben). Die Länge des Einspannbereiches variiert zwischen 60mm (nur Stufenzugversuch, siehe Kapitel 4.1.1), 100mm (sonstige CFK-Proben) und 130mm (nur GFK-Durchlicht bei $R = -1$ siehe Kapitel 4.2.1 und 4.2.2). Bei einigen Vorversuchen an $0^\circ/90^\circ$ -Gelege ist zur Vereinfachung nur eine Seite komplett mit der Indikatorschicht versehen, ansonsten ist die Schicht zur Vermeidung von Störeinflüssen symmetrisch und nur zur Hälfte aufgebracht. Die in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 verwendeten Proben orientieren sich in ihren Abmessungen mit 210mm/32mm/2mm an der RHV [Lba99]. Eine Übersicht findet sich im Anhang.

4. Ergebnisse der Untersuchungen

4.1. Röntgenrefraktions- und Schallemissionsmessung am Grundlaminat

Proben aus demselben Material (HTA-Faser mit LY556-System), an dem im Folgenden die Indikatorschicht untersucht wird, wurden mit dem Röntgenrefraktionsverfahren (RR) untersucht. Anhand dieser Versuche können Informationen über die Querrissbildung gewonnen werden. Ein besonderer Vorteil der entwickelten Messeinrichtungen ist, dass die Proben beim Zugversuch ohne Aus- und wieder Einspannen gescannt werden können. Damit konnte der Einfluss aus unbemerkten Belastungen beim Ein und Ausspannen vermieden und eine begleitende Schallemissionsmessung ermöglicht werden.

4.1.1. Stufenzugversuche

Zur Untersuchung des Risswachstums in CFK wurden an 0°/90°-Gewebe-Proben (170mm x 15mm x 1mm, 2 Lagen 0°/90°-Gewebe HTA-Faser und LY556-System, 100mm Einspannlänge, Aufleimer aus GFK) Zugversuche mit begleitender Röntgenrefraktionsmessung und Schallemissionsmessung unternommen. Die Röntgenrefraktionsmessung erfolgte in einem Aufbau, wie er in Abbildung 20 dargestellt ist. Dieser Aufbau nutzt in der Röntgenröhre eine Kupferanode. Zusätzlich sind an der Probe – wie in Abbildung 21 skizziert – Schallemissionssensoren installiert, die während der gesamten Messung aktiv sind. Aus der langen Messzeit der Röntgenrefraktionsmessung (3s je Rasterpunkt, mehrere Stunden pro Scan) ergibt sich die Notwendigkeit eines unterbrochenen Zugversuches wie in Abbildung 32 skizziert.

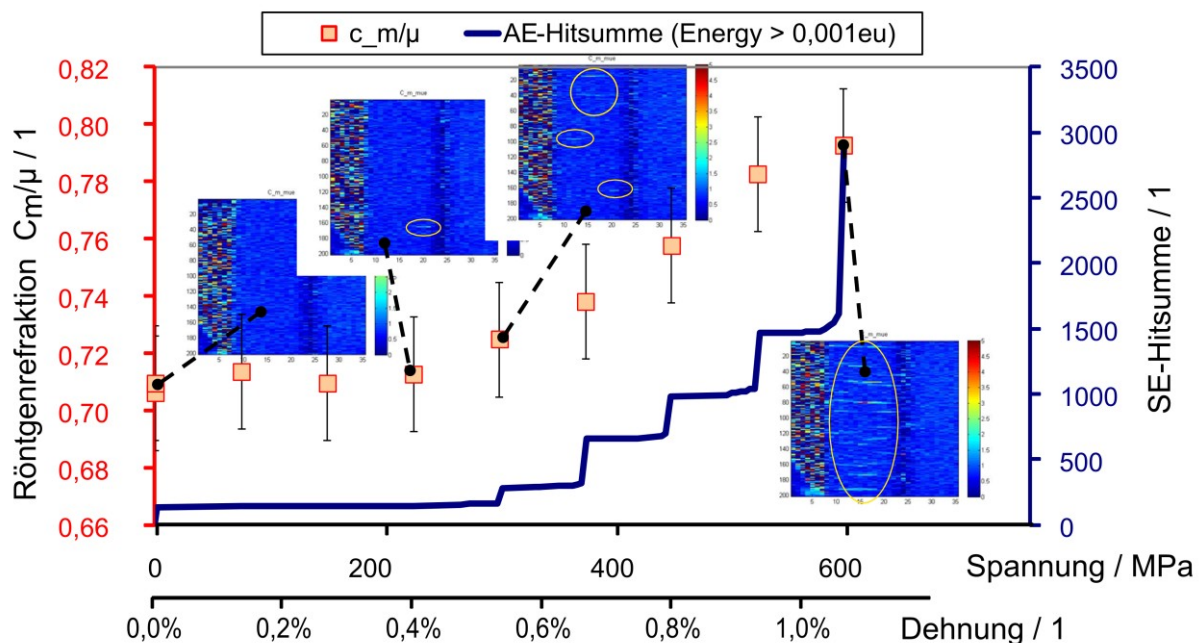


Abbildung 38 Ergebnisse des Stufenzugversuchs, Röntgenrefraktion und Schallemission

Es wurden weder mit der Röntgenrefraktions-Technik, noch durch auffällige Schallemissionen Mikrorisse vor dem Entstehen von Makrorissen detektiert. Mikrorisse werden im Röntgenrefraktionsergebnis durch eine integrale Zunahme der Refraktion, also der inneren Oberfläche sichtbar. Dies wurde nicht beobachtet. Der erste erkennbare Riss (siehe Abbildung 38) ist bereits einige Millimeter lang und deutlich eingrenzbar. Bei zunehmender Rissdichte ist ein typischer Rissabstand von ca. einem Millimeter in den Röntgen-Scans (siehe Abbildung 39) abzuschätzen. In den Schallemissionsergebnissen wird eine Rissbildung durch eine Zunahme von Schallereignissen angezeigt, was in den Versuchen erst mit dem Auftreten von Makrorissen - wie von der Röntgenrefraktionsmessung dargestellt - der Fall ist.

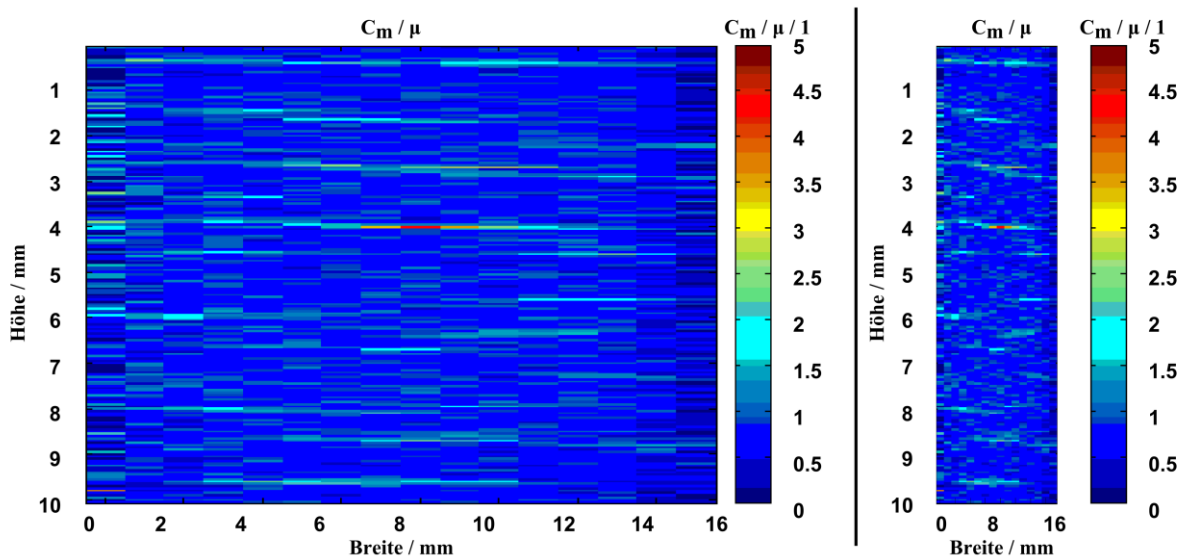


Abbildung 39 Röntgenrefraktion bei Probenversagen im Zugversuch, links: schlechtere Erkennbarkeit bei gestreckter Darstellung

4.1.2. Schwingversuche

Röntgenrefraktionsuntersuchungen zur Entwicklung der Querrisse wurden nicht in der Röntgenanlage mit integrierter Prüfmaschine sondern in der zweiten Röntgenanlage mit Molybdänröhre durchgeführt. Die Proben wurden zwischen den Scans mit konventioneller servohydraulischer Prüftechnik belastet. Für alle hier vorgestellten Ergebnisse wurden die Proben mit zugschwellender Last bei $R = 0,1$ zyklert.

Querrisse an schwingend belasteten CFK-Gewebelaminat $0^\circ/90^\circ$

In Abbildung 40 ist ein Scan verschiedener CFK-Proben mit Gewebe in $0^\circ/90^\circ$ -Anordnung zu sehen. Die Proben wurden vor dem Scan jeweils 10^6 Lastwechsel bei der im Bild angegebenen Oberspannung belastet. Zu erkennen ist, dass erst bei der mit 200MPa belasteten Probe erste Querrisse auftreten. Bei höheren Lasten entspricht das Rissbild im Wesentlichen dem aus dem Stufenzugversuch (siehe Abbildung 38 und Abbildung 39).

Scan verschiedener Gewebelaminat-Proben nach 10^6 LW bei:

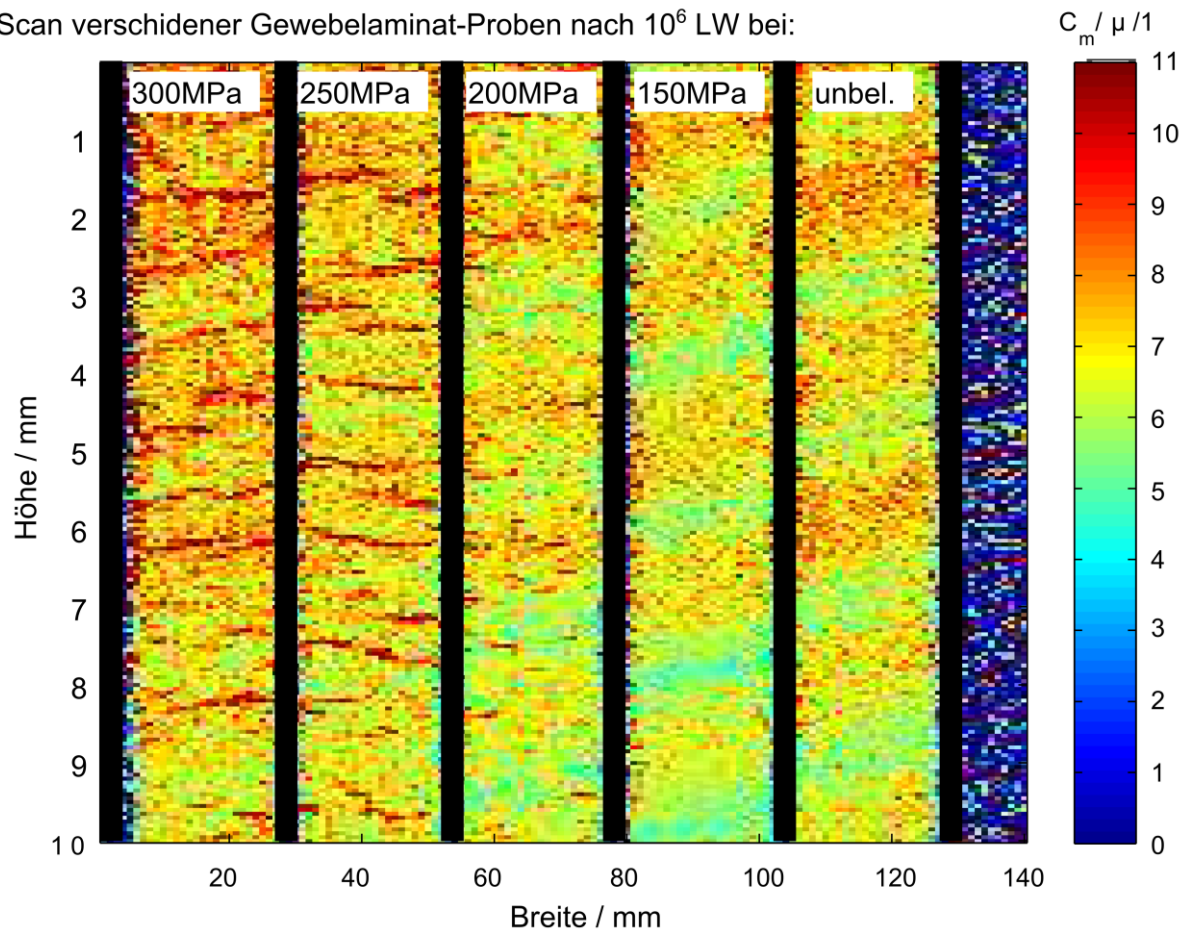


Abbildung 40 0°/90°-Gewebebeprben, Scans nach 10^6 Lastwechseln

Zeitliche Entwicklung der Schädigung im Schwingversuch von 0°/90°-CFK-Gewebe laminat

Die Entwicklung der Refraktionswerte über der Lastspielzahl ist in Abbildung 41 dargestellt. Die Probe wurde bis 10^4 Lastwechsel mit dem integrierten elektromechanischen Prüfraahmen innerhalb des Röntgenaufbaus mit Kupferröhre zyklert. Von 10^4 bis 10^6 Lastwechseln mit ebenfalls $\sigma_o = 300\text{MPa}$ und $R = 0,1$ wurde eine servohydraulische Prüfmaschine eingesetzt. In der Darstellung mit logarithmischer Abszisse ist eine monotone Zunahme der Refraktion mit zunehmender Lastwechselanzahl zu sehen. Der Versuch wurde nicht bis zum Erreichen einer Sättigung weitergeführt, sondern bei 10^6 Lastwechseln abgebrochen.

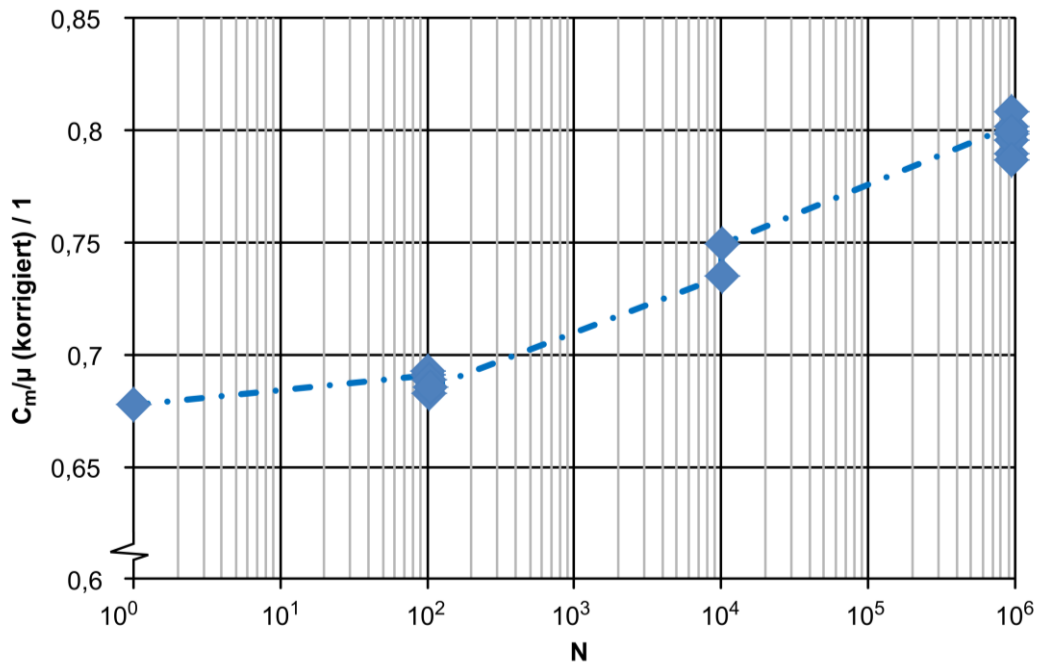


Abbildung 41 Ergebnisse der Röntgenscans einer 0°/90°-Gewebelaminat-Probe bei verschiedenen Lastwechselzahlen bei 300MPa und R=0,1

Querrisse an 0°/90°-CFK-Gelegelaminat

Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse eines Scans bei CFK-Proben aus Gelegelaminat. Hier werden die Rissmuster verschiedener Proben bei gleicher Lastgeschichte verglichen. Die Rissmuster sind ähnlich und weisen ähnliche Rissdichten auf. Auch bei diesen Proben ist beim Lastniveau von $\sigma_o = 100\text{MPa}$ noch keine Rissbildung vom Röntgenrefraktionsverfahren festgestellt worden. Proben mit $\sigma_o = 200\text{MPa}$ sind nicht dargestellt.

Scan verschiedener Gelegelaminat-Proben nach 10^6 LW bei:

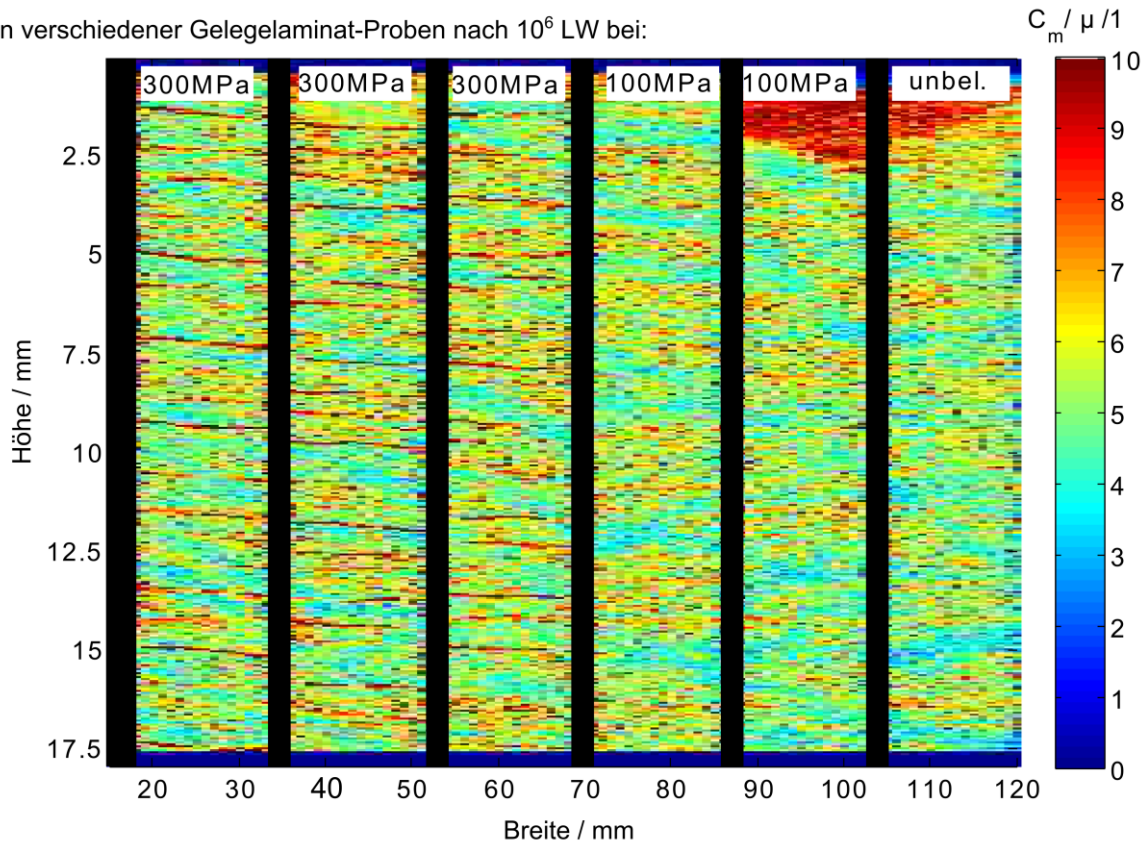


Abbildung 42 0°/90°-CFK- Gelege-Proben, Scans nach 10^6 Lastwechseln

Entwicklung der Rissdichte an $\pm 45^\circ$ -CFK-Gewebeproben

Schwingversuche an $\pm 45^\circ$ -Gewebe laminaten wurden in bestimmten Intervallen unterbrochen und mit der kupferröhrenbasierten Röntgenrefraktionsmessung untersucht. Die Belastung wurde teilweise außerhalb der Anlage aufgebracht. Deshalb und zur Realisierung der verschiedenen Ausrichtungen der Scans quer und längs war es nötig, immer neu einzuspannen. Da kein exaktes Wiederauffinden der Messpunkte nötig und gefordert ist, stellte dies keine Einschränkung der Messung dar. In Abbildung 43 werden die Messergebnisse für $\sigma_0 = 75 \text{ MPa}$ bei $R = 0,1$ gezeigt. Scans mit senkrechter und waagerechter Ausrichtung sind bei $\pm 45^\circ$ -Laminaten nötig, da wie in Abbildung 19 dargestellt die Röntgenrefraktion Risse richtungsselektiv unterschiedlich gut darstellt. Im dargestellten letzten Scan dominieren in der senkrechten Probenausrichtung Querrisse das Scanbild. Im Scan waagrecht zum Röntgenstrahl sind diese nicht zu sehen. Damit sind aber die diagonalen Strukturen besser erkennbar, die die Ausbildung von Diagonallissen entlang der Fasern repräsentieren. Sie sind in senkrechtem und waagrechtem Scan gleichermaßen vorhanden. Wie an den Scans zu den 0°/90°-Schwingversuchen wurden die Zeitpunkte in Zehnerpotenzen über die bekannte Lastspielzahl verteilt, um bei überschaubarem Messaufwand auch den Rissbeginn abzudecken.

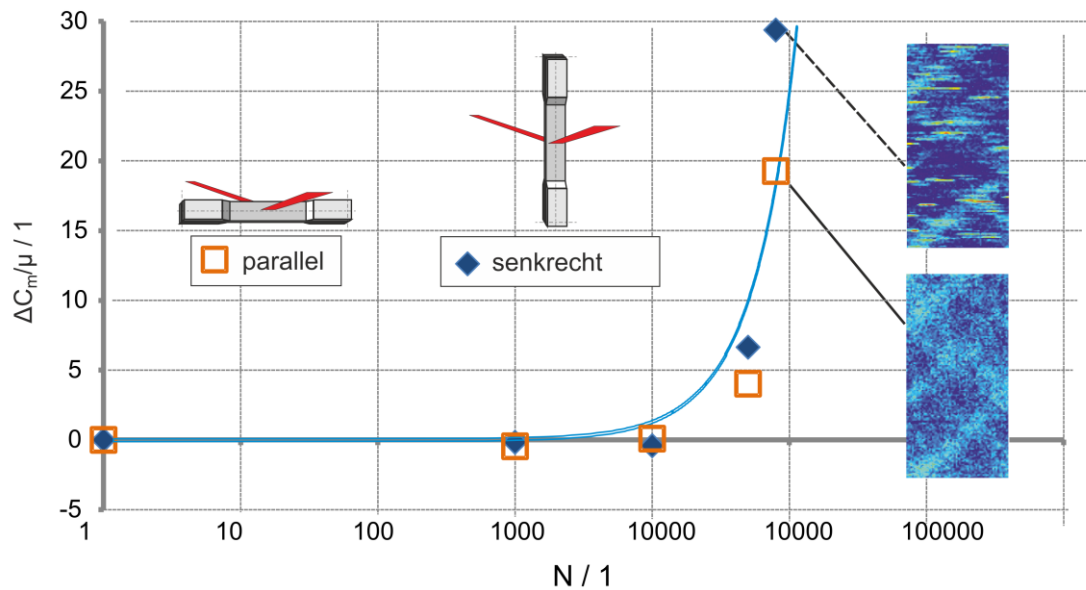


Abbildung 43 Entwicklung der Rissdichte an $\pm 45^\circ$ -Gewebebeugen bei $\sigma_o = 75\text{MPa}$ und $R = 0,1$ (aus [TrOH13])

Zwischenfazit zur Untersuchung der CFK-Lamine mit Röntgenrefraktionsmessungen und Schallemissionstechnik

Die Untersuchung der Matrixrissbildung des verwendeten Werkstoffes mit der Röntgenrefraktionsmessung und Schallemissionsmessung liefert Informationen über den Beginn der Rissbildung und der Zunahme über die Lebensdauer. Die Schallemissionsmessung und die Röntgenrefraktionsmessung an $0^\circ/90^\circ$ -Laminaten bestätigen sich gegenseitig hinsichtlich des Rissbeginns $\sigma_o = 250\text{MPa}$ entsprechend ca. 0,4% Dehnung. Auch im Schwingversuch bis 10^6 Lastwechsel wurden Risse erst ab $\sigma_o = 250\text{MPa}$ erkennbar. Trotz eingeschränkter Auflösung kann die Aussage gemacht werden, dass eine Rissdichte von einem Riss pro Millimeter typisch ist. Für höhere Last konnte der Verlauf des Refraktionswertes über der Lebensdauer als Maß für die Zunahme der Querrisse ermittelt werden – teilweise sogar ohne nötigen Ausbau der Probe aus der Röntgenanlage. Im Vergleich zu deutlicheren Ergebnissen an kurzglasfaserverstärkten Werkstoffen [Günz13, RulH01] und anderen endlosfaserverstärkten Werkstoffen [TrHS08] neigen die hier untersuchten endlosfaserverstärkten Lamine dazu, wenige große Risse statt einer größeren Anzahl von kleineren Rissen zu bilden. Diese größeren Risse liefern insgesamt einen kleineren Anteil an der gesamten Refraktion des Scans. Die Ausbildung größerer glatter Risse und daraus die Frage nach deren effektiver Darstellung spielte auch bei der Ideenfindung zur optischen Indikatorschicht eine Rolle. Mit einem weiter verbesserten RR-Aufbau gelang eine Darstellung der Zunahme der Querrisse und Diagonalrisse an $\pm 45^\circ$ -Proben im Schwingversuch. Dabei mussten je Scanintervall zwei Scans durchgeführt werden, um senkrechte und waagerechte Risse unterscheiden zu können. Diagonalrisse werden dann in beiden Scans dargestellt.

4.2. Schädigung und Lichttransmission an GFK

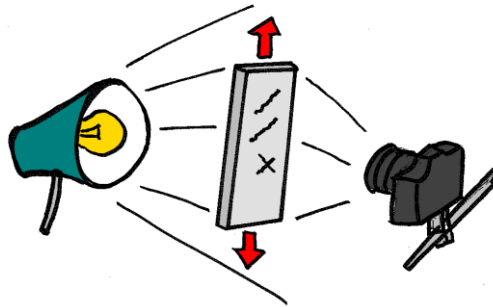


Abbildung 44 Prinzip der Auswertung der Lichttransmission

An transparenten oder nahezu transparenten Proben lässt sich die Rissentwicklung gut beobachten (Abbildung 44). Die Nutzung dieser Möglichkeit ist etabliert. Sie wird nicht nur in Studien zur Rissentwicklung [AdHo06, AdHo10, Bam08, Oyta91] im Labor genutzt. Auch in der Praxis zeigen sich bekanntlich Schlagschäden und andere gravierende Überlastungen an GFK vielfach durch den sogenannten Weißbruch an. Die Ergebnisse aus der Arbeit mit der Lichttransmission zeigen, wie einfach und effektiv die Rissentwicklung an transparenten FKV untersucht werden kann. Für die Variante der Auswertung an der BAM wird gelegentlich der Begriff Grauwertanalyse benutzt. Er beschreibt die integrale Auswertung der Eintrübung einer Testfläche der Probe.

Damit wird im Folgenden die Frage bearbeitet, ob die Eintrübung durch Matrixrisse tatsächlich ein Maß für die Schädigung der Probe darstellt. Dies wird mit Versuchsergebnissen zum Reihenfolgeeinfluss der Lasthöhe und zum Einfluss der Matrixeigenschaften auf die Lebensdauer unterschiedlicher Faserorientierungen belegt. Spiegeln sich solche Parametervariationen in der Auswertung der Lichttransmission wieder, bestätigt dies den Zusammenhang zwischen rissdichtebedingter Eintrübung und Lebensdauer.

4.2.1. Reihenfolgeeinfluss der Last auf die Lebensdauer

In einer Studienarbeit [Bam08] wurde an der BAM der Lastreihenfolgeeinfluss auf die Lebensdauer von $\pm 45^\circ$ -Proben und $0^\circ/90^\circ$ -Proben unter Nutzung der Eintrübung der Probe als Schadensindikator untersucht.

Bei den verwendeten Faserhalbzeugen handelte es sich um Biax-Glasfasergelege aus der Windenergiebranche mit einem Flächengewicht von 1000g/m^2 mit Polyamid-Bindungsfäden. Es wurde als typisches Harzsystem das System L135/H137 von HEXION verwendet. Die Probenmaße sind nach der Richtlinie RHV des Luftfahrtbundesamtes [Lba99] mit $210\text{mm}/32\text{mm}/2\text{mm}$ gewählt. Das Lastverhältnis liegt bei allen Versuchen bei $R = -1$, weshalb mit einer PTFE-beschichteten Knickstütze – ebenfalls nach RHV – gearbeitet wurde.

Die Versuche an $\pm 45^\circ$ -Proben wurden wie folgt aufgebaut:

Im ersten Schritt wurden die Versuche zur Erstellung einer Wöhlerlinie mit der Lichttransmissionsauswertung beobachtet, um den Verlauf zu ermitteln. Aus der Lebensdauer der Proben wurde mit der linearen Schadensakkumulationshypothese [Mi-

ne45, Palm24] eine Lebensdauer für ein Lastkollektiv (Abbildung 45 und Gleichung 19) erstellt. Dieses entstand mit Daten aus den vier gemessenen Stützstellen der Wöhlerlinie. Nach dessen Durchlaufen wird das Versagen der Proben erwartet.

$$D_{P-M} N = \sum_i^n \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_{28MPa}}{N_{28MPa}} + \frac{n_{30MPa}}{N_{30MPa}} + \frac{n_{34MPa}}{N_{34MPa}} + \frac{n_{37MPa}}{N_{37MPa}} \leq 1 \quad \text{Gleichung 19}$$

Aus dem mittleren, stabil wachsenden Teil der Lichttransmissionsverläufe wurde eine typische Transmissionsabnahme pro Lastwechsel gemittelt. Damit wurde ein Verlauf der Eintrübung während des Durchlaufens der Kollektive vorhergesagt. Es wurden drei verschiedene Reihenfolgen des Lastkollektivs gewählt: Eine ansteigende Reihenfolge der Last, eine abfallende Lasthöhe und eine zehnmalige Wiederholung je eines Zehntels der Anteile (in ansteigender Lasthöhe innerhalb jedes Zehntels) im Sinne von Blockprogrammen [Gass39]. Die letzte beschriebene Reihenfolge wird als „durchmisches Kollektiv“ bezeichnet.

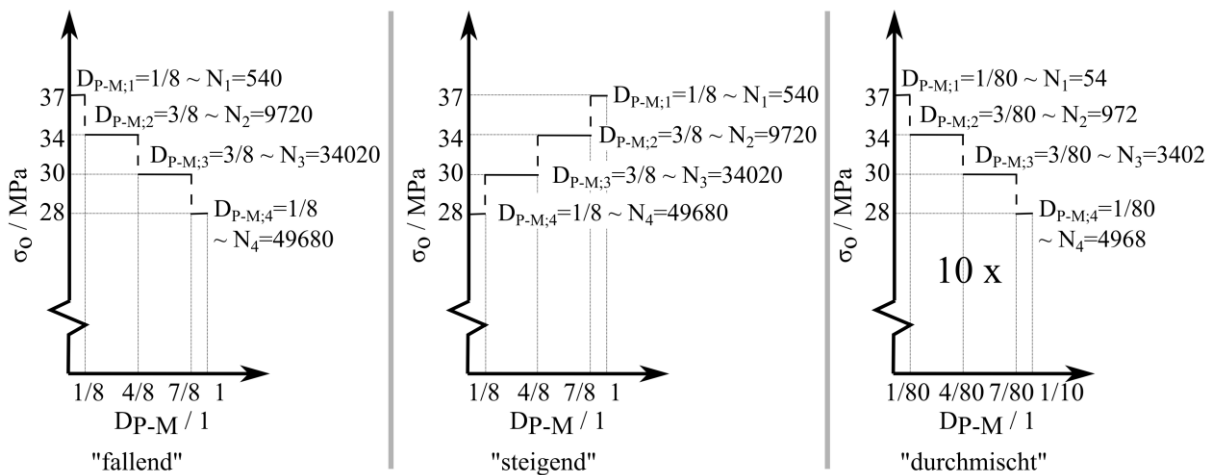


Abbildung 45 Lastfolgen mit $D = 1$ nach linearer Schadensakkumulationshypothese

Bezüglich der Reihenfolgeeffekte ergab sich:

- Die Lastreihenfolge mit ansteigender Amplitude führte jeweils zum Versagen vor der erwarteten Lastspielzahl.
- Die Lastfolge mit absinkender Lasthöhe wurde jeweils vollständig durchlaufen. Im abschließenden Restfestigkeitsversuch wurden nur geringe Festigkeitsabnahmen festgestellt.
- Die Versuche mit „durchmischem Kollektiv“ endeten in zwei Fällen mit dem Probenversagen und in 3 Fällen mit Durchläufern (siehe Abbildung 47).

Mit zunehmender Degradation sinkt also die Schwingfestigkeit. Hohe schwingende Lasten werden gegen Ende der Lebensdauer nicht mehr ertragen, währenddessen niedrige Lasten noch über lange Zeit ertragen werden.

Die Auswertung der Lichttransmission erfolgte durch ein Skript. Das Programm liest die Bilder ein, transformiert sie in Matrixform und wertet die Farbwerte aus. Die einzelnen Farben werden jeweils gleich gewertet und zu einem Grauwert zusammengefasst, der für die vorher gewählten Regionen „Probe“ und „Hintergrund“ gesondert gespeichert wird. Der Hintergrund wird mit ausgewertet, um Helligkeitsschwankun-

gen der Lampe oder der Umgebung auszugleichen. Es wird ein Schädigungsparameter „Grauwertparameter“ D_{GW} definiert:

$$D_{GW} = 1 - \frac{I(N)}{I_o - I_{ref,0} - I_{ref}(N)} \quad \text{Gleichung 20}$$

mit $I_{ref,0}$ Intensität des Hintergrunds zu Beginn, $I_{ref}(N)$ Intensität des Hintergrunds bei Lastwechselzahl N , I_o Intensität der Probe zu Beginn und $I(N)$ Intensität der Probe bei Lastwechselzahl N . Der Term $I_{ref,0} - I_{ref}(N)$ gleicht mögliche Schwankungen der Beleuchtung aus.

Bezüglich der Lichttransmission konnte damit folgendes gefunden werden:

- Die durchschnittliche Eintrübung je Lastwechsel nahm mit zunehmender Amplitude zu. Dies wurde exklusive der Phasen nichtlinearer Zunahme am Anfang und kurz vor dem Versagen ermittelt.
- Alle Proben, bei denen der Grauwertparameter dauerhaft unterhalb der prognostizierten Zunahme blieb, überlebten (Abbildung 47).
- Proben, die frühzeitig eine besonders starke Zunahme des GWP zeigten, versagten vorzeitig.
- Beim Überschreiten des durchschnittlichen End-Grauwertparameters (Abbildung 46) aus den Einstufenversuchen der jeweiligen Lasthöhe wurde nur noch eine sehr kleine Zahl Schwingspiele auf dieser Lasthöhe ertragen, jedoch leicht eine große unterhalb dieser Last.

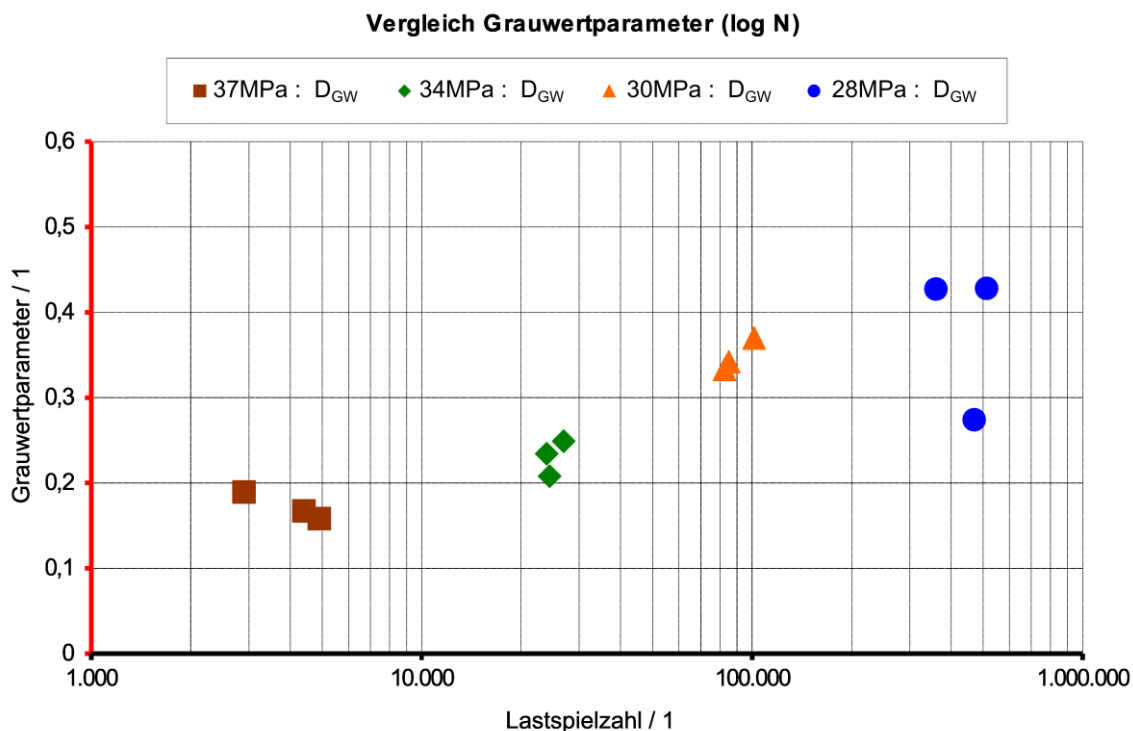


Abbildung 46 End-Grauwertparameter bei +/-45°-Biax-GFK-Gelege-Schwingversuchen, R=-1

Mit zunehmender Eintrübung sinkt also die Schwingfestigkeit. Hohe schwingende Lasten werden bei einem Grauwertparameter größer als der durchschnittliche Endwert im Einstufenversuch der entsprechenden Lasthöhe nicht mehr ertragen, wäh-

renddessen niedrige Lasten noch über lange Zeit ertragen werden. Dies stützt die Eignung der optisch beobachteten Matrixdegradation als Schädigungsparameter.

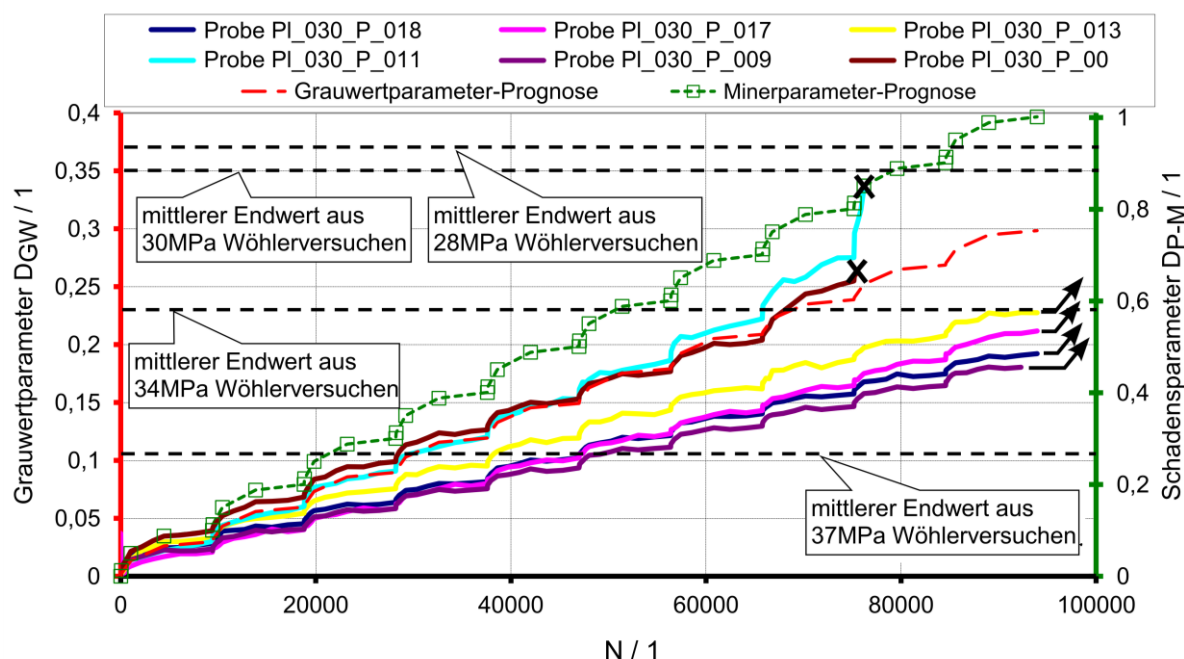


Abbildung 47 Grauwertparameter bei +45°/-45°-Biax-GFK-Gelege-Blocklastversuchen, R=-1, Spannungsangabe als Oberlast

4.2.2. Einfluss der Rissfortschritt-rate der Matrix auf die Lebensdauer

Die bruchmechanischen Eigenschaften der Matrix müssen einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Lebensdauer von daraus hergestellten Verbundwerkstoffen haben. Eine deutliche Unterscheidung – bei ansonsten gleichen Eigenschaften – lässt sich durch unvollständige Aushärtung darstellen. In einer Studie zum Einfluss des Aushärtegrades auf die Schwingfestigkeit von GFK-Laminaten [Kasu11, TrGJ12] wurde dies untersucht. Auch hierbei konnte die Analyse der Probeneintrübung genutzt werden. Für die Untersuchung wurden bruchmechanische Untersuchungen am Reinharz mit Schwingversuchen an GFK-Proben mit zwei verschiedenen Aushärtegraden verglichen. Für die in einer Diplomarbeit an der BAM [Kasu11] betrachtete Werkstoffkombination (Leinwandgewebe 280g/m² und L285/H287) ergab sich ein Zusammenhang der Rissfortschritt-rate im Reinharz mit der Abnahme der Lebensdauer von +/-45°-Proben für das unvollständig gehärtete Harz im Vergleich zum nach Herstellerempfehlung ausgehärteten. An 0°/90°-Proben ist der Einfluss des Aushärtegrades auf die Lebensdauer nicht hinreichend deutlich messbar. Die Längsfasern dominieren das Versagen der Proben.

Ein noch deutlicheres Ergebnis ist bei TRAPPE et al [TrGJ12] zu finden. Dort ist die Abnahme der Schwingfestigkeit durch den Unterschied im Aushärtegrad für +/-45°-Proben bei etwa dem Faktor 10, während die Zunahme der Rissfortschrittsgeschwindigkeit im Reinharz ebenfalls bei etwa dem Faktor 10 liegt.

Wie auch in einer Untersuchung an der BAM [Bam08] zeigt sich in der Entwicklung der Probeneintrübung jeweils ein typischer Verlauf, der sich in drei Phasen gliedern

lässt. Wird erstmals eine bestimmte Amplitude erreicht, so ist zunächst eine starke Zunahme der Eintrübung (siehe Abbildung 48) zu beobachten, die schnell in einen Bereich geringerer Zunahme übergeht, um kurz vor Ende der Lebensdauer wieder schnell zuzunehmen. Ebenso wurde beobachtet, dass die drei Phasen der Grauwertparameterentwicklung auch bei unterschiedlichen Lebensdauern an der Gesamtlebensdauer immer gleich großen Anteil haben.

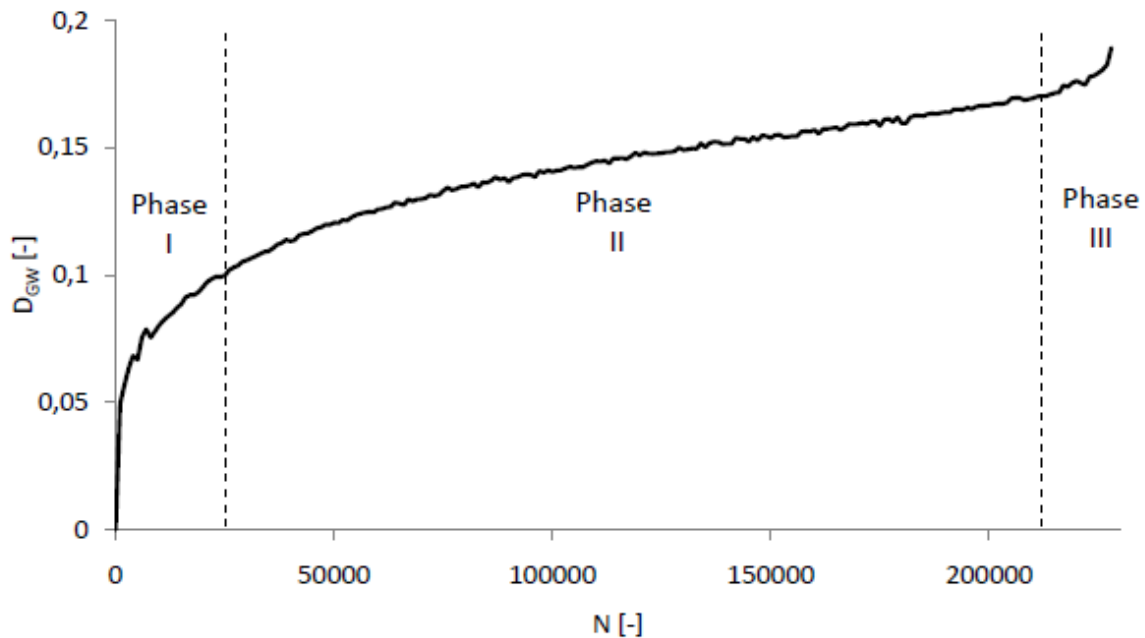


Abbildung 48 Drei Phasen der Probeneintrübung bei +/-45°-Leinwand-GFK-Proben unter schwingender Last [Kasu11]

Bei genauerer Betrachtung der Durchlichtaufnahmen ist bei den Proben mit Leinwandgewebe ein typisches Rissbild (Abbildung 49 und Abbildung 50) zu beobachten. Risse sind in beiden Fällen quer zur Faser orientiert. Außerdem sind punktförmige Eintrübungen in regelmäßiger Verteilung zu beobachten. Der Abstand stimmt mit dem Abstand der Webkreuzungspunkte überein. Ähnliche Schädigungsstrukturen werden in der Literatur als Meta-Delaminationen [Pate99, ReCa02, S.420] als typischer Schädigungsmechanismus in Gewebelaminaten beschrieben.



Abbildung 49 Rissmuster an geschädigtem +/-45°Leinwand-GFK im Durchlicht

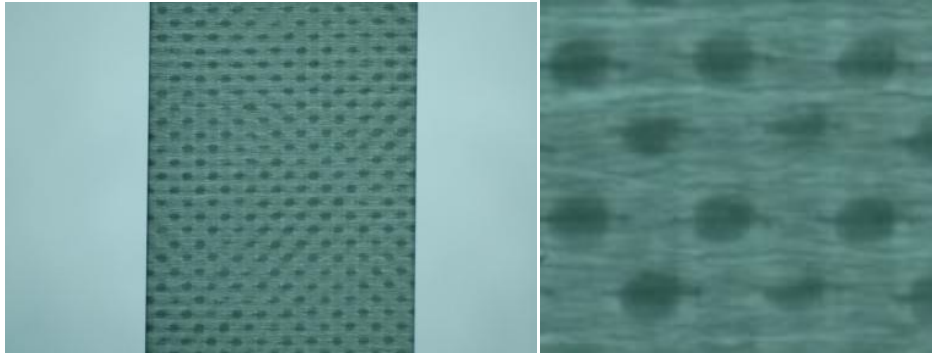


Abbildung 50 Rissmuster an geschädigtem 0°/90°-Leinwand-GFK im Durchlicht

Die Eintrübung vor Versagen der Proben ist (vgl. [Bam08]) bei $\pm 45^\circ$ -Proben bei höherer Last und wenigen Lastwechseln kleiner als bei niedriger Last und vielen Lastwechseln. Weiterhin konnte eine stärkere Eintrübung der besser ausgehärteten $\pm 45^\circ$ -Proben bis zum Versagen beobachtet werden. Die Rissbildung erfolgte über längere Zeit gleichmäßiger, bevor die Rissakkumulation lokal zum Bruch führte. In schlechter ausgehärtetem Laminat war die Risszunahme ungleichmäßiger über die Probe verteilt und eher lokal zu kritischen Dichten angewachsen. Bei $0^\circ/90^\circ$ -Proben wurde dies anders beobachtet: Dort war der Eintrübungswert für unterschiedliche Aushärtzustände vergleichbar. An $0^\circ/90^\circ$ -Proben mit Loch wurde bei höherer Last ein deutlicherer Anstieg der Eintrübung und ein größerer Endwert verzeichnet. Dies deutet auf einen Zusammenhang der Stärke der Eintrübung mit der Dehnungsamplitude hin.

4.2.3. Transmission von Licht unter Langzeitschwingbelastung

Im Rahmen des Teilprojektes „Untersuchung zur Dauerfestigkeitsgrenze in FVK durch zerstörungsfreie Bestimmung mikrostruktureller Versagensprozesse mittels Röntgenrefraktionstopographie unter schwingender Beanspruchung“ des DFG Schwerpunktprogrammes 1466 „Unendliche Lebensdauer“ [OrTr12] wurde ebenfalls unter anderem die Lebensdauer von GFK-Proben in Lichttransmissionstechnik untersucht. Die Gewebe sind in Webart und Faden exakt den CFK-Gewebe nachempfunden und auf demselben Studiowebstuhl bei C. Cramer & Co. Industrial Fabrics ECC entstanden.

Neben Informationen über den Zeitfestigkeitsbereich konnten Erkenntnisse über den Langzeitfestigkeitsbereich gewonnen werden. In Abbildung 51 sind die Verläufe der Eintrübung als Farbdarstellung eingefügt. Bei der bei 10^6 Lastwechseln bei $\sigma_o = 50\text{MPa}$ ($R = 0,1$) versagenden Probe ist die größte Zunahme der Eintrübung erst kurz vor Ende der Lebensdauer zu finden. Bis 10^5 Lastwechsel ist noch gar keine Rissbildung zu erkennen. Der Verlauf der Eintrübung einer Probe aus dem Zeitfestigkeitsbereich zeigt schon beim ersten Messpunkt deutliche Rissbildung. Akustische und optische Beobachtungen beim Starten der Versuche deuten darauf hin, dass hier schon nach wenigen Lastwechseln die Rissbildung einsetzt.

Bei einer Probe belastet mit $\sigma_o = 45\text{MPa}$ und $R = 0,1$ zeigte sich bis zum Abbruch des Versuches bei $N=10^7$ keinerlei erkennbare Rissbildung, was zur Annahme führt, dass der Beginn der Rissbildung bei über 45MPa die Grenze zur Dauerfestigkeit darstellt.

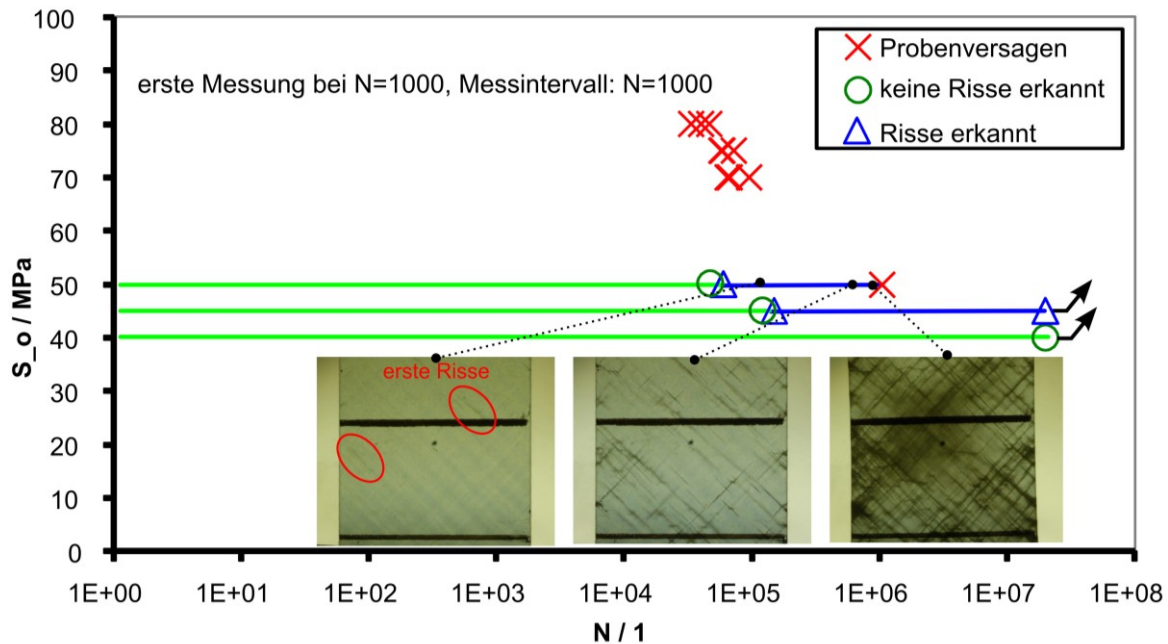


Abbildung 51 Lichttransmission an $\pm 45^\circ$ -GFK-Gewebe-Laminat, $R = 0,1$ (Darstellung nach [Trap02, S.17])

Zwischenfazit zur Lichttransmissionsauswertung an GFK-Proben

Anhand von drei verschiedenen Auswerteverfahren der Lichttransmission (auch oft als Grauwertanalyse bezeichnet) wurde das Potential der optischen Rissdichteauswertung dargestellt.

Bei der Untersuchung des Reihenfolgeefflusses konnte mit der Grauwertanalyse ein Zusammenhang zwischen Eintrübung und tatsächlicher Schädigung dargestellt werden. Die unterschiedliche Schädigungswirkung verschiedener Lasthöhen zu verschiedenen Zeiten im Probenleben wurde gut von der Probeneintrübung angezeigt. Aus $\pm 45^\circ$ -Einstufenversuchen konnten für bestimmte Lastniveaus entsprechende Grenzbereiche der Eintrübung ermittelt werden. Bei deren Erreichen setzte der Probenbruch im Lastfolgeversuch mit großer Wahrscheinlichkeit ein. Mit steigender Schadensakkumulation, welche durch die Eintrübung repräsentiert wird, nimmt die Empfindlichkeit hohen Lasten gegenüber zu. Bei der Untersuchung des Aushärtegrades der Matrix auf die Betriebsfestigkeit von $\pm 45^\circ$ - und $0^\circ/90^\circ$ -Laminaten wurde die Beobachtung der Eintrübung ebenfalls erfolgreich eingesetzt. Es wurde bestätigt, dass ein geringerer Anstieg der Probeneintrübung eine längere Lebensdauer anzeigt. Auch hier ist der geringere Einfluss der Matriceigenschaften bei faserdominierter Belastung erkennbar. Während sich bei den $\pm 45^\circ$ -Proben der geringere Aushärtegrad in geringerer Lebensdauer und ungleichmäßiger Rissdichteentwicklung zeigt, ist bei $0^\circ/90^\circ$ -Proben der Einfluss des Aushärtegrades in weniger gut beobachtbar gewesen [Kasu11]. Die weniger gut ausgehärteten $\pm 45^\circ$ -Proben neigen außerdem offensichtlich dazu, eher in Schädigungsmechanismen überzugehen, die schnell zum Bruch führen, und so weniger Rissdichte akkumulieren zu können, als die gut ausgehärteten.

In einer Untersuchung zur Langzeitfestigkeit von $\pm 45^\circ$ -Proben wurde die Probeneintrübung als Indiz auf der Suche nach einer Dauerfestigkeitsgrenze genutzt. Es zeigte

sich, dass Proben, die keine erkennbaren Risse oder Eintrübung aufwiesen auch bis zum Ende der Grenzlastspielzahl schädigungsfrei blieben, während solche mit Rissbildung versagten. Die damit mögliche Überwachung von Laminaten nach der Prämisse „frei von detektierbaren Rissen“ könnte mit dem Konzept der Indikatorschicht auch auf CFK-Lamine übertragen werden.

Bereits die integrale Auswertung der Eintrübung von GFK kann also als Schadensanzeiger genutzt werden. Es deutet sich an, dass die Definition von Grenzwerten, bei denen beispielsweise eine genauere zerstörungsfreie Prüfung oder ein Austausch des Bauteils angezeigt ist, eine realistische Möglichkeit ist. Eine weitere Möglichkeit bietet die detailliertere Auswertung der Bilder, die für eine Lebensdauerüberwachung aber automatisiert werden müsste. Für manuelle Auswertung ist dies in der Literatur [AdHo10, BeML01, COSH97, GaBa77, GaSj99, LaAn92, Oyta91, PaBa78, SjBe00] bereits vielfach beschrieben. Die Unterscheidung verschiedener Schädigungsarten bietet die Möglichkeit, das Stadium der Laminatschädigung und die Wirkung auf die Tragfähigkeit genauer zu bestimmen. Die Ermittlung von Kriterien und Grenzwerten, sowie die Auswertung werden aber aufwändig, so dass die integrale Auswertung der Eintrübung bereits eine effiziente Auswertungsmöglichkeit sein kann. Dieses einfache Prinzip wird mit der untersuchten Indikatorschicht auf undurchsichtiges CFK übertragen und wie in Kapitel 3.3 dargestellt in den nächsten Kapiteln genauer untersucht.

4.3. Optisches Verhalten der Indikatorschicht

Über das Lichttransmissionsverhalten transparenter GFK-Proben mit praxisrelevanten Standardgeweben und Gelegen aus der Windkraftbranche bei Werkstoffermüdung liegen also positive Erfahrungen vor. Noch nicht jedoch für besonders feine Gewebe – wie das für die Indikatorschicht verwendete - und nicht in Bezug auf Lichtremission. Es ist zunächst also das Verhalten der vorgesehenen Halbzeuge dahingehend zu untersuchen um dann die Interaktion von Indikator und Substrat weiter aufzuklären.

4.3.1. Zugversuche an der Indikatorschicht

An einem Versuchslaminat aus den für die Indikatorschicht gewählten Halbzeugen wurden quasistatische und Schwingversuche durchgeführt, um das Verhalten der Indikatorschicht zu charakterisieren. Folgende Fragestellungen ergeben sich:

- Wann sind erste Risse zu beobachten?
- Wie verhält sich die Rissdichte über die Lebensdauer?
- Wird die zyklische Beanspruchung dargestellt?

Der Versuchswerkstoff

Weil der dünnste Distanzrahmen des Probenfertigungswerkzeuges 1mm stark ist, erfolgte der Bau einer Platte mit 36 Lagen des 25g/m²-Gewebes IG 02034 mit L285/H287 von Momentive. Gründe für die Wahl eines so vielschichtigen Laminates ist die Handhabbarkeit und Robustheit des Laminates und des Fertigungswerkzeuges. Außerdem sollte eine größere Wandstärke die vermutet eher kleinen optischen

Effekte potenzieren. Dünnere Distanzrahmen sind technisch möglich, wurden aber zugunsten einer erprobten Konfiguration des Werkzeugs nicht gewählt. Der erreichte Faservolumengehalt φ beträgt zwischen 26,2% und 32,7%. Diese Platte ist porenfrei und transparent. Der niedrige Faservolumengehalt liegt auf ähnlichem Niveau wie der der applizierten Indikatorschicht.

Der Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgte wie in Abbildung 52 skizziert. Da die Proben ohne schwarzen Kohlenstofffaseranteil transparent sind, wurde für die Untersuchung der Proben aus GFK ein tiefschwarzer Hintergrund hinter der Probe angebracht. 0°/90°-Proben wurden mit Aufleimern versehen, Proben mit +/-45°-Faserorientierung konnten ohne Aufleimer eingesetzt werden.

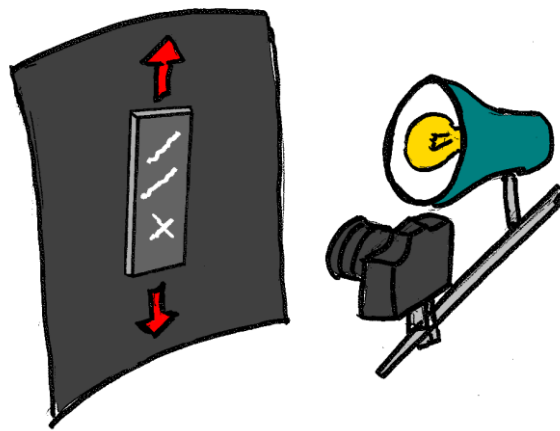


Abbildung 52 Prinzip der Auswertung der Lichtremission

Auswertung der Aufnahmen

Im Gegensatz zur in Kapitel 4.2 vorgestellten Auswertung mit dem Grauwertparameter D_{GW} wird im Folgenden für jeden Helligkeitswert – ob in Transmission oder Remission ermittelt – der gemittelte Helligkeitswert aus dem RGB-Farbraum (Grauwert) im Wertebereich 0-255 angegeben.

$$\text{Helligkeit} = \frac{I_{\text{blau}} + I_{\text{rot}} + I_{\text{gelb}}}{3} \quad \text{Gleichung 21}$$

Dieses Vorgehen wurde gewählt, um keine direkte Vergleichbarkeit der Werte zu implizieren.

Quasistatische Zugversuche an 0°/90°-Proben:

Die Zugversuche an 0°/90°-Proben brachten ein zunächst überraschendes Ergebnis (siehe Abbildung 53): Die während des Zugversuchs ermittelte Remission war im Rahmen der Messauflösung reversibel. Aus dem einfachen Zugversuch den Beginn der Rissbildung abzuleiten, ist also zunächst nicht möglich. Die bleibende Rissdichte ist ohne Mikroskop nicht erkennbar. Sie ist gegenüber der reversiblen Änderung sehr klein. Die bleibende Dehnung ist ebenfalls sehr klein.

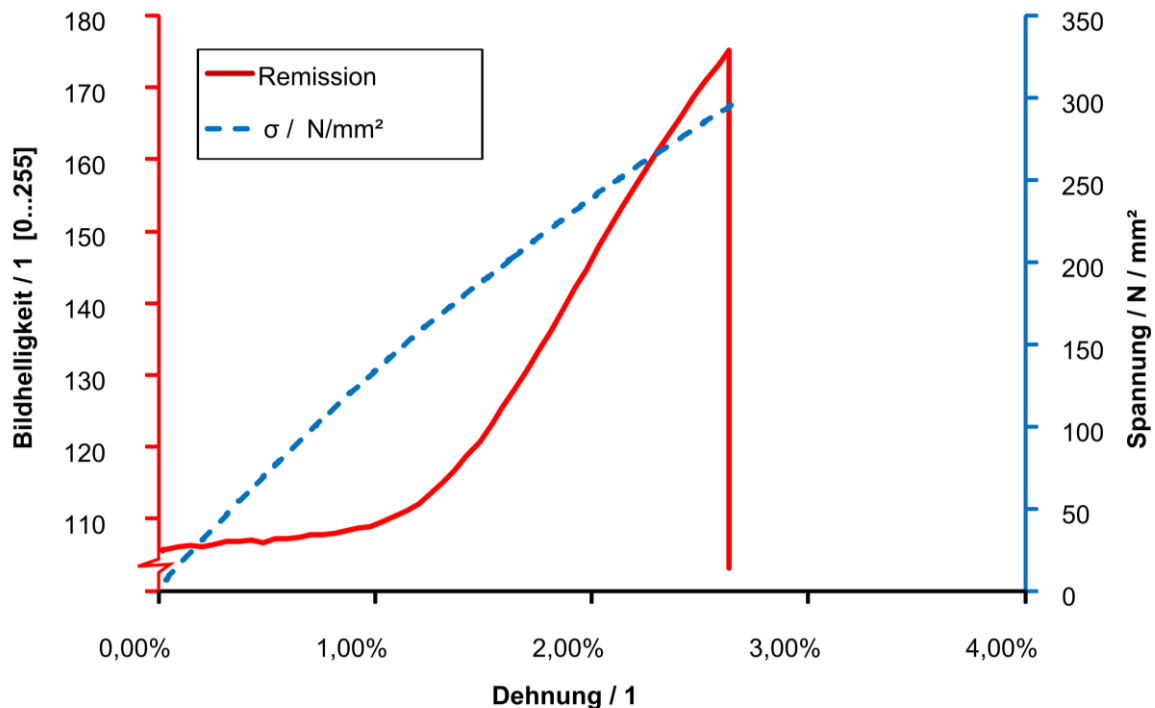


Abbildung 53 quasistatischer Zugversuch am Indikatorwerkstoff, Kettfäden des Gewebes in 0° zur Last orientiert, 2mm/min, Beleuchtung wie in Abbildung 54

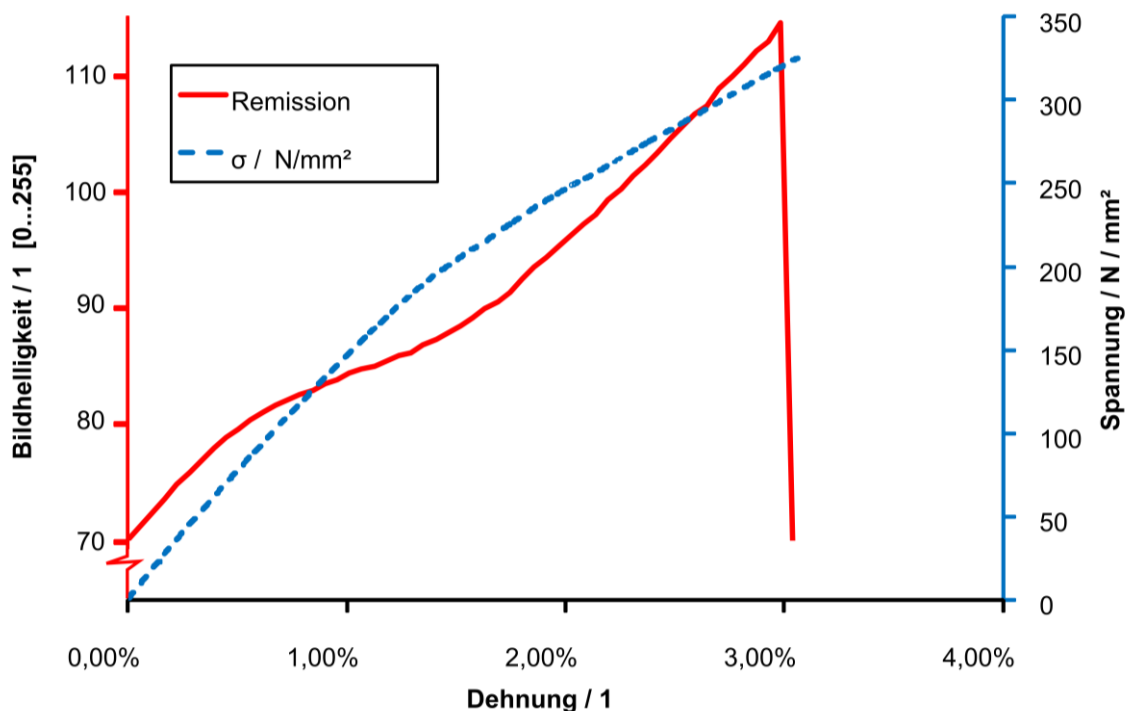


Abbildung 54 quasistatischer Zugversuch am Indikatorwerkstoff, Kettfäden des Gewebes in 90° zur Last orientiert, Last in 0° 2mm/min, Beleuchtung wie in Abbildung 53

Der Unterschied in der Eintrübung zwischen den verschiedenen Ausrichtungen der Versuchsstücke zur Indikatorschicht trat in mehreren Versuchen auf, kann aber nicht eindeutig vom Einfluss der Beleuchtungssituation (siehe Kapitel 4.4.3) getrennt werden. Weitere Versuchsreihen zum Einfluss der Fadeneinarbeitung auf die Eintrübung und Rissdarstellung in möglichen Indikatorschichten sind also bei einer zukünftigen

Anpassung und Optimierung der Schicht sinnvoll. Für die hier vorgestellten Ergebnisse wird dieser Einfluss aber im Vergleich zu anderen Fehlerquellen als gering eingestuft.

Wie bereits in Abbildung 12 beschrieben, kann in Geweben die Fadeneinarbeitung variieren. Dies wurde als Ursache der Unterschiede in der Eintrübung verschieden ausgerichteter Proben in Betracht gezogen. In Abbildung 53 ist ein Ergebnis eines Zugversuches bei 0°-Orientierung (0°-Richtung=Ketttrichtung des Gewebes vgl. Abbildung 12) des Gewebes gezeigt, die in Mikroskopaufnahmen etwas stärkere Ondulation aufweist. In der Abbildung 54 ist ein Zugversuch mit 90°-Orientierung dargestellt. Bei der Herstellung der Platte wurde aufgrund der Herausforderungen durch das sehr feine Gewebe auf ein Drehen und Wenden des Gewebes bei der Fertigung verzichtet. Möglicherweise durch die Handhabung beim Zuschnitt bedingt oder durch eine unterschiedliche Fadeneinarbeitung in Kett- oder Schussrichtung, sind stärkere Ondulationen in Abbildung 55 a (0°-Ausrichtung) als in Abbildung 55 b (90°-Ausrichtung) zu erkennen. Der Einfluss des Unterschiedes der Ondulation muss also im Allgemeinen näher betrachtet werden.

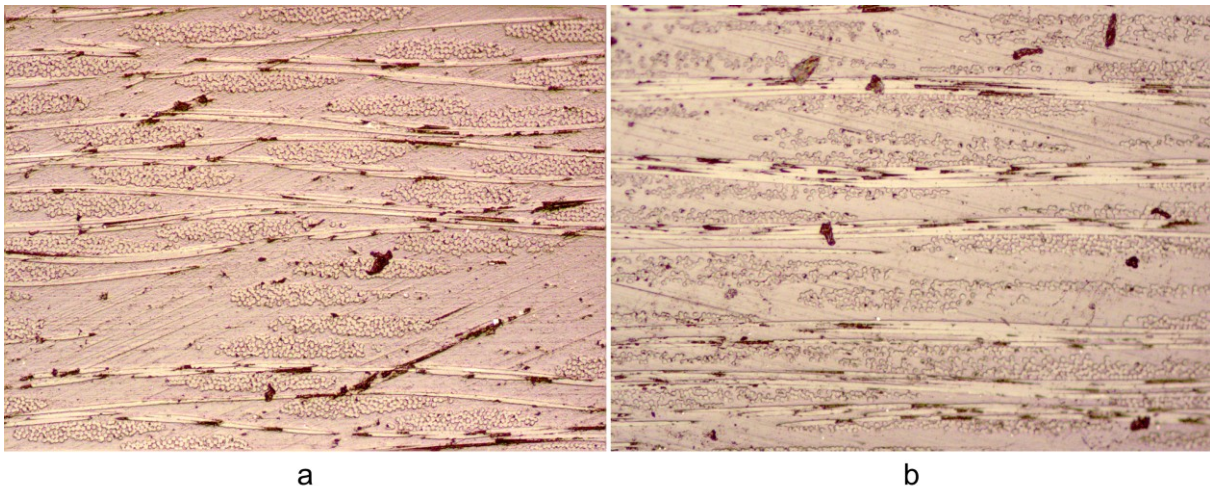


Abbildung 55 Unterschiedliche Faserondulation; etwas stärkere Ondulation in Zugrichtung bei Probe 140t6 (a) mit 0° Ausrichtung als in Probe 140t31 (b) mit 90° Ausrichtung

Aus der fast vollständigen Reversibilität der Eintrübung nach dem Bruch der Proben im quasistatischen Zugversuch ergeben sich neue Fragestellungen:

- Wie ist diese Reversibilität zu erklären (Versuche mit Polarisation im folgenden und Kapitel 4.3.3)?
- Ergibt sich bei schwingender Belastung mehr bleibende Eintrübung (Kapitel 4.3.2)?
- Welche anderen Mechanismen beeinflussen die Darstellung von Rissen aus dem Substrat in der Indikatorschicht (Kapitel 4.4)?

Zur Untersuchung des großen Anteils an Reversibilität werden zwei verschiedene Methoden angewendet. Zu einen die Untersuchung von Proben unter Belastung mit dem Mikroskop. Zum anderen der Einsatz von polarisiertem Licht bei der Durchlichtuntersuchung an belasteten Proben.

Zug- und Entlastungsversuche in polarisiertem Licht

Mit dem Einsatz polarisierten Lichts wurde erneut zu einer Transmissionsmessung übergegangen. Der Aufbau wie in Abbildung 44 skizziert, wurde durch Polarisationsfilter vor und einen weiteren 90° dazu verdreht nach der Probe ergänzt – ähnlich wie im typischen Aufbau der Spannungsoptik.

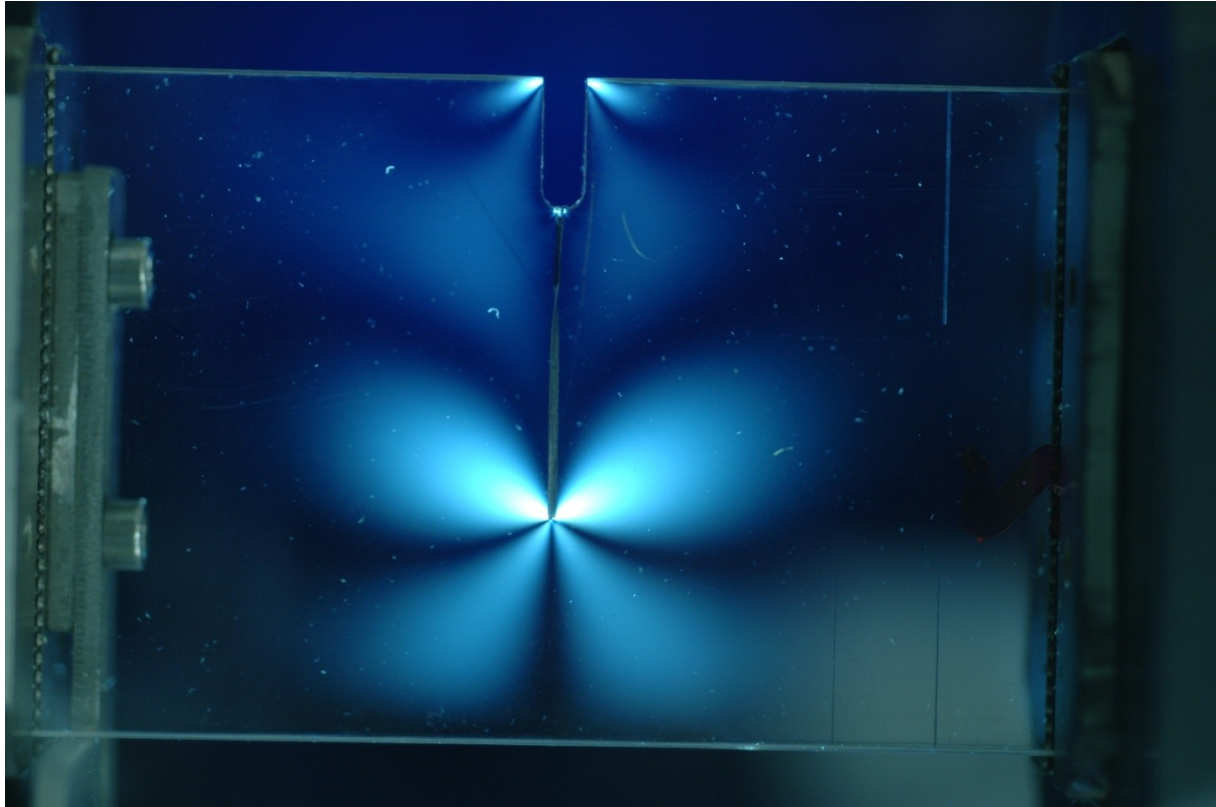


Abbildung 56 Spannungsoptik an der Risspitze in transparentem PMMA

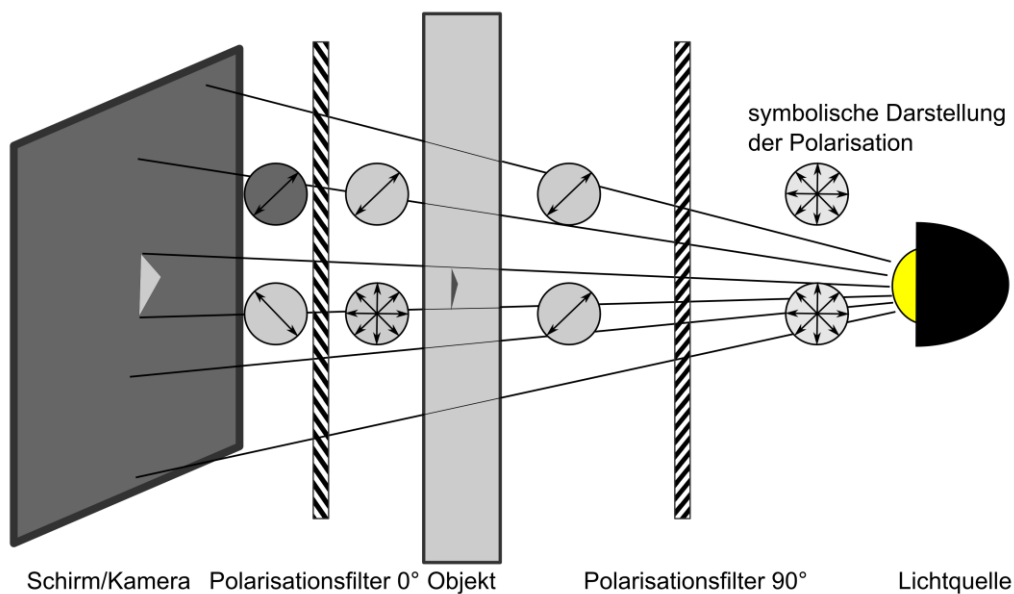


Abbildung 57 Skizze des Aufbaus mit Polarisationsfiltern

In Abbildung 57 ist skizziert, wie das Licht polarisiert wird. Dies ist durch Pfeile symbolisiert. Zunächst ist das Licht nach der Lichtquelle (A) unpolarisiert. Durch den Po-

larisator (P1) wird das Licht linear polarisiert. Im Normalfall durchdringt das Licht das Objekt (O) ohne die Polarisation zu ändern. Dann wird es von Polarisator (P2) herausgefiltert. Damit erscheint das Objekt zunächst dunkel und man spricht von der Dunkelfeldanordnung. Wird das polarisierte Licht aber im Objekt durch Brechung oder Streuung in ihrer Polarisation geändert, so wird ein Anteil vom Polarisator (P2) hindurch gelassen. Die in Abbildung 56 und Abbildung 59 auffälligen weißen Punkte sind durch Brechung und Streuung an Kratzern und Einschlüssen zu erklären. Die Verringerung der Transmission, wie sie ohne Polarisationsfilter zu beobachten wäre, ist nun wegen der Anordnung der Polarisationsfilter als Aufhellung zu erkennen. Mögliche Erklärungen sind wiederum sowohl Brechung und Streueffekte an sich öffnenden Mikrorissen, als auch Doppelbrechung an Spannungskonzentrationen ohne Risse (vgl. Spannungsfeld an makroskopischem Riss in PMMA in Abbildung 56), da sowohl Glasfasern als auch Epoxidharz doppelbrechend sind.

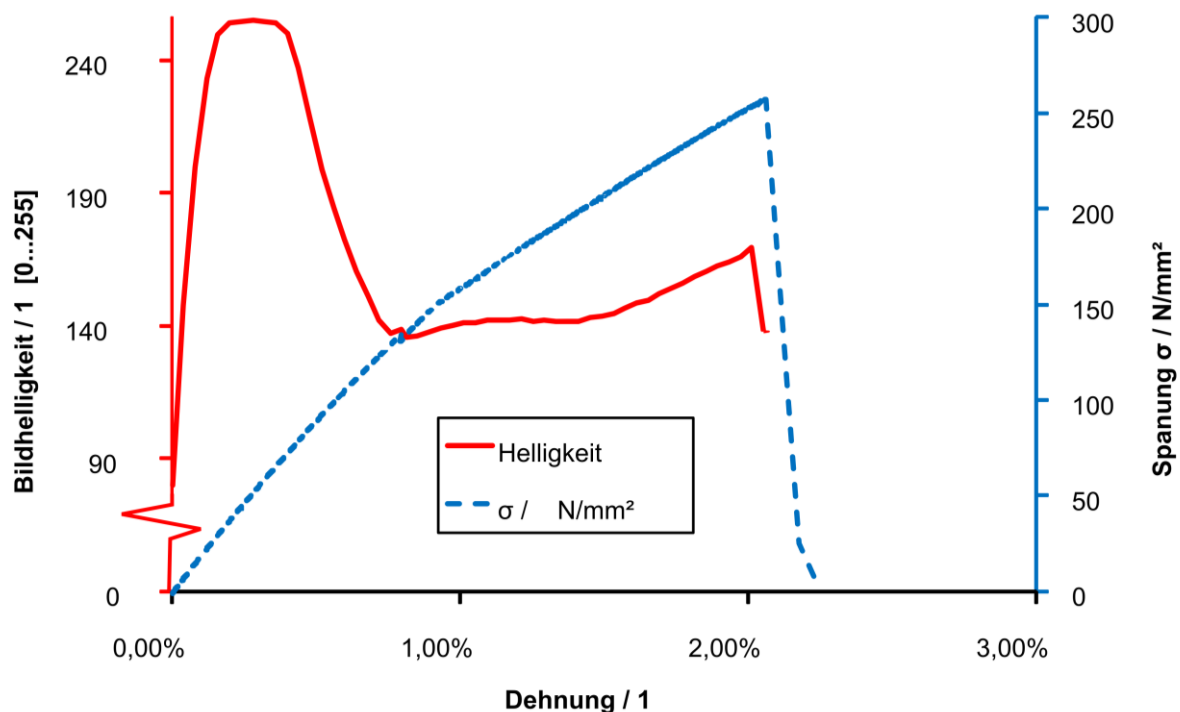


Abbildung 58 Helligkeitsverlauf eines Zugversuches im polarisierten Licht, 0,2mm/min

Hinweise auf das Zusammenspiel von Doppelbrechung und entstehenden Rissen liefert der in Abbildung 58 dargestellte Helligkeitsverlauf der Transmission polarisierten Lichts während eines Zugversuchs. Zunächst steigt die Helligkeit stark an und führt sogar zur Überbelichtung des Fotos. Bei 0,5% Dehnung fällt die Helligkeit wieder stark ab, um dann im Bereich von 1% Dehnung wieder sanft anzusteigen. Eine Erklärung ist ein Vorherrschen spannungsoptischer Effekte zu Beginn, die dann von einem Rückgang der gesamten Intensität durch beginnende Rissbildung überlagert werden. Die physikalischen Hintergründe bedürften aber einer genaueren Untersuchung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen soll, so dass dieser Helligkeitsverlauf hier nur als Indiz beachtet werden soll.

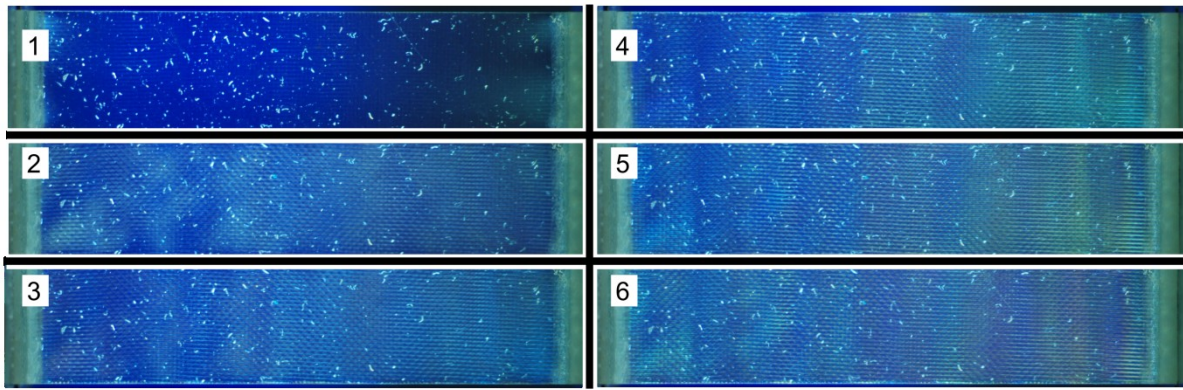


Abbildung 59 Lichttransmission (in polarisiertem Licht) an $0^\circ/90^\circ$ -Probe aus Indikatorschicht; (1)-(6): zunehmende Zugdehnung

Auch ohne zu wissen, inwieweit Spannungsoptik oder sich wieder schließende Mikrorisse die Aufhellung verursachen, kann der Zusammenhang zwischen optischen Eigenschaften und Dehnung der Probe in einem Punkt besser beschrieben werden: dem zeitlichen Verlauf der Aufhellung. In Abbildung 59 sind Fotos der in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargestellten Ergebnisse zu sehen. Es zeigt von 1 bis 6 nummeriert dieselbe Probe während der Belastung unter zunehmender Zuglast.

In Abbildung 60 ist der Verlauf der Aufhellung und der Dehnung einer stufenweise höher belasteten Probe dargestellt. Nach jeder Laststufe wurde die Probe entlastet. Der Helligkeitswert wurde jeweils bei Erreichen der Maximallast und bei erneutem Erreichen von $F=0\text{N}$ aufgenommen.

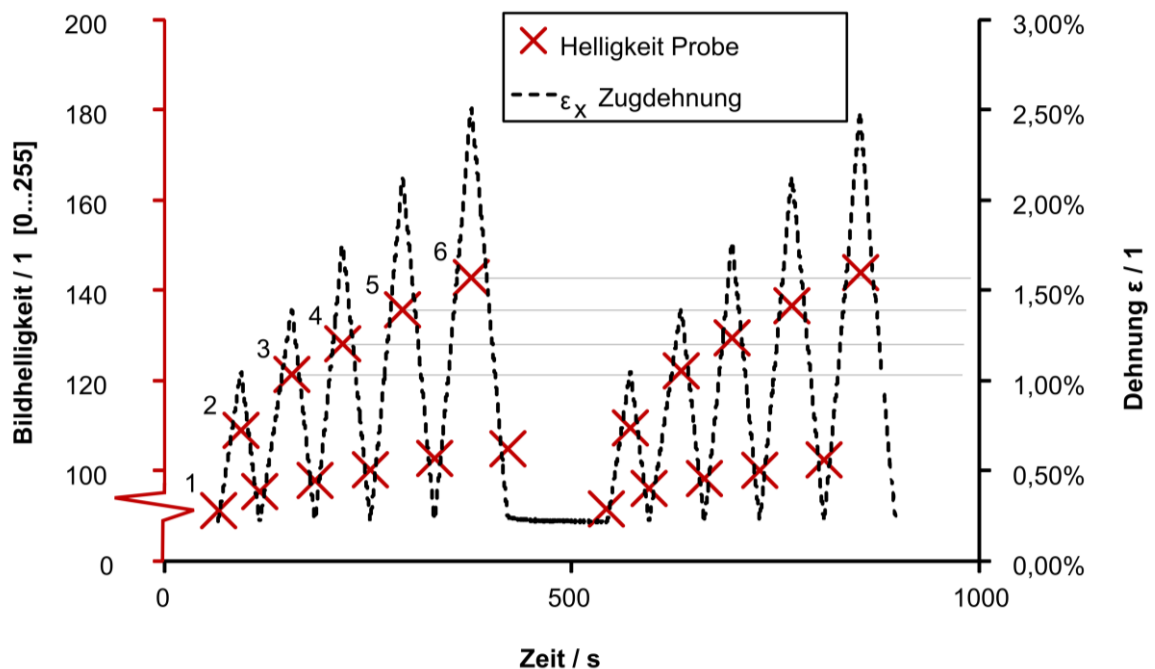


Abbildung 60 Reversible Eintrübung und Dehnung bei Auswertung mit polarisiertem Licht

Zu erkennen ist in Abbildung 60, dass die Aufhellung bei Entlastung einen von Laststufe zu Laststufe zunehmenden bleibenden Anteil hat, der bei mehrminütiger Entlastung wieder verschwindet. Abbildung 61 ist eine vergrößerte Darstellung dieser

Messwerte bei Entlastung. Dort ist der Verlauf der Dehnung detaillierter dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Aufhellung und Dehnung ist zu erkennen. Qualitativ wurde eine geringe bleibende Eintrübung der Probe und ein zeitabhängiger Rückgang dieser nach Entlastung auch bei Proben bei normaler Beleuchtung mit dem bloßen Auge beobachtet, war dort fotografisch aufgrund der geringen Helligkeitsänderung aber nicht dokumentierbar.

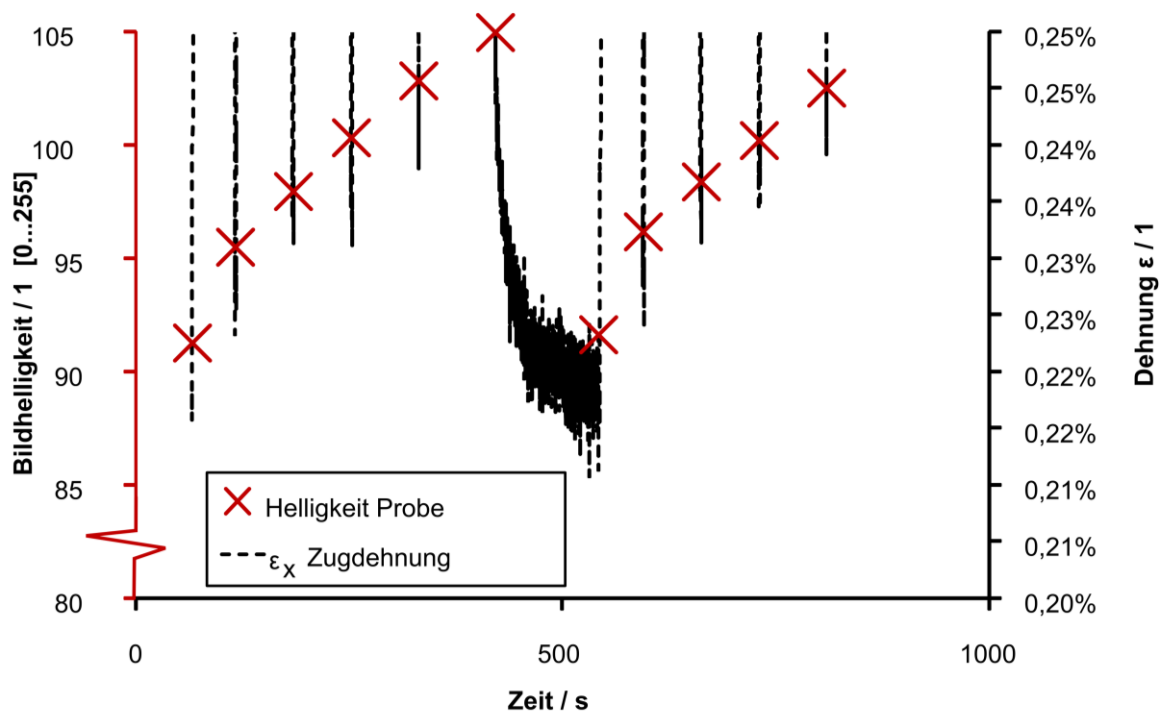


Abbildung 61 Reversible Eintrübung und Restdehnung bei Auswertung mit polarisiertem Licht

Die Unterscheidung der möglichen physikalischen Ursachen soll im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr im Detail erfolgen. Möglich ist ein kombiniertes Auftreten von Mikrorissen, die sich im Rahmen der Empfindlichkeit optischer Verfahren wieder perfekt schließen und weiterer optischer Effekte an Rissspitzen und Faser-Matrix-Grenzflächen. Wie die Experimente mit dem spannungsoptischen Aufbau gezeigt haben, spielt hierbei die Doppelbrechung eine Rolle. Dass Doppelbrechung ohne externe Polarisationsfilter zur Eintrübung der Proben beiträgt, ist ebenfalls möglich, aber ohne aufwändigere optische Simulationen und Modellversuche hypothetisch. Polarisationsfilter auf Refraktionsbasis aber existieren [JDHB98, ToHW09] und die Struktur der eingebetteten Glasfasern ist sehr regelmäßig und könnte Licht polarisieren. Somit ist dies auch in den Strukturen der Indikatorschicht möglich. Auch Crazing [Ehre92, Meng90] ist an den Rissspitzen [Reif80] zunächst denkbar und könnte zur Eintrübung beitragen. Crazing wird bei Epoxidharzen aber selten beobachtet [LiHo73, LoHa86].

Der Befund, dass die Eintrübung der Proben aus 36 Lagen des untersuchten Indikatormaterials nach einmaliger Belastung in eine der beiden Faserrichtungen stark reversibel ist, ist aber unabhängig von seiner Ursache.

+/-45°-Proben, Zugversuche

Auch für die +/-45° Ausrichtung wurden reine Indikatorschichtproben quasistatisch bis zum Bruch getestet.

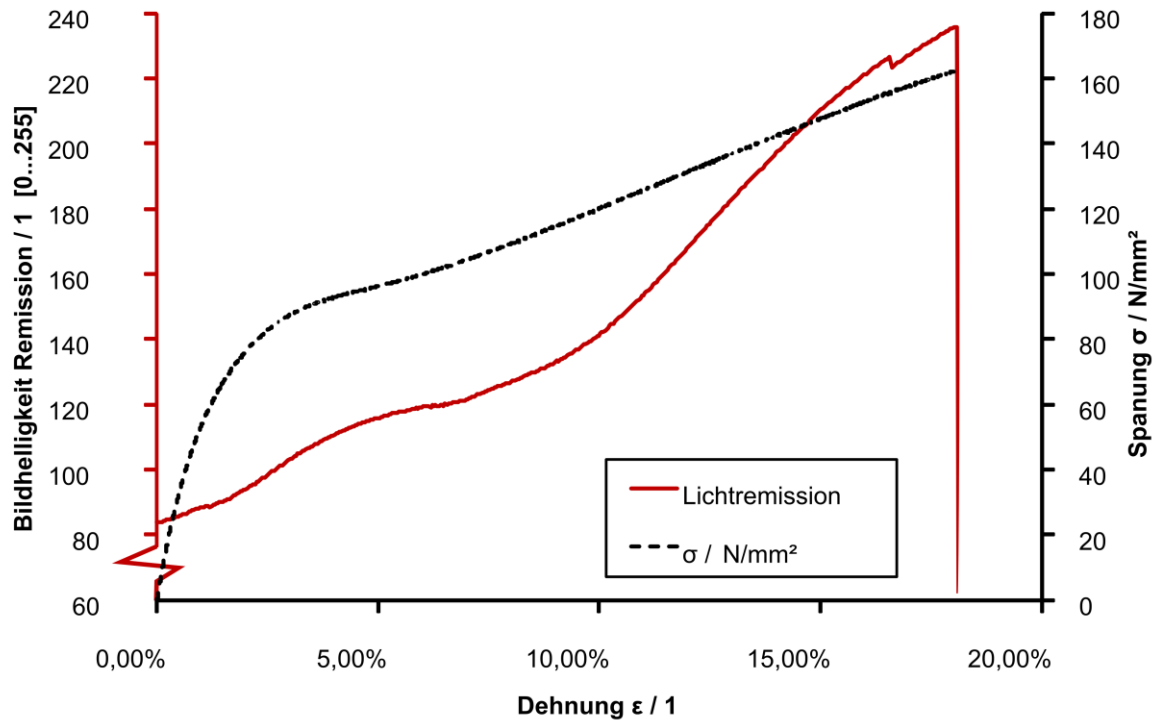


Abbildung 62 Remission an +/-45°-Indikatorschichtmaterial, Zugversuch 0,1mm/min

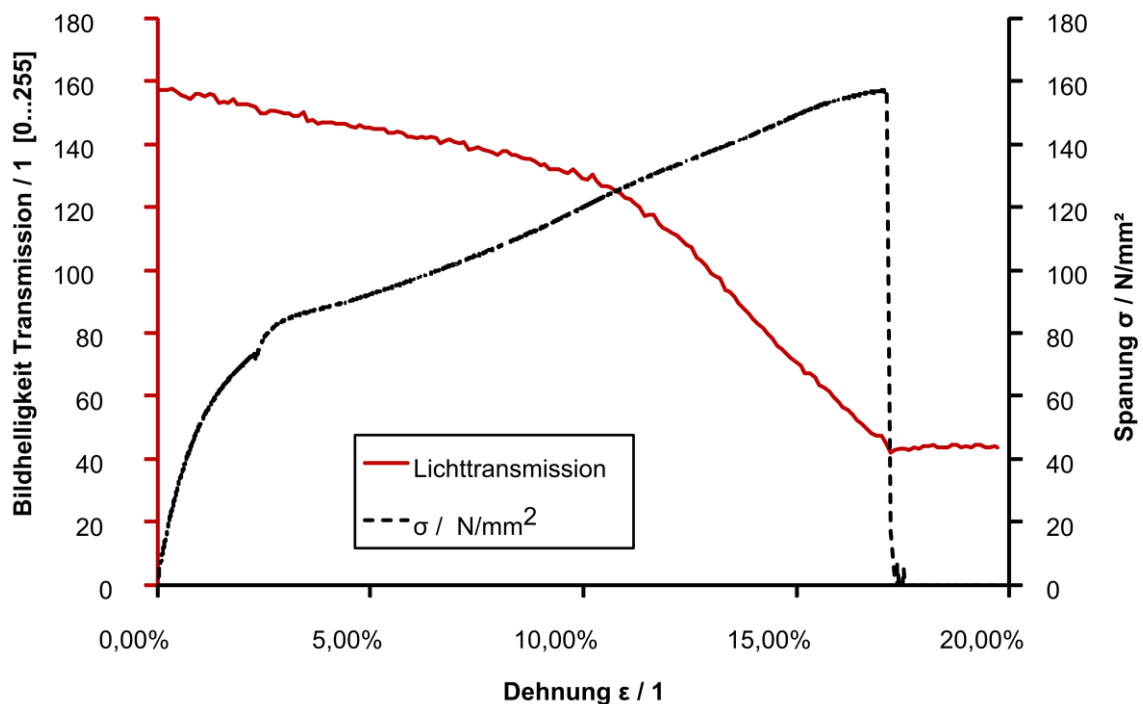


Abbildung 63 Transmission an +/-45°-Indikatorschichtmaterial, Zugversuch 0,01mm/min

Der Bruch tritt bei den in Abbildung 63 dargestellten Ergebnissen einer Probe in Lichttransmissionsauswertung bei über 17% Dehnung auf. Gezeigt wird nur die relevante Dehnung bis 5%. In der Anwendung als Indikatorschicht bei Betriebsbelastung wird dieser Wert nicht überschritten. Bei 2,3% Dehnung wurde die Messung kurz unterbrochen und die Traversengeschwindigkeit von 0,01mm/min auf 0,1mm/min erhöht, um den Versuch zu beschleunigen. Der gesamte Verlauf wird in Abbildung 63 dargestellt.

Abbildung 62 zeigt den Verlauf von rückgestrahltem Licht und Spannung aufgetragen über die Dehnung einer gleichartigen Probe bei sonst identischem Versuchsablauf. Sowohl in Transmission (Abbildung 63) als auch in Remission (Abbildung 62) läuft die Entwicklung der Probeneintrübung zu Beginn proportional zur Dehnung. Dies wurde ähnlich auch schon an anderen Halbzeugkombinationen [Bam08] beobachtet und ist vergleichbar mit dem dort beobachteten Verlauf von Dehnung und Eintrübung. Der Verlauf der Spannung zeigt die starke Degradation des Verbundes mit zunehmender Dehnung.

Auch die Rückstrahlung der $\pm 45^\circ$ -Proben hat einen großen reversiblen Anteil. In Abbildung 64 ist der Verlauf von Helligkeit und Dehnung einer Probe dargestellt, die mit in Stufen ansteigender Last belastet und dann wieder entlastet wurde. Die Helligkeit folgt qualitativ gut dem Verlauf der Dehnung der Probe.

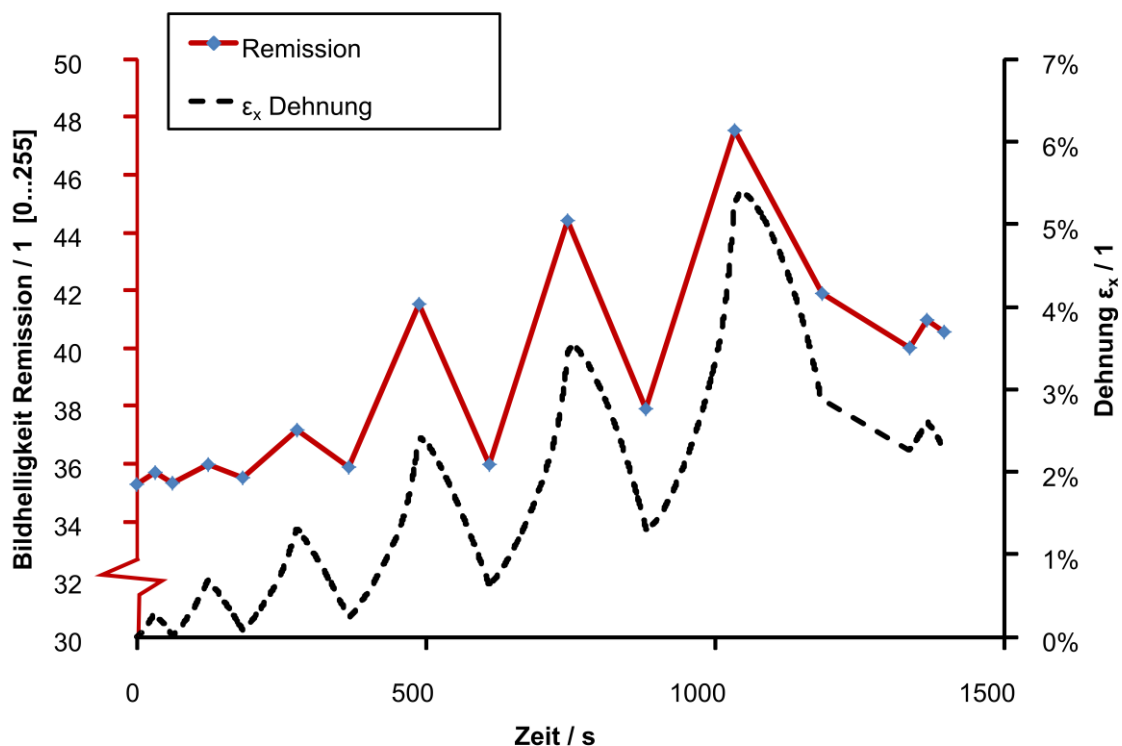


Abbildung 64 Remission und Dehnung an $\pm 45^\circ$ -Indikatorschichtmaterial

4.3.2. Schwingende Belastung an der Indikatorschicht

Die Beobachtung der Rückstrahlung bei schwingender Belastung zeigt eine große bleibende Eintrübung der Proben. Ausgehend von einer berechneten Zwischenfa-

serbruchgrenze aus der schichtweisen Festigkeitsanalyse von 110MPa wurde eine 0°/90°-Probe zugschwellend bei einem Lastverhältnis von $R=0,1$ und σ_o von zunächst 100MPa belastet. Über ca. $3 \cdot 10^5$ Lastwechsel nahm die Rückstrahlung (siehe Abbildung 65) nur sehr wenig zu. Eine Erhöhung der Oberlast σ_o auf 150MPa führte zu einer deutlichen Zunahme. Eine weitere Steigerung auf 200MPa erfolgte um schnell einen Endwert der Eintrübung und Rissdichte zu erreichen. Die Zunahme der Rissdichte im Schwingversuch strebt für das 0°/90°-Laminat aus 36 Lagen des Faserhalbzeuges der Indikatorschicht zu einem Sättigungszustand mit geringer weiterer Zunahme der Eintrübung. Die Dehnung und die Eintrübung verlaufen auf den jeweiligen Lastniveaus ähnlich – wie Abbildung 65 zeigt.

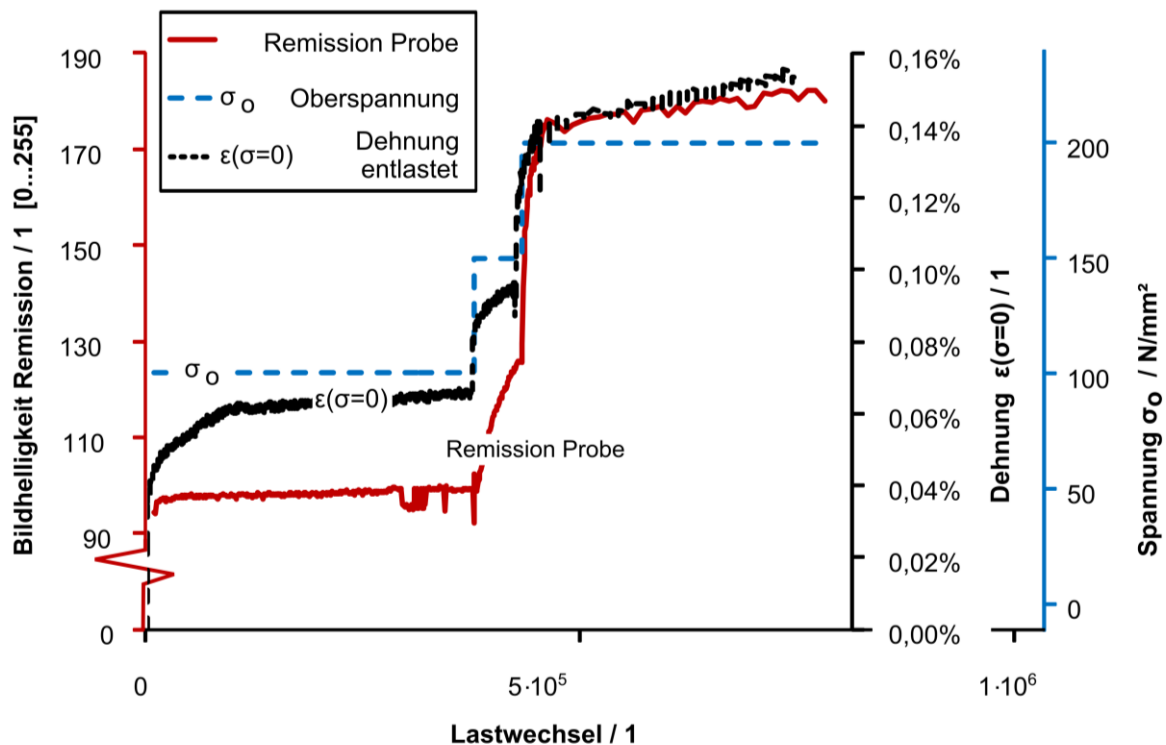


Abbildung 65 Beginn der Eintrübung (Rissbildung) an Indikatorschichtprobe bei schwingender Last, $R = 0,1$

4.3.3. Belastete Indikatorschicht unter dem Mikroskop

Ziel der Untersuchung unter dem Mikroskop ist die Suche nach den Ursachen der reversiblen und irreversiblen Eintrübung der transparenten Proben. Es wurde je eine unbelastete, eine einmalig bis zum Versagen im Zugversuch belastete und eine zugschwingend belastete 0°/90°-Probe untersucht. Aus den Proben präparierte Schnitte wurden im Durchlichtmikroskop bis kurz vor Zwischenfaserbruch (ca. 110MPa) belastet (Siehe Abbildung 66). Hierfür existiert im Fachbereich „Mechanik der Polymerwerkstoffe“ der BAM eine eigenentwickelte Prüfmaschine, die eine Belastung von Proben bis 500N während der Untersuchung unter dem Mikroskop ermöglicht. Die Absolutwerte der Lichttransmission sind dabei nicht direkt vergleichbar, da durch die Anordnung unter dem Mikroskop keine Referenz mit gemessen wird.

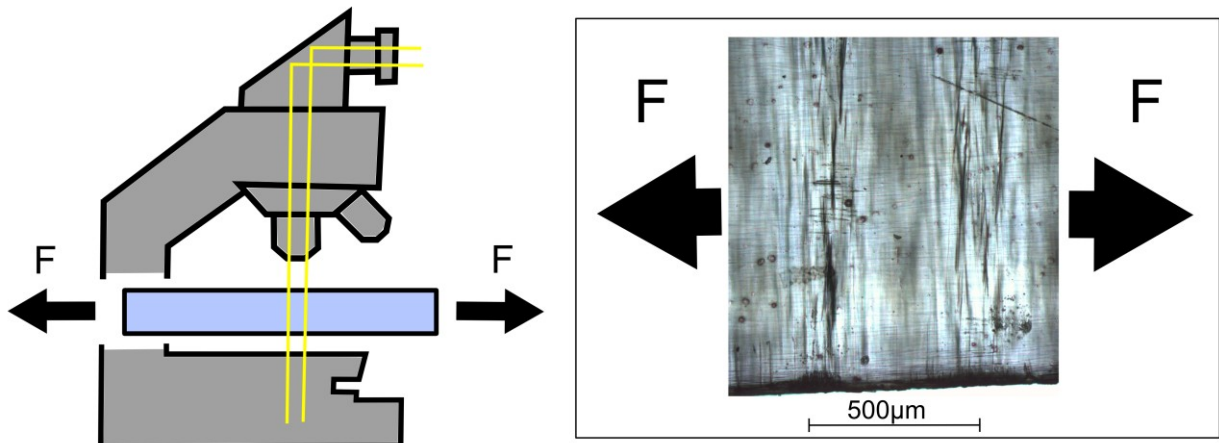


Abbildung 66 Unter dem Durchlichtmikroskop belastete Proben, Beispiel: Aufnahme einer schwingend vorbelasteten Probe unter 5-facher optischer Vergrößerung

An der unbelasteten $0^\circ/90^\circ$ -Probe (Abbildung 67) wurde eine deutliche Verdunkelung der Probe festgestellt, die bei Entlastung vollständig reversibel war. Risse und Mikrorisse konnten aber auch bei 50-facher Vergrößerung weder mit noch ohne anliegende Zuglast gefunden werden.

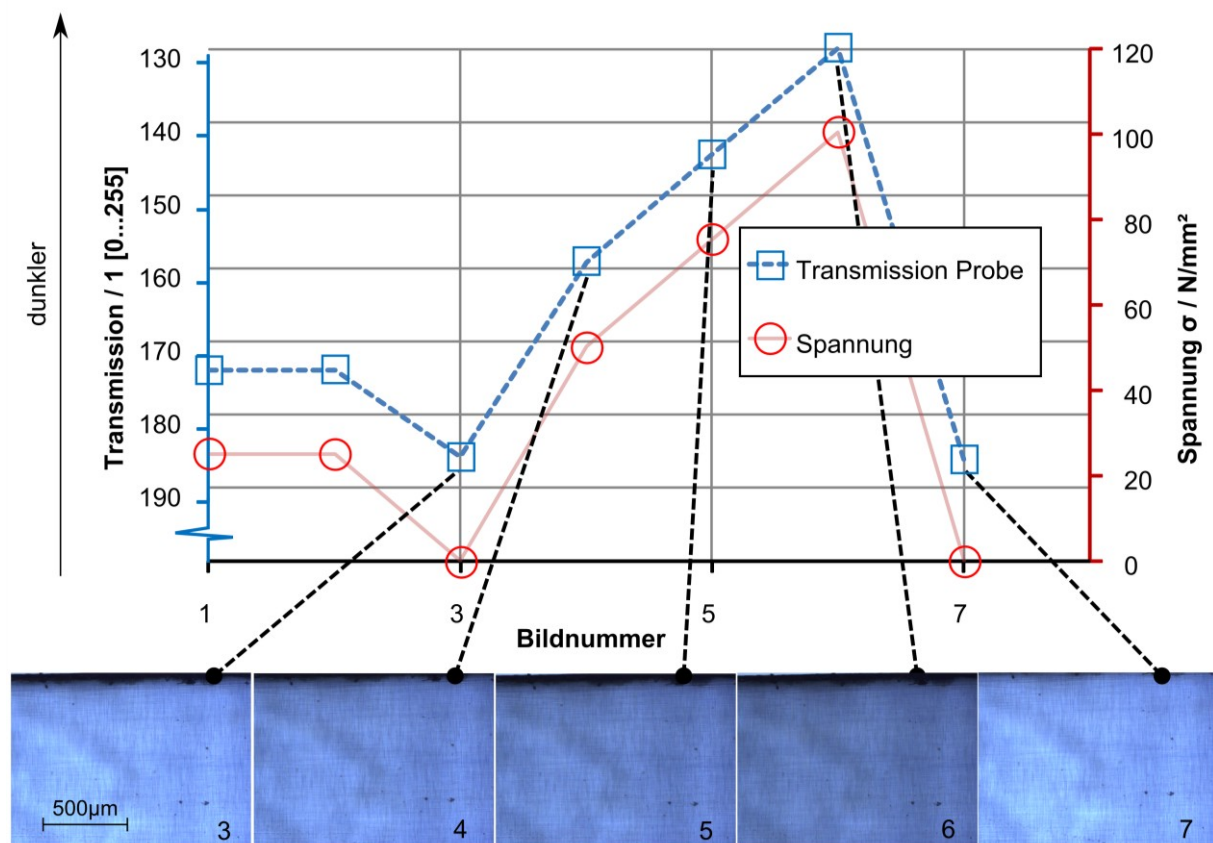


Abbildung 67 Reversible Eintrübung unter dem Durchlichtmikroskop an einer zuvor unbelasteten Probe

An einer Sektion der im Zugversuch bei 290MPa gebrochenen 0°/90°-Probe (Abbildung 68) konnten dagegen einige Querrisse gefunden werden. Aus dem Messbereich der gebrochenen Probe wurde dazu ein Streifen (1mm x 1mm x 60mm) fein geschliffen und heraus präpariert. Da die Risse in verschiedenen Ebenen liegen,

werden die tiefer gelegenen nicht scharf dargestellt und tragen so zur diffusen Transmissionsabnahme durch die Probe bei Rissöffnung durch Belastung verstärkt bei. Auch hier ist die Eintrübung unter Last im Rahmen der Messauflösung vollständig reversibel.

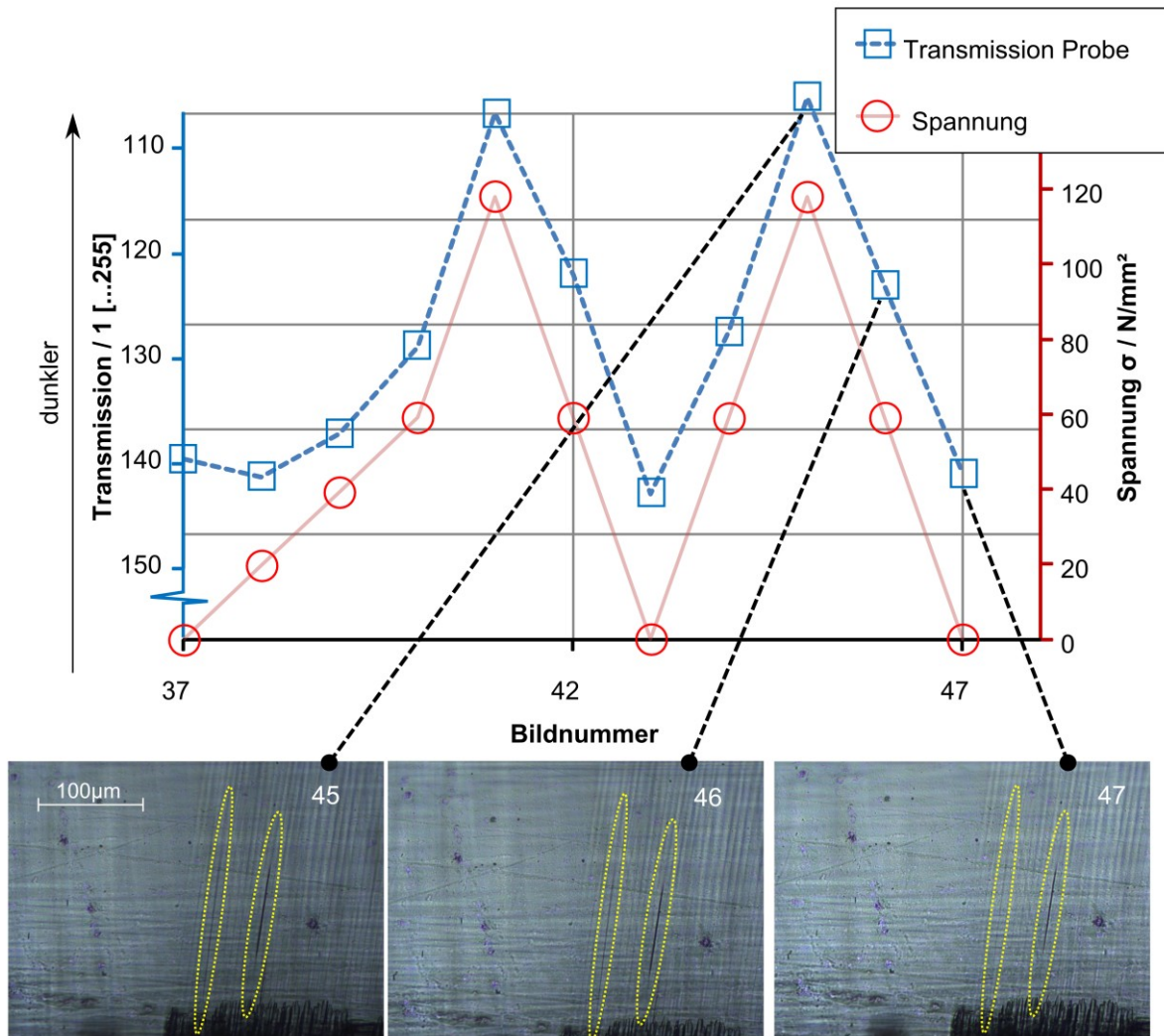


Abbildung 68 Zugprobenstreifen aus bereits gebrochener Zugprobe unter mäßiger Zuglast unter dem Durchlichtmikroskop

An einem Ausschnitt aus einer zugschwellend zyklisierten Probe (Abbildung 69) wurde eine deutlich größere Rissdichte festgestellt. Viele Querrisse in verschiedenen Ebenen verursachen eine deutliche Transmissionsabnahme. Auch hier ist die Zunahme unter Last – im Rahmen der Messauflösung – ebenfalls reversibel und vor allem von der momentanen Last abhängig.

Es tritt also auch im als rissfrei eingestuften Laminat eine reversible Abnahme der Transmission unter Zuglast auf. Dieser Effekt steht nicht offensichtlich erkennbar im Zusammenhang mit der Öffnung eventueller Risse, – soweit er mit der Auflösung optischer Mikroskopie detektierbar ist.

Die reversible Eintrübung in statisch beziehungsweise dynamisch vorbelasteten Proben unterscheidet sich qualitativ deutlich. Die Eintrübung nach einem quasistatischen Zugversuch bis zum Versagen ist deutlich geringer als die einer Probe nach einem zugschwellenden Schwingversuch. Die im Schwingversuch ermüdete Probe

weist schon ohne Zugvorlast eine hohe Rissdichte auf. Diese Risse werfen je nach Tiefe im Laminat Schatten, die unter Last größer werden und die Probe stärker eintrüben.

In der Probe nach dem Zugversuch sind nur einzelne Risse erkennbar. Diese werden im Durchlichtbild etwas länger und breiter und tragen damit zur Eintrübung der Probe bei. Vor Allem in tieferen Schichten liegende Risse werfen breitere Schatten.

Die Form der Risse unterscheidet sich vom Zugversuch zum Schwingversuch durch unregelmäßigere, deutlicher erkennbare Rissufer beim Schwingversuch, die auch im entlasteten Zustand noch erkennbar geöffnet bleiben.

In der vorher unbelasteten Probe konnten trotz deutlicher lastabhängiger Eintrübung keine Risse optisch aufgelöst werden. Mögliche Erklärungen für die Eintrübung sind Mikrorisse, die kleiner als die Auflösung der Mikroskope sind oder spannungsoptische Effekte, die durch wiederholte Doppelbrechung einen gewissen Lichtanteil aus dem Aufnahmebereich der Linse bringen.

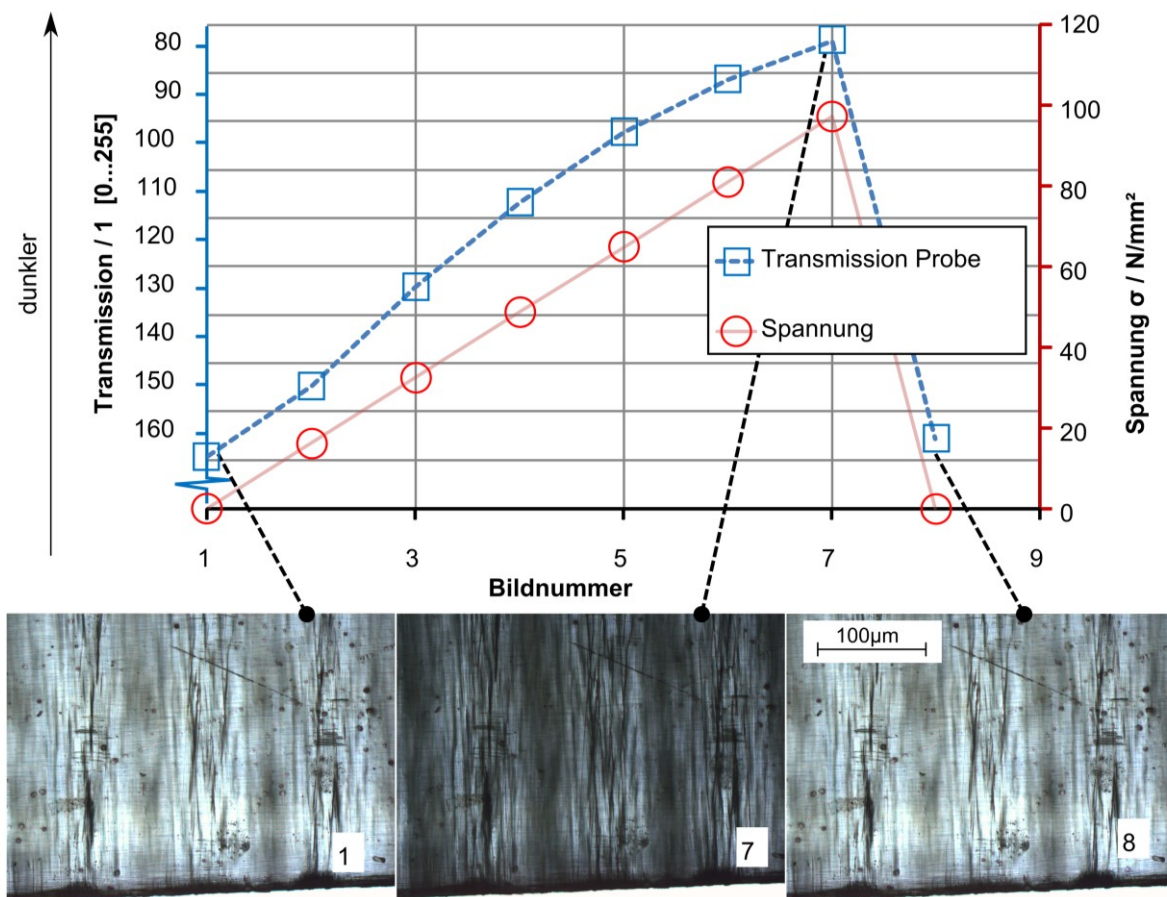


Abbildung 69 Schwingend vorgeschädigte Probe unter mäßiger Zuglast unter dem Durchlichtmikroskop

Zwischenfazit zum Verhalten der Indikatorschicht

Für die Untersuchung des Grundmaterials der Indikatorschicht war aus fertigungs- und versuchstechnischen Gründen eine Mindestdicke von 1mm nötig. Daher ergab sich eine GFK-Platte von 36 Lagen des Gewebes. Damit konnte zwar der Faservolumengehalt in einem ähnlichen Bereich realisiert werden, wie der in der Indikator-

schicht aus Mikroskopaufnahmen geschätzte. Die Interaktionen zwischen vielen gleichartigen Lagen hier beziehungsweise der Indikatorschicht und dem größeren Grundlaminat in Einsatz der Indikatorschicht sind dort jedoch unterschiedlich. Die Dicke von 36 Lagen bietet außerdem optischen Effekten wie Lichtbrechung und Doppelbrechung deutlich mehr Raum zur Ausprägung als nur eine Lage. Dies war ein Argument bei der Wahl der Probendicke, führt letztlich aber zu einer schlechteren Vergleichbarkeit. Sowohl zur Ausprägung bei der $0^\circ/90^\circ$ -Ausrichtung als auch bei der $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung ist die Eintrübung stark an die elastische Dehnung gebunden – dargestellt durch größere Rückstrahlung oder Transmissionsrückgang. Auch die viskoelastischen Anteile, die nach der Entlastung in einem zeitabhängigen Dehnungsrückgang zutage treten, werden in der Probeneintrübung sichtbar. Als Grund dafür wird eine Kombination aus noch nicht unter dem Lichtmikroskop erkennbaren Mikrorissen mit der Doppelbrechung in Glasfasern und Epoxidharz vermutet.

Zusammengefasst ergibt sich also:

- Eine deutliche bleibende Eintrübung der Indikatorschicht tritt erst spät ein und bedarf mehr als einmaliger Belastung.
- Die unterschiedlich stark vorgeschädigten Proben zeigen ebenfalls eine proportional unterschiedlich stark dehnungsabhängige Zunahme der Eintrübung
- Bei der reinen Indikatorschicht besteht eine deutliche Dehnungsabhängigkeit der Eintrübung - gemessen als Rückstrahlung oder Transmissionsrückgang.
- Remission und Transmission sind vergleichbar.

4.4. Rissdarstellung in der applizierten Indikatorschicht

Eine zentrale Frage in dieser Arbeit ist die nach der Darstellung der Risse des Grundlaminates in der Indikatorschicht. Genauer:

- Werden Risse, die in der direkt darunter liegenden Schicht entstehen, zuverlässig durch die Indikatorschicht angezeigt?
- Hat die Indikatorschicht relevante Rückwirkungen auf das Laminat?
- Wie setzt sich ein Riss in die Indikatorschicht fort?

Dies kann an Querschliffen von belasteten Proben mit Indikatorschicht unter dem Mikroskop untersucht werden.

4.4.1. Lichtmikroskopische Untersuchung der Rissübertragung

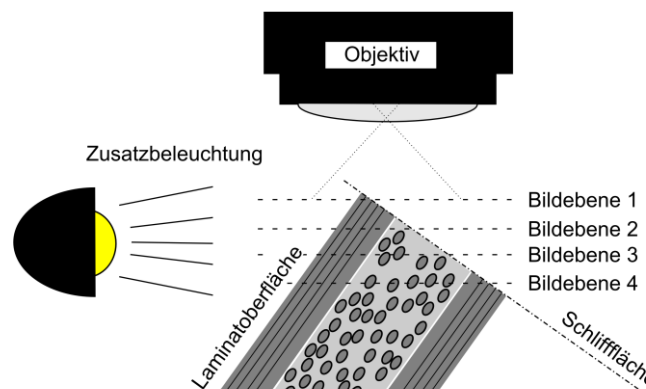


Abbildung 70 Image-Stacking zur nachträglichen Vergrößerung der Tiefenschärfe

Das Grundmaterial ist in den Untersuchungen mit Röntgenrefraktions- und Schallemissionsmessungen bereits hinsichtlich der Querrissbildung untersucht worden (siehe 4.1). Die Proben wurden an den Kanten mit Nassschleifpapier auf einer Schleifscheibe bis 4000er Körnung geschliffen und anschließend unter dem Auflichtmikroskop betrachtet. Dabei haben sich verschiedene Vorgehensweisen bewährt. Ein einfaches Stereomikroskop mit einem Beleuchtungs-Ring, der die Proben leicht seitlich und gleichmäßig beleuchtet, liefert gute Übersichtsaufnahmen vom Bruchbild.

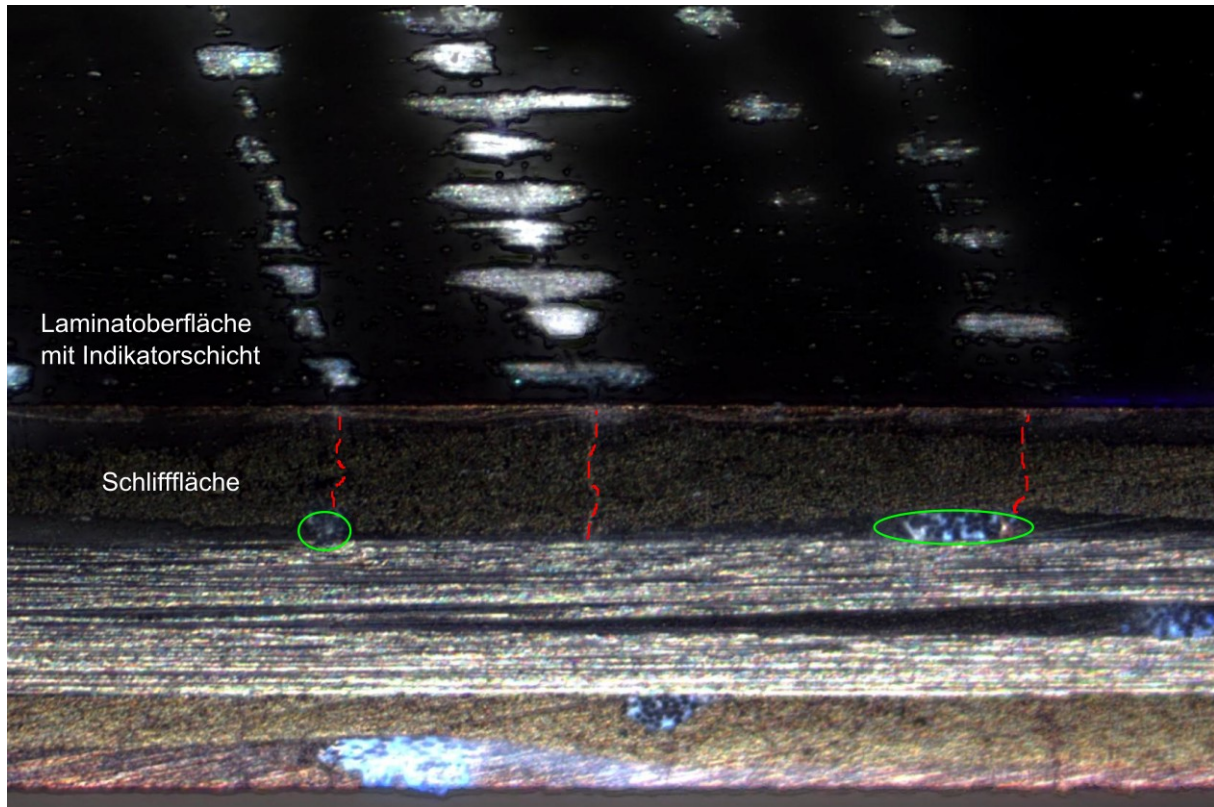


Abbildung 71 Schrägansicht, beschichtete Seite: Rissdarstellung (farblich hervorgehoben) in der Indikatorschicht, Rissstart teilweise an Inhomogenitäten z.B. Bindungsfäden des NCF-Kohlenstofffasergeleges

Bei leicht schräg angestellten Proben lassen sich mittels Image-Stacking (Abbildung 70) Übersichtsaufnahmen mit softwareseitig vergrößerter Tiefenschärfe zusammensetzen. In Abbildung 71 konnte damit deutlich dargestellt werden, wie Risse aus dem Substrat in der Indikatorschicht dargestellt werden. Die ansonsten schwer zu erkennenden Risse sind gestrichelt hervorgehoben. Von der Indikatorschicht werden sie durch linienförmig angeordnete weiße Flecken dargestellt. An der Grenze der obersten, quer zur Last angeordneten Substratschicht zur unteren Längsfaserschicht sind zwei typische Startpunkte der Querrisse hervorgehoben.

In Abbildung 72 ist dieselbe Probe dargestellt, wie sie nach demselben Verfahren an der unbeschichteten Seite aufgenommen wurde. Trotz guter Beleuchtung von der Seite sind die Risse nur schwer zu erkennen, obwohl die Risse bereits mit weißen Farbpigmenten hervorgehoben werden.

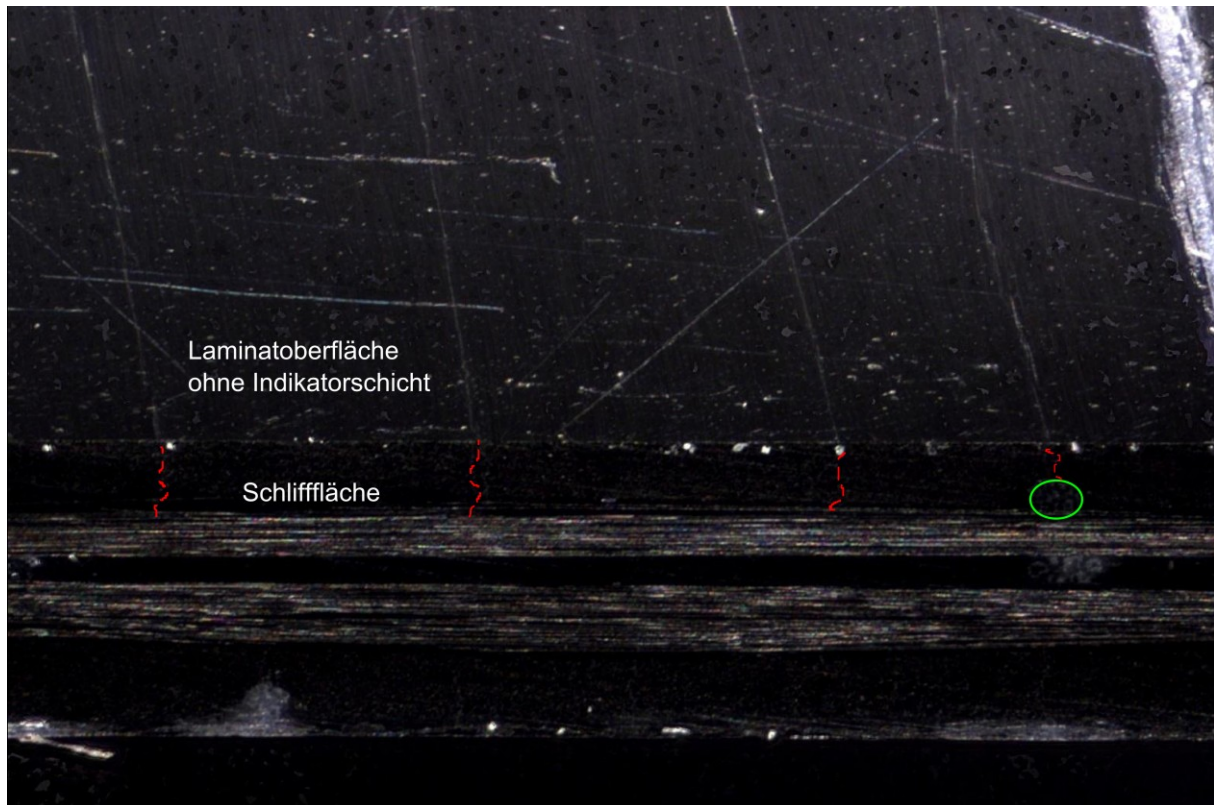


Abbildung 72 Schrägansicht, NCF-Gelege, unbeschichtete Seite: Risse (farblich hervorgehoben) kaum erkennbar

Zusätzliche seitliche Beleuchtung hilft auch bei Untersuchungen unter einem höher auflösenden (mit klassischer integrierter Auflichtbeleuchtung durch die Objektive ausgestatteten) Mikroskop, die Rissbildung (Abbildung 73) in der Indikatorschicht besser sichtbar zu machen. In Teilbild (b) ist der Effekt der beleuchteten Indikatorschicht einmal an der fokussierten Oberfläche und schemenhaft unscharf auch an einem weiteren weißen Fleck außerhalb des Fokus erkennbar.

Die **Rückwirkungen der Indikatorschicht** auf die betrachtete Schicht werden theoretisch bzw. anhand von Erkenntnissen aus der Literatur und auch durch die Auswertung der Mikroskopaufnahmen bewertet. Aus der Literatur [NaHu92, NaHu94, Reif80, SmBG98] ist bekannt, dass der Lagenaufbau durchaus einen Einfluss auf die Entwicklung der Querrissdichte hat. $0^\circ/90^\circ$ -Lamine unterscheiden sich von $90^\circ/0^\circ$ -Laminen durch später einsetzende Rissinitierung bei innenliegenden Querschichten. Außerdem beobachtet man einen geringeren Einfluss der Risse auf die weiteren Eigenschaften und eine stärkere Delaminationsbildung wenn die Querschicht außen liegt. Diese Untersuchungen beziehen sich aber auf Lamine in denen die Position der tragenden Längsschicht variiert wird. Im Falle der nicht wesentlich mittragenden Indikatorschicht sind die zu erwartenden Effekte wesentlich kleiner. Die Indikatorschicht ist durch geringen Faservolumengehalt φ , geringer Steifigkeiten von GFK im Vergleich mit CFK und sehr geringer Dicke der Schicht wesentlich weniger zug- und biegesteif als die dicken Deckschichten in der Literatur. Typisch für die hier verwendeten Werkstoffe sind $E_{\parallel}^{CFK\ 0^\circ\ 90^\circ} \cong E_{\perp}^{CFK\ 0^\circ\ 90^\circ} \cong 55\text{GPa}$ (aus Messung) für das CFK- $0^\circ/90^\circ$ -Gewebe-Laminat und $E_{\parallel}^{GFK\ 0^\circ\ 90^\circ} \cong E_{\perp}^{GFK\ 0^\circ\ 90^\circ} \cong 14\text{GPa}$ (aus Messung) für die Indikatorschicht jeweils in $0^\circ/90^\circ$ -Ausrichtung. Die Dicke der Indikatorschicht ist mit

0,03mm ($\varphi \cong 30\%$) im Vergleich zu den 1mm oder 2mm der Testsubstrate ebenfalls sehr klein.

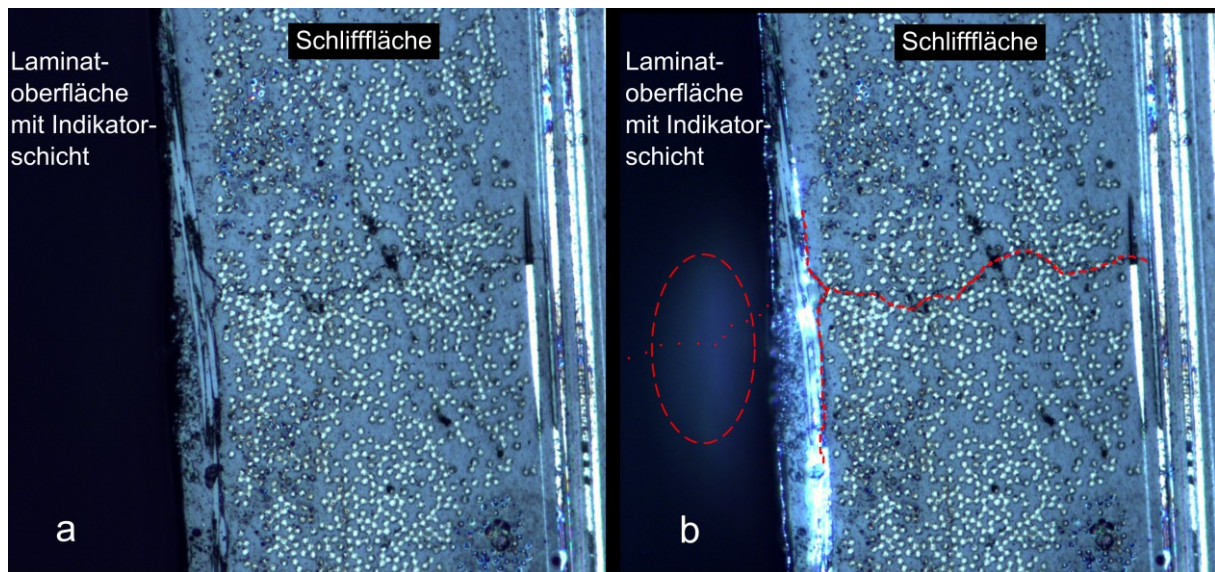


Abbildung 73 Riss im Auflicht schwer erkennbar (a) und mit zusätzlichem Seitenlicht durch die Indikatorschicht auch an der Oberfläche durch helle Flecken gut sichtbar (b)

Eigene Ergebnisse für betriebsbelastete 0°/90°-Proben aus UD-Gelege sind in Tabelle 3 dargestellt. Der Rissabstand im Segment mit Indikatorschicht unterscheidet sich nur wenig von dem im unbeschichteten Bereich der Probe.

Tabelle 3 Rissdichte mit und ohne Indikatorschicht an der Oberfläche

Probe G3 auf 60mm Länge	Rissanzahl	Rissabstand
Normale Oberfläche	51	1,18mm
Beschichtete Oberfläche	54	1,11mm

An schwingend belasteten Proben wurde die Rissdichte an polierten Probenkanten ausgezählt – jeweils an der Seite mit und ohne Indikatorschicht (siehe Tabelle 4). Zu vermuten wäre eine geringere Rissdichte auf der von der Indikatorschicht „verstärkten“ Seite.

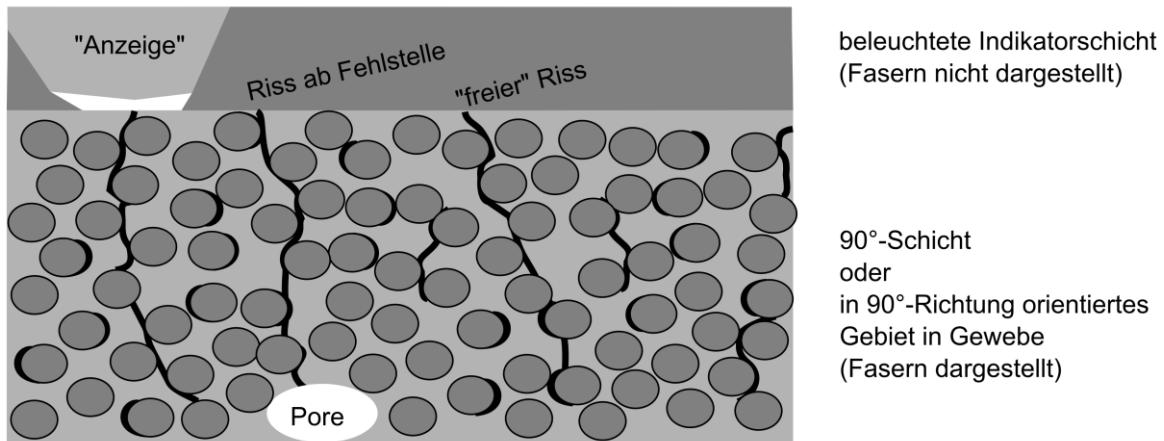


Abbildung 74 Kategorien von Rissen, wie sie im Schliffbild an der seitlich beleuchteten Probe unter dem Mikroskop beobachtet wurden

Die Ergebnisse liefern keinen besonderen Hinweis auf einen rissverhindernden Einfluss der Indikatorschicht. Im Gegenteil war bei der Risssuche unter dem Mikroskop zu beachten, dass die bessere Erkennbarkeit durch die Indikatorschicht eine schnellere Erkennung der Risse ermöglichte. Risse, die sonst vielleicht übersehen worden wären, waren durch die Indikatorschicht auffälliger. Die konzentriertere Suche nach Rissen in der Nähe von Auffälligkeiten in der Indikatorschicht, macht auf bestimmte Risse erst aufmerksam. Auf der unbeschichteten Seite der Probe können also Risse übersehen werden, die auf der beschichteten hervorgehoben worden wären. Deshalb wird in Tabelle 4 zwischen Rissen unterschieden, die (siehe Abbildung 74) ein „Signal“ in der Indikatorschicht hervorrufen, solchen bei denen die Darstellung in der Indikatorschicht erst auf den Riss aufmerksam gemacht hat (also der Riss mit hoher Wahrscheinlichkeit sonst nicht erkannt worden wäre) und solchen, die in der CFK-Schicht erkannt wurden, aber in der Indikatorschicht keine erkennbare Rückstrahlung bewirken.

Tabelle 4 Rissdichte mit und ohne Indikatorschicht im Schliffbild

Probe G3 auf 65mm Länge	Von Fehlstelle ausgehend	„freie“ Risse	Summe	Rissabstand
Normale Probenoberfläche	36	11	47	0,72mm
Beschichtete Oberfläche gesamt	36	25	61	0,94mm
davon:				
„Anzeige“ in Indikatorschicht	24	14	-	-
„Anzeige“ führte zur Erkennung	5	8	-	-
Keine „Anzeige“	7	3	-	-

Ein weiteres Ergebnis der Risszählung ist das Verhältnis von Rissen, die erkennbar sind, zu Rissen, die auch eine Trübung der Indikatorschicht (eine „Anzeige“) hervor-

rufen. Das Ergebnis der Stichprobe an einem $0^\circ/90^\circ$ -Gelegelaminat zeigt, dass nur ein geringer Anteil keine „Anzeige“ in der Schicht erzeugt.

Bezüglich der Übertragung der Risse vom Grundlaminat in die Probe liefert die Untersuchung von Schliffen also interessante Informationen: Wie in Kapitel 3.1.3 dargestellt, ist die Intensität der Remission von der Größe der Risse und deren Lage relativ zur Beleuchtung und Beobachtung entscheidend. Für die Indikatorschicht bedeutet dies, dass schmale Risse senkrecht zur Beobachtungsrichtung nur geringen Anteil an der Remission haben werden. Breitere Rissflächen mit optisch rauer Oberfläche, wie Delaminationen werden viel Licht zurückwerfen. Diese Tatsache wird bei $0^\circ/90^\circ$ -Laminaten durch die feine Webstruktur der Indikatorschicht gut ausgenutzt. Wie in Mikroskopaufnahmen zu erkennen ist, werden die Risse an einem längsgerichteten Filament der dünnen Glasgewebeschicht gestoppt (Abbildung 71) und führen dort zu lokalen Delaminationen, die deutliche Remission verursachen. Die Ondulation der Glasfasern (Abbildung 73) und daraus die Schälspannungen an der Querriss spitze führen zu einer Delamination, die nach weiterer zyklischer Belastung bis zur nächsten Fadenkreuzung reicht. Dies geschieht jeweils bei unten- oder obenliegendem Längsfaden gleichermaßen, wobei die unten liegenden – also nach innen zum Laminat hin weisenden – größere delaminierte Bereiche erzeugen. In Abbildung 77 wird eine Hypothese des Mechanismus der Entstehung der charakteristischen hellen Flecken entlang der Querrisse unter Berücksichtigung aller Ergebnisse skizziert. Den Befunden aus den Schliffbildern zufolge treten diese Metadelaminationen nur entlang von Risse in der Kohlefaserschicht auf.

An $0^\circ/90^\circ$ -Gewebe-Laminaten ist der Vorgang – wie Abbildung 76 zeigt – vergleichbar. Hier ist das Grundlaminat seinerseits gewebt. Also enden oberflächennahe Querrisse in Dickenrichtung an Fadenkreuzungen. In Breitenrichtung verschwinden sie unter den Fadenkreuzungen, setzen sich darunter aber fort.

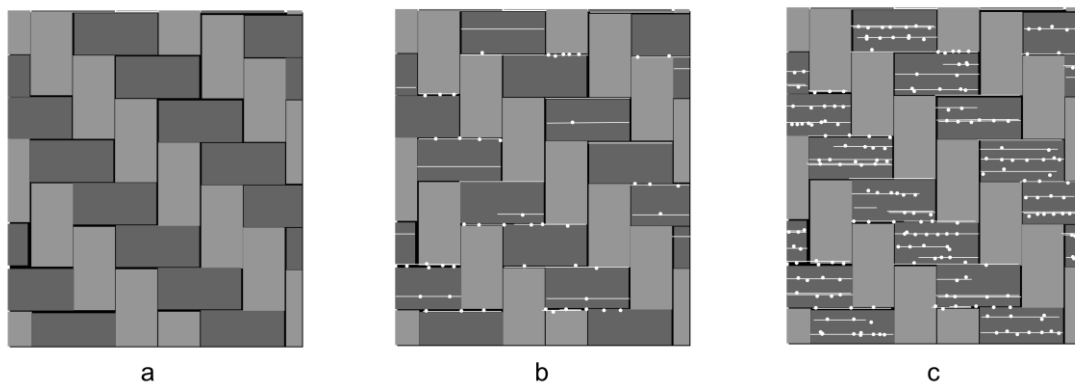


Abbildung 75 Rissanzeige in der Indikatorschicht an $0^\circ/90^\circ$ -Gewebe-Laminat; a) ohne Risse, b) Risse und Anzeige schwach ausgeprägt, c) deutliche Darstellung der Risse

Die Rissanzeige in $0^\circ/90^\circ$ -Gewebe laminat ist ebenfalls in Abbildung 75 skizziert. Abbildung 75 b und c zeigen zunehmende Ausprägungen der Rissausbildung und Rissanzeige in der Indikatorschicht. Zu Beginn der Rissentwicklung ist eine Besondere Häufung an den Webkreuzungspunkten typisch.

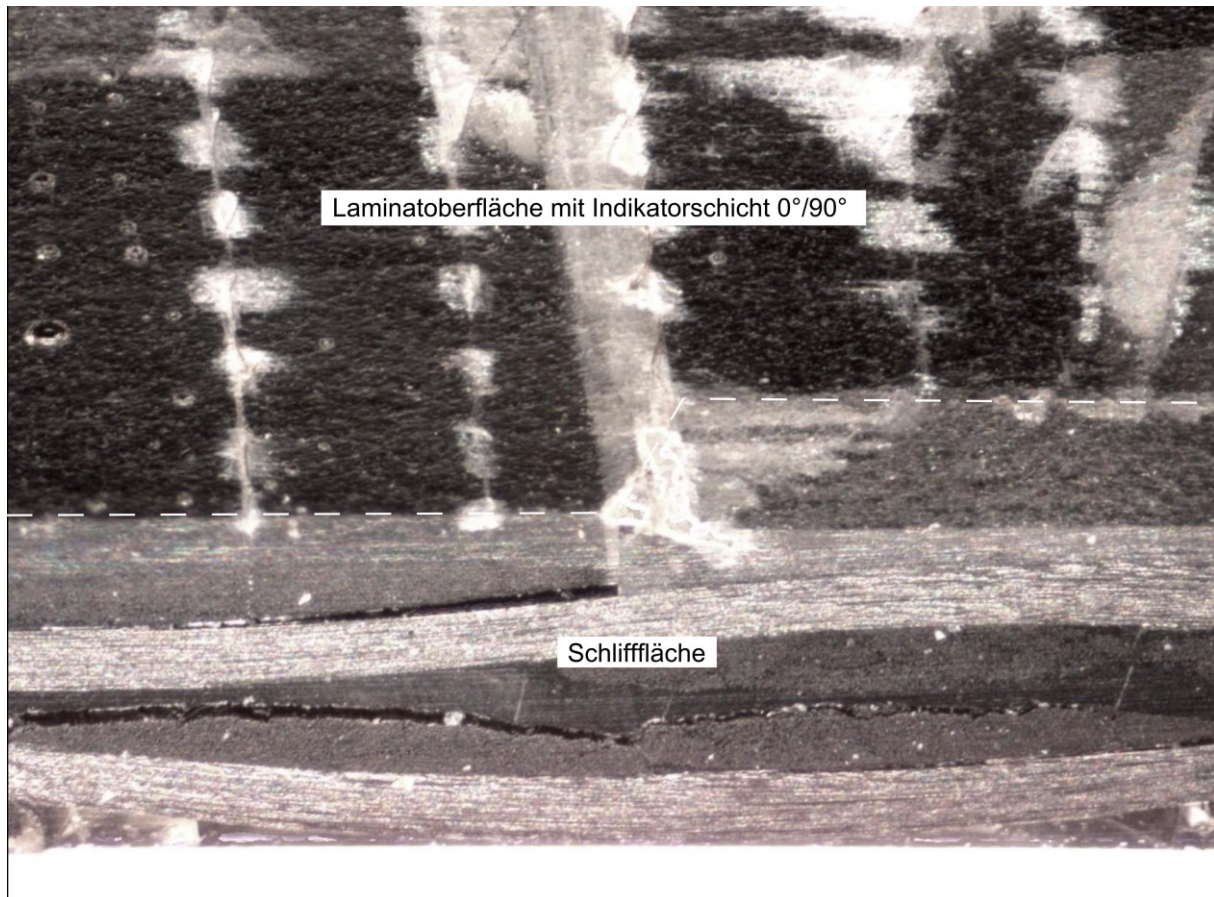


Abbildung 76 0°/90°-Gewebelaminat mit Indikatorschicht nach Probenversagen im Schwingversuch (Bildausschnitt abseits der Bruchstelle)

In Abbildung 77 wird das Verhalten der Indikatorschicht skizziert, wie es sich aus den Auswertungen der Schliffbilder erklären lässt. Die Darstellung orientiert sich am Beispiel eines 90°/0°-NCF-Geleges mit Indikatorschicht. Das Prinzip der Rissanzeige ist aber in allen Anordnungen der Indikatorschicht parallel zur von Querrissen betroffenen Schicht. Also auch bei diagonalen Rissen und ebenso diagonal angeordneter Indikatorschicht.

- Risse aus der Querschicht wachsen immer in die Indikatorschicht und werden dort angezeigt.
- In der Indikatorschicht ist der Spannungszustand an der Rissspitze und den Kreuzungspunkten Grund für die Entstehung der charakteristischen weißen Punkte. Diese Metadelamination zwischen Grundlaminat und Indikatorschicht ist dort für gute Erkennbarkeit der Risse verantwortlich.
- Die Indikatorschicht beeinflusst die Anzahl der Risse nicht messbar.

Nicht alle Querrisse werden von gleich starken Metadelaminationen angezeigt. Daraus ergibt sich die Annahme, dass diese nicht bei den ersten Lastwechseln, sondern erst mit der Zeit entstehen. Da Delaminationsbildung an Kreuzungspunkten der deutlichste Messeffekt ist, hinkt die Rissdarstellung vermutlich einige hundert Lastwechsel nach. Dies wird anhand der Fotografien von Schwingversuchen mit Indikatorschicht auch genauer beobachtet.

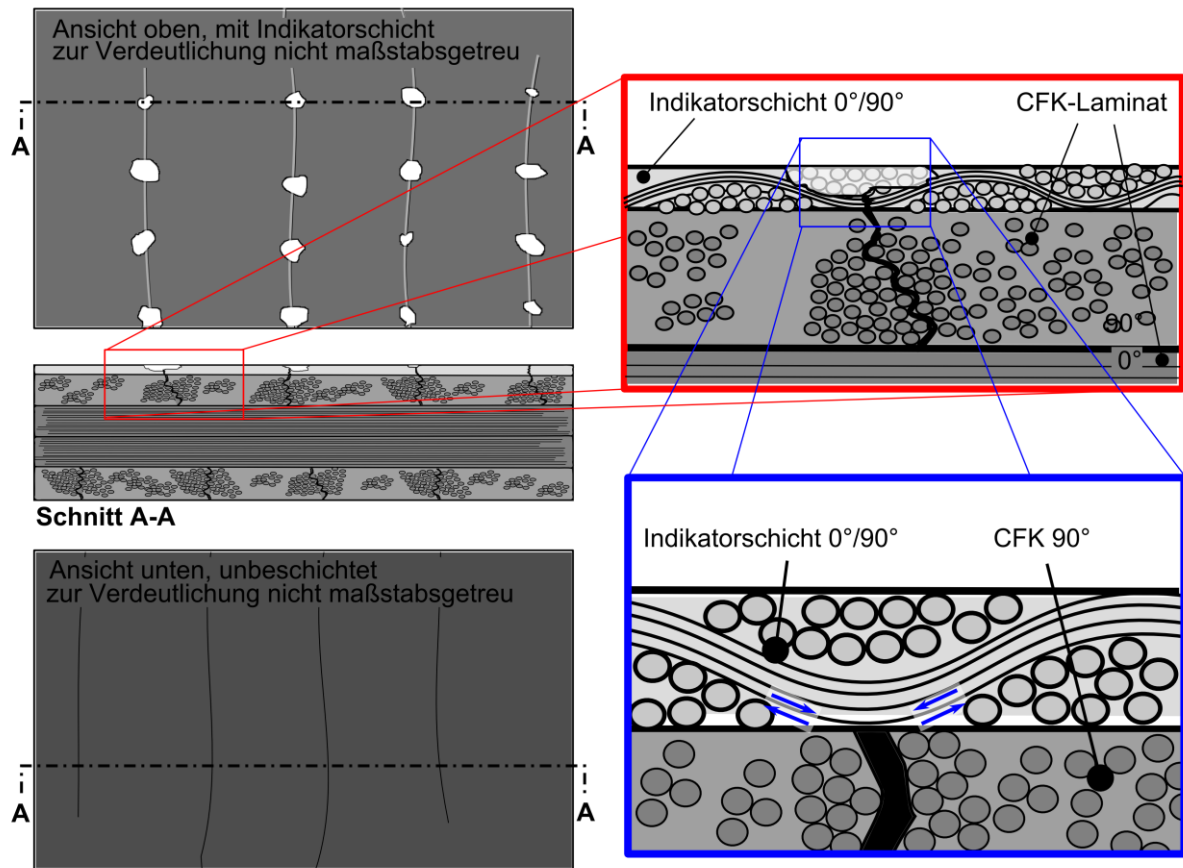


Abbildung 77 Skizze der Rissübertragung in die Indikatorschicht bei parallel zur Schicht mit Querrissen angeordneter Indikatorschicht. Beispielhaft an 90°/0°-NCF-CFK-Gelege dargestellt

Rissdarstellung in $\pm 45^\circ$ -Proben

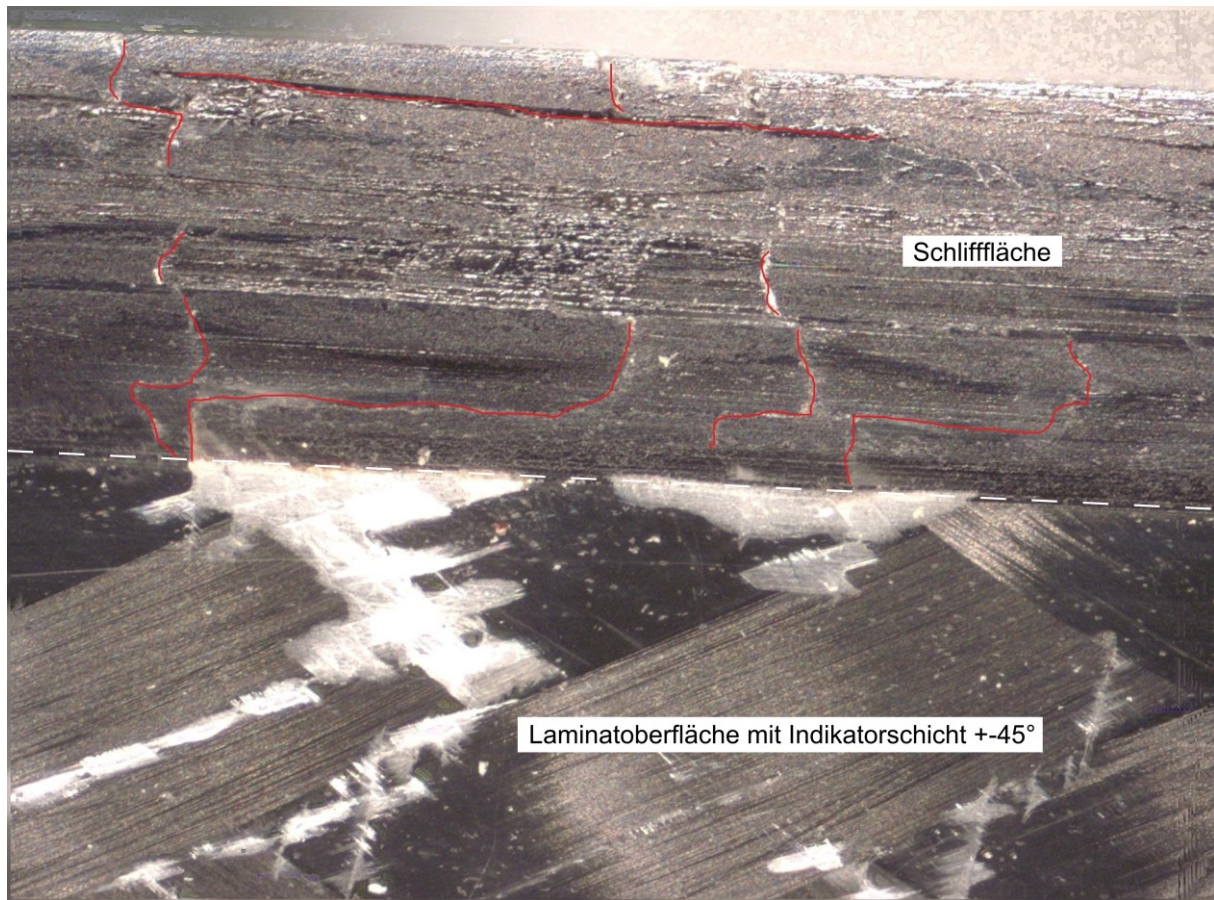


Abbildung 78 Schrägansicht einer $\pm 45^\circ$ -Probe mit Rissen (rot hervorgehoben) und deren Darstellung in der Indikatorschicht

An Schubzugproben sind zwei verschiedene Rissmuster (Abbildung 79) an der Probenoberfläche zu beobachten (Abbildung 78). Bei schwingender Belastung tritt zunächst eine Harzrissbildung in harzreicheren Gebieten an Faserkreuzungspunkten auf. Später im Verlauf des Werkstofflebens ist – bei größeren Dehnungen – die Entstehung faserparalleler Risse zu beobachten. Die Harzrisse (Abbildung 79 b) verlaufen quer zur Last und werden von der Indikatorschicht nur wenig hervorgehoben. Für eine Delaminationsbildung an Faserkreuzungspunkten der Indikatorschicht sind sie in die falsche Richtung orientiert. Anders dagegen die faserparallelen Diagonalrisse (Abbildung 79 c), die parallel zur Orientierung der Indikatorschicht laufen. Bei fortgeschrittener Schwingbelastung des Werkstoffs in Schub-Zug-Richtung tritt die von der $0^\circ/90^\circ$ -Faserorientierung bekannte Bildung weißer punktförmiger Delaminationen in der Indikatorschicht auf. Typischerweise ist dann ein Rissbild wie in Abbildung 79 d dargestellt zu beobachten.

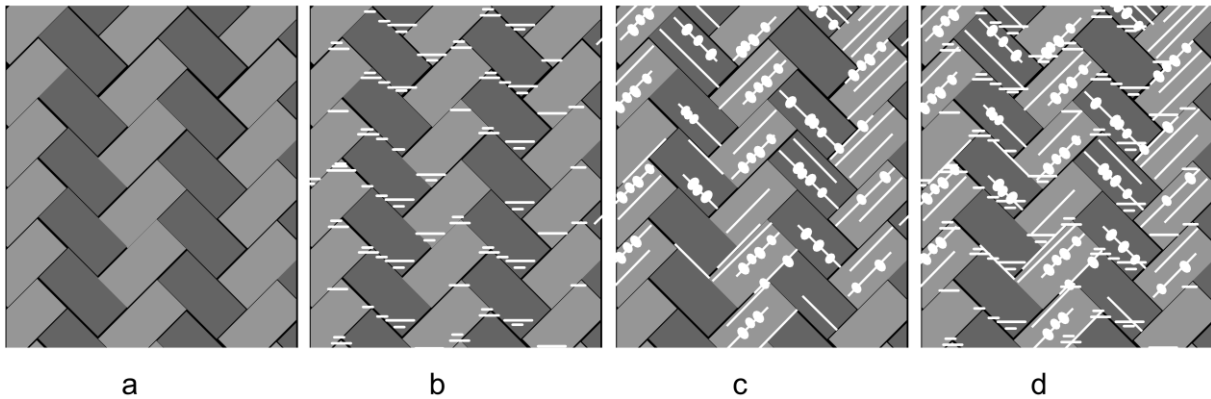


Abbildung 79 Rissarten in +/-45°-CFK-Körper_Gewebelaminat mit Indikatorschicht +/-45° schematisch dargestellt

Eine Übersicht über die Verschiedenen Rissarten und einen Detailblick auf die Mikrodelaminationsrisse zwischen Indikatorschicht und Substrat liefert Abbildung 80. Die Darstellung der Diagonalsrisse durch die ebenfalls diagonal angeordneten Indikatorschicht erfolgt wie bereits in Abbildung 77.

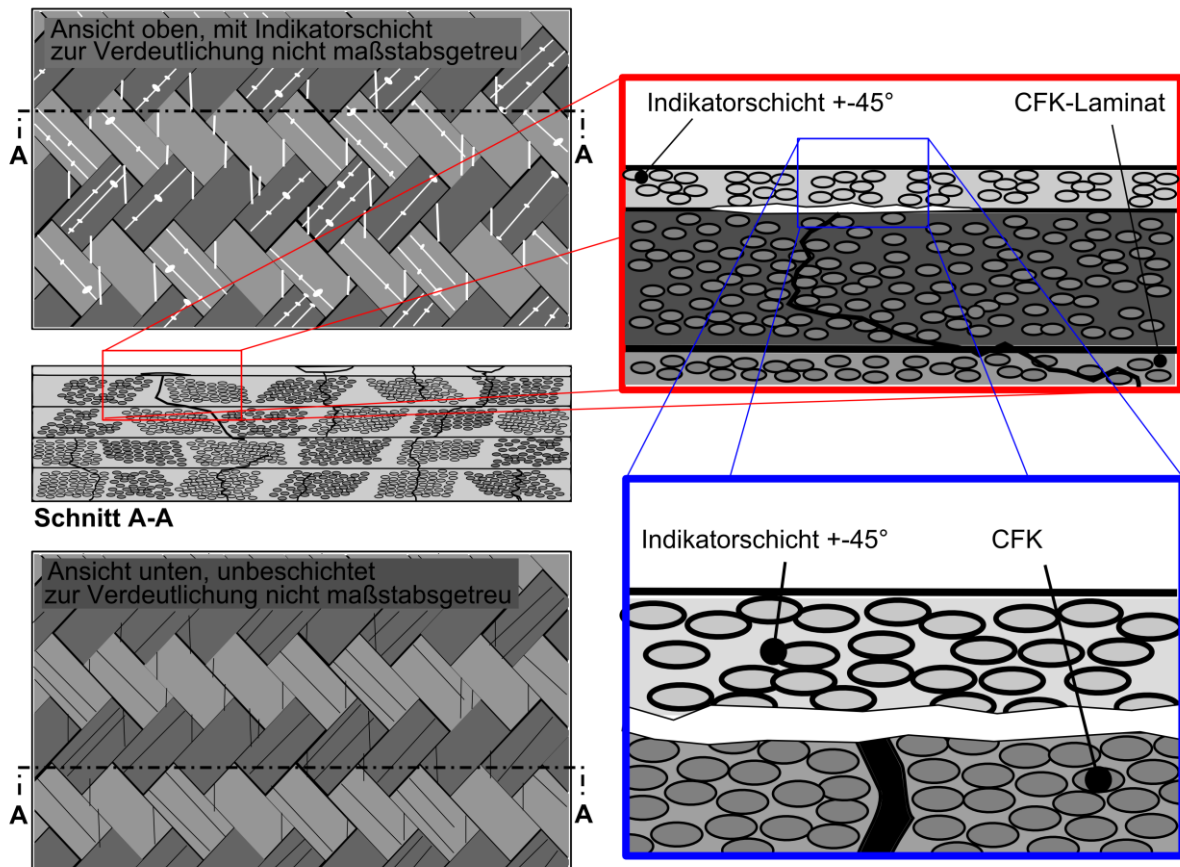


Abbildung 80 Skizze der Rissentwicklung an +/-45°-CFK-Gewebe-Laminat, Detailansicht der Mikrodelaminationsrissentwicklung, die von der Indikatorschicht nur schwach dargestellt wird.

Mikroskopaufnahmen von seitlichen Schliffen der Proben (Abbildung 78) zeigen ein komplizierteres Rissmuster als die 0°/90°-Proben. Es ist erkennbar, wie faserparallele Risse aus den mittleren Schichten zunächst zu lokalen Delaminationen an der äußeren Schicht führen, die wiederum mit Diagonalsrissen dort zusammenwachsen. Am

Probenrand treten auch großflächigere Delaminationen zwischen Indikatorschicht und Grundmaterial in Bereichen auf, in denen sonst auch die Harzquerrisse zu beobachten sind.

Vergleich mit Röntgenrefraktionsaufnahmen

Die Entwicklung von Harzquerrissen konnte in Röntgenrefraktionsaufnahmen (Abbildung 81 und Abbildung 43) besonders deutlich dargestellt werden. Die Querrisse liegen genau in der Richtung der maximalen Empfindlichkeit des Verfahrens bei senkrechter Scanrichtung und werden damit im Gegensatz zu Diagonallissen in diese Richtung scharf abgegrenzt dargestellt. Diagonallisse werden bedingt durch die Scanrichtung verschmiert in beiden Scans gleichermaßen abgebildet.

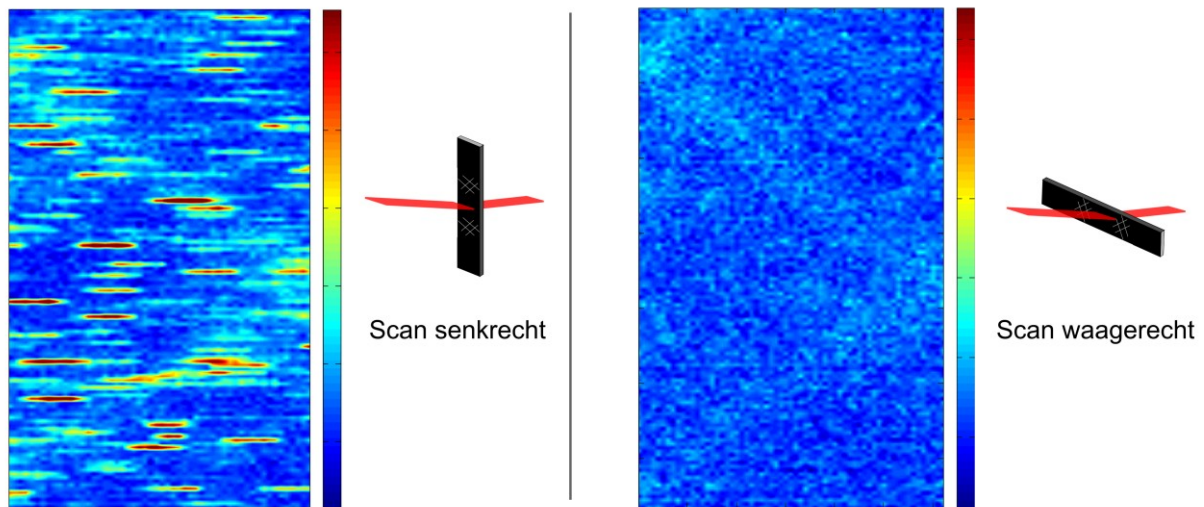


Abbildung 81 Scans eines +/-45°-Gewebelaminats nach 10^5 Lastwechseln bei 75MPa Oberlast und $R=0,1$;

Die Querrisse in Harztaschen sind in der Indikatorschicht weniger deutlich erkennbar, weil diese auch diagonal und nicht passend zu den Querrissen angeordnet ist. Diese Querrissbildung in Harztaschen wurde auch in Röntgenrefraktionsaufnahmen am gleichen Material festgestellt. Sie werden später deutlicher sichtbar, wenn zwischen Indikatorschicht und Grundlaminat Delaminationen auftreten. Faserparallele Risse sind, wie in 0°/90°-Laminaten, durch Metadelaminationen zwischen Indikatorschicht und Grundlaminat deutlich sichtbar, treten aber zeitlich etwas verzögert auf.

4.4.2. Modellierung der Lastübertragung in die Indikatorschicht

Zur Untersuchung des Spannungs- und Verformungszustandes um einen bereits entwickelten Querriss herum wird eine einfache FEM-Rechnung durchgeführt. Modelliert werden zweidimensional drei Schichten (siehe Abbildung 82). An der zur weiteren Vereinfachung genutzten Symmetrieebene liegt eine 0°-UD-CFK-Schicht, daran schließt eine 90°-UD-CFK-Schicht an. In dieser Schicht ist ein bereits fertig entwickelter Riss modelliert, der durch vollständige Materialtrennung entlang einer Linie (A) dargestellt wird. Auf dieser Schicht befindet sich wiederum eine homogenisierte Darstellung der Indikatorschicht. An der Linie (B) kann eine Delamination zwischen

Indikatorschicht und 90°-CFK-Schicht dargestellt werden. Verwendet wird das Programmsystem ANSYS R14.5 in der Academic-Version.

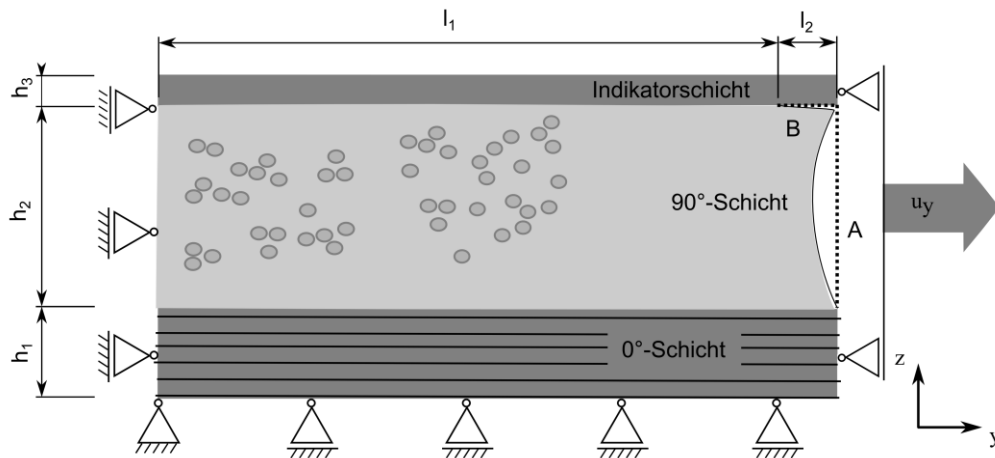


Abbildung 82 Mechanisches Grundmodell zur FEM – Modellierung eines Querrisses

Die linear-elastische Modellierung der Risspitze ist prinzipiell stark vereinfachend. Umfangreichere bruchmechanisch fundierte Simulationen oder solche mit nichtlinearem Materialmodell werden nicht durchgeführt. Das Modell soll qualitativ zur Erklärung der beobachteten Risse dienen. Spannungen und Dehnungen werden lokal nicht auf Kompatibilität mit den Werkstofffestigkeiten überprüft. Also kann das Rechenergebnis auch eine Momentaufnahme während des instabilen Risswachstums sein. Ziel der Berechnungen ist, einen Überblick über die Kinematik der Rissumgebung zu erlangen. Ein einfaches numerisches Modell ist dabei prädestiniert für Parameterstudien. Parameter wie die Größe einer Delamination und die Dicke der Indikatorschicht sind leichter als im physischen Experiment variierbar.

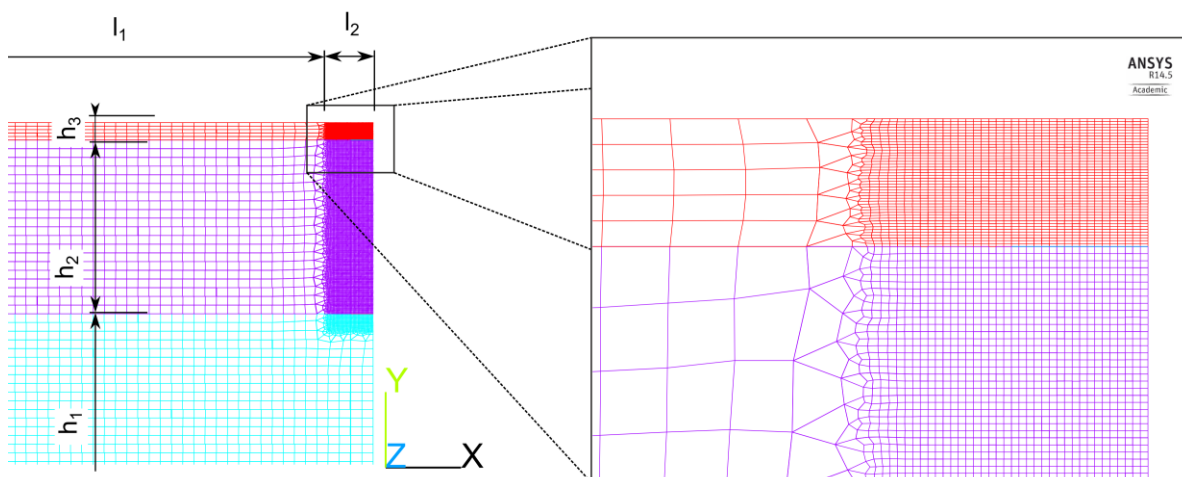


Abbildung 83 FEM-Netz, Verfeinerung der Vernetzung in Rissnähe

Weitere Randbedingungen und Modellparameter:

- Gesamtdehnung $e_x = 0,4\%$
- Elementanzahl 25.000 bis 35.000, verfeinertes Netz in Rissnähe (siehe Abbildung 83)
- Ausnutzung der Symmetrien: Modellierung als Viertelmodell

- Einfache 2-D-Elemente des Typs PLANE183
- Kontaktelemente des Typs TARGE169 und CONTA172 an der Linie (B): modellieren auch feste Verbindung wenn „keine Delamination“
- Materialmodell: orthotrop, linear-elastisch
- Dicken: $h_1=0,2\text{mm}$; $h_2=0,2\text{mm}$; $h_3=0,02\text{mm}$ oder h_3 variiert

Ergebnisse 1: Variation der Indikatorschichtdicke

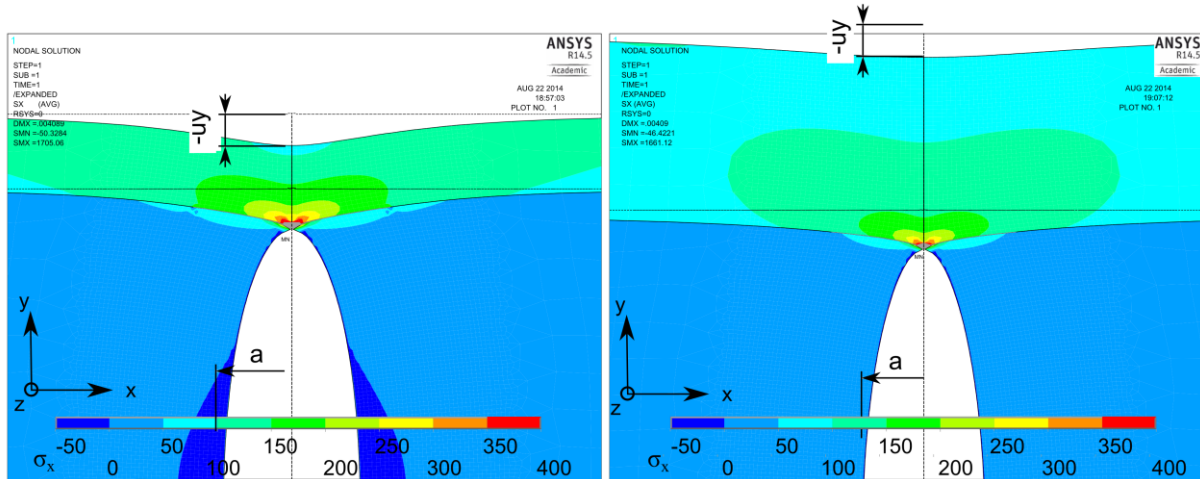


Abbildung 84 Risspitze ohne Delamination, 0,02mm (links) und 0,055mm (rechts) starke Indikatorschicht

Als charakteristische Ergebnisse werden die mittlere Spannung in der Indikatorschicht und deren Eindellung u_y als Maß für Biege- und Schubverformungsanteile in der Indikatorschicht ausgewertet. Außerdem wird die maximale Rissöffnung a bei verschiedenen Schichtdicken verglichen.

Abbildung 85 zeigt, dass eine dünne Indikatorschicht – bei gleicher globaler Dehnung – größere Spannungen ($\sim$ Dehnungen) ertragen muss (Abbildung 84). Der Vergleich mit einer Rechnung ohne Indikatorschicht (Abbildung 87) macht die Ursache deutlich: Die Indikatorschicht behindert die Rissöffnung a . Je dünner und damit weicher sie ist, umso mehr Verschiebung ϵ_x ist in der Schicht möglich. In der linear-elastischen Simulation ist dies gleichbedeutend mit der Spannung σ_x . Ideal ist demnach eine minimal dicke, aber sehr dehnbare Schicht.

Weiterhin ist ersichtlich, dass die Eindellung u_y der Laminatoberfläche bei dünner Indikatorschicht maximal ist. Ausgehend von der These, dass eine Kombination aus Schub- und Zugspannungen in der Indikatorschicht die Eintrübung an Webkreuzungspunkten begünstigt, ist auch hier eine möglichst dünne Schicht ideal.

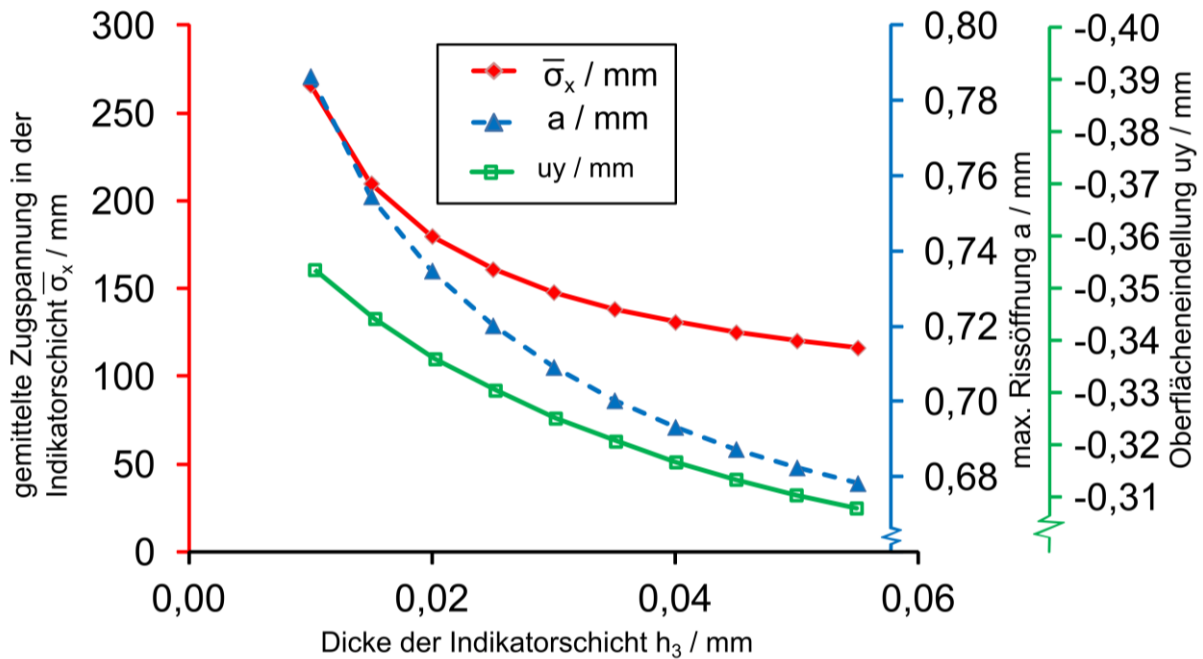


Abbildung 85 Einfluss der Dicke der Indikatorschicht auf die gemittelte Zugspannung σ_x in der Schicht, die max Rissöffnung a und die Oberflächeneindellung u_y

Ergebnisse 2: Variation der Delaminationslänge

Hier werden wieder mittlere Spannung in der Indikatorschicht, die Eindellung und die Rissöffnung betrachtet.

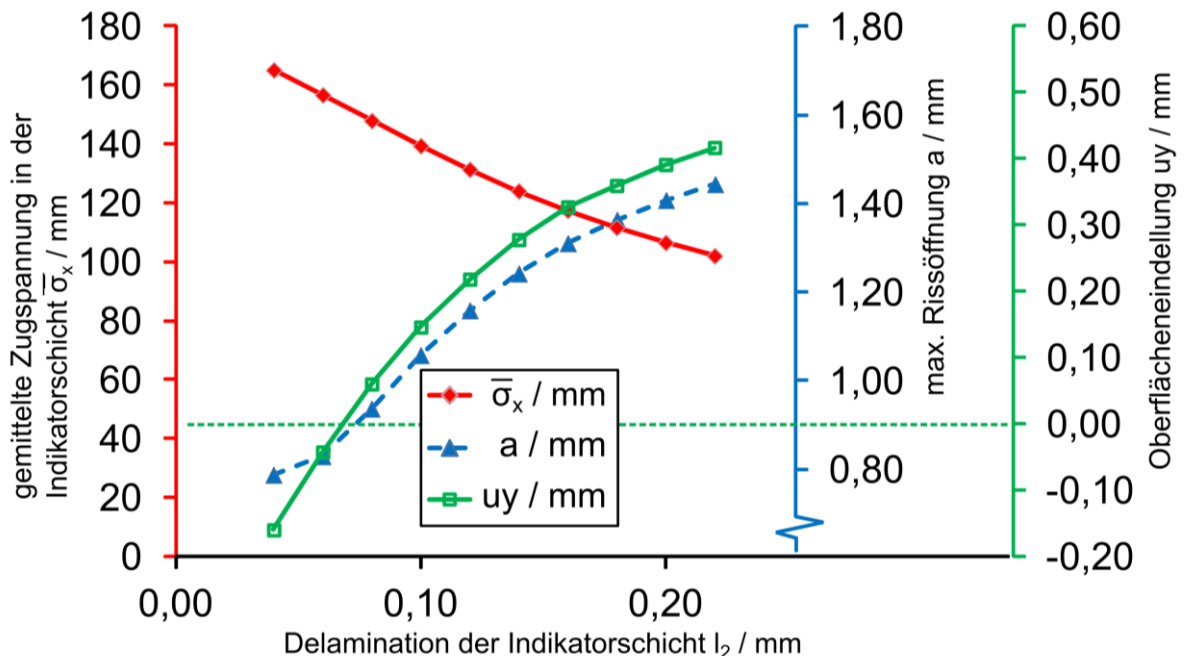


Abbildung 86 Einfluss der Delaminationslänge der 0,2mm dicken Indikatorschicht auf die gemittelte Zugspannung σ_x in der Schicht, die max Rissöffnung a und die Oberflächeneindellung u_y

Es fällt die deutlich größer werdende Rissöffnung mit zunehmender Delaminationslänge auf. Damit einher geht eine Längsverschiebung der Rissufer gegeneinander und ein Übergang von Eindellung zu Auswärtswölbung (siehe Abbildung 87 rechts).

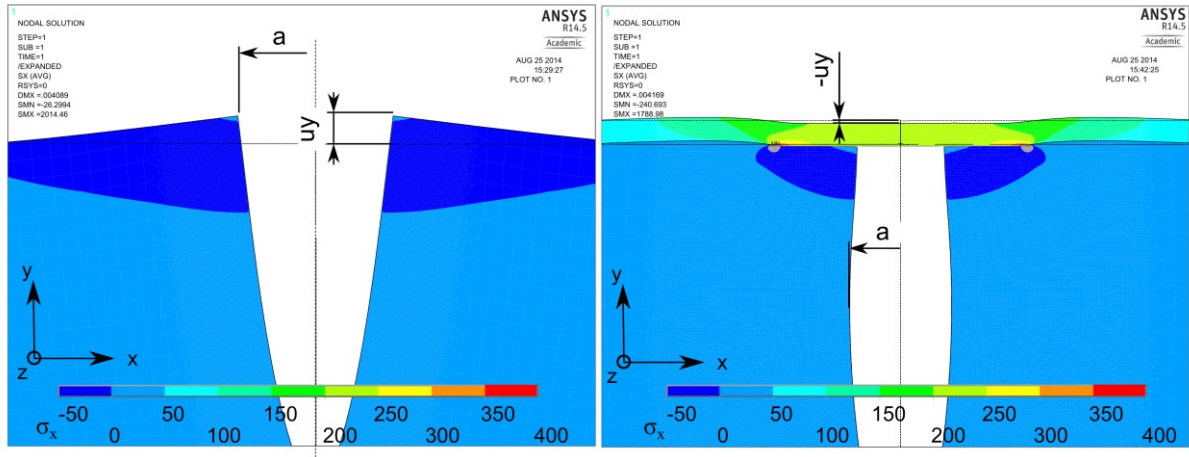


Abbildung 87 Rissumgebung ohne Indikatorschicht (links) und 0,06mm mit Delamination ($l_2=0,4\text{mm}$) und $h_3=0,02\text{mm}$ starker Indikatorschicht (rechts)

Abbildung 84 links zeigt den Verformungszustand mit der für das Experiment gewählten Schichtdicke. Die Wahl des dünnsten erhältlichen Halbzeuges bestätigt sich also durch die experimentellen Ergebnisse und die Simulationsergebnisse als richtig. Das Rissverhalten von GFK ist im Gegensatz zu anderen Halbzeugen und Matrixwerkstoffen recht gut bekannt. Dies ist der Grund für die Wahl von Glasfasergewebe und Epoxidharz gewesen.

Die Ausprägung von interlaminaren Delaminationen hat einen erheblichen Einfluss auf die Spannungen in der Indikatorschicht und damit auf die intralaminaren Metadelaminationen an den Umschlingungen des Gewebes.

Die Entstehung von Rissen an der Oberfläche wird durch die Steifigkeit der Indikatorschicht gebremst. Dies ist bei einer Nutzung als Lebensdauerüberwachungsverfahren durch die Kalibrierung zu berücksichtigen.

4.4.3. Einfluss der Beleuchtung

Der Großteil der Versuche mit der Indikatorschicht in einem einfachen Aufbau durchgeführt, bei dem ein Spotstrahler leicht schräg neben der Kamera für eine einheitliche Beleuchtung sorgt – genau wie in Abbildung 52 dargestellt. Wegen der bereits vorhandenen, einfachen Technik stellte dies zunächst die effizienteste Lösung zur Untersuchung des Schädigungsverhaltens der Schicht dar. Die variable Ausrichtung der Lichtquelle ist aber ein wesentlicher Faktor für die Lichtremission. Also wurde die Abhängigkeit der Rückstrahlung qualitativ untersucht, um Hinweise zur weniger fehleranfälligen und besser standardisierbaren Beleuchtung zu erhalten. Hierzu wurden geschädigte, rissgesättigte Proben unter moderater Vergrößerung unter dem Stereolichtmikroskop aus verschiedenen Richtungen beleuchtet.

Zunächst wird die Indikatorschicht alleine betrachtet. Abbildung 88 zeigt jeweils unterschiedliche Beleuchtungen einer im Schwingversuch geschädigten Probe aus 36 Lagen und jeweils am linken Rand der Bildausschnitte den Vergleich mit einer ungeschädigten Probe. In Abbildung 88 a wird die Probe von vorn im Winkel von etwa 20° von einer linienförmigen Lichtquelle beleuchtet. Die Remission der Querrisse ist hierbei deutlich. Dadurch, dass ein großer Teil der Risse in tieferen Schichten als der fokussierten obersten liegen, ist kaum ein Riss scharf abgebildet. An der Vergleichs-

probe sind nur feine, fertigungsbedingte Abplatzungen an der Probenkante zu erkennen, Ansonsten zeigt sie keine Remission. Abbildung 88 b zeigt die unveränderte Probenanordnung bei seitlicher Beleuchtung ebenfalls mit einem Höhenwinkel von etwa 20° . Nun liegen die Querrisse parallel zur Beleuchtungsrichtung und werden somit nur sehr schwach abgebildet. Eine gegenüber Abbildung 88 a geringfügig schwächere Rückstrahlintensität zeigt Abbildung 88 c. Dort wurde eine ringförmige Lichtquelle eingesetzt, die aus einem ringförmigen Spalt Licht nach innen abstrahlt.

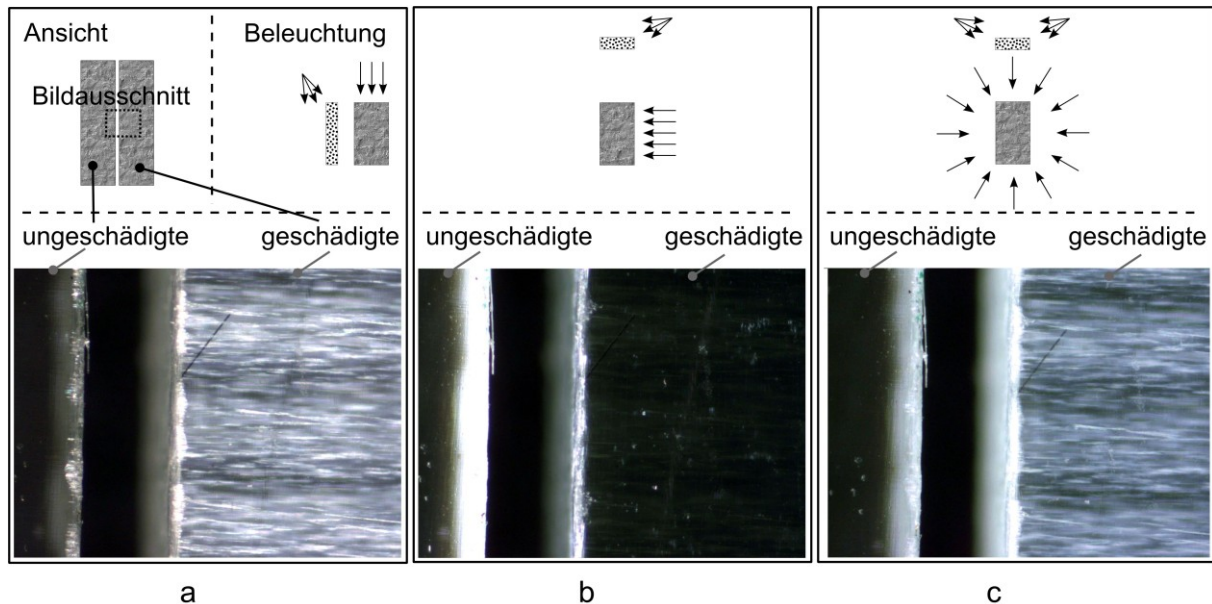


Abbildung 88 Verschiedene Beleuchtungsarten einer unbeschädigten und einer geschädigten Probe aus 36 Lagen der GFK-Indikatorschicht

Eine schematische Darstellung (Abbildung 89) zeigt, wie an den Faser-Matrix-Grenzflächen über einen weiten Winkelbereich Reflexion auftreten kann. Das seidige Glänzen der Fasern – als Halbzeug oder eingebettet in Matrix – erklärt sich durch die vielen Möglichkeiten zur Reflexion, die aus der strukturierten Oberfläche der gebündelten vielen Fasern herrührt. An der glatten Probenoberfläche tritt Totalreflexion nur bei flachen Winkeln bezüglich dieser Oberfläche auf und ist so besser vermeidbar.

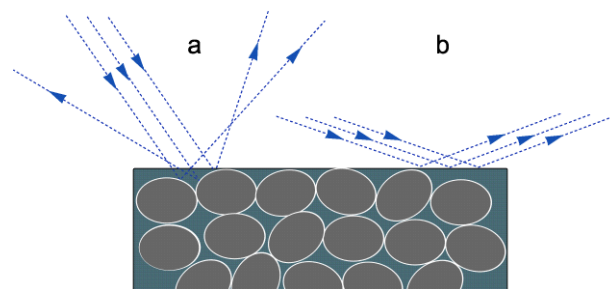


Abbildung 89 Reflexion an Faser-Matrix-Grenzflächen (a) und an glatter Probenoberfläche (b)

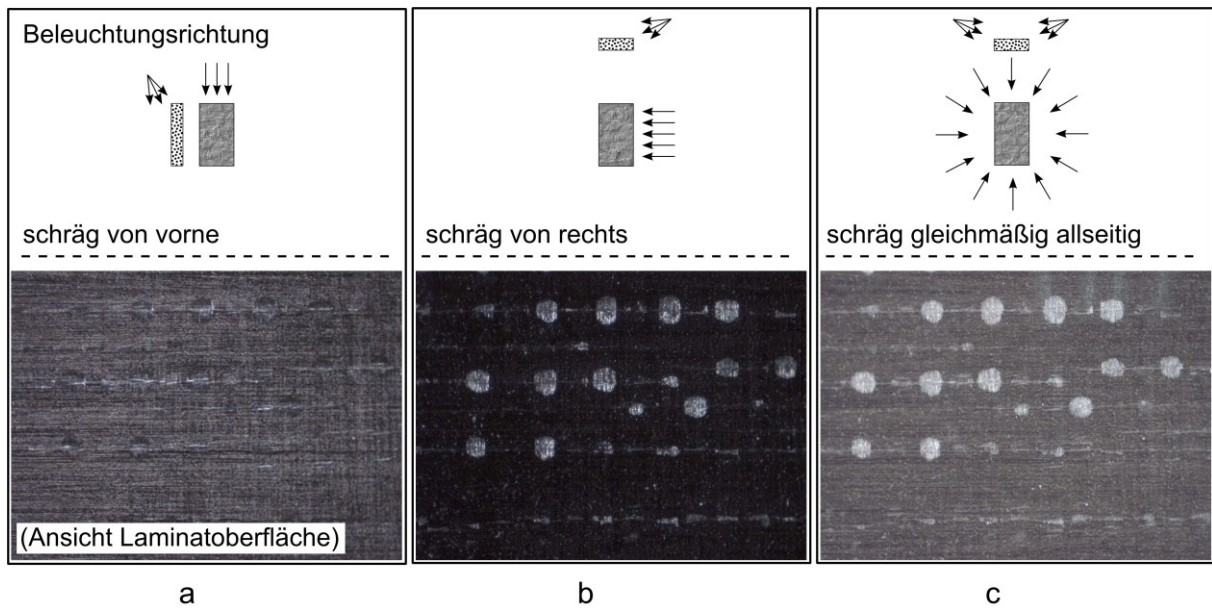


Abbildung 90 Verschiedene Beleuchtungsarten einer unbeschädigten und einer geschädigten NCF-Gelegeprobe mit Indikatorschicht

In Abbildung 90 ist die gleichartige Untersuchung einer $[90^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ]$ -CFK-Probe mit aufgebrachtener Indikatorschicht dargestellt. Das Ergebnis ist in Details vom vorhergehenden abweichend. In Abbildung 90 a ist zu erkennen, dass die starke Reflexion der glänzenden Kohlefasern die Remission der Querrisse erschwert. In Abbildung 90 b sind bei seitlicher Beleuchtung die beschriebenen Delaminationen an den Kreuzungspunkten der Fasern der Indikatorschicht deutlich zu sehen. In Abbildung 90 c wurde wieder die ringförmige Beleuchtung genutzt. Trotz der Überlagerung mit dem Glanz der Kohlenstofffasern ist die Darstellung der Risse in Teilbild c gut.

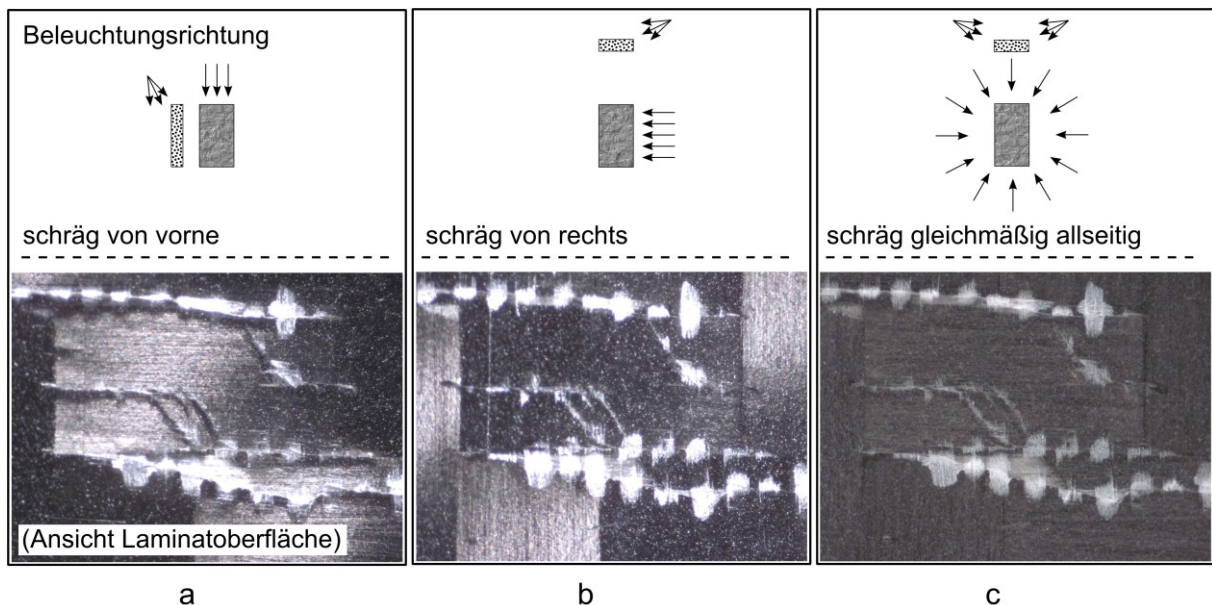


Abbildung 91 Verschiedene Beleuchtungsarten einer unbeschädigten und einer geschädigten CFK-0°/90°-Gewebeprobe mit Indikatorschicht

An der untersuchten 0°/90°-Gewebe-CFK-Probe ist ein ähnliches Verhalten der Indikatorschicht erkennbar. In den Teilbildern a und b der Abbildung 91 stört Glanz auf den Kohlefasern die Erkennung von Rissen. Die Beleuchtung mit der Ringspaltbe-

leuchtung bietet einen guten Kontrast zur Risserkennung in der Indikatorschicht. Der Glanz der CFK-Schicht ist gleichmäßig und stört die Darstellung der Risse kaum.

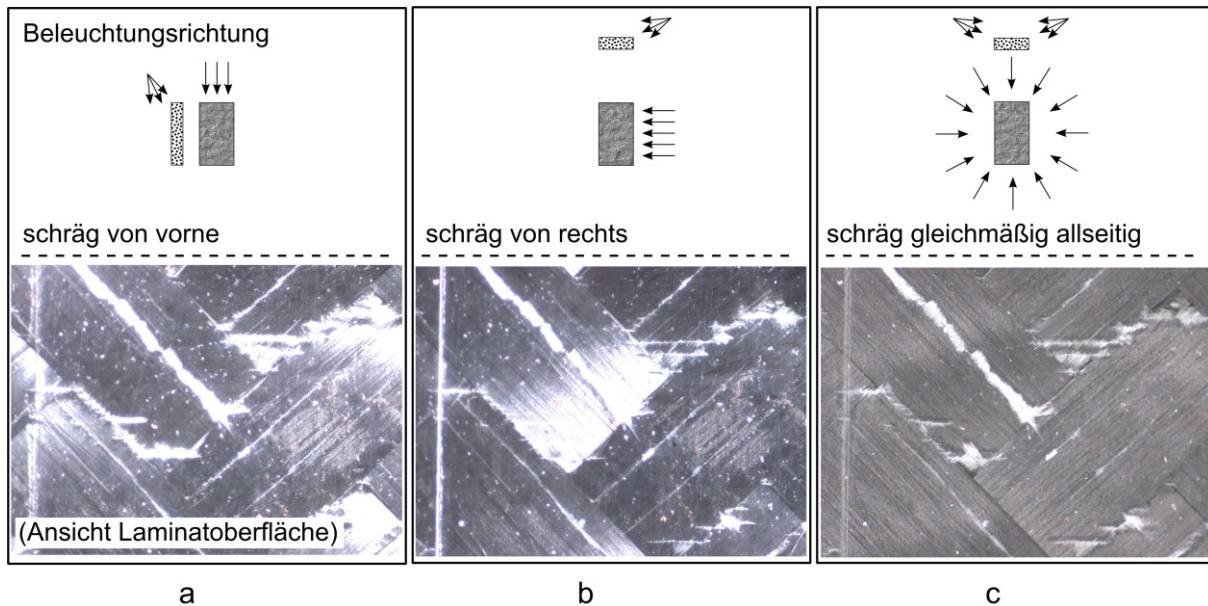


Abbildung 92 Verschiedene Beleuchtungsarten einer unbeschädigten und einer geschädigten CFK- $\pm 45^\circ$ -Gewebeprobe mit Indikatorschicht

Abbildung 92 zeigt, wie auch bei den Aufnahmen der $\pm 45^\circ$ -CFK-Proben mit Indikatorschicht in den ersten beiden Teilbildern störende Glanzeffekte der Kohlenstofffasern die Aufnahme beeinflussen. Trotz immer gleicher Beleuchtungsrichtung geht so ein Teil der Information über neu entstandene Risse unter. Abbildung 92 c zeigt, dass bei gleichmäßig ringförmiger Beleuchtung trotz Glanz auch hier alle Risse gut erkennbar sind.

Zusammenfassung zur Untersuchung der Beleuchtungsrichtung

Erst nach den bereits durchgeführten Versuchen, wurde die Beleuchtung der Proben detaillierter untersucht. Da nahezu alle Versuche nicht ausschließlich der Untersuchung der Indikatorschicht dienten und so die Messungen in andere Messprojekte integriert werden mussten, war zunächst eine einfache – noch nicht optimierte – Beleuchtung mit einer einzigen Punktlichtquelle verwendet worden. Die später erfolgte Untersuchung der Beleuchtungsrichtung zeigt, dass eine ringförmige Beleuchtung von schräg seitlich noch deutlich bessere Ergebnisse liefern kann. Für alle betrachteten Einsatzfälle einer Indikatorschicht erweist sich eine ringförmig um das Objektiv angeordnete Lichtquelle als guter Kompromiss zur Darstellung aller wichtigen Effekte in der Schicht. Um gezielt bestimmte Rissarten hervorzuheben oder auszublenden, ist eine gerichtete Beleuchtung in Betracht zu ziehen.

4.5. Indikatorschicht zur Bestimmung der Schädigung

Es wurden in den vorherigen Kapiteln Ergebnisse zur Entwicklung der Rissdichte im verwendeten CFK-Material, zum Verhalten der Indikatorschicht alleine und zur Übertragung der Risse aus dem Grundmaterial in die Indikatorschicht gezeigt. Inwieweit diese Rissdarstellung auch Informationen über die Lebensdauer liefern kann, zeigt

der Verlauf der Rückstrahlung in Schwingversuchen. Dieser Verlauf konnte auch punktuell mit Röntgenrefraktionsmessungen verglichen werden.

4.5.1. Verlauf der Remission über die Lebensdauer

In Schwingversuchen an verschiedenen mit der Indikatorschicht präparierten CFK-Proben wurde also der Verlauf des Rückstrahlverhaltens der Schicht untersucht. Der Versuchsaufbau entspricht dem in Abbildung 44 dargestellte. Der Versuchsablauf erfolgte nach demselben Schema wie auch bei der Auswertung der Eintrübung bei GFK-Proben: Im Abstand einer bestimmten Anzahl von Lastspielen wird die Prüfung kurz angehalten und eine Aufnahme der entlasteten Probe gemacht. Zusätzlich wurde kurz die Mittellast angefahren und in diesem Zustand fotografiert. Die Dehnung wurde aus dem Maschinenweg ermittelt, wobei zur Verbesserung der Genauigkeit noch die Bezugslänge mit aus den fotografischen Aufnahmen ermittelte Dehnungen angepasst werden kann.

Rückstrahlungsverlauf bei Schwingversuchen mit Indikatorschicht an 0/90°-Gewebe-Laminaten

In Abbildung 93 ist der Verlauf der Rückstrahlung und der der Dehnung bei kurzfristig wieder entlasteter Probe an einer 0°/90°-CFK-Gewebe-Probe bei $\sigma_0 = 575 \text{ MPa}$ ($R = 0,1$) dargestellt. Sie laufen über weite Bereiche synchron.

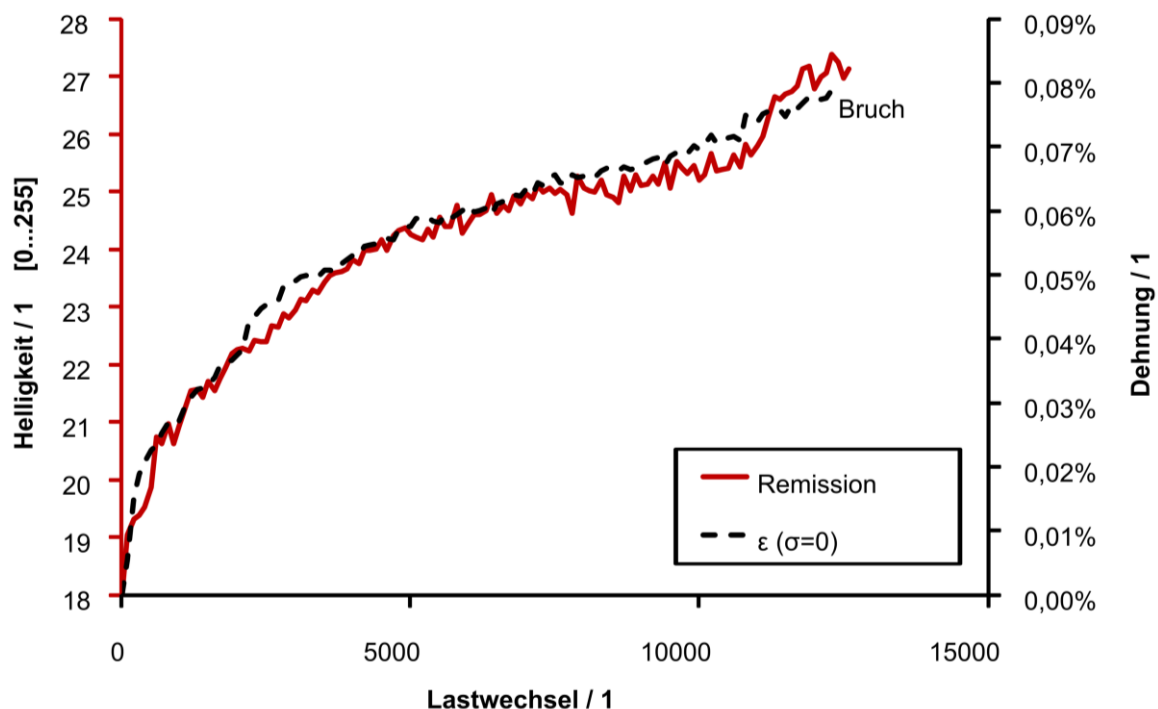


Abbildung 93 0°/90°-Gewebelaminat, Remission und Kriechdehnung bei unbelasteter Probe

Die Fotos in Abbildung 94 zeigen durch die seidenartigen Spiegelungen, dass die gewählte Beleuchtung (vgl. Kapitel 4.4.3) nicht ideal ist. Dennoch ist die Zunahme der Rückstrahlung gut erkennbar und auch die Lage und Größe der Risse erkennbar. Dargestellt werden nur Risse an der Oberfläche, also Querrisse nur dort, wo die querliegenden Faserstränge an die Oberfläche kommen. Dies führt durch die Gleich-

gratkörperbindung des Gewebes zu den charakteristischen diagonalen Bandstrukturen. Über verschiedene Versuche hinweg wurde – begünstigt auch durch die noch nicht optimierte Beleuchtung – kein typischer Endwert der Rückstrahlung bei Probenbruch gefunden. Die Ergebnisse der Transmission an GFK-Proben (Kapitel 4.2) legen die Existenz eines solchen Grenzwertes aber nahe.

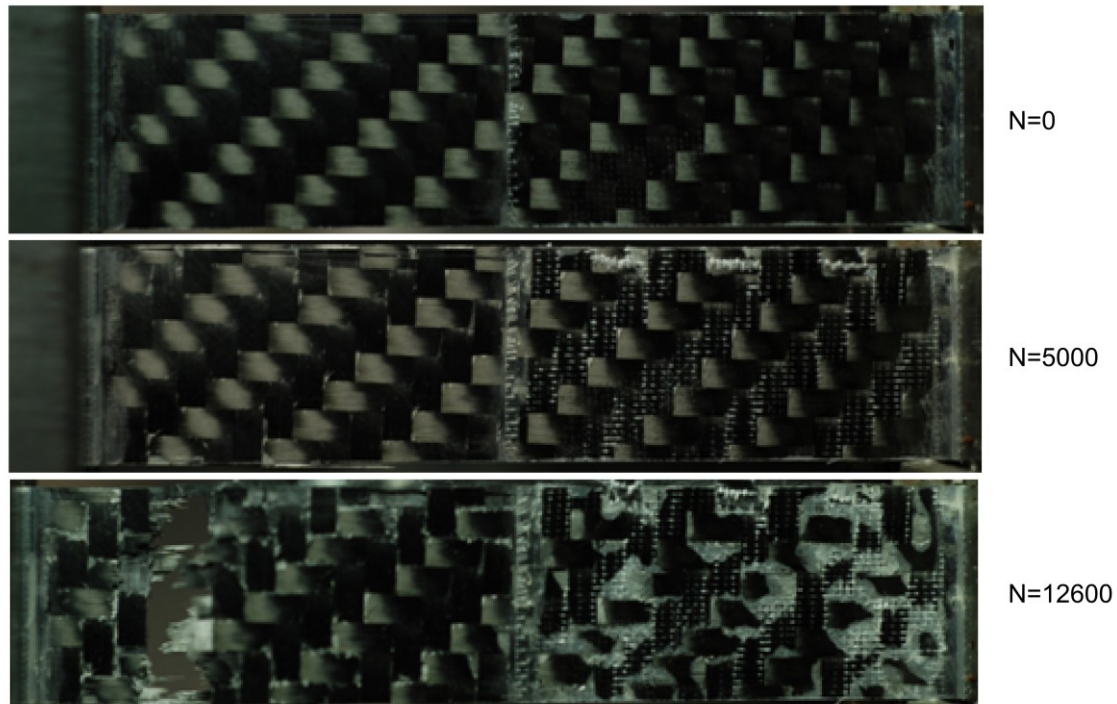


Abbildung 94 0°/90°-Gewebelaminat, Remissionsbilder bei unbelasteter Probe

In Abbildung 95 ist ebenfalls Helligkeits- und Dehnungsdifferenzverlauf einer beschichteten CFK-Probe dargestellt. Als Grundmaterial stand ein NCF-UD-Gelege-Laminat zur Verfügung. Im Gelegehalbzeug unterliegen die Fasern nahezu keinen Ondulationen. Dieses ist als non-crimp-fabric (NCF) nicht gewebt, dafür sind in Abbildung 95 Teilbild 1-4 gut erkennbare Bindefäden (quer und diagonal) aus Polyamidfasern als störender Einfluss enthalten. Hier entstehen vorzeitig Querrisse. Die an der Oberfläche durchgehend gleichmäßige Querlage sättigt sich sukzessive mit Querrissen. Diese stellen sich dann deutlich in der Indikatorschicht dar. Wie in Kapitel 4.4.2 in den Mikroskopaufnahmen gefunden, weisen Metadelaminationen an den Kreuzungspunkten der GFK-Schicht die deutlichste Rückstrahlung auf. Dort sind auch bereits Informationen über den Rissabstand zusammengestellt. Im dargestellten Versuch (Abbildung 95) erreicht die Dehnungsdifferenz bei kurzer Entlastung schnell einen Grenzwert, während die Rückstrahlung langsamer zunimmt.

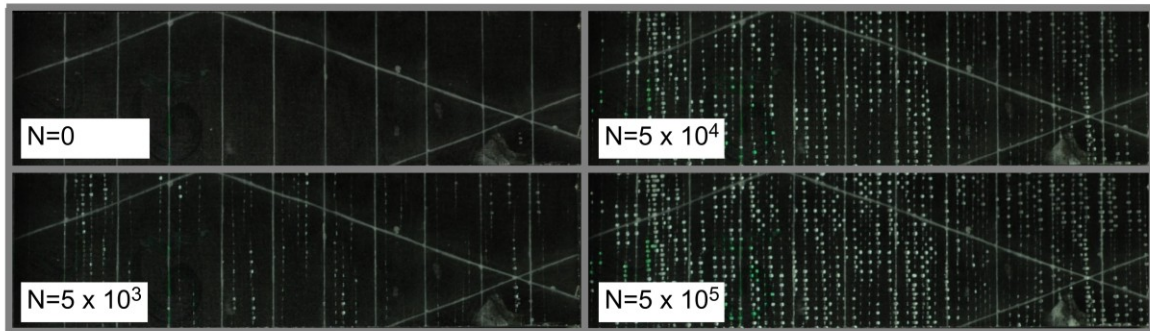
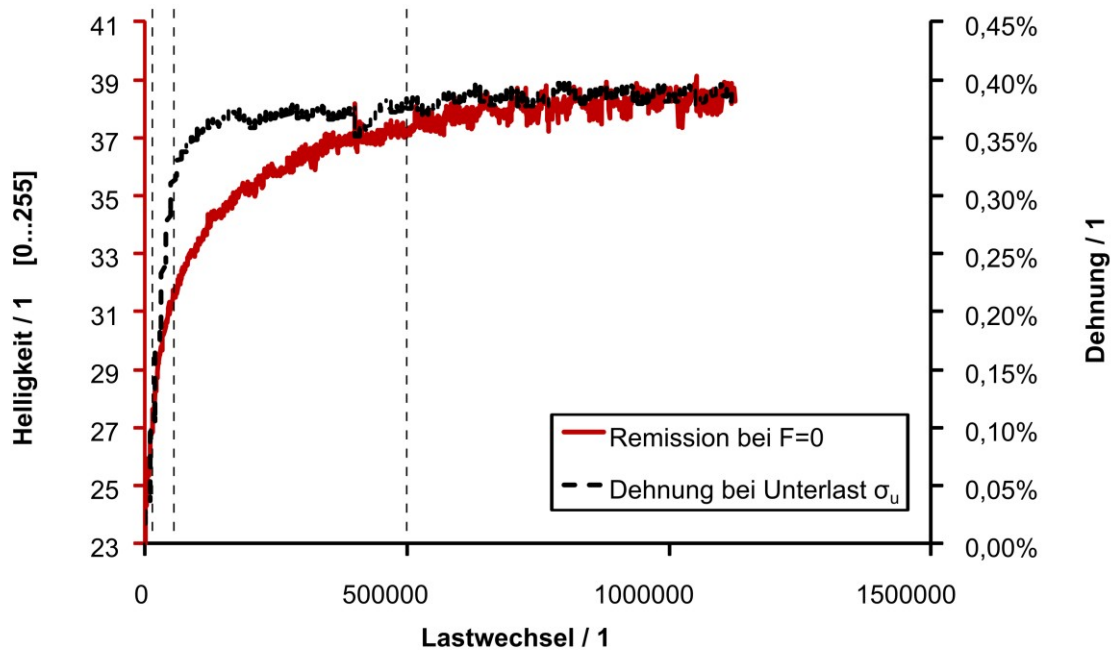


Abbildung 95 Verlauf der Rückstrahlung und der Dehnung bei Entlastung an NCF-(90°/0°/0°/90°)-Gelege-Laminat

Rückstrahlung bei Zugversuchen mit Indikatorschicht an +/-45°-CFK-Gewebe-Laminaten

An +/-45°-CFK-Gewebeprouben mit Indikatorschicht wurden Zugversuche durchgeführt. Das Versagensverhalten ist komplex. Bei allen drei Proben der Reihe wird ein erstes Spannungsmaximum bei etwa 176MPa (Mittelwert der drei Versuche, Standardabweichung 3,5MPa) bei einer Dehnung von 14,9% (mit einer Standardabweichung von 0,6% Dehnung) erreicht. Danach folgt ein Spannungsabfall um 10 bis 20MPa. Kurz vor Bruch der Proben (im Beispiel in Abbildung 96 nicht dargestellt) beträgt die Maximalspannung etwa 195MPa bei etwa 24% Dehnung.

In der getesteten Konfiguration zeigte sich – ähnlich wie auch bei der Untersuchung der Lichttransmission (siehe Kapitel 4.3.1) an transparenten Proben – erst bei relativ großen Dehnungen eine deutliche Änderung der optischen Eigenschaften (Abbildung 96).

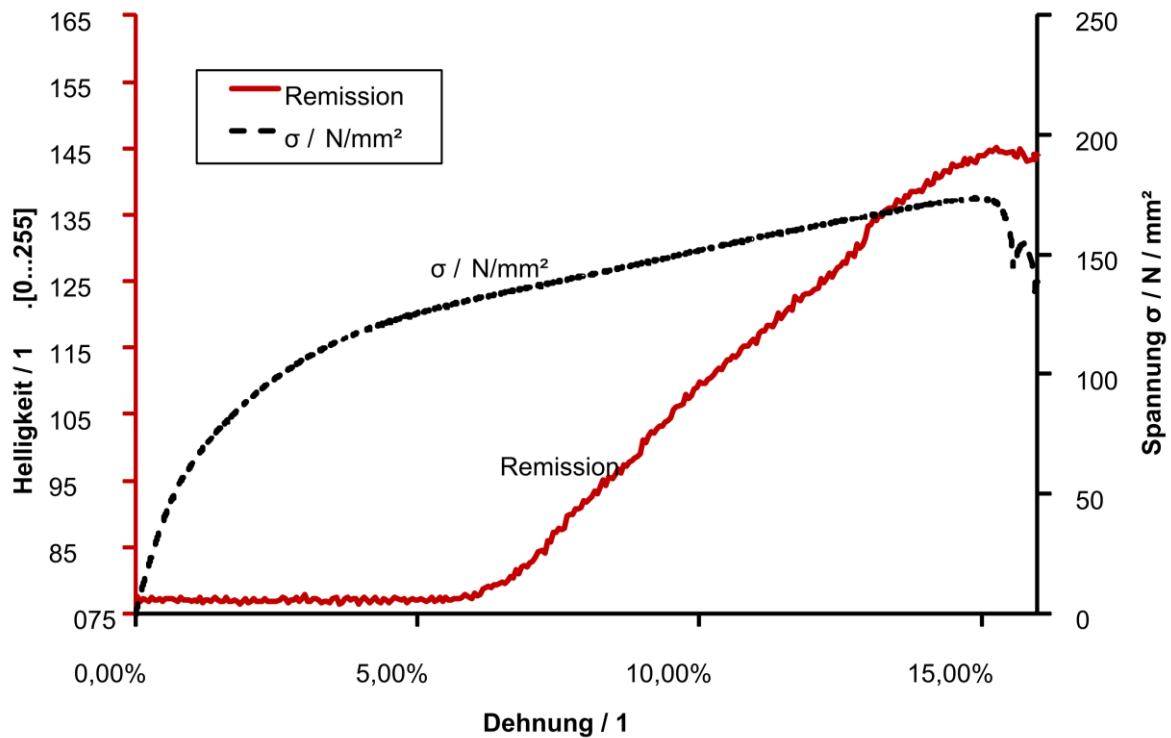


Abbildung 96 Zugversuch $\pm 45^\circ$ -Gewebe-Laminat mit Indikatorschicht

Vor dem Erreichen von etwa 6% Dehnung gibt es zwar bereits einen leichten Anstieg, es sind aber keine Strukturen im Sinne von Rissen oder Metadelamination (siehe Abbildung 97) erkennbar. Erst ab 6% Dehnung zeigt sich eine steilere stetige Zunahme (siehe Abbildung 96), die mit der Bildung größerer lokaler Delamination an der Indikatorschicht assoziiert ist. Das Maximum der Rückstrahlungszunahme wird im selben Dehnungsbereich wie das Spannungsmaximum erreicht. Der Bruch der Proben erfolgte außerhalb des Messbereiches der Indikatorschicht.

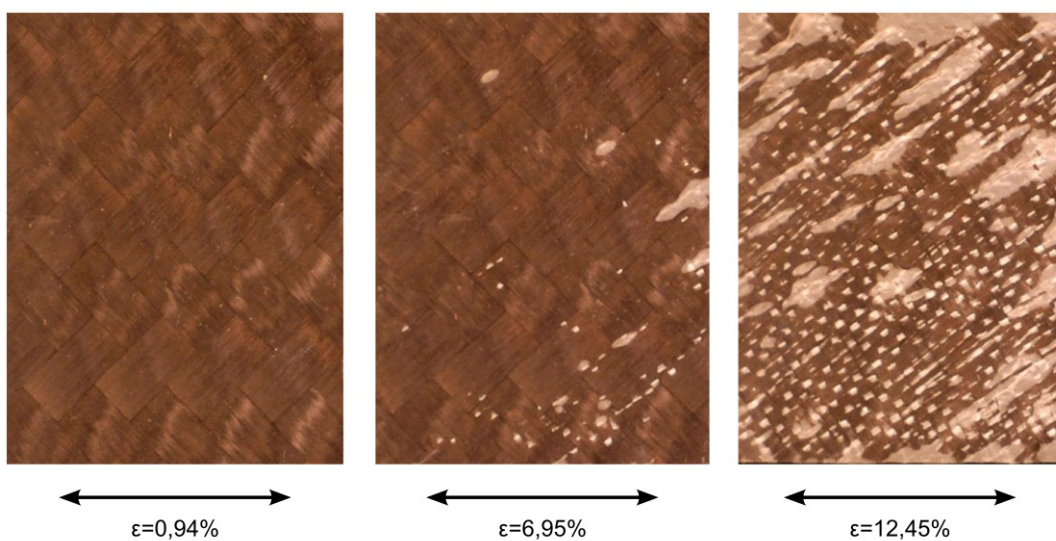


Abbildung 97 Rissmuster in der Indikatorschicht an $\pm 45^\circ$ -Gewebe-Laminat bei verschiedenen Dehnungen

Verlauf der Rückstrahlung bei Schwingversuchen mit Indikatorschicht an $\pm 45^\circ$ -Gewebe-Laminat

Die Rissarten und die Übertragung von Grundlaminat nach Indikatorschicht sind bereits in Kapitel 4.4 und an Zugversuchen (siehe oben) betrachtet worden.

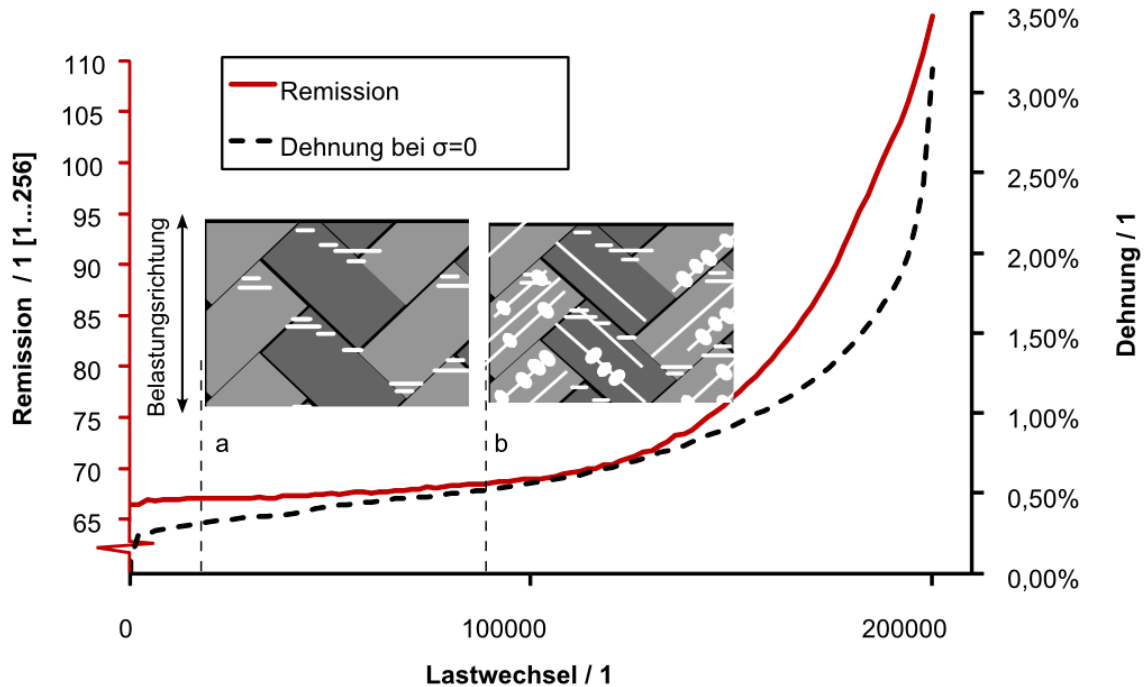


Abbildung 98 Remission und Dehnung an $\pm 45^\circ$ -CFK-Probe bei $\sigma_o = 75\text{MPa}$, $R = 0,1$; a) erste Querrisse, b) Quer- und deutlicher angezeigte Diagonalrisse

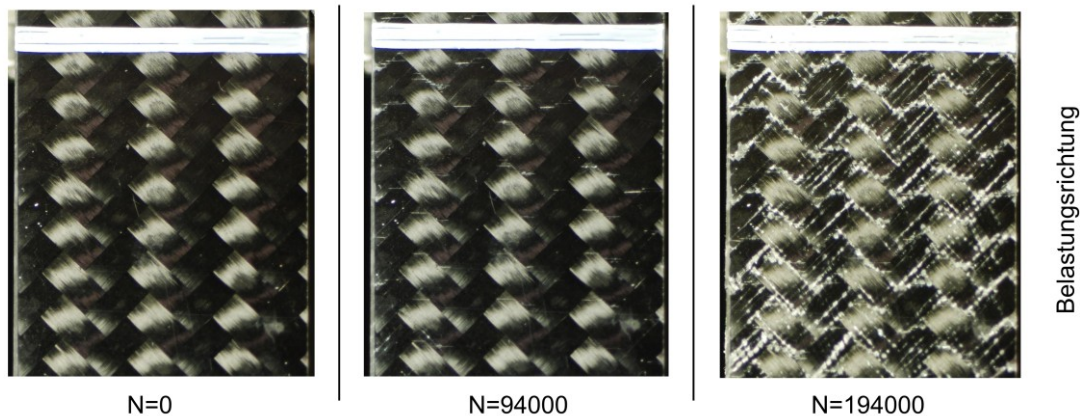


Abbildung 99 Remission der $\pm 45^\circ$ -CFK-Probe 139t5 bei $\sigma_o = 75\text{MPa}$ und $R = 0,1$ bei verschiedenen Lastwechselzahlen

Im Vergleich der Kurvenverläufe von Abbildung 98 mit denen der Cross-Ply-Laminat in Abbildung 93 und noch deutlicher mit dem in Abbildung 95, ist für die Schub-Zug-belasteten Laminat ein grundverschiedener Verlauf von Dehnung und Rückstrahlung zu beobachten. Weder Rückstrahlung, noch Dehnung streben einem Grenzwert zu. Sie nehmen im Gegenteil progressiv mit zunehmenden Lastwechselzahlen zu. Zunehmende Matrixdegradation verringert die Steifigkeit. Es ist keine lastparallele Schicht vorhanden, die dann die Last trägt. Ähnliche Verläufe sind aus der Untersuchung von transparenten GFK-Proben, die in Kapitel 4.2

beschrieben wird, bekannt. Abbildung 99 zeigt die Fotos der Auswertung. Im mittleren Bild sind die Querrisse, im rechten Bild die Diagonalrisse erkennbar.

4.5.2. Vergleich mit Röntgenrefraktionsmessungen

In Abbildung 100 ist der Vergleich der Ergebnisse zweier gleich gefertigter und belasteter Proben dargestellt. Die eine Probe (112t48) wurde – wie in Kapitel 3.1.1 dargestellt – mit der Röntgenrefraktionsmessung mehrfach über ihre Lebensdauer untersucht, die andere (139t5) wurde wie oben beschrieben mit einer Indikatorschicht versehen und kontinuierlich alle 1000 Lastwechsel fotografisch dokumentiert. Die Indikatorschicht stellt – wie die senkrechte Messrichtung der Röntgenrefraktion auch – Diagonal- und Querrisse dar. Die Rückstrahlung der Probe mit Indikatorschicht nimmt etwas später als die Röntgenrefraktion an der anderen Probe zu. Dies korreliert mit der Erkenntnis, dass die Entwicklung der Risse sich in der Indikatorschicht erst über eine gewisse Spanne an Lastwechseln später darstellt. Außerdem ist es mit der Röntgenrefraktionsmessung möglich, schon frühe, kaum geöffnete Risse nur aufgrund ihrer Oberflächen zu detektieren. Bei der Übertragung von Rissen in die Indikatorschicht ist auch eine gewisse Öffnung der Risse nötig.

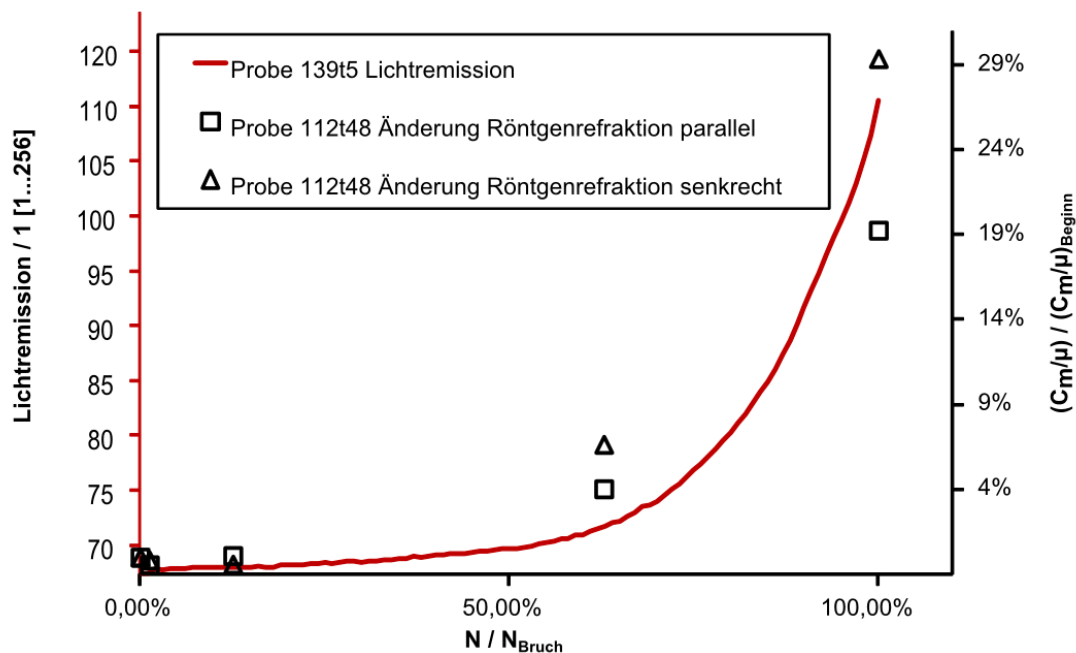


Abbildung 100 Vergleich von Röntgenrefraktionsmessungen ohne Indikatorschicht (Probe 112t48) und Lichtremission an der Indikatorschicht (Probe 139t5), $R = 0,1$, $\sigma_o = 75\text{MPa}$

5. Diskussion und Ausblick

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Experimente aus Kapitel 4 ausgewertet und diskutiert. Die eingesetzten Untersuchungsmethoden wurden bereits in Kapitel 3 detaillierter beschrieben und Grundlagen zum Werkstoff FKV wurden in Kapitel 2 zusammengestellt.

5.1. *Diskussion der Ergebnisse*

Bei der Untersuchung der Indikatorschicht wurden am Anfang von Kapitel 3.3 einige Untersuchungsziele konkretisiert, die experimentell betrachtet werden sollten. In den Ergebnissen – dargestellt in Kapitel 4 – wurden viele Antworten gefunden, aber es stellten sich auch – unvermeidlich – neue Fragen für weitere Untersuchungen, die im Ausblick zusammengefasst werden.

Die fünf wesentlichen eingangs gestellten Fragen lauteten:

- Wie verhält sich die eigentliche Rissbildung in den als Substrat verwendeten CFK-Laminaten?
- Eignet sich die Zwischenfaserrissentwicklung in FVW-Proben als Zustandsanzeiger?
- Wie verhält sich die Rissbildung und Eintrübung im für die Indikatorschicht verwendeten Werkstoff?
- Auf welche Art erfolgt die Rissübertragung zwischen Probe und Indikatorschicht?
- Wie entwickelt sich die Remission der Indikatorschicht über die Zeit bei schwingender Beanspruchung von Proben?

5.1.1. Rissbildung in den untersuchten Basis-Laminaten aus CFK

Für die später mit Indikatorschicht versehenen CFK-Lamine wurden an unbeschichteten Proben Zugversuche und Schwingversuche durchgeführt. Mit der Röntgenrefraktionsmessung und der Schallemissionsmessung wurde dabei der Verlauf der Querrissbildung (bzw. Querriss- und Diagonalarissbildung bei $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung) dargestellt.

Im Stufenzugversuch an $0^\circ/90^\circ$ -Gewebelaminat wurde der Rissbeginn mit Röntgenrefraktions- und Schallemissionsmessung untersucht. Beide Verfahren zeigten übereinstimmend den Beginn der Querrissbildung nach der Laststufe 200MPa. In Schwingversuchen mit $R = 0,1$ und 10^6 Lastwechseln wurde der Beginn der Querrissbildung auch bei $\sigma_o = 200\text{MPa}$ festgestellt. Die Bestimmung der Rissdichte ist durch die Auflösung der Scans limitiert. Sie liegt aber immer im selben Bereich von etwa einem Riss pro Millimeter. In allen Proben konnten vor dem Auftreten von Querrissen in der Größenordnung von Millimetern an Länge keine Mikrorisse durch die Röntgenrefraktionsmessungen gefunden werden. Risse durchtrennen demnach schnell die komplette Querschicht in der sie auftreten von Probenkante zu Probenkante. Dies gilt für die untersuchten Gewebe- und Gelelamine.

Bei einem Schwingversuch des Gewebelaminates bei 300MPa bis $N=10^6$ zeigt die Zunahme der Röntgenrefraktion im untersuchten ersten Bereich einen monotonen

Anstieg. Dies ist vergleichbar zum Verhalten der Transmission von Licht an GFK, wie dann in Kapitel 4.2 gezeigt.

An $\pm 45^\circ$ -Gewebeproben wurde ebenfalls der Verlauf der Röntgenrefraktion über die Lastspielzahl untersucht. Da hier die Fasern diagonal zur Hauptauflösung der Röntgenrefraktionsmessung liegen, wurde je ein Scan quer und längs durchgeführt. Dies machte auch die Unterscheidung von Querrissen und Diagonalarissen möglich. Die typische Ausprägung dieser Rissarten wurde später bei den Untersuchungen mit der Indikatorschicht wieder in gleicher Art gefunden.

Die Röntgenrefraktionstechnik ist sehr empfindlich hinsichtlich kleinster Verformungen der Optik. Verformungen des Aufspanntisches und thermisch induzierte Verformungen der optischen Bank führen zur Drift der Messergebnisse, was zu einem großen Versuchsaufwand führt. Die Röntgenrefraktion bietet allerdings die wertvolle Möglichkeit ins Innere der Probe zu sehen. Sie ist empfindlicher hinsichtlich feiner Risse als Computertomografie oder durch Kontrastmittel unterstützte Röntgendurchstrahlungsprüfung. Aber sie ist auch sehr zeit- und ressourcenaufwändig und somit ein Verfahren für kleinskalige Grundlagenforschung im Labor. Es ist wünschenswert, Ergebnisse ähnlicher Aussagekraft mit einem geringeren Messaufwand erzeugen zu können. Die im Kapitel 4.2 diskutierte Auswertung der Lichttransmission gelingt aber nur bei transparenten Laminaten. Die vorgeschlagene, hier untersuchte Indikatorschichtauswertung als (Teil-)Lösung zu diesem Problem bietet aber bereits erste gute Ergebnisse für undurchsichtige CFK-Proben und viel weiteres Potential, wie Ergebnisse in Kapitel 4.4 und 4.5 zeigen.

5.1.2. Zwischenfaserrissentwicklung als Zustandsanzeiger

Ob und unter welchen Bedingungen sich die Zwischenfaserrissentwicklung als Zustandsanzeiger eignet, wurde für viele Fälle in der Literatur (z.B. [GaBa77, GaSj99, LeDa90, PaBa78, Seba12, ThRe94, Trap02]) untersucht. Es gibt zahlreiche Vorschläge, die Querrissbildung mit Lebensdauervorhersagemodellen (siehe Kapitel 2.3) zu verbinden.

Experimentell wurde in dieser Arbeit die Transmission von Licht – zum Vergleich, als korrespondierende Größe zur Remission – an verschiedenen Laminattypen aus GFK-Gelege und -GFK-Gewebelaminaten untersucht. Das verwendete Verfahren nutzt bewusst nur die integrale Eintrübung der Proben und bleibt somit einfach und schnell auswertbar. Dennoch konnten wertvolle Ergebnisse erzielt werden:

- Die integrale Auswertung ist bereits relativ aussagekräftig. Lastreihenfolgeeffekte zeigten sich nicht nur in der resultierenden Lebensdauer, sondern bereits frühzeitig im Verlauf der Lichttransmission.
- Die Entwicklung der Lichttransmission zeigt besondere Schädigungskonzentrationen verlässlich an. Dies wurde an Proben mit mittigem Loch deutlich.
- Innerhalb einer Probenserie war die Definition von Grenzwerten der integralen Lichttransmission möglich, ab denen die Betriebslasten nicht mehr sicher ertragen werden. Aus den Eintrübungswerten der Wöhlerversuche ermittelte Vorhersagen trafen besser zu als die der linearen Schadensakkumulationshypothese.

- In Gewebelaminat $0^\circ/90^\circ$ konnten Querrisse und Delaminationen an den Kreuzungspunkten beobachtet werden, die sich in eingetrübten Spots zeigen. Solche Beobachtungen sind auch in der Literatur als Metadelaminationen [LaLV06, ReCa02] bekannt und wurden später auch bei der Übertragung von Rissen in die Indikatorschicht gefunden.
- Die Eintrübung ist für $0^\circ/90^\circ$ -Lamine im Anfangsbereich stark und wird dann flach. Dies entspricht dem Erreichen eines charakteristischen Schädigungsmaßes (CDS [CaRe03, Schu92]), bei dem ein Schädigungsmechanismus nahezu vollständig ausgeprägt ist und eine Sättigung mit nur mehr geringer beobachtbarer Zunahme der Schädigung eingetreten ist.
- An $0^\circ/90^\circ$ -Proben mit Loch wurde bei höherer Last ein größerer Anstieg der Eintrübung und ein größerer Endwert verzeichnet. Dies deutet auf einen Zusammenhang der Eintrübung mit der Dehnungsamplitude hin.
- An $\pm 45^\circ$ -Proben wird bei hoher Last ebenfalls ein schneller Anstieg der Eintrübung je Lastwechsel beobachtet. Hier allerdings werden keine großen Endwerte der Eintrübung beim Probenversagen verzeichnet. Im Gegensatz zu Proben mit 0° -Faseranteil ist die Matrixschädigung als bruchrelevanter Mechanismus hier progressiv. Gegen Ende kraftgeregelter Versuche nehmen die Dehnungen selbstverstärkend stark zu, da keine Fasern mittragen.
- Proben, die bis in den VHCF-Bereich intakt bleiben, weisen auch keine Eintrübung oder Matrixrisse innerhalb der Auflösung des Verfahrens auf.

Es ist unter Laborbedingungen bei transparenten Laborlaminaten möglich, belastungsartabhängig Grenzwerte der Eintrübung festzulegen und die Eintrübung als Maß für die Schädigung zu nutzen. Hierzu genügt die Auswertung der Eintrübung über eine bestimmte Fläche. Die Verläufe der Eintrübung über die Lebensdauer korrelieren meist gut mit der Steifigkeitsabnahme der Proben. Die so dargestellte Matrixrissentwicklung eignet sich in vielen Fällen also gut als möglicher Zustandsanzeiger für die Lebensdauerbestimmung. Aufgrund der notwendigen Forderung nach transparenten Laminaten ist die Einsetzbarkeit dieses einfachen und effektiven Verfahrens praktisch stark eingeschränkt. Dies führte zur Entwicklung der Idee der untersuchten Indikatorschicht.

5.1.3. Lichtremission in der Indikatorschicht als Schädigungsvariable

Inwiefern Remission und Transmission von Licht die gleichen inneren Oberflächen bzw. Schäden in durchsichtigen Werkstoffen erfassen, wird theoretisch in Kapitel 3.1.3 diskutiert. Es ist erkennbar, dass die Zunahme der Rückstrahlung und die Abschwächung des Durchgangs von Licht im Wesentlichen von den gleichen Effekten verursacht werden müssen. Größere Rissdichte führt zu einer stärkeren Remission ebenso wie zu einer verringerten Transmission – bedingt vor allem durch diffuse und gerichtete Reflexionen an Schäden.

Die experimentelle Untersuchung der Indikatorschicht (Kapitel 4.3) wurde an einem 1mm starken Laminat aus dem Material der Indikatorschicht vorgenommen. Dabei neu auftretende Fragen nach der physikalischen Ursache einer Reversibilität der

Probeneintrübung sollen in dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden. Ergebnisse aus der Untersuchung des Indikatorschichtmaterials:

- Bei der Untersuchung der Spannungen und Dehnungen, bei denen zuerst Risse auftreten, wurde ein stark dehnungsabhängiges Verhalten der Eintrübung der Proben beobachtet. Parallel zur elastischen Entlastung ist auch die Eintrübung insbesondere bei $0^\circ/90^\circ$ -Laminaten mit hohem Anteil an elastischer Dehnung stark reversibel.
- Auch die – wesentlich größere bleibende Dehnung erreichenden – $\pm 45^\circ$ -Lamine weisen einen erheblichen Anteil an reversibler Eintrübung auf. Die Untersuchungen der Proben im polarisierten Licht – also im klassischen Aufbau der Spannungsoptik – lieferten weitere Hinweise auf den Charakter der reversiblen Eintrübung.
- Die Spannungsoptik verstärkte die sonst recht schwache Eintrübung. Insbesondere der Zusammenhang zwischen Dehnung und optischen Effekten konnte durch die Beobachtung beider Größen bei der Relaxation der Proben nach Entlastung gestützt werden.
- Die $0^\circ/90^\circ$ -Proben zeigen nach Entlastung eine sich zeitabhängig zurückbildende Restdehnung, die proportional zum optischen Effekt abnimmt.

Unter dem Mikroskop wurden zur weiteren Klärung der Effekte streifenförmige Präparate verschiedener Proben unter gleichzeitig aufgebracht leichter Zuglast untersucht.

- Die Wirkung der elastischen Dehnung ist auch hier groß. Sie nimmt mit steigender bereits vorhandener Schädigung zu. Eine zyklisch geschwungene Probe hat die größte Rissdichte. Eine im Zugversuch bei 290MPa gebrochene Probe weist nur wenige erkennbare Risse auf. Eine zuvor unbelastete Probe weist keine erkennbaren Risse, aber dennoch Eintrübung auf.
- Die Zunahme bleibender Schädigung wurde nicht beobachtet, da die Zwischenfaserrissgrenze von der Vorlast nicht wesentlich überschritten wurde
- Das Öffnen bereits vorhandener Risse kann unter dem Mikroskop beobachtet werden.
- Nur Risse an der Oberfläche werden scharf dargestellt. Risse in tieferen Schichten der transparenten Proben werfen einen Schatten, der deutlich breiter aber auch weniger intensiv ist.

Dass die zuvor unbelastete Probe keine erkennbaren Risse, aber Eintrübung zeigt, weist auf den möglichen Einfluss vermuteter spannungsoptischer Effekte hin, die Spannungsspitzen an den Faser-Matrix-Grenzflächen darstellen könnten. Die nötige Polarisation des Lichts kann durch leicht differierende Brechungsindizes von Faser und Matrix und die gleichförmige Struktur der Faserbündel entstehen. Vergleichbare Polarisatoren, die durch Kombination unterschiedlicher Brechungsindizes und Periodizität arbeiten, existieren. Die Erklärung dieses Effektes ist aber nicht Kernthema dieser Arbeit. Sie ist auch zur Untersuchung der Indikatorschicht in der hier genutzten Form nicht nötig, wie sich in der Art der Rissdarstellung in der Indikatorschicht in Kapitel 4.4 zeigt.

Nicht allein die Dehnung in der Indikatorschicht ist ausschlaggebend. Auch die Anzahl der Lastwechsel bestimmt die bleibende Opazität, wie der Vergleich der im Zugversuch gebrochenen Probe mit der Probe aus dem Schwingversuch zeigt. Dass nicht vorrangig die Querrissbildung in der Indikatorschicht ausschlaggebend für die Rissdarstellung ist haben bereits Vorversuche gezeigt. Die Untersuchungen zur Übertragung zwischen Grundlaminat und Indikatorschicht wird in Kapitel 4.4 vorgestellt und im Folgenden diskutiert.

5.1.4. Übertragung zwischen Grundlaminat und Indikatorschicht

Dass die Rissbildung in der Indikatorschicht selbst von einem wesentlich deutlicheren Effekt verstärkt und überlagert wird, wurde in der lichtmikroskopischen Untersuchung von CFK-Proben mit Indikatorschicht erkannt. Mikrodelamination zwischen Schicht und Grundlaminat und Metadelaminationen an den umgelenkten Faserbündeln der feinen Leinwandstruktur der Indikatorschicht liefern den größten Anteil zur Remission und machen Risse der obersten Schicht dieses Grundlaminates deutlich sichtbar. Dies wurde an Schliffbildern von geschädigten beschichteten Proben deutlich. Wie bereits theoretisch in Kapitel 3.1.3 begründet, erzeugen Querrisse allein wenig Remissionszunahme, lokale (und raue) Delaminationen dagegen viel. Bei $0^\circ/90^\circ$ -Laminaten ergibt sich eine effektive Ausnutzung dieses Effektes. Denn die Risse aus Querschicht wachsen in den untersuchten Proben immer in die Indikatorschicht und werden dort zunächst schwach durch feine Querrisse angezeigt. Dannach ist die große Dehnung an der Rissspitze und den Kreuzungspunkten Grund für die Entstehung der charakteristischen Metadelaminationen zwischen Grundlaminat und Indikatorschicht. Diese sorgen dort für gute Erkennbarkeit der Risse.

An $0^\circ/90^\circ$ -NCF-Gelege-Laminat (Kapitel 4.4.1) kann dies an der außenliegenden Querschicht besonders gut mit der Indikatorschicht verfolgt werden. Die Querrisse werden im Muster des Gewebes der Indikatorschicht durch gut sichtbare punktförmige Metadelaminationen dargestellt. Daneben sind feine Querrisse in der Schicht für den Messeffekt insgesamt nachrangig.

Für die Beurteilung der Rückwirkung der Schicht auf das Grundlaminat wurden die erkannten Risse von unbeschichteter und beschichteter Seite verglichen. Die Indikatorschicht beeinflusst die Anzahl der Risse in der Stichprobe nicht erkennbar. Dabei wird – wie zuvor am unbeschichteten Laminat in der Röntgenrefraktionsuntersuchung – ein typischer Rissabstand von etwa einem Riss pro Millimeter beobachtet.

An $0^\circ/90^\circ$ -Gewebe-Laminat zeigt sich anschaulich, dass die Querrissentwicklung nur an der Grenzschicht zwischen Querschichten und der Indikatorschicht, nicht aber durch Längsschichten hindurch, dargestellt wird. Das Rissbild aus Metadelaminationen und Querrissen in der Indikatorschicht ist vergleichbar mit dem an NCF-Gelege-Laminat beobachteten. Zusätzlich tritt gegen Ende der Lebensdauer besonders deutlich Delamination ausgehend von Fadenumschlingungen auf. Dies kann das kurz bevorstehende Probenversagen anzeigen.

Für die $\pm 45^\circ$ -Gewebe-Laminat-Proben fallen Querrisse auf, die in matrixreichen Gebieten an Webkreuzungspunkten auftreten. Diese sind optisch frühzeitig, aber vergleichsweise schwach erkennbar. Die Indikatorschicht ist parallel zum Substrat im $\pm 45^\circ$ -Winkel aufgebracht und somit nicht parallel zu den Querrissen. Diagonalrisse

werden erst später sichtbar und vergleichbar zu den Ergebnissen der $0^\circ/90^\circ$ -Orientierung durch Diagonalrisse (dort Querrisse) und die erwähnten Metadelaminationen dargestellt.

Die numerische Betrachtung eines vereinfachten Modells eines Querrisses in einem $0^\circ/90^\circ$ -Laminat mit Indikatorschicht mittels der FEM zeigte Besonderheiten der Rissumgebung an der Indikatorschicht auf. Die linear-elastische Simulation modelliert die Spannungen in der Indikatorschicht bei verschiedenen Schichtdicken, mit und ohne Delamination zwischen Substrat und Indikatorschicht. Sie bestätigt, dass die Wahl einer möglichst dünnen und möglichst weichen Indikatorschicht richtig ist. Innerhalb der für diese Arbeit untersuchten ersten Konfiguration wurde dem mit der Wahl des dünnsten am Markt erhältlichen Glasfasergewebe und einem niedrigen Faservolumengehalt entsprochen. Weiteres Ergebnis der numerischen Rechnungen ist die Bekräftigung der Forderung nach möglichst guter Anbindung der Indikatorschicht. Mit zunehmender Delaminationslänge verteilt sich die Verschiebung aus der Rissöffnung auf eine größere Länge. Dies führt zu geringeren Dehnungen in der Indikatorschicht, was wiederum die günstigere Rissanzeige innerhalb der Indikatorschicht beeinträchtigt. Günstiger weil wie in Abbildung 80 und den Experimenten in Kapitel 4.4.1 gezeigt wurde, ist das Rückstrahlungssignal von interlaminaren Delaminationen weniger deutlich als die Eintrübung durch Metadelaminationen in der Indikatorschicht selbst (vgl. Abbildung 77).

Die Art und Richtung der Beleuchtung der Proben spielt eine wichtige Rolle bei Rückstrahlung von Licht und damit der Darstellung der Risse. Die ausgewerteten Aufnahmen aus den verschiedenen Versuchen zeigten, dass die Parameter noch nicht ideal gewählt wurden. Die Variation der Beleuchtungsrichtung zeigte die Hauptfehlerquellen auf und ergab mit einer ringförmigen Beleuchtung eine einfache universell einsetzbare Lösung. Besonders störend ist die seidig schimmernde Reflexion an den Kohlenstofffasern des Grundlaminates. Die tiefschwarze Farbe und die zylindrischen Faser-Matrix-Grenzflächen an den Kohlenstofffasern spiegeln Licht aus verschiedensten Richtungen quer zur Faserrichtung. Die Ondulation der Fasern in Gewebe-Laminaten führt zu weiteren Richtungen in denen das Material seidenartig glänzt. Als günstige Lösung hat sich eine allseitig ringförmig schräge Beleuchtung erwiesen. Reflexionen an der glatten Probenoberfläche werden so vermieden. Das seidige Schimmern der Kohlenstofffasern ist dann relativ schwach und für alle Richtungen gleichmäßig. Somit sind die Störungen sowohl von der Probenoberfläche als auch von der Kohlenstofffaserschicht gering und wenig störend.

5.1.5. Verhalten der Indikatorschicht bei Schwingbelastung

In Kapitel 4.5 werden Ergebnisse zum Verhalten der Indikatorschicht unter Schwingbelastung dargestellt.

- Aus dem Verlauf von Remission und bleibender Dehnung an $0^\circ/90^\circ$ -Gewebe-Laminat mit Indikatorschicht kann abgeleitet werden, dass die bleibende Dehnung und die Remission vom selben Mechanismus beeinflusst werden. Dieser Mechanismus muss unter Einbeziehung der vorherigen Ergebnisse hauptsächlich Querrissbildung sein, die die Steifigkeit verringert und als Remissionszunahme in der Indikatorschicht dargestellt wird. Die Rissbildung erklärt

die Remissionszunahme. Crazing ist nach Literaturangaben [LiHo73, LoHa86, Meng90, Walt03] für Epoxidharz unwahrscheinlich.

- Die Zunahme beider Größen ist – wie aus den Ergebnissen an GFK-Proben in Kapitel 4.2 und Literaturstellen [Reif91, Schu92] bekannt – in drei Bereiche unterteilbar. Im ersten Bereich ist eine starke Zunahme zu verzeichnen. Risse entstehen und wachsen bis eine gewisse Rissdichte erreicht ist. Dann nimmt die Steigung ab. Ein flacher Anstieg auf dem Niveau eines charakteristischen Schädigungsniveaus (CDS) ist von weiterer geringfügiger Zunahme der ersten Schädigungsart und weiterer Zunahme von Schädigung, die nicht von den beobachteten Größen erfasst wird, geprägt. Diese nicht erfassten Schädigungsarten sind vorrangig Faserrisse (jeweils die höchstbelasteten Fasern reißen) und verdeckte Delaminationen (die unter Umständen nur geringen Einfluss auf die Steifigkeit und die Probeneintrübung haben).
- Bei Geweben in der Deckschicht des Grundlaminates werden lokale Delaminationen gut von der Indikatorschicht dargestellt, wie Fotos (z.B. Abbildung 76) zeigen.

An $0^\circ/90^\circ$ -Gelegelaminat ist der Zusammenhang zwischen bleibender Dehnung und Remission weniger deutlich. Hier liegen 0° und 90° -Schichten getrennt nebeneinander und sind nicht als Gewebe miteinander verschlungen.

- Dies kann den nacheilenden Verlauf der Remission zur Dehnung erklären. Metadelaminationen werden weniger stark induziert. Dafür sind sie deutlicher zu erkennen und einfacher zu verfolgen.
- Es zeigt sich, dass Querrisse bereits vor den Metadelaminationen auftreten, aber erst mit zunehmender Lastspielzahl durch die Metadelaminationen an den Kreuzungspunkten der Indikatorschicht immer deutlicher dargestellt werden.
- Die Indikatorschicht stellt also damit nicht direkt Risse im Grundlaminat dar, sondern verzögert und hat so einen Lastzähleffekt. Damit hat die Indikatorschicht auch teilweise Eigenschaften der in Kapitel 3.2 definierten „Stellvertreterschicht“.

Für $\pm 45^\circ$ -Laminat mit Indikatorschicht werden zur Einordnung zunächst die Ergebnisse eines Zugversuches vorgestellt.

- Hier setzt eine deutliche Zunahme der Remission erst bei großen Dehnungen ein. Dies noch um einiges deutlicher als von der Transmission von GFK-Laminaten (vgl. Laminat aus Indikatorschicht in Abbildung 63) bekannt. Der Knick in der Remissionszunahme tritt bei etwa 6% Dehnung auf.
- Mikrodelaminationen zwischen Indikatorschicht und Grundlaminat liefern in der beschichteten CFK-Probe (siehe Abbildung 97) den ersten großen Anteil zur Remission und verursachen den beschriebenen Knick dieser. Bei der Transmission an feinem 36-lagigem-Laminat aus dem Material der Indikatorschicht tritt ein ähnlicher Knick erst kurz vor 10% Dehnung auf. Hier bestehen keine Dehnungsunterschiede zwischen den Schichten. Die kleinen Querrisse liefern weniger Beitrag zur Remission und haben in jeder Schicht dieselbe

Größenordnung, was ein späteres Einsetzen der Metadelamination erklären kann.

Ergebnisse der Schwingversuche an $\pm 45^\circ$ -Gewebe-Laminat:

- Es ergeben sich schon bei wesentlich geringeren Dehnungen deutliche Remissionszunahme in der $\pm 45^\circ$ -Indikatorschicht.
- Vor dem Erscheinen deutlicher Diagonalrisse in der Indikatorschicht sind Querrisse in den harzreichen Gebieten an Webkreuzungspunkten (Abbildung 79) zu erkennen. Dies wurde ähnlich auch an unbeschichteten Proben mit der Röntgenrefraktionsmethode dargestellt. Dabei ist die Röntgenrefraktionsmessung prinzipbedingt besonders empfindlich hinsichtlich der Darstellung der Querrisse, während durch die – auch bezüglich des Querrisses – diagonale Ausrichtung der Indikatorschicht die Querrisse von der Indikatorschicht nur schwach hervorgehoben werden.
- Bleibende Dehnung und Remissionszunahme haben einen sehr ähnlichen Verlauf. Dieser hat aber im Gegensatz zu den Verläufen aus Laminaten mit 0° -Faseranteil oder den vorgestellten Ergebnissen der Transmissionsentwicklung an GFK keinen vorübergehenden Sättigungszustand. Dies kann auf ein Nacheilen der Remission verglichen mit der tatsächlichen Schädigung im Laminat hindeuten.
- Im Vergleich mit der Dehnungsentwicklung fällt bei näherer Betrachtung auch der kleine steile Anstieg der Dehnung ganz zu Beginn des Versuches auf. Dies wird offensichtlich von der Indikatorschicht nicht dargestellt. Der steile Verlauf gegen Ende ist aber wieder für beide Verläufe ähnlich. Das Nacheilen der Remission könnte durch das Verwenden einer risseempfindlicheren (also schlechteren) Matrix in der Indikatorschicht kompensiert werden.

Im Gegensatz zu Ergebnissen zur Transmission an GFK-Laminat (siehe Kapitel 4.2.1) war die Abschätzung von Grenzwerten, ab denen mit dem Versagen der Proben gerechnet werden muss für die Indikatorschicht auf CFK noch nicht möglich. Die Datenlage ist hierfür zu dünn und die Streuung der Lastspielzahlen zu groß. Bei einer größeren Anzahl an Versuchen scheint aber auch hier die Ermittlung von Grenzwerten möglich. Der steile Anstieg der Remission bei CFK mit Indikatorschicht (Abbildung 93 und Abbildung 98) vor dem Probenversagen ist qualitativ vergleichbar mit dem steilen Anstieg der Transmissionsabnahme bei GFK-Laminat (Abbildung 48).

Ein Vergleich der Ergebnisse zweier gleich gefertigter und belasteter Proben mit Röntgenrefraktionsmessungen einerseits und dem Einsatz der Indikatorschicht andererseits (Abbildung 100) lieferte ähnliche Verläufe des jeweiligen Schädigungsmaßes. Dabei finden sich weitere Hinweise darauf, dass der Messeffekt in der Indikatorschicht dem tatsächlichen Auftreten von Querrissen im Grundlaminat etwas hinterherhinkt. Die Übertragung von Grundlaminat zu Indikatorschicht benötigt also eine gewisse Anzahl an Lastwechseln Zeit und eine gewisse Rissöffnung. Dies kann aber bei der Bewertung der Ergebnisse der Indikatorschicht leicht entsprechend berücksichtigt werden.

5.2. Einordnung der Ergebnisse

Die intensive Untersuchung des Konzeptes in den obigen Kapiteln ermöglicht die Diskussion seiner Vor und Nachteile im Folgenden.

5.2.1. Diskussion wesentlicher Vor- und Nachteile des Konzeptes

Position außen am Laminat (-)

Ein Nachteil des Konzeptes ist die Tatsache, dass die zu beobachtende Querschicht außen sein muss. Konstruktionsrichtlinien empfehlen keine Platzierung querrissgefährdeter Schichten als äußere Lagen. Dies auch daher, weil Querrisse dort Umwelteinflüssen ausgeliefert sind. Gemeint ist dabei, die am stärksten querrissgefährdete Schicht eher innen anzuordnen, da in einem optimierten Laminat jede Schicht gut ausgenutzt und somit jede Querschicht auch nennenswert Querdehnung erfährt. Wird die Indikatorschicht ganzflächig aufgebracht, so lässt sich dieses Argument größtenteils entkräften. Dann schützt die Indikatorschicht die Querschicht. Die Stellen, die überwacht werden sollen, müssen außerdem sowieso zum Schutz der Indikatorschicht besonders vor Witterung geschützt werden.

Optische Zugänglichkeit erforderlich (-)

Ein weiterer Punkt, der zur Nutzung zu beachten ist, ist, dass die untersuchten Stellen optisch zugänglich sein müssen. Ein Einsatz außen ist also nur möglich, wenn kein deckender Lack die Sicht verhindert. Die Möglichkeit, den Lack zu Inspektionen regelmäßig zu entfernen widerspricht dem Gedanken der Einfachheit. Wenn keine anderen Gründe (s.u.) dagegen sprechen bietet sich aber natürlich auch transparenter Decklack an.

Verunsicherung technisch unbedarfter Nutzer (-)

Außerdem ist ein Einsatz der Indikatorschicht an dekorativen Sichtflächen nicht sinnvoll, wenn die Information über den Zustand den Nutzer mehr verunsichert als nötig. (Eine alltägliche Umsetzung dieses Gedankens ist die Kühlmitteltemperaturanzeige aktueller PKW, die im Normalbetrieb trotz tatsächlicher Schwankungen im Rahmen von 10 bis 20K erst bei Abweichungen darüber hinaus eine Zeigerbewegung ausgibt, um den Nutzer nicht zu überfordern.) Sollte eine gewisse Rissdichte noch mit entsprechender Gewissheit sicher sein, ist es sicherlich besser, einen ängstlichen Nutzer (vielleicht einen Passagier) mit dem Anblick dieser Rissdichte nicht zu überfordern. Wenn aber informierte, sicherheitsbewusste Anwender diese Entwicklung während der Nutzung beobachten können, kann dies vorteilhaft sein. Bei Sportgeräten könnte der Nutzer so rechtzeitig die entscheidenden Hinweise erhalten, die schlimmere Schäden vermeiden helfen.

Zusätzliche Masse (-)

Nachteilig ist weiterhin die zusätzliche Masse der Schicht. Die wenig steife Schicht trägt kaum mit. Sie ist – im Rahmen der bisherigen Konzeption – dafür aber auch nur sehr dünn und damit leicht. Im Falle einer zusätzlich implementierten Schutzfunktion

der Schicht ist dieses Argument weiter entkräftet. Ob es in jedem Fall das vergleichsweise schwere GFK sein muss, das die Risse darstellt, ist außerdem noch nicht abschließend festgelegt.

Verzögerung der Anzeige über die Lebensdauer (-)

Wie sich gezeigt hat, stellt die Indikatorschicht die Risse nicht direkt, sondern erst über die Lebensdauer verzögert dar. Da dieser Zusammenhang experientell zu ermitteln ist, kann diese Verzögerung leicht berücksichtigt werden. Bei der Modellierung nach Kalibrierkurven würde dies automatisch berücksichtigt. Außerdem sind die Eigenschaften der verwendeten Matrix noch nicht optimiert und entsprechend anpassbar, so dass diese Verzögerung auch sicherlich noch zu verringern ist.

Metadelamination als Haupteffekt in der Indikatorschicht (-)

Als Nachteil könnte angesehen werden, dass Metadelaminationen einen Hauptteil des Messeffektes ausmachen. Auch hier sind noch zahlreiche Parameter vorhanden, die eine verbesserte Darstellung ermöglichen. Feinere Gewebe bis zu gänzlich anderen Halbzeugen bieten viele Möglichkeiten, die Darstellung nach Wunsch richtungsunabhängiger und die Auflösung der Rissdarstellung genauer zu machen.

Diesen Nachteilen stehen unter anderem die prinzipiellen Vorteile gegenüber, die den Anstoß zur Untersuchung der Idee gaben.

Einfachheit des Prinzips (+)

Als erstes ist die prinzipielle Einfachheit zu nennen. Optische Erkennung von Rissen oder Rissdichte ist intuitiv und direkt.

Großflächige Überwachung (+)

Darüber hinaus ist es leicht, und außerdem in vielerlei Hinsicht vorteilhaft, die Schicht großflächig einzusetzen. Damit sinkt die Wahrscheinlichkeit kritische Fehler und stärker geschädigte Stellen nicht zu entdecken.

Immanente Informationsspeicherung (+)

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Speicherung von Schädigungsinformationen mit denselben Effekten geschieht wie im „Schädigungsgedächtnis“ des Werkstoffes. Dabei ist die Schicht auch in verschiedenste Überwachungskonzepte integrierbar.

Flexible Auswertbarkeit (+)

Das wesentliche Sensorelement, die Indikatorschicht, ist unverlierbar immer am Bauteil. Dabei ist sie ebenso online auswertbar, wie in bestimmten Intervallen auslesbar. Informationen gehen dabei nicht verloren.

Umfassende Schädigungsdarstellung (+)

Dadurch, dass das Verfahren dieselben Schädigungsmechanismen gerade als Messeffekt nutzt, die die Schädigung des Grundwerkstoffes ausmachen ist es ebenso

empfindlich gegenüber anderen als mechanisch induzierten Schädigungsmechanismen. Die gesamte Spannbreite hygro-thermo-mechanischer Ermüdung kann bei entsprechender Anpassung erfasst werden. Eine – wie auch immer geartete – Matrixschädigung durch Umwelteinfluß etwa UV-Strahlung, Feuchtigkeit oder Frost erfasst die Indikatorschicht zuerst, so dass hier eine frühzeitige Warnung erfolgen würde.

Kombinierbarkeit der Indikatoreigenschaft mit anderen Anforderungen (+)

Gerade auch bei Sportgeräten ist es oft üblich, eine GFK-Deckschicht einzusetzen, um die bei Gelegen nach dem Bruch unter Umständen gefährlich langen spitzen Faserbündel im Verbund zu halten oder zu kleineren weniger gefährlichen Bruchstücken zu zerteilen (Die hier untersuchte Ausführung der Indikatorschicht ist dafür allerdings zu dünn). Mit einer Anpassung der Matrix hinsichtlich besserer Rissdarstellung kann man diese Verfahrensweise zur Nutzung als Indikatorschicht weiterentwickeln.

5.2.2. Konzept für die Anwendung am Bauteil

Ein Konzept für die konkrete Anwendung wird in Abbildung 101 skizziert. Es kann begleitend zu anderen bauteilnahen Lebensdauernachweisen ablaufen. Mit einer entsprechenden Datenbasis und Erfahrungen kann eine Auswahl des konkret geeigneten Indikatormaterials erfolgen. An für die Belastung repräsentativen Probenversuchen wird der Zusammenhang zwischen Lebensdauer und Rissentwicklung ermittelt. Bei bewährten Modellen hierfür kann dies auch ganz oder teilweise rechnerisch erfolgen. Die Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Rissdichte in der beschichteten obersten Laminatlage und der Remission der Indikatorschicht erfolgt im nächsten Schritt. Ob hierfür allgemeingültige Regeln ermittelt werden können, muss noch geprüft werden. Danach müssen am betreffenden Bauteil besonders gefährdete Bereiche identifiziert werden, die als Messstellen dienen können. Dabei sind möglichst große Bereiche vorteilhaft, um möglichst alle Schäden zu entdecken. Diese Messstellen werden dann kontinuierlich oder in Inspektionsintervallen mit den Werten der Kalibrierkurve verglichen, an der bereits Grenzwerte definiert wurden. Beim Erreichen der Grenzwerte ist dann ein Austausch oder eine umfangreiche Überholung des Bauteils zu veranlassen.

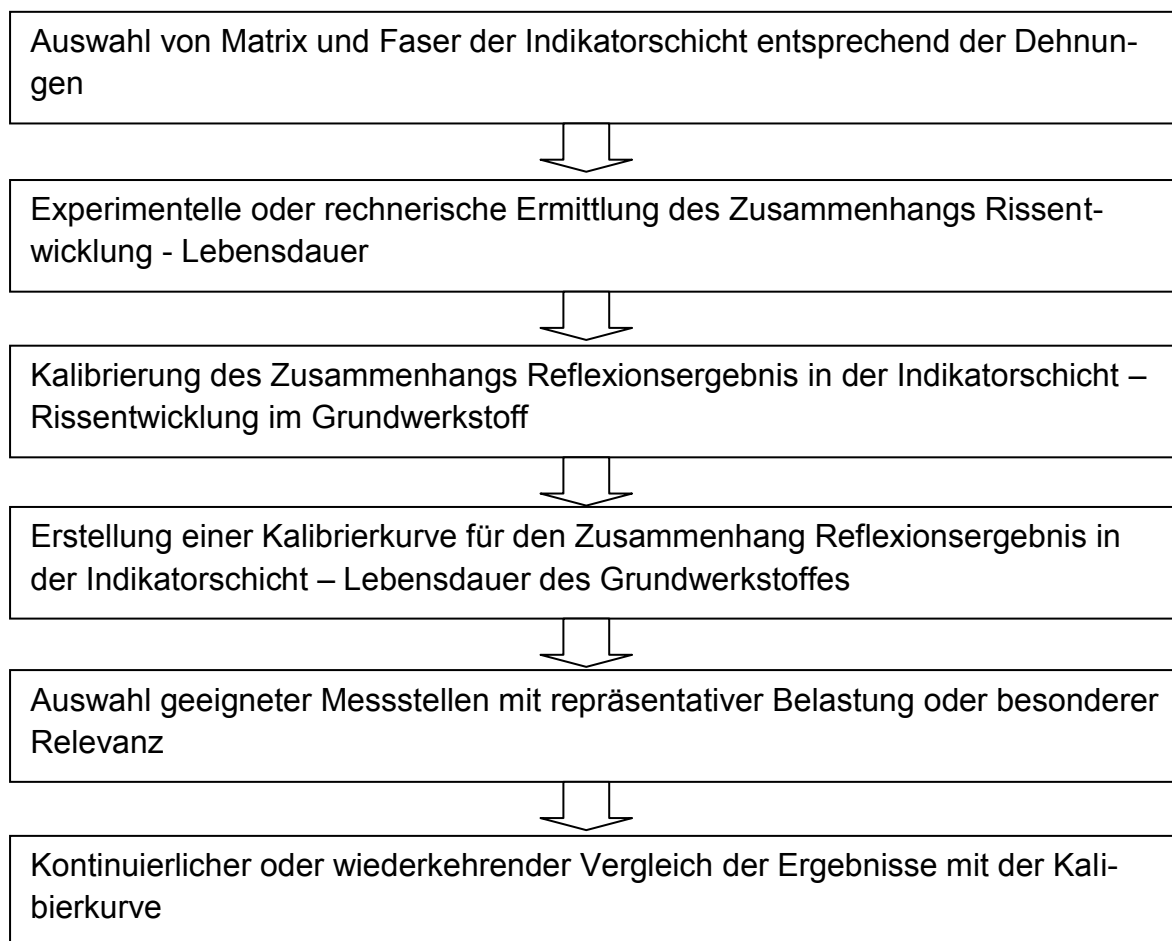


Abbildung 101 Mögliches Einsatzkonzept für die Indikatorschicht

Einsatzmöglichkeiten am Bauteil

Ein möglicher Einsatzort ist die äußerste Schicht von Compositedruckbehältern. In Druckbehältern liegt in den einzelnen Schichten immer gleichzeitig Längs- und Quersugbelastung vor. In vielen Fällen kann frühzeitig Querrissbildung beobachtet werden. Diese beeinträchtigt zwar primär die Festigkeit nicht, ist aber eine erste Schwächung des Verbundes und Ausgangspunkt für weitere Schadensmechanismen. Die Belastungen sind bei Druckbehältern besondere. Die maximale Last (voller Tank) wird lange gehalten und die Lastwechsel beschränken sich auf wenige Tausende. Die Eignung des Konzeptes Indikatorschicht muss dafür hinsichtlich Zeitstandfestigkeit und LCF genauer untersucht werden.

Ein Einsatz an verschiedensten Konstruktionen bietet sich insbesondere an Schwach- und Kerbstellen an. Zum Beispiel nahe Löchern oder Nietverbindungen. Die von dort ausgehenden Querrisse und Delaminationen sind in vielen Experimenten untersucht [Kasu11, Talr94]. Es wäre effektiv, den Zustand dieser Bereiche „auf den ersten Blick“ anhand einer Indikatorschicht beurteilen zu können.

Auch die Innenseite impactgefährdeter Bereiche wäre so zu überwachen. Dabei wären bei der aktuellen miniaturisierten Kameratechnik auch dauerhafte Überwachungslösungen realisierbar.

Zu diskutieren ist der Einsatz als äußere Lage unter Lack, die bei größeren Inspektionen freigelegt und beurteilt wird. In Bereichen, wo andere Prüfverfahren nicht einsetzbar oder zu teuer sind ist diese Variante denkbar. Die Entfernung der Lackschichten ohne Beschädigung ist dabei allerdings ein entscheidendes Problem. Wie bereits für mechanische Schutzschichten im Bereich der sogenannten „Sichtkohle“ besprochen, kann die Indikatorschicht – wenn sie entsprechend angepasst wird – auch andere Aufgaben mit übernehmen. Die größere Dehnung der Glasfaserschichten lässt diese bei Crashlasten mittragen und die Energieaufnahme vergrößern. Möglicherweise lassen sich andere leichtere transparente Kunststofffasern mit entsprechend kompatibler Refraktion, angepasster Matrixanbindung und noch größerer Bruchdehnung finden.

Diese Einsatzmöglichkeiten sind aber zunächst nur als Vorschläge für die weitere Entwicklung der Idee zu sehen. Die bisher gefundenen Erkenntnisse lassen zurzeit noch manche Szenarien möglich erscheinen, die weitere Untersuchungsergebnisse vielleicht als nicht realisierbar ausschließen werden.

5.3. *Ausblick*

Insgesamt wurde erst ein Bruchteil der Möglichkeiten des Konzeptes betrachtet. Es gibt noch viel Potential alle Parameter in verschiedene Richtungen zu untersuchen und für spezielle Informationen zu optimieren, die über ein Laminat gefordert sind. Darüber soll im Folgenden diskutiert werden.

Weitere Forschung

Bisher wurde nur eine Faser-Matrix-Kombination mit einer Halbzeugvariante an zwei verschiedenen Belastungsrichtungen an nur drei Grundlaminaten untersucht. Dabei wurde außerdem nur der zugschwellende Bereich der Betriebsfestigkeit im mittleren bis hohen Zeitfestigkeitsbereich untersucht. Weitere Forschung kann also in folgende Richtungen gehen:

- Variation des Grundwerkstoffes hinsichtlich Halbzeugart, Faserart und Matrixeigenschaften
- Variation der Belastungsart. Untersuchung von Druckbelastung und unterschiedlichen Lastverhältnissen R
- Variation der Belastungsart hinsichtlich Lasthaldedauer und Zeitstandversuchen, beispielsweise entsprechend langer Haltezyklen bei Druckbehältern
- Untersuchung des Bereiches der Langzeitschwingfestigkeit: Kann mit der Indikatorschicht zwischen quasi-dauerfest und zeitfest unterschieden werden?
- Suche nach Möglichkeiten, die Schichtdicke weiter zu verringern. Gibt es eine ideale Schichtdicke der Indikatorschicht?
- Sind die aus den in Kapitel 4.3 ausgewerteten Versuchen vermuteten spannungsoptischen Effekte nachvollziehbar und eventuell gezielt nutzbar?
- Variation der Werkstoffe der Indikatorschicht. Andere Matrixwerkstoffe könnten zu einer risseempfindlicheren Schicht führen, die schneller den Zustand des Grundlaminates wieder gibt. Andere Fasern und eine andere Anordnung der Fasern haben eventuell nicht die Richtungsabhängigkeit des bisher verwendeten Gewebes. Auch der Versuch, statt Fasern andere Verstärkungspartikel zur Sichtbarmachung der Risse einzusetzen sollte gemacht werden.
- Weitere Untersuchungen des Einflusses der bruchmechanischen Eigenschaften der Matrix auf die Lebensdauer von FKV allgemein und auf das optische Verhalten einer Indikatorschicht im speziellen erscheinen lohnend.
- Integration der Bildaufnahme und Beleuchtung wie im Patent [OrTr13] vorgestellt. Auch für die Untersuchung des Konzeptes im Labor ist eine wiederholbar gleiche Anordnung wichtig, wie die bisherigen Ergebnisse zeigen.
- Entwicklung von Bildauswertungsverfahren zur detaillierteren Auswertung der Bilder hinsichtlich des Auftretens verschiedener Schadensarten.
- Integration der Informationen aus der Schicht in ein Lebensdauervorhersagemodell. Dabei besteht die Möglichkeit, komplexe mikromechanische Ansätze zu bevorzugen, die idealerweise an verschiedene Lamine und Halbzeuge anpassbar sein sollen. Oder – was möglicherweise den Eigenarten der Indikatorschicht eher entgegenkommt – die Entwicklung eines einfacheren phäno-

menologischen Ansatzes, der dann anhand von Messergebnissen kalibriert werden muss.

5.4. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung einer transparenten Deckschicht als visueller Indikator für die Rissentwicklung in undurchsichtigen Faserkunststoffverbunden (FKV). Zunächst wurden dazu in Kapitel 2 relevante Grundlagen zu FKV dargestellt und mögliche Messverfahren für Schädigung vorgestellt und in Kapitel 3 genauer erläutert. Basierend auf diesen Grundlagen wird die rissanzeigende Indikatorschicht vorgestellt. Nach der Darstellung der mechanischen Versuchskonzepte sowie der Werkstoffe und deren Herstellung folgen die Ergebnisse der Untersuchungen zu den fünf Hauptfragen in Kapitel 4.

1. Die Untersuchung der Grundlamine aus CFK mit der Röntgenrefraktionsmessung und der Schallemissionsmessung zeigt, dass die Rissentwicklung in diesen als Schädigungsindikator dienen kann.
2. An GFK-Laminaten konnte die Eignung der Eintrübung als Schädigungsmaß belegt werden. Die Eintrübung ist direkte Folge von Zwischenfaserbruchereignissen und an transparenten GFK-Proben direkt und sehr effizient auswertbar.
3. Zunächst wurde die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse von der Lichttransmission zur -remission an der Indikatorschicht an sich untersucht. An der Indikatorschicht auf intransparentem Material kann nur die Lichtremission ausgewertet werden. Die gewählte Kombination aus sehr feinem Glasfasergewebe und Epoxidharz zeigte sich dabei als gut geeignet für eine Untersuchung des Konzeptes. Remission und Transmission stellen gut vergleichbar dieselben Schädigungen dar. Ferner konnten Ansatzpunkte zur Ausnutzung von spannungsoptischen Effekten in FKV gefunden werden, die eine weitere Untersuchung in anderem Kontext rechtfertigen könnten.
4. In der lichtmikroskopischen Auswertung von Schliffen vorgeschädigter Werkstoffproben und der numerischen Modellierung eines Querrisses mit Indikatorschicht können wesentliche Mechanismen und Einflussgrößen identifiziert werden. Lokale Delaminationen zwischen Indikatorschicht und Metadelaminationen in der Indikatorschicht haben den größten Anteil am Messeffekt. Damit stellt die Indikatorschicht vor allem das Rissgeschehen im Grundlaminat und weniger die eigene Schädigung im Sinne einer Stellvertreterschicht dar. Somit ist die Schicht direkt ein Indikator für die Schädigung des zu überwachenden Laminates.
5. Dass die Lichtremission der Indikatorschicht einen typischen Verlauf über die Lebenszeit zyklisch belasteter Proben hat, zeigen die Ergebnisse der Schwingversuche von beschichteten CFK-Laminaten. Sie gleichen dabei denen der Lichttransmissionsauswertung bei transparentem GFK. Die Schädigungsanzeige durch die Indikatorschicht erfolgt leicht zeitversetzt. Die Indikatorschicht hat somit zu einem gewissen Anteil Eigenschaften einer Stellvertreterschicht, was durch Anpassung und Kalibrierung berücksichtigt werden kann. Um die direkte Nutzbarkeit zur Lebensdauervorhersage zu sichern, sind weitere Versuchsreihen sinnvoll. Dies insbesondere, da die Applikation der Schicht und die Bildauswertung mit den gewonnenen Erkenntnissen nun bessere Auswertbarkeit verspricht.

Die Ähnlichkeit der Verläufe der Rückstrahlung zu anderen Schädigungsindikatoren deutet zusammen mit den Erkenntnissen aus der Untersuchung der Rissübertragung in die Schicht auf eine gute Nutzbarkeit des Konzeptes als einfaches und zuverlässiges Monitoringwerkzeug für intransparente FKV hin. Eine weitere Beschäftigung mit dem Konzept – unter Optimierung der noch wenig variierten Parameter – ist in Hinblick auf eine Fortentwicklung des Ansatzes als einfaches und robustes Verfahren zur Darstellung von Schädigung über das Bauteilleben vielversprechend.

Literaturverzeichnis

- [AASS12] ASOKAN, R. ; ARUMUGAM, V. ; SANTULLI, C. ; STANLEY, A. JOSEPH: Acoustic emission monitoring of repaired composite laminates. In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Bd. 31 (2012), Nr. 18, S. 1226–1235
- [AdHo06] ADDEN, S. ; HORST, P.: Damage propagation in non-crimp fabrics under bi-axial static and fatigue loading. In: *Composites Science and Technology* Bd. 66 (2006), Nr. 5, S. 626–633
- [AdHo10] ADDEN, S. ; HORST, P.: Stiffness degradation under fatigue in multiaxially loaded non-crimped-fabrics. In: *International Journal of Fatigue* Bd. 32 (2010), Nr. 1, S. 108–122
- [ADJR86] ADAM, T. ; DICKSON, R. F. ; JONES, C. J. ; REITER, H. ; HARRIS, B.: A power law fatigue damage model for fibre-reinforced plastic laminates - Theoretisches Modell fuer die Bestimmung der kraftabhaengigen Dauerfestigkeit von faserverstaerkten Kunststoff-Laminaten. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* Bd. Jg. 1986 (1986), Nr. C3, S. 155–166
- [AgCh82] AGARWAL, B. D. ; CHATURVEDI, S. K.: Exact and approximate strain-optic laws for photoelastic composites. In: *Polymer Composites* Bd. 3 (1982), Nr. 3, S. 146–151
- [AlCâ93] DE ALMEIDA, S. F. M. ; CÂNDIDO, G. M.: Effect of the free edge finishing on the tensile strength of carbon/epoxy laminates. In: *Composite Structures* Bd. 25 (1993), Nr. 1-4, S. 287–293
- [BaFe95] BADCOCK, R. A. ; FERNANDO, G. F.: An intensity-based optical fibre sensor for fatigue damage detection in advanced fibre-reinforced composites. In: *Smart Materials and Structures* Bd. 4 (1995), S. 223
- [Bam08] BAM 5.3: Ortwein, H.-P.; Lebensdauervorhersage von +/-45°-GFK-Laminaten mittels Grauwertanalyse - Studienarbeit am FB 5.3 „Mechanik der Polymerwerkstoffe der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung“ (2008)
- [Bam10] BAM 5.3: Altanov, N.; Betriebsfestigkeitsuntersuchungen an Werkstoffproben aus Epoxydharz- und glasfaserverstärkten Kunststoffen - Diplomarbeit am FB 5.3 „Mechanik der Polymerwerkstoffe der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung“ (2010)

- [Bans07] BANSEMIER, H.: Leichtbau im Hubschrauber - unter Berücksichtigung multifunktionaler Eigenschaften. In: *Themenheft Forschung Uni Stuttgart* Bd. 3 (2007)
- [Basa11] BASAN, R.: *Untersuchung der intralaminaren Schubeigenschaften von Faserverbundwerkstoffen mit Epoxidharzmatrix unter Berücksichtigung nichtlinearer Effekte*. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), TU Berlin, Dissertation, 2011
- [Bath06] BATHIAS, C.: An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials. In: *International Journal of Fatigue* Bd. 28 (2006), Nr. 10, S. 1094–1099
- [Beat97] BEATTIE, A. G.: Acoustic Emission Monitoring of a Wind Turbine Blade during a Fatigue Test. In: *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 1997, S. 239–248
- [Beau03] BEAUMONT, P. W. R.: Physical modelling of damage development in structural composite materials under stress. In: HARRIS, B. (Hrsg.): *Fatigue in composites - Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Boca Raton, Fla.; Cambridge, U.K. : CRC Press; Woodhead, 2003
- [BeDS06] BEAUMONT, P. ; DIMANT, R. ; SHERCLIFF, H.: Failure processes in composite materials: getting physical. In: *Journal of Materials Science* Bd. 41 (2006), Nr. 20, S. 6526–6546
- [BeKr94] BECKER, W. ; KRESS, G.: Stiffness reduction in laminate coupons due to the free-edge effect. In: *Composites science and technology : an internat. journal* Bd. Jg. 1994 (1994), Nr. 1, S. 109–116
- [BeLe00] BERTHELOT, J.-M. ; LE CORRE, J.-F.: A model for transverse cracking and delamination in cross-ply laminates. In: *Composites Science and Technology* Bd. 60 (2000), Nr. 7, S. 1055–1066
- [BeML01] BERTHELOT, J.-M. ; MAHI, A.EL ; LE CORRE, J.-F.: Development of transverse cracking in cross-ply laminates during fatigue tests. In: *Composites Science and Technology* Bd. 61 (2001), Nr. 12, S. 1711–1721
- [BIBT07] BLASSIAU, S. ; BUNSELL, A. R. ; THIONNET, A.: Damage accumulation processes and life prediction in unidirectional composites. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science* Bd. 463 (2007), Nr. 2080, S. 1135 –1152

- [Bohs00] BOHSE, J.: Acoustic emission characteristics of micro-failure processes in polymer blends and composites. In: *Composites Science and Technology* Bd. 60 (2000), Nr. 8, S. 1213–1226
- [Bohs04] BOHSE, J.: Schallemissionsprüfung (AT) von CFK-Druckgasbehältern Acoustic emission testing (AT) of CFRP pressure gas vessels. In: *DGZfP-Berichtsband, Teil BB 89-CD*. Berlin : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2004 — ISBN 3-931381-55-2
- [Bohs81] BOHSE, J.: *Zum Verformungsverhalten von schlagzähem Polyvinylchlorid/Äthylenvinylacetat-Kombinationen*, TH Carl Schorlemmer Leuna-Merseburg, Dissertation, 1981
- [Bohs92] BOHSE, J.: Phasenhaftung und Schallemission bei faserverstärkten Thermoplasten. In: *Kunststoffe* Bd. 82 (1992), Nr. 1, S. 72–76
- [BoKr92] BOHSE, J. ; KROH, G.: Micromechanics and acoustic emission analysis of the failure process of thermoplastic composites. In: *Journal of Materials Science* Bd. 27 (1992), S. 298–306
- [BoKW92] BOHSE, J. ; KROH, G. ; WOLF, H.: Schallemission charakterisiert mikromechanisches Verhalten. In: *Kunststoffe* Bd. 81 (1992), Nr. 6, S. 543–547
- [CaRe03] CASE, S. W. ; REIFSNIDER, K. L.: Fatigue of Composite Materials. In: RITCHIE, R. O. ; KARIHALOO, B. (Hrsg.): *Comprehensive Structural Integrity*. Oxford : Pergamon, 2003, S. 405–441
- [Cher11] CHERIF, CHOKRI: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Berlin : Springer, 2011 — ISBN 3-642-17991-6
- [ChHa93] CHEN, A. S. ; HARRIS, B.: Fatigue-induced damage mechanisms in carbon fibre-reinforced plastic composites. In: *Journal of Materials Science* Bd. 28 (1993), Nr. 8, S. 2013–2027
- [COSH97] CROCKER, L.E. ; OGIN, S.L. ; SMITH, P.A. ; HILL, P.S.: Intra-laminar fracture in angle-ply laminates. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 28 (1997), Nr. 9–10, S. 839–846
- [Dibt04] DIBT DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK: *Richtlinie für Windenergieanlagen; Einwirkungs- und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung*. Berlin, 2004
- [DVVD11] DAGGUMATI, S. ; VOET, E. ; VAN PAEPEGEM, W. ; DEGRIECK, J. ; XU, J. ; LOMOV, S.V. ; VERPOEST, I.: Local strain in a 5-harness satin weave composite under static tension: Part I – Experimental analysis. In:

- Composites Science and Technology* Bd. 71 (2011), Nr. 8, S. 1171–1179
- [EhPo07] EHRENSTEIN, G. ; PONGRATZ, S.: *Beständigkeit von Kunststoffen*. München : Hanser, 2007 — ISBN 3-446-21851-3
- [Ehre92] EHRENSTEIN, G. W.: *Kunststoff-Schadensanalyse: Methoden und Verfahren*. München [u.a.] : Hanser, 1992 — ISBN 3-446-17329-3
- [ElKh10] ELLINGSEN, M ; KHANNA, S.: Experimental Investigation of Static Interfacial Fracture in Orthotropic Polymer Composite Bimaterials Using Photoelasticity. In: *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme* Bd. 132 (2010), Nr. 2
- [Epa06] EPAARACHCHI, J. A: Effects of static-fatigue (tension) on the tension-tension fatigue life of glass fibre reinforced plastic composites. In: *Composite Structures* Bd. 74 (2006), Nr. 4, S. 419–425
- [FGSF10] FOERSTER, J. ; GEYER, M. ; SCHLÜTER, O. ; FEY, P. ; KIEFER, M.: Akustische Resonanzanalyse zur Bestimmung der Qualität von Obst und Gemüse. In: *Landtechnik* Bd. 65 (2010), Nr. 2
- [FiMP09] FISCHER, O. ; MANNIGEL, M. ; PRELLER, F.: *COMPOSITOR V4.1 - Hilfsmittel zur Analyse von Laminaten aus Faserverbundkunststoffen*. für Microsoft Excel : IKV Aachen, 2009
- [GaBa77] GARRETT, K. W. ; BAILEY, J. E.: Multiple transverse fracture in 90° cross-ply laminates of a glass fibre-reinforced polyester. In: *Journal of Materials Science* Bd. 12 (1977), Nr. 1, S. 157–168
- [GaSj02] GAMSTEDT, E. K. ; SJÖGREN, B. A.: An experimental investigation of the sequence effect in block amplitude loading of cross-ply composite laminates. In: *International Journal of Fatigue* Bd. 24 (2002), Nr. 2-4, S. 437–446
- [GaSj99] GAMSTEDT, E. K ; SJÖGREN, B. A: Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies. In: *Composites Science and Technology* Bd. 59 (1999), Nr. 2, S. 167–178
- [Gass39] GASSNER, E.: Festigkeitsversuche mit wiederholter Beanspruchung im Flugzeugbau. In: *Luftwissen; Volume 6; No. 2; 61-64* (1939)
- [GBOS99] GAO, F. ; BONIFACE, L. ; OGIN, S. L. ; SMITH, P. A. ; GREAVES, R. P.: Damage accumulation in woven-fabric CFRP laminates under tensile loading: Part 1. Observations of damage accumulation. In: *Composites Science and Technology* Bd. 59 (1999), Nr. 1, S. 123–136

- [Germ09] GERMANISCHER LLOYD INDUSTRIAL SERVICES GMBH, WINDENERGIE: *Richtlinie für den Weiterbetrieb von Windenergieanlagen*. Hamburg, 2009
- [Germ10] GERMANISCHER LLOYD INDUSTRIAL SERVICES GMBH, WINDENERGIE: *Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen*. Hamburg : Ausgabe 2003 mit Beiblatt 2004 und Ausgabe 2010), 2010
- [GoSc89] GOETTING, H. C. ; SCHÜTZE, R.: An optical Strain Measurement Facility for damage mechanics investigations on composites. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* Bd. 20 (1989), Nr. 10, S. 344–350
- [Gras14] GRASSE, F.: *Beitrag zur Untersuchung des Betriebsfestigkeitsverhaltens von Rotorblättern für Windenergieanlagen im verkleinerten Maßstab*. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, TU Berlin, Dissertation, 2014
- [Grif21] GRIFFITH, A. A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* Bd. 221 (1921), Nr. 582-593, S. 163–198
- [GrOh08] GROßE, C. U. ; OHTSU, M.: *Acoustic emission testing [basics for research - applications in civil engineering]*. Berlin;Heidelberg : Springer, 2008 — ISBN 978-3-540-69895-1
- [GrSe07] GROSS, D. ; SEELIG, T.: *Bruchmechanik mit einer Einführung in die Mikromechanik*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 — ISBN 3-540-37113-3
- [GTTS11] GRASSE, F. ; TRAPPE, V. ; THÖNS, S. ; SAID, S.: Structural health monitoring of wind turbine blades by strain measurement and vibration analysis. In: *EURODYN 2011 - 8th International conference on structural dynamics (Proceedings)*. Bd. MS25 Tue. Leuven, 2011 — ISBN 978-90-76019-31-4, S. 3490–3497
- [Günz13] GÜNZEL, S.: *Analyse der Schädigungsprozesse in einem kurzglasfaserverstärkten Polyamid unter mechanischer Belastung mittels Röntgenrefraktometrie, Bruchmechanik und Fraktografie*. BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, TU Berlin, Dissertation, 2013
- [HaHS01] HARBICH, K. -W. ; HENTSCHEL, M. P. ; SCHORS, J.: X-ray refraction characterization of non-metallic materials. In: *NDT & E International* Bd. 34 (2001), Nr. 4, S. 297–302

- [HaKS94] HAMPE, A. ; KALINKA, G. ; SCHULZ, E.: The Fracture Process in the Interphase Investigated by the Single Fiber Pull-out Test. In: *Composites Testing and Standardisation ECCM-CTS 2*. Hamburg, 1994
- [HaRo73] HASHIN, Z. ; ROTEM, A.: A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials. In: *Journal of Composite Materials* Bd. 7 (1973), Nr. 4, S. 448–464
- [Harr03a] HARRIS, B.: *Fatigue in composites - Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Boca Raton, Fla.; Cambridge, U.K. : CRC Press; Woodhead, 2003
- [Harr03b] HARRIS, B.: A parametric constant-life model for prediction of the fatigue lives of fibre-reinforced plastics. In: HARRIS, B. (Hrsg.): *Fatigue in composites - Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Boca Raton, Fla.; Cambridge, U.K. : CRC Press; Woodhead, 2003
- [Hash85] HASHIN, Z.: Cumulative damage theory for composite materials: residual life and residual strength methods. In: *Composites Science and Technology* (1985), Nr. 1, S. 1–19
- [Hash86] HASHIN, Z.: Analysis of stiffness reduction of cracked cross-ply laminates. In: *Engineering Fracture Mechanics* Bd. 25 (1986), Nr. 5-6, S. 771–778
- [Hash96] HASHIN, Z.: Finite thermoelastic fracture criterion with application to laminate cracking analysis. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Bd. 44 (1996), Nr. 7, S. 1129–1145
- [HCZX99] HAIXIAO, L. ; CHUHAN, Z. ; ZHENG, L. ; XTRENG, Z.: Photoelastic studies for composite dynamics. In: *Journal of Materials Science* Bd. 34 (1999), Nr. 14, S. 3479–3487
- [Hege07] HEGEMANN, J.: Simulation der Ultraschallwellenausbreitung in komplexen Faserverbundwerkstoffen. In: *ZfP-Zeitung* Bd. 106 (2007), S. 42–46
- [HeHa93] HENTSCHEL, K. W. ; HARBICH, M. P.: Einzelfaserhaftung in Kompositen. In: *Materialprüfung* Bd. 35 (1993), Nr. 3
- [Hert03] HERTLIN, I.: *Akustische Resonanzanalyse, Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung, Teil 5*. Wuppertal : Castell-Verl., 2003 — ISBN 3-934255-06-X

- [HeSc11] HEUER, H. ; SCHULZE, M. H.: Eddy current testing of carbon fiber materials by high resolution directional sensors. In: *2011 CANSMART CINDE IZFP*. Montreal, 2011
- [Hexi06] HEXION: Technische Information Laminierharz MGS L285 (2006)
- [HHLU87] HENTSCHEL, M. P. ; HOSEMAN, R. ; LANGE, A. ; UTH, B. ; BRÜCKNER, R.: Röntgenkleinwinkelbrechung an Metalldrähten, Glasfäden und hartelastischem Polypropylen. In: *Acta Crystallographica Section A Foundations of Crystallography* Bd. 43 (1987), Nr. 4, S. 506–513
- [HiEZ10] HINKELMANN, K. ; ESDERTS, A. ; ZENNER, H.: Ein verbessertes Verfahren zur Lebensdauerabschätzung mittels linearer Schadensakkumulation. An improved method to adapt the fatigue life estimation using linear damage accumulation. In: *Materials Testing* Bd. 52 (2010), Nr. 5, S. 282–291
- [HiKS02a] HINTON, M. J. ; KADDOUR, A. S. ; SODEN, P. D.: A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence. In: *Composites Science and Technology* Bd. 62 (2002), Nr. 12-13, S. 1725–1797
- [HiKS02b] HINTON, M. J. ; KADDOUR, A. S. ; SODEN, P. D.: Biaxial test results for strength and deformation of a range of E-glass and carbon fibre reinforced composite laminates: failure exercise benchmark data. In: *Composites Science and Technology* Bd. 62 (2002), Nr. 12-13, S. 1489–1514
- [HiKS98] HINTON, M. J. ; KADDOUR, A. S. ; SODEN, P. D.: Lamina properties, lay-up configurations and loading conditions for a range of fibre-reinforced composite laminates. In: *Composites Science and Technology* Bd. 58 (1998), Nr. 7, S. 1011–1022
- [HKLM07] HENTSCHEL, M.P. ; KUPSCH, ANDREAS ; LANGE, AXEL ; MÜLLER, BERND R.: Das Anwendungspotential der Röntgen-Topographie vom Mikroriss bis zur Gepäckprüfung. In: *DGZfP-Berichtsband 94*. Fürth, 2007
- [HLKS99] HINRICHS, V. ; LEISTNER, A. ; KALINKA, G. ; SCHULZ, E. ; HINRICHS, G.: Viscoelastic properties of the interphase in fibre reinforced polymers - measurement and simulation. In: *Composite interfaces : proceedings* Bd. 6 (1999), Nr. 2, S. 93–101
- [HoAK09] HOSOI, A. ; ARAO, Y. ; KAWADA, H.: Transverse crack growth behavior considering free-edge effect in quasi-isotropic CFRP laminates under high-cycle fatigue loading. In: *Composites Science and Technology* Bd. 69 (2009), Nr. 9, S. 1388–1393

- [HoNL11] HOPKINS, D. ; NEAU, G. ; LE BER, L.: Advanced phased-array technologies for ultrasonic inspection of complex composite parts. In: *2011 CANSMART CINDE IZFP*, 2011 — ISBN 978-0-9813815-1-0
- [Hsb06] HSB: Bruchhypothese und Reservefaktoren für unidirektionale Einzelschichten in Faserverbunden. In: *Luftfahrttechnisches Handbuch (LTH)*. Bd. Handbuch Strukturberechnung (HSB). herausgegeben vom Industrieausschuß Strukturberechnung (IASB), 2006
- [Hunt07] HUNTSMAN: Datasheet Huntsman AralditeLY556/Aradur917/DY070 (2007)
- [IbCK02] IBA, H. ; CHANG, T. ; KAGAWA, Y.: Optically transparent continuous glass fibre-reinforced epoxy matrix composite: fabrication, optical and mechanical properties. In: *Composites Science and Technology* Bd. 62 (2002), Nr. 15, S. 2043–2052
- [IbKa98] IBA, H. ; KAGAWA, Y.: Light transmittance of continuous fibre-reinforced composites: Analysis, model experiment and parametric study. In: *Philosophical Magazine Part B* Bd. 78 (1998), Nr. 1, S. 37–52
- [Jami85] JAMISON, R. D.: On the Interrelationship Between Fiber Fracture and Ply Cracking in Graphite/Epoxy Laminates. In: THOMAS HAHN, H. (Hrsg.): *Composite Materials: Fatigue and Fracture*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 1985, S. 252–274
- [JDHB98] JAGT, H. ; DIRIX, Y. ; HIKMET, R. ; BASTIAANSEN, C.: Linear Polarizers Based on Oriented Polymer Blends. In: *Advanced Materials* Bd. 10 (1998), Nr. 12, S. 934–938
- [Kais50] KAISER, J.: *Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch*. München, Technische Universität München (TUM), 1950
- [KaLH97] KALINKA, G. ; LEISTNER, A. ; HAMPE, A.: Characterisation of the fibre/matrix interface in reinforced polymers by the push-in technique. In: *Composites science and technology* Bd. 57 (1997), Nr. 8, S. 845–851
- [KAPL13] KRUG III, D. J. ; ASUNCION, M. Z. ; POPOVA, V. ; LAINE, R. M.: Transparent fiber glass reinforced composites. In: *Composites Science and Technology* Bd. 77 (2013), S. 95–100
- [KaSo00] KASHTALYAN, M. ; SOUTIS, C.: The effect of delaminations induced by transverse cracks and splits on stiffness properties of composite lam-

- inates. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 31 (2000), Nr. 2, S. 107–119
- [KaSo05] KASHTALYAN, M. ; SOUTIS, C.: Analysis of composite laminates with intra- and interlaminar damage. In: *Progress in Aerospace Sciences* Bd. 41 (2005), Nr. 2, S. 152–173
- [Kasu11] KASUBECK, C.: *Einfluss des Aushärtegrades einer Epoxidharzmatrix auf die Betriebsfestigkeit im Glasfaser-Kunststoff-Laminat*. TU Berlin, Diplomarbeit am Fachgebiet Luftfahrzeugbau und Leichtbau der TU Berlin, 2011
- [KhEW04] KHANNA, S.K. ; ELLINGSEN, M.D. ; WINTER, R.M.: Investigation of fracture in transparent glass fiber reinforced polymer composites using photoelasticity. In: *Transactions of the ASME, Journal of Engineering Materials and Technology* Bd. 126; Jg. 2004 (2004), Nr. 1, S. 1–7
- [Kief12] KIEFER, K: Simulation of high-cycle fatigue-driven delamination in carbon/epoxy laminates using cohesive elements. In: *ECCM15*. Venedig, 2012
- [Knop03] KNOPS, M.: *Sukzessives Bruchgeschehen in Faserverbundlaminaten - Gradual failure process in fibre polymer laminates*. Aachen, Mainz, Dissertation, 2003
- [KoHH11] KOYAMA, K. ; HOSHIKAWA, H. ; HIRANO, T.: Investigation of Impact Damage of Carbon Fiberreinforced Plastic (CFRP) by Eddy Current Nondestructive Testing. In: , 2011 — ISBN 978-0-9813815-1-0
- [Kopp00] KOPP, J. W.: *Zur Spannungs- und Festigkeitsanalyse von unidirektionalen Faserverbundkunststoffen*. Aachen, Verl. Mainz, Dissertation, 2000
- [KwAl08] KWON, Y. W. ; ALLEN, D. H. (Hrsg.): *Multiscale modeling and simulation of composite materials and structures*. T 08 B 1507 : Springer, 2008
- [LaAn92] LACAZE, S. ; ANQUEZ, L.: Modelling of transverse crack growth and saturation in cross-ply laminates. In: *Journal of Materials Science* Bd. 27 (1992), Nr. 22, S. 5982–5988
- [LaLM06] LADEVÈZE, P. ; LUBINEAU, G. ; MARSAL, D.: Towards a bridge between the micro- and mesomechanics of delamination for laminated composites. In: *Composites Science and Technology* Bd. 66 (2006), Nr. 6, S. 698–712

- [LaLV06] LADEVÈZE, P. ; LUBINEAU, G. ; VIOLEAU, D.: A Computational Damage Micromodel of Laminated Composites. In: *International Journal of Fracture* Bd. 137 (2006), Nr. 1-4, S. 139–150
- [Lamb17] LAMB, H.: On waves in an elastic plate. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science* (1917), Nr. 93
- [Lba99] LBA, FB M3: *Richtlinien zur Führung des Nachweises für die Anerkennung von Harz-Faser-Verbundsystemen im Anwendungsbereich der Herstellung und Instandhaltung von Segelflugzeugen und Motorsiegeln (RHV)*, 1999
- [LeAl03] LEE, J. A. ; ALMOND, D. P.: A neural network approach to fatigue-life prediction. In: HARRIS, B. (Hrsg.): *Fatigue in composites - Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Boca Raton, Fla.; Cambridge, U.K. : CRC Press; Woodhead, 2003
- [LeDa90] LEE, J.-W. ; DANIEL, I. M.: Progressive Transverse Cracking of Crossply Composite Laminates. In: *Journal of Composite Materials* Bd. 24 (1990), Nr. 11, S. 1225–1243
- [LiHo73] LILLEY, J. ; HOLLOWAY, D. G.: Craze in epoxy resins. In: *Philosophical Magazine* Bd. 28 (1973), Nr. 1, S. 215–220
- [LiWG13] LIANG, Y. ; WANG, H. ; GU, X.: In-plane shear response of unidirectional fiber reinforced and fabric reinforced carbon/epoxy composites. In: *Polymer Testing* Bd. 32 (2013), Nr. 3, S. 594–601
- [LLKS01] LEE, D. C. ; LEE, J. J. ; KWON, I. B. ; SEO, D. C.: Monitoring of fatigue damage of composite structures by using embedded intensity-based optical fiber sensors. In: *Smart Materials and Structures* Bd. 10 (2001), Nr. 2, S. 285
- [LoAV14] LOUKIL, M. S. ; AYADI, Z. ; VARNA, J.: ESPI analysis of crack face displacements in damaged laminates. In: *Composites Science and Technology* Bd. 94 (2014), S. 80–88
- [LoHa86] LORENZO, L. ; HAHN, H. T.: Effect of ductility on the fatigue behavior of epoxy resins. In: *Polymer Engineering & Science* Bd. 26 (1986), Nr. 4, S. 274–284
- [LuVa06] LUNDMARK, P. ; VARNA, J.: Crack face sliding effect on stiffness of laminates with ply cracks. In: *Composites Science and Technology* Bd. 66 (2006), Nr. 10, S. 1444–1454

- [Mand70] MANDELL, G. K.: *Analysis of free-edge effects in composite laminates by an assumed-stress method*. Cambridge, MA, MIT, Master thesis, 1970
- [MaRe82] MASTERS, J. ; REIFSNIDER, K. L.: An Investigation of Cumulative Damage Development in Quasi-Isotropic Graphite/Epoxy Laminates. In: REIFSNIDER, K. L. (Hrsg.): *Damage in Composite Materials: Basic Mechanisms, Accumulation, Tolerance, and Characterization*. Bd. ASTM STP 775 : American Society for Testing and Materials, 1982, S. 40–62
- [MaSC02] MANDELL, G. K ; SAMBORSKY, D. D. ; CAIRNS, D. S.: *Fatigue of Composite Materials and Substructures for Wind Turbine Blades* (contractor report Nr. SAND2002-0771) : sandia.gov, 2002
- [MaSR92] MANDELL, J. F. ; SAMBORSKY, D. D. ; REED, R.: *Fatigue of Fiberglass Wind Turbine Blade Materials* (contractor report Nr. SAND92–7005) : sandia.gov, 1992
- [Meng90] MENGES, G.: *Werkstoffkunde Kunststoffe*. München [u.a.] : Hanser, 1990
- [Mgs06] MGS: *Momentive.com - EPIKOTE Resin MGS LR 135 and EPIKURE Curing Agent MGS LH 133-138*. URL <http://www.momentive.com/Products/TechnicalDataSheet.aspx?id=8119>. - abgerufen am 2014-07-15
- [MiBe06] MITTELSTEDT, C. ; BECKER, W.: Fast and reliable analysis of free-edge stress fields in a thermally loaded composite strip by a layerwise laminate theory. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* Bd. 67 (2006), Nr. 6, S. 747–770
- [MiBe08] MITTELSTEDT, C. ; BECKER, W.: Reddy's layerwise laminate plate theory for the computation of elastic fields in the vicinity of straight free laminate edges. In: *Materials Science and Engineering: A* Bd. 498 (2008), Nr. 1-2, S. 76–80
- [Mine45] MINER, M. A.: Cumulative damage in fatigue. In: *J. Appl. Mech.* Bd. 12 (1945), S. 159–164.
- [MMRS14] MAIERHOFER, C. ; MYRACH, P. ; REISCHEL, M. ; STEINFURTH, H. ; RÖLLIG, M. ; KUNERT, M.: Characterizing damage in CFRP structures using flash thermography in reflection and transmission configurations. In: *Composites Part B: Engineering* Bd. 57 (2014), S. 35–46

- [Mook01] MOOK, G.: *Zerstörungsfreie Charakterisierung von carbonfaserverstärkten Kompositen mit Hilfe des Wirbelstromverfahrens, DGZfP-Berichtsband, Teil 75*, 2001
- [MuCK04] MUNZ, M. ; CHUNG, J. U. ; KALINKA, G.: Mapping Epoxy Interphases. In: *Adhesion : current research and applications*. Bd. 7. Freiberg, Germany : Wiley-VCH, 2004, S. 103–123
- [MüHR13] MÜLLER, T. ; HOROSCHENKOFF, A. ; RAPP, H.: Carbon Fibre Sensor for Crack Monitoring of Composite Materials. In: *Proc. 19th Int. Conf. on Composites (ICCM 19)*. Montreal : Bytepress, 2013
- [NaHu92] NAIRN, J. A. ; HU, S.: The formation and effect of outer-ply microcracks in cross-ply laminates: A variational approach. In: *Engineering Fracture Mechanics* Bd. 41 (1992), Nr. 2, S. 203–221
- [NaHu94] NAIRN, J. A. ; HU, S.: Matrix Microcracking. In: TALREJA, R. (Hrsg.): *Damage Mechanics of Composite Materials, Composite Materials Series*. Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 1994
- [Nair97] NAIRN, J. A.: On the use of shear-lag methods for analysis of stress transfer in unidirectional composites. In: *Mechanics of Materials* Bd. 26 (1997), Nr. 2, S. 63–80
- [NaMe01] NAIRN, J. A. ; MENDELS, D. A.: On the use of planar shear-lag methods for stress-transfer analysis of multilayered composites. In: *Mechanics of Materials* Bd. 33 (2001), Nr. 6, S. 335–362
- [Nati04] NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD: *In-Flight Separation of Vertical Stabilizer American Airlines Flight 587 Airbus Industrie A300-605R, N14053 Belle Harbor, New York November 12, 2001* (Aircraft Accident Report Nr. NTSB/AAR-04/04). Washington : NTSB, 2004
- [OBTH11] ORTWEIN, H.-P. ; BOHSE, J. ; TRAPPE, V. ; HICKMANN, S.: Untersuchung des Zwischenfaserrisswachstums in Faserverbundwerkstoffen mit Schallemissions- und Röntgenrefraktionsverfahren. In: *DGZfP-BB 127*. Bremen : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2011 — ISBN 978-3-940283-33-7
- [OCLW14] O'BRIEN, D. J. ; CHIN, W. K. ; LONG, L. R. ; WETZEL, E. D.: Polymer matrix, polymer ribbon-reinforced transparent composite materials. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 56 (2014), S. 161–171
- [OrBT11] ORTWEIN, H.-P. ; BOHSE, J. ; TRAPPE, V.: Untersuchung der Mikrorissbildung in Faserkunststoffverbunden mittels Röntgenrefraktions- und

- Schallemissionsmessung. In: *18. Kolloquium Schallemission*. Wetzelar, 2011
- [OrTr12] ORTWEIN, H.-P. ; TRAPPE, V.: Investigation of infinite life in fiber-reinforced-plastics by non-destructive monitoring of micro structural damage processes with x-ray-refraction. In: *MSE 2012*. Darmstadt, Germany, 2012
- [OrTr13] ORTWEIN, H. P. ; TRAPPE, V.: *DE 10 2013 103 773 .9; Monitoring von intransparenten Composite-Strukturen durch optische Auswertung der Rissbildung in Indikatorschichten an der Oberfläche* (Patent), 2013
- [OTBH11] ORTWEIN, H. P. ; TRAPPE, V. ; BOHSE, J. ; HICKMANN, S.: In-situ-Messung der Matrixschädigung in kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff unter uni- und biaxialer Zugbelastung. In: GRELLMANN, W. (Hrsg.): *Neue Entwicklungen in der Werkstoffprüfung - Herausforderungen an die Kennwertermittlung*. Bd. 29. Berlin, 2011, S. 161–166
- [Oyta91] OYTANA, C.: Damage Indicators - Part I. In: *Mechanics and Mechanisms of Damage in Composites and Multi-Materials* : Mechanical Engineering Publications, London, 1991, S. 215–232
- [PaBa78] PARVIZI, A. ; BAILEY, J. E.: On multiple transverse cracking in glass fibre epoxy cross-ply laminates. In: *Journal of Materials Science* Bd. 13 (1978), Nr. 10, S. 2131–2136
- [Palm24] PALMGREN, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. In: *VDI-Z* Bd. 58 (1924), S. 339–341
- [Pate99] PATEL, S. R.: *Durability of Advanced Woven Composites in Aerospace Applications*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Master Thesis, 1999
- [PBCL06] POST, N. L. ; BAUSANO, J. ; CASE, S. W. ; LESKO, J. J.: Modeling the remaining strength of structural composite materials subjected to fatigue. In: *International Journal of Fatigue* Bd. 28 (2006), Nr. 10, S. 1100–1108
- [PBSM01] PRASSE, T. ; BAUHOFFER, W. ; SCHULTE, K. ; MICHEL, F. ; MOOK, G.: In situ Schädigungsüberwachung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels elektrischer Methoden.
- [Pdin11] PD-INTERGLAS TECHNOLOGIES: Produktinformation - Interglas Type 02034 (2011)

- [PhVa00] PHILIPPIDIS, T. P. ; VASSILOPOULOS, A. P.: Fatigue design allowables for GRP laminates based on stiffness degradation measurements. In: *Composites Science and Technology* Bd. 60 (2000), Nr. 15, S. 2819–2828
- [PhVa99] PHILIPPIDIS, T. P. ; VASSILOPOULOS, A. P.: Fatigue Strength Prediction under Multiaxial Stress. In: *Journal of Composite Materials* Bd. 33 (1999), Nr. 17, S. 1578–1599
- [Pien08] PIENING, M.: *Die Berechnung der Spannungsfelder in dünnwandigen Faserverbundstrukturen*, TU Braunschweig, DLR-Forschungsbericht 2008-09, Dissertation, 2008
- [PIMD10] PLUMTREE, A. ; MELO, M. ; DAHL, J.: Damage evolution in a $[\pm 45]_2S$ CFRP laminate under block loading conditions. In: *International Journal of Fatigue* Bd. 32 (2010), Nr. 1, S. 139–145
- [PMMS01] PRASSE, T. ; MICHEL, F. ; MOOK, G. ; SCHULTE, K. ; BAUHOFFER, W.: A comparative investigation of electrical resistance and acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates. In: *Composites Science and Technology* Bd. 61 (2001), Nr. 6, S. 831–835
- [Ptb07] PTB: *Zur Rotationsinvarianz von Reflexionsnormalen*. URL http://www.ptb.de/de/org/4/nachrichten4/2006/metro_6.htm. - abgerufen am 2014-03-11. — Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
- [Puck67] PUCK, A.: Zur Beanspruchung und Verformung von GFK-Mehrschichtenverbund-Bauelementen, Teil3. In: *Kunststoffe* Bd. 57 (1967), Nr. 12, S. 965–973
- [Puck69] PUCK, A.: Festigkeitsberechnung an Glasfaser/Kunststoff-Laminaten bei zusammengesetzter Beanspruchung. In: *Kunststoffe* Bd. 59 (1969), Nr. 11, S. 780–787
- [Puck92] PUCK, A.: Praxisgerechte Bruchkriterien für hochbeanspruchte Faser-Kunststoff-Verbunde Fracture criteria which meet practical requirements in highly stressed fibre-plastics composites. In: *Kunststoffe* Bd. 82; Jg. 1992 (1992), Nr. 2, S. 149–155
- [Puck96] PUCK, A.: *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten : Modelle für die Praxis*. München; Wien : Hanser, 1996
- [ReCa02] REIFSNIDER, K. L. ; CASE, S. W.: *Damage tolerance and durability of material systems*. New York, NY : Wiley Interscience, 2002

- [ReFJ93] RENARD, J. ; FAVRE, J.-P. ; JEGGY, T.: Influence of transverse cracking on ply behavior - introduction of a characteristic damage variable. In: *Composites science and technology : an internat. journal* Bd. Jg. 1993 (1993), Nr. 1, S. 29–38
- [Reif80] REIFSNIDER, KENNETH: Fatigue behavior of composite materials. In: *International Journal of Fracture* Bd. 16 (1980), Nr. 6, S. 563–583
- [Reif90] REIFSNIDER, K. L.: Damage and Damage Mechanics. In: *Fatigue of Composite Materials, Composite Materials Series*. Bd. 4 : Elsevier, 1990, S. 11–75
- [Reif91] REIFSNIDER, K. L.: *Fatigue of composite materials, Composite Materials Series*. Bd. 6. Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 1991
- [Rote94] ROTEM, A.: The anisotropic fatigue behaviour of isotropic composite laminates. In: *International journal of fatigue : materials, structures, components* Bd. Jg. 1994 (1994), Nr. 4, S. 266–272
- [RSDS11] RHEINFURTH, M. ; SCHMIDT, F. ; DÖRING, D. ; SOLODOV, I. ; BUSSE, G. ; HORST, P.: Air-coupled guided waves combined with thermography for monitoring fatigue in biaxially loaded composite tubes. In: *Composites Science and Technology* Bd. 71 (2011), Nr. 5, S. 600–608
- [RulH01] RUDOLPH, H.-V. ; IVERS, H. ; HARBICH, K.-W.: Application of X-ray refraction topography to fibre reinforced plastics. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Bd. 32 (2001), Nr. 3-4, S. 473–476
- [RZMR08] RACK, A. ; ZABLER, S. ; MÜLLER, B.R. ; RIESEMEIER, H. ; WEIDEMANN, G. ; LANGE, A. ; GOEBBELS, J. ; HENTSCHEL, M. ; U. A.: High resolution synchrotron-based radiography and tomography using hard X-rays at the BAMline (BESSY II). In: *Nuclear instruments & methods in physics research* Bd. Jg. 2008 (2008), Nr. 2, S. 327–344
- [SaWM09] SAMBORSKY, D. D. ; WILSON, T. J. ; MANDELL, J. F.: Comparison of Tensile Fatigue Resistance and Constant Life Diagrams for Several Potential Wind Turbine Blade Laminates. In: *Journal of Solar Energy Engineering* Bd. 131 (2009), Nr. 1, S. 011006–011006
- [ScBa89] SCHULTE, K. ; BARON, CH.: Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements. In: *Composites Science and Technology* Bd. 36 (1989), Nr. 1, S. 63–76
- [Schl12] SCHLICHTING, J.: *Integrale Verfahren der aktiven Infrarotthermografie*. Berlin, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2012

- [Schü08] SCHÜRMANN, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden* : Springer DE, 2008
- [Schu92] SCHULTE, K.: *Faserverbundwerkstoffe mit Polymermatrix - Aufbau und mechanische Eigenschaften* - (Forschungsbericht Nr. 92-28). Köln : DLR, 1992
- [ScMK12] SCHLICHTING, J. ; MAIERHOFER, CH. ; KREUTZBRUCK, M.: Crack sizing by laser excited thermography. In: *NDT & E International* Bd. 45 (2012), Nr. 1, S. 133–140
- [Seba12] SEBAEY, T.A.: In-Situ Strength Measurement by Real Time Monitoring of Transverse Cracks. In: . Venedig, 2012
- [Send91] SENDECKYJ, G. P.: Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials. In: REIFSNIDER, K. L. (Hrsg.): *Fatigue of Composite Materials, Composite Materials Series*. Bd. 6. Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 1991
- [ShCh06] SHIN, C.S. ; CHIANG, C.C.: Fatigue damage monitoring in polymeric composites using multiple fiber bragg gratings. In: *International Journal of Fatigue* Bd. 28 (2006), Nr. 10, S. 1315–1321
- [ShHa11] SHIN, D.-C. ; HAWONG, J.-S.: Development of a Hybrid Method of Reflection Photoelasticity for Crack Problems in Anisotropic Plates. In: *Experimental Mechanics* Bd. 51 (2011), Nr. 2, S. 183–198
- [SHKS09] SAUSE, M.G.R ; HORN, S. ; KLUG, M. ; SCHOLLER, J.: *Anwendung von Mustererkennungsverfahren zur Schadensanalyse in faserverstärkten Kunststoffen Application of pattern recognition methods for damage analysis in fiber reinforced plastics*. Berlin : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2009
- [ShLe03] SHOKRIEH, M. M. ; LESSARD, L. B.: Fatigue under multiaxial stress systems. In: HARRIS, B. (Hrsg.): *Fatigue in composites - Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*. Boca Raton, Fla.; Cambridge, U.K. : CRC Press; Woodhead, 2003
- [SjBe00] SJÖGREN, B.A. ; BERGLUND, L.A.: The effects of matrix and interface on damage in GRP cross-ply laminates. In: *Composites Science and Technology* Bd. 60 (2000), Nr. 1, S. 9–21
- [SmBG98] SMITH, P. A. ; BONIFACE, L. ; GLASS, N. F. C.: A Comparison of Transverse Cracking Phenomena in (0/90)s and (90/0)s CFRP Laminates. In: *Applied Composite Materials* Bd. 5 (1998), Nr. 1, S. 11–23
- [SRHB12a] SCHMIDT, F. ; RHEINFURTH, M. ; HORST, P. ; BUSSE, G.: Effects of local fibre waviness on damage mechanisms and fatigue behaviour of bi-

- axially loaded tube specimens. In: *Composites Science and Technology* Bd. 72 (2012), Nr. 10, S. 1075–1082
- [SRHB12b] SCHMIDT, F. ; RHEINFURTH, M. ; HORST, P. ; BUSSE, G.: Multiaxial fatigue behaviour of GFRP with evenly distributed or accumulated voids monitored by various NDT methodologies. In: *International Journal of Fatigue* Bd. 43 (2012), S. 207–216
- [Stin86] STINCHCOMB, W. W.: Nondestructive evaluation of damage accumulation processes in composite laminates. In: *Composites Science and Technology* Bd. 25 (1986), Nr. 2, S. 103–118
- [SuBl87] SULLIVAN, E. ; BLAIS, J. L.: Transmission photoelasticity of centrally loaded generally and specially orthotropic beams Bd. 27 (1987), Nr. 2, S. 208–219
- [SVWV99] SURGEON, M. ; VANSWIJGENHOVEN, E. ; WEVERS, M. ; VAN DER BIEST, O.: Transverse cracking and Poisson's ratio reduction in cross-ply carbon fibre-reinforced polymers. In: *Journal of Materials Science* Bd. 34 (1999), Nr. 22, S. 5513–5517
- [Talr94] TALREJA, R.: *Damage mechanics of composite materials*. Amsterdam [u.a.] : Elsevier, 1994
- [TaOK95] TAKEDA, N. ; OGIHARA, S. ; KOBAYASHI, A.: Microscopic fatigue damage progress in CFRP cross-ply laminates. In: *Composites* Bd. 26 (1995), Nr. 12, S. 859–867
- [Tens04] TENSİ, H. M.: The KAISER - EFFECT and its Scientific Background. In: . Berlin, 2004
- [TGHM10] TRAPPE, V. ; GRASSE, F. ; HICKMANN, S. ; MEISTER, O.: Lifetime assessment for GFRP-gliders using a representative substructure. In: *International Journal of Fatigue* Bd. 32 (2010), Nr. 1, S. 94–99
- [ThRe94] THIONNET, A. ; RENARD, J.: Laminated composites under fatigue loading: A damage development law for transverse cracking. In: *Composites Science and Technology* Bd. 52 (1994), Nr. 2, S. 173–181
- [THTS14] TIMME, S. ; HÖROLD, A. ; TRAPPE, V. ; SCHARTEL, B. ; KORZEN, M.: Structural Integrity in Fire: An Intermediate-Scale Approach on Plain and Shell-Structured Composites. In: *16th European Conference on Composite Materials, ECCM16*. Sevilla, Spain, 2014
- [Tied14] TIEDEMANN UND BETZ: *Reißlack: Tiedemann und Betz*. URL <http://www.tiedemann-betz.de/spannungsoptik/reisslack/>. - abgerufen am 2014-03-28

- [ToHW09] TOTANI, K. ; HAYASHI, H. ; WATANABE, T.: Scattering-Type Polarizers Consisting of Fiber/Matrix and Methods to Enhance Polarization Property. In: *Japanese Journal of Applied Physics* Bd. 48 (2009), Nr. 8, S. 082403
- [Tora12] TORAY INC.: Typical Fibre Properties - Commercial Documentation (2012)
- [ToTe11] TOHO ; TENAX: TohoTenax - Produktprogramm und Eigenschaften für Tenax ® HTA Filamentgarn (2011)
- [Trap02] TRAPPE, V.: *Beschreibung des intralaminaren Ermüdungsverhaltens von CFK mit Hilfe innerer Zustandsvariablen, Fortschrittberichte VDI*. Bd. 5. Düsseldorf : VDI-Verl., 2002
- [TrGJ12] TRAPPE, V. ; GÜNZEL, S. ; JAUNICH, M.: Correlation between crack propagation rate and cure process of epoxy resins. In: *Polymer Testing* Bd. 31 (2012), Nr. 5, S. 654–659
- [TrHa03] TRAPPE, V. ; HARBICH, K. -W.: Damage state of cfrp characterized non-destructively by x-ray-refraction and ultrasound. In: *48th International SAMPE Symposium* Bd. 48/1 (2003), S. 1228–1239
- [TrHa06] TRAPPE, V. ; HARBICH, K. -W.: Intralaminar fatigue behaviour of carbon fibre reinforced plastics. In: *International Journal of Fatigue, The Third International Conference on Fatigue of Composites The Third International Conference on Fatigue of Composites*. Bd. 28 (2006), Nr. 10, S. 1187–1196
- [TrHS08] TRAPPE, V. ; HICKMANN, S. ; STURM, H.-V.: Bestimmung des Zwischenfaserbruchversagens in textilverstärktem Glasfaserkunststoff mittels der Röntgenrefractionstopografie. In: *MP Materials Testing* Bd. 50 (2008), Nr. 10, S. 615–622
- [TrOH13] TRAPPE, V. ; ORTWEIN, H. P. ; HICKMANN, S.: Infinite Life of CFRP evaluated nondestructively with X-ray-Refracton Topography. In: *Proc. 19th Int. Conf. on Composites (ICCM 19)*. Montreal : Bytepress, 2013
- [TsWu71] TSAI, S. W. ; WU, E. M.: A General Theory of Strength for Anisotropic Materials. In: *Journal of Composite Materials* Bd. 5 (1971), S. 58
- [VaDe01] VAN PAEPEGEM, W. ; DEGRIECK, J.: Fatigue Damage modeling of fibre-reinforced composite materias: Rewiew. In: *Appl Mech REv* Bd. 54 (2001), Nr. 4

- [VaDe02] VAN PAEPEGEM, W. ; DEGRIECK, J.: Effects of Load Sequence and Block Loading on the Fatigue Response of Fiber-Reinforced Composites. In: *Mechanics of Advanced Materials and Structures* Bd. 9 (2002), Nr. 1, S. 19–35
- [VaKe11] VASSILOPOULOS, A. P. ; KELLER, T.: *Fatigue of fiber-reinforced composites*. London : Springer, 2011
- [Vank84] VAN KREVELEN, D. W.: Verbundwerkstoffe (Composites). In: *Kautschuk + Gummi/Kunststoffe* Bd. 37 (1984), Nr. 4, S. 295–302
- [Vish14] VISHAY PRECISION GROUP INC.: *VPG - Micro-Measurements - Photo-Stress® Plus*. URL <http://www.vishaypg.com/micro-measurements/photo-stress-plus/>. - abgerufen am 2014-04-10
- [Walt03] WALTER, H.: *Morphologie-Zähigkeits-Korrelationen von modifizierten Epoxidharzsystemen mittels bruchmechanischer Prüfmethoden an Miniaturprüfkörpern*. Halle, MLU Halle-Wittenberg, 2003
- [Webe09a] WEBER, T.: *AlfaLam 1.3.1*. für Microsoft Excel : KLuB TU Darmstadt, 2009
- [Webe09b] WEBER, T.: *Nichtlineare Analyse von Faser-Kunststoff-Verbunden. Grundlagen, Methoden und Auswertungen auf den Konstruktionsprozess*. Aachen, RWTH, Dissertation, 2009
- [WSKK94] WITTICH, H. ; SCHULTE, K. ; KUPKE, M. ; KLIEM, H. ; BAUHOFFER, W.: *The measurement of electrical properties of CFRP for damage detection and strain recording Die Messung elektrischer Eigenschaften von Carbonfaser-verstärkten Kunststoffen zwecks Schadenserkenkung und Dehnungsaufzeichnung*. Abington : Woodhead Publ., 1994
- [Zwic29] ZWICKY, F.: On the imperfections of crystals. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* Bd. 15 (1929), S. 253–259

Abkürzungsverzeichnis

AFK.....	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
BAM.....	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
CAI	Compression after Impact – Materialversuchsanordnung für FKV
CDS	Characteristic Damage State
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DIC	Digital Image Correlation
ESPI	Elektronische Speckle-Interferometrie
FEM.....	Finite Elemente Methoden
FKV.....	Faser-Kunststoff-Verbund
FWW.....	Faserverbundwerkstoffe
GFK.....	glasfaserverstärkter Kunststoff
KLT	Klassische Laminattheorie
NCF	Non-Crimp Fabric
PE.....	Polyethylen
PMMA.....	Polymethylmethacrylat
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
RHV	Richtlinien zur Führung des Nachweises für die Anerkennung von Harz- Faser-Verbundsystemen im Anwendungsbereich der Herstellung und Instandhaltung von Segelflugzeugen und Motorseglern
RR	Röntgenrefraktionsmessung
RVE	Representatives Volumenelement
SAXS	Small angle X-ray scattering
SFA.....	Schichtweise Festigkeitsanalyse
UD	Unidirektional (Faseranordnung)
(V)HCF	(Very-) high-cycle-fatigue
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Symbolverzeichnis

α	hier: Verhältnis zweier Werte
C_m	Refraktionswert
δ	Winkel
D_{GW}	Grauwertschädigungsparameter bei Lichttransmissionsauswertung an GFK
ε	technische Dehnung
φ	Faservolumengehalt
μ	Absorptionskoeffizient im LAMBERT-BEERschen-Gesetz
ν	Querkontraktionszahl
σ	Sigma – mechanische Spannung
$\sigma_{\perp}^{(+)}, \sigma_{\perp}^{-}$	Fasersenkrechte (Zug/Druck)-Spannung in der Einzelschicht
$\sigma_{\parallel}^{(+)}, \sigma_{\parallel}^{(-)}$	Faserparallele (Zug/Druck)-Spannung in der Einzelschicht
$\tau_{\#}$	Schubspannung in der Einzelschicht
σ_o	Oberspannung bei schwingender mechanischer Last
σ_u	Unterspannung bei schwingender mechanischer Last
σ_a	Spannungsamplitude bei schwingender mechanischer Last
θ_n	Refraktionswinkel der RR-Messung
I_R	Intensität der Refraktion der RR-Messung
I_{R0}	Intensität der Refraktion der Referenz der RR-Messung
I_T	Intensität der Transmission der RR-Messung
I_{T0}	Intensität der Transmission der Referenz der RR-Messung
n_i	Brechzahlen bei Lichtrefraktion
n_{xMPa}	Lastspielzahl bei $\sigma_o = xMPa$
N_{xMPa}	Bruchlastspielzahl bei $\sigma_o = xMPa$
R	Lastverhältnis bei Schwingender mechanischer Last
$R_{\perp}^{+}, R_{\perp}^{-}$	Fasersenkrechte (Zug/Druck)-Festigkeit der Einzelschicht
$R_{\parallel}^{+}, R_{\parallel}^{-}$	Faserparallele (Zug/Druck)-Festigkeit der Einzelschicht
$R_{\#}$	Schubfestigkeit der Einzelschicht
R_{ges}	Remissionskoeffizient bei Lichtbrechung
T_{ges}	Transmissionskoeffizient bei Lichtbrechung
T_s, T_p	Transmissionskoeffizient, senkrechte bzw. parallele Polarisierung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Übersicht über die Kapitel der Arbeit.....	5
Abbildung 2	Einzelriss in Metallen (1) und Rissakkumulation in FKV (2) nach [EhPo07]	9
Abbildung 3	Verschiedene überlagerte Mechanismen schematisch eingezeichnet in Wöhlerdiagramm [nach ChHa93]	10
Abbildung 4	Beanspruchungen und Schädigungen in der Einzelschicht [Puck96]	12
Abbildung 5	Schädigungsarten in Kreuzlaminat: a) Mikrorisse, b) Querrisse, c) Splitting, d) Delamination, e) massiver Faserbruch	12
Abbildung 6	Mikrorisse in Querschicht	14
Abbildung 7	Scheibenmodell für die Dehnungsüberhöhung [Schü08, S.380] (li.) und spannungsoptisch dargestellte Dehnungsüberhöhung [Puck67] (re.).....	15
Abbildung 8	Spannungen an der Querriss spitze in $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ -Laminat	16
Abbildung 9	Mikrodelamination an Querriss in $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ -Laminat	17
Abbildung 10	Freier-Rand-Delaminationen an Querriss in $90^\circ/0^\circ/90^\circ$ -Laminat.....	18
Abbildung 11	Schubknicken [Schü08]	18
Abbildung 12	Schnittdarstellungen von Leinwandgeweben mit (a) geringer Schusseinarbeitung, (b) ausgewogenem Einarbeitungsverhältnis und (c) hoher Schusseinarbeitung [Cher11]	19
Abbildung 13	Querriss- und Delaminationsentwicklung in Geweben	20
Abbildung 14	Steifigkeitsverlauf an Schwingversuchen an $0^\circ/90^\circ$ -Laminaten und dominierende Schädigungsmechanismen [nach Poursartip in [Beau03]]	21
Abbildung 15	Erreichen eines Characteristic Damage State in statischer und Ermüdungsbelastung (Grafik nachgezeichnet und mit Übersetzungen ergänzt [CaRe03])	21
Abbildung 16	KLT - schematisch, Darstellung nach [Knop03]	24
Abbildung 17	Abfall der Restfestigkeit, Modellierung durch „Schrumpfung“ der Festigkeitshypothese.....	28
Abbildung 18	Restfestigkeit und Reststeifigkeit (Grafik nachgezeichnet und übersetzt [VaKe11]).....	29
Abbildung 19	Refraktion an Grenzflächen im Faserkunststoffverbund.....	37
Abbildung 20	Prinzip der Röntgenrefraktionsmessung	38

Abbildung 21	Prinzip der Schallemissionsmessung	39
Abbildung 22	Abbildung von Eintrübungen in Transmission und Remission	41
Abbildung 23	Diffuse (a) und gerichtete (b) Reflexion	42
Abbildung 24	LAMBERTsches Cosinus-Gesetz	42
Abbildung 25	Gerichtete Reflexion an Einzelriss	43
Abbildung 26	Transmittierte Energie bei gerichteter Reflexion	44
Abbildung 27	Rissmuster an der Oberfläche einer 0°/90°-Gewebe-Probe nach Schwingbelastung bei schrägem Lichteinfall	45
Abbildung 28	Indikatorschicht - schematisch, ohne Schicht (links) und mit Anzeige in der Schicht (rechts)	45
Abbildung 29	Untersuchungen zum Konzept der Indikatorschicht	46
Abbildung 30	Schematische Darstellung der Belastung der Einzelschichten in ausgeglichenen 0°/90°- (oben) und +/-45°-Laminaten (unten) unter Zuglast	47
Abbildung 31	Schematische Darstellung des Kraft/Zeit- und des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs eines zügigen Zugversuches	48
Abbildung 32	Versuchsablauf des Stufenzugversuchs	48
Abbildung 33	Schwingversuch, schematische Darstellung des Verlaufs der aufgetragenen Spannung	49
Abbildung 34	Gewebe- und Gelege-Halbzeuge	51
Abbildung 35	Vakuum-Harzinjektionsverfahren	52
Abbildung 36	Vakuuminjektionsverfahren zur Applikation der Indikatorschicht	52
Abbildung 37	Probenabmessungen	53
Abbildung 38	Ergebnisse des Stufenzugversuchs, Röntgenrefraktion und Schallemission	54
Abbildung 39	Röntgenrefraktion bei Probenversagen im Zugversuch, links: schlechtere Erkennbarkeit bei gestreckter Darstellung	55
Abbildung 40	0°/90°-Gewebeprüfungen, Scans nach 10 ⁶ Lastwechseln	56
Abbildung 41	Ergebnisse der Röntgenscans einer 0°/90°-Gewebe laminat-Probe bei verschiedenen Lastwechselzahlen bei 300MPa und R=0,1	57
Abbildung 42	0°/90°-CFK- Gelege-Prüfungen, Scans nach 10 ⁶ Lastwechseln	58
Abbildung 43	Entwicklung der Rissdichte an +/-45°-Gewebeprüfungen bei $\sigma_0 = 75\text{MPa}$ und $R = 0,1$ (aus [TrOH13])	59
Abbildung 44	Prinzip der Auswertung der Lichttransmission	60
Abbildung 45	Lastfolgen mit $D = 1$ nach linearer Schadensakkumulationshypothese	61

Abbildung 46	End-Grauwertparameter bei $\pm 45^\circ$ -Biax-GFK-Gelege-Schwingversuchen, $R=-1$	62
Abbildung 47	Grauwertparameter bei $\pm 45^\circ$ -Biax-GFK-Gelege - Blocklastversuchen, $R=-1$, Spannungsangabe als Oberlast.....	63
Abbildung 48	Drei Phasen der Probeneintrübung bei $\pm 45^\circ$ -Leinwand-GFK-Proben unter schwingender Last [Kasu11]	64
Abbildung 49	Rissmuster an geschädigtem $\pm 45^\circ$ -Leinwand-GFK im Durchlicht ..	64
Abbildung 50	Rissmuster an geschädigtem $0^\circ/90^\circ$ -Leinwand-GFK im Durchlicht.	65
Abbildung 51	Lichttransmission an $\pm 45^\circ$ -GFK-Gewebe-Laminat, $R = 0,1$ (Darstellung nach [Trap02, S.17])	66
Abbildung 52	Prinzip der Auswertung der Lichtremission	68
Abbildung 53	quasistatischer Zugversuch am Indikatorwerkstoff, Kettfäden des Gewebes in 0° zur Last orientiert, 2mm/min, Beleuchtung wie in Abbildung 54	69
Abbildung 54	quasistatischer Zugversuch am Indikatorwerkstoff, Kettfäden des Gewebes in 90° zur Last orientiert, Last in 0° 2mm/min, Beleuchtung wie in Abbildung 53	69
Abbildung 55	Unterschiedliche Faserondulation; etwas stärkere Ondulation in Zugrichtung bei Probe 140t6 (a) mit 0° Ausrichtung als in Probe 140t31 (b) mit 90° Ausrichtung.....	70
Abbildung 56	Spannungsoptik an der Rissspitze in transparentem PMMA.....	71
Abbildung 57	Skizze des Aufbaus mit Polarisationsfiltern	71
Abbildung 58	Helligkeitsverlauf eines Zugversuches im polarisierten Licht, 0,2mm/min	72
Abbildung 59	Lichttransmission (in polarisiertem Licht) an $0^\circ/90^\circ$ -Probe aus Indikatorschicht; (1)-(6): zunehmende Zugdehnung.....	73
Abbildung 60	Reversible Eintrübung und Dehnung bei Auswertung mit polarisiertem Licht	73
Abbildung 61	Reversible Eintrübung und Restdehnung bei Auswertung mit polarisiertem Licht	74
Abbildung 62	Remission an $\pm 45^\circ$ -Indikatorschichtmaterial, Zugversuch 0,1mm/min	75
Abbildung 63	Transmission an $\pm 45^\circ$ -Indikatorschichtmaterial, Zugversuch 0,01mm/min	75
Abbildung 64	Remission und Dehnung an $\pm 45^\circ$ -Indikatorschichtmaterial.....	76
Abbildung 65	Beginn der Eintrübung (Rissbildung) an Indikatorschichtprobe bei schwingender Last, $R = 0,1$	77

Abbildung 66	Unter dem Durchlichtmikroskop belastete Proben, Beispiel: Aufnahme einer schwingend vorbelasteten Probe unter 5-facher optischer Vergrößerung.....	78
Abbildung 67	Reversible Eintrübung unter dem Durchlichtmikroskop an einer zuvor unbelasteten Probe	78
Abbildung 68	Zugprobenstreifen aus bereits gebrochener Zugprobe unter mäßiger Zuglast unter dem Durchlichtmikroskop	79
Abbildung 69	Schwingend vorgeschädigte Probe unter mäßiger Zuglast unter dem Durchlichtmikroskop	80
Abbildung 70	Image-Stacking zur nachträglichen Vergrößerung der Tiefenschärfe	81
Abbildung 71	Schrägensicht, beschichtete Seite: Rissdarstellung (farblich hervorgehoben) in der Indikatorschicht, Rissstart teilweise an Inhomogenitäten z.B. Bindungsfäden des NCF- Kohlenstofffasergeleges	82
Abbildung 72	Schrägensicht, NCF-Gelege, unbeschichtete Seite: Risse (farblich hervorgehoben) kaum erkennbar	83
Abbildung 73	Riss im Auflicht schwer erkennbar (a) und mit zusätzlichem Seitenlicht durch die Indikatorschicht auch an der Oberfläche durch helle Flecken gut sichtbar (b)	84
Abbildung 74	Kategorien von Rissen, wie sie im Schliffbild an der seitlich beleuchteten Probe unter dem Mikroskop beobachtet wurden	85
Abbildung 75	Rissanzeige in der Indikatorschicht an 0°/90°-Gewebe-Laminat; a) ohne Risse, b) Risse und Anzeige schwach ausgeprägt, c) deutliche Darstellung der Risse	86
Abbildung 76	0°/90°-Gewebelaminat mit Indikatorschicht nach Probenversagen im Schwingversuch (Bildausschnitt abseits der Bruchstelle).....	87
Abbildung 77	Skizze der Rissübertragung in die Indikatorschicht bei parallel zur Schicht mit Querrissen angeordneter Indikatorschicht. Beispielhaft an 90°/0°-NCF-CFK-Gelege dargestellt	88
Abbildung 78	Schrägensicht einer +/-45°-Probe mit Rissen (rot hervorgehoben) und deren Darstellung in der Indikatorschicht	89
Abbildung 79	Rissarten in +/-45°-CFK-Körper_Gewebelaminat mit Indikatorschicht +/-45° schematisch dargestellt	90
Abbildung 80	Skizze der Rissentwicklung an +/-45°-CFK-Gewebe-Laminat, Detailansicht der Mikrodelaaminationsrissentwicklung, die von der Indikatorschicht nur schwach dargestellt wird.	90
Abbildung 81	Scans eines +/-45°-Gewebelaminats nach 10 ⁵ Lastwechseln bei 75MPa Oberlast und R=0,1;.....	91

Abbildung 82	Mechanisches Grundmodell zur FEM – Modellierung eines Querrisses	92
Abbildung 83	FEM-Netz, Verfeinerung der Vernetzung in Rissnähe.....	92
Abbildung 84	Rissspitze ohne Delamination, 0,02mm (links) und 0,055mm (rechts) starke Indikatorschicht.....	93
Abbildung 85	Einfluss der Dicke der Indikatorschicht auf die gemittelte Zugspannung σ_x in der Schicht, die max Rissöffnung a und die Oberflächeneindellung u_y	94
Abbildung 86	Einfluss der Delaminationslänge der 0,2mm dicken Indikatorschicht auf die gemittelte Zugspannung σ_x in der Schicht, die max Rissöffnung a und die Oberflächeneindellung u_y	94
Abbildung 87	Rissumgebung ohne Indikatorschicht (links) und 0,06mm mit Delamination ($l_2=0,4\text{mm}$) und $h_3=0,02\text{mm}$ starker Indikatorschicht (rechts)	95
Abbildung 88	Verschiedene Beleuchtungsarten einer unbeschädigten und einer geschädigten Probe aus 36 Lagen der GFK-Indikatorschicht	96
Abbildung 89	Reflexion an Faser-Matrix-Grenzflächen (a) und an glatter Probenoberfläche (b).....	96
Abbildung 90	Verschiedene Beleuchtungsarten einer unbeschädigten und einer geschädigten NCF-Gelegeprobe mit Indikatorschicht	97
Abbildung 91	Verschiedene Beleuchtungsarten einer unbeschädigten und einer geschädigten CFK-0°/90°-Gewebeprobe mit Indikatorschicht.....	97
Abbildung 92	Verschiedene Beleuchtungsarten einer unbeschädigten und einer geschädigten CFK-+/-45°-Gewebeprobe mit Indikatorschicht.....	98
Abbildung 93	0°/90°-Gewebelaminat, Remission und Kriechdehnung bei unbelasteter Probe	99
Abbildung 94	0°/90°-Gewebelaminat, Remissionsbilder bei unbelasteter Probe	100
Abbildung 95	Verlauf der Rückstrahlung und der Dehnung bei Entlastung an NCF-(90°/0°/0°/90°)-Gelege-Laminat.....	101
Abbildung 96	Zugversuch +/-45°-Gewebe-Laminat mit Indikatorschicht	102
Abbildung 97	Rissmuster in der Indikatorschicht an +/-45°-Gewebe-Laminat bei verschiedenen Dehnungen	102
Abbildung 98	Remission und Dehnung an +/-45°-CFK-Probe bei $\sigma_0 = 75\text{MPa}$, $R = 0,1$; a) erste Querrisse, b] Quer- und deutlicher angezeigte Diagonalrisse	103
Abbildung 99	Remission der +/-45°-CFK-Probe 139t5 bei $\sigma_0 = 75\text{MPa}$ und $R = 0,1$ bei verschiedenen Lastwechselzahlen	103

Abbildung 100	Vergleich von Röntgenrefraktionsmessungen ohne Indikatorschicht (Probe 112t48) und Lichtremission an der Indikatorschicht (Probe 139t5), $R = 0,1$, $\sigma_o = 75\text{MPa}$	104
Abbildung 101	Mögliches Einsatzkonzept für die Indikatorschicht	116

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Daten der Matrixwerkstoffe.....	50
Tabelle 2	Daten der Faserwerkstoffe	51
Tabelle 3	Rissdichte mit und ohne Indikatorschicht an der Oberfläche.....	84
Tabelle 4	Rissdichte mit und ohne Indikatorschicht im Schliffbild	85

Anhang

Übersicht über die verwendeten Lamine

0°/90°-CFK-Gewebe:

- ECC-CCC Cramer Köper-2/2-Gewebe 400g/m²
- Tejin TohoTenax Tenax® E HTA40 E13 6K-Faser, 7µm
- Araldite®LY556/ Aradur®917/ DY070 von Huntsman
- 130mm/15mm/1mm Einspannlänge 60mm oder 170mm/15mm/1mm Einspannlänge 100mm
- mit Indikatorschicht ebenfalls 0°/90°-Ausrichtung beidseitig halbhoch
- oder ohne Indikatorschicht

+/-45°-CFK-Gewebe:

- ECC-CCC Cramer Spezialanfertigung Köper-2/2-Gewebe 400g/m²
- Tejin TohoTenax Tenax® E HTA40 E13 6K-Faser, 7µm
- Araldite®LY556/ Aradur®917/ DY070 von Huntsman
- 130mm/15mm/2mm Einspannlänge 60mm
- mit Indikatorschicht ebenfalls +/-45°-Ausrichtung beidseitig halbhoch
- oder ohne Indikatorschicht

+/-45°-Biax-GFK-Gelege:

- Saertex +/-45°-Biax-E-Glas-Gelege 1000g/m²
- Standard-E-Glasfaser 17µm
- Epikote® MGS® LR 135 mit Epikure® MGS® LH 137 von Momentive
- 210mm /32mm /2mm Einspannlänge 130mm

+/-45°-Leinwand-GFK und 0°/90°-Leinwand-GFK:

- PD-Interglas Leinwandgewebe Spezialanfertigung 280g/mm² FK800-Finish
- EC-9 E-Glasfaser, 9µm
- Epikote® MGS® LR 285 mit Epikure® MGS® LH 287 von Momentive
- 210mm /32mm /2mm – wie +/-45°-Biax-GFK-Gelege

+/-45°-Köper-GFK und 0°/90°-Köper-GFK:

- ECC-CCC Cramer Spezialanfertigung Köper-2/2-Gewebe 600g/m²
- SE 1500 Glasfaser 3B-Fiberglas 17µm 600tex
- Araldite®LY556/ Aradur®917/ DY070 von Huntsman
- 130mm/15mm/2mm Einspannlänge 60mm,

NCF-0°/90° (90°/0°/0°/90°):

- NCF-Gelege SGL-Carbon UDO® CS 200/300 200g/m²
- Toray T700-Faser, 7µm

- LY564
- 130mm/15mm/1mm Einspannlänge 60mm
- mit Indikatorschicht einseitig vollflächig
- oder ohne Indikatorschicht

Indikatorschicht – 36 Lagen:

- PD-Interglas Leinwandgewebe 25g/mm² IG02034 FK800-Finish
- EC-5-5,5tex E-Glasfaser. 5µm
- Epikote® MGS® LR 285 mit Epikure® MGS® LH 287 von Momentive
- 130mm/15mm/1mm Einspannlänge 60mm