

IN-SITU VERFOLGUNG DER ERMÜDUNG VON FASER-KUNSTSTOFF- VERBUNDEN MIT LUFTGEKOPPELTEN PLATTENWELLEN

D. Sauer,
IABG mbH, Einsteinstraße 20, D-85521 Ottobrunn, Deutschland

Zusammenfassung

In der Arbeit, die an der Universität Stuttgart am Institut für Kunststofftechnik, Abteilung für Zerstörungsfreie Prüfung, durchgeführt wurde, wird glasfaserverstärkter Kunststoff mechanisch ermüdet. Eine zerstörungsfreie und berührungslose Verfolgung des Ermüdungslebens wird mit Hilfe von luftgekoppelten Plattenwellen ermöglicht. Es wird ein Verfahren angewandt, dass eine Verfolgung der Plattenwellengeschwindigkeit des untersuchten Probenmaterials erlaubt, ohne die Zugstäbe aus der Schwingprüfmaschine auszuspannen. Der Verlauf der Geschwindigkeit wird mit der relativen Steifigkeit über das Ermüdungsleben und der Rissdichte verglichen.

1. EINLEITUNG

Neben den konventionellen Werkstoffklassen der Metalle, Keramiken und Polymere finden Verbundwerkstoffe einen stetig wachsenden Anwendungsbereich vor allem in der Luftfahrt und Windenergie. Durch die Kombination zweier Werkstoffklassen lassen sich die Materialeigenschaften für die gewünschte Anwendung ideal einstellen. Faser-Kunststoff-Verbunde ermöglichen Strukturen mit einer richtungsoptimierten, hohen spezifischen Steifigkeit und Festigkeit. Dies kann z.B. für die Rotorblätter von Windkraftanlagen von Bedeutung sein. In der Praxis ermüden diese Bauteile durch die kontinuierlich wechselnde Belastung.

Während des Ermüdungslebens solcher Faserverbunde kommt es zu Materialschädigung (Zwischenfaserbrüche, Delaminationen, Faserbrüche), die eine Abnahme der Steifigkeit über die Gesamtlebensdauer zur Folge hat. Der Verlauf der Schädigung kann für Multiaxialgelege (MAG), wie in Bild 1 schematisch dargestellt, in drei Stadien eingeteilt werden.

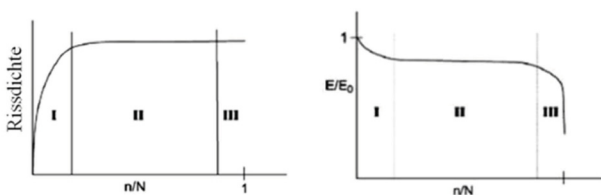


BILD 1. Schematischer Verlauf von Rissdichte und Steifigkeit über das Ermüdungsleben eines MAG [1].

Während des ersten Stadiums I, steigt die Zahl der Zwischenfaserbrüche stark an. Sie entstehen entlang der Fasern in Lagen, die quer zur Lastichtung liegen, wodurch ein starker Abfall der Steifigkeit in Zugrichtung stattfindet. Bereich II ist gezeichnet durch einen flachen Abfall der Steifigkeit aufgrund von sich ausbreitenden und zusammenwachsenden Rissen in der Polymermatrix. In Bereich III kommt es vermehrt zu Faserbrüchen und Delaminationen, die schließlich zum endgültigen Versagen des Werkstoffs führen. Der Verlauf der Steifigkeit fällt in diesem Bereich stark ab. Werden die Schädigung auf

Grund mechanischer Ermüdung an im Betrieb befindlichen Bauteilen und Anlagen mit zerstörungsfreien Prüfmethoden zu verfolgt, können Kosten für Wartung, Instandhaltung und Reparatur zum Teil erheblich reduziert werden. Dafür wurden verschiedene Techniken vorgeschlagen, wie z. B. die Zählung der Rissdichte [2, 3]. Diese aufwändige Methode ist nur bei transparenten und unlackierten Proben möglich, wie dem hier untersuchten glasfaserverstärkten Kunststoff. Integrierte Sensoren um z. B. die elektrische Leitfähigkeit zu messen, verändern die Struktur des Materials und erfordern gegebenenfalls auch ein leitfähiges Material.

Die Steifigkeit eines Materials lässt sich auch über seine Ultraschall-Bulkwellengeschwindigkeit bestimmen. Dies kann z.B. in konventioneller Ultraschall-Tauchtechnik gemessen werden [4], die ein Wasserbad oder ein anderes Kontaktmittel benötigt. Es lassen sich daher Prüfungen in Betrieb befindlicher Bauteile nur schwer realisieren. Solche Messung erfolgen über einen zweiseitigen Zugang, der an Realbauteilen nicht immer gegeben ist.

Das hier verwendete Verfahren basiert auf Lambwellen. Sie sind zweidimensionale geführte Wellen, die sich in plattenartigen Proben ausbreiten und als Sensor zur Verfolgung der in-plane elastischen Eigenschaften auch von Verbundwerkstoffen geeignet sind [5, 6]. Bei Kontaktanregung von Plattenwellen konnte gezeigt werden, dass sie sich zur Verfolgung von thermisch und mechanisch induzierten Ermüdungsschädigung eignen [7-9].

Eine kontaktfreie Prüfung, auch während der Ermüdung, wird durch Luftgekoppelung des Schalls ermöglicht. Diese kontaktfreie Prüfmethode findet auf Grund ihrer Vorteile steigende Anwendung bei der Untersuchung von plattenartigen Proben. Es konnten im schrägeinstahlenden Transmissionsmodus lokale Anisotropie in den elastischen Eigenschaften detektiert und quantifiziert werden [10].

In den durchgeführten Versuchen werden die Proben zyklisch belastet. Die zerstörungsfreie Prüfung kann währenddessen durchgeführt werden, ohne die Proben auszuspannen. Über das Ermüdungsleben wird ein Abfall der Plattenwellengeschwindigkeit mit zunehmender Schädigung beobachtet. Es kann gezeigt werden, dass der Verlauf der Geschwindigkeit gut mit dem der Steifigkeit übereinstimmt. Zusätzlich wird die fortschreitende Schädigung durch die Rissdichte verfolgt.

2. MATERIAL UND PROBEN

Ein Glasfasermultiaxialgelege wurde VARTM-Prozess (vacuum-assisted resin transfer moulding) mit dem Epoxidharzsystem Epikote Resin MGS RIM 135 und Epikure Curing Agent MGS RIM H 137 der Firma Momentive infiltriert. Es wurden Glasfaserverbundplatten mit einer Dicke von 2 mm und einem nominellen Faservolumengehalt von 51 % hergestellt. Die hier verwendeten Matten werden zunächst in einem Lagenaufbau $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ ausgelegt und anschließend umgeklappt, wodurch ein leicht unsymmetrischer Aufbau wie in Bild 2 entsteht und die Proben eine geringere Symmetrie aufweisen. In den 0° -Lagen liegen 49 % der Fasern, 46 % verteilen sich auf die $\pm 45^\circ$ -Lagen, und nur 5 % verstärken die 90° -Lagen.

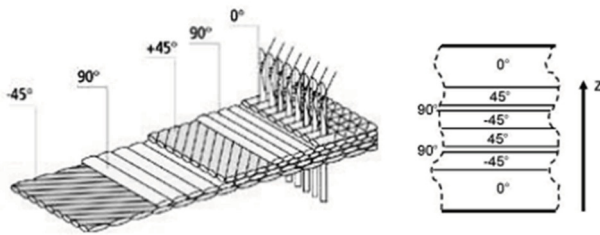


BILD 2. Lagenaufbau eines Multiaxialgeleges [11].

Der Vorteil eines solchen Gelege-Aufbaus gegenüber einem Gewebe ist die geringe Ondulation der Fasern. Dadurch bleiben sie in Lastrichtung ausgerichtet, und führen zu höheren mechanischen Kennwerten bei gleichem Gewicht. Die Fasern erscheinen aufgrund des nahezu identischen Lichtbrechungsindex von Faser und Matrix durchsichtig, der Binfaden ist sichtbar. Diese Transparenz ermöglicht eine optische Prüfung entstandener Risse. Die hergestellten Platten wurden mit GFK/Aluminium-Krafteinleitungselementen versehen und anschließend mit einem diamantbesetzten Sägeblatt auf 250 mm Länge und 25 mm Breite geschnitten. Um Randdelaminationen und weitere Randzoneneffekte zu vermeiden, wurden die Kanten der Proben poliert.

3. EXPERIMENTELLES

In den Versuchen soll die Plattenwellengeschwindigkeit als Indikator für die Steifigkeitsänderung verfolgt werden. Angeregt werden die Lambwellen mit Hilfe von luftgekoppeltem Ultraschall. Trifft eine Luftultraschallwelle im Einfallswinkel θ , der die Beziehung [12]

$$(1) \quad \theta = \arcsin \frac{v_a}{v_p}$$

erfüllt, auf die Probe, fand resonante Anregung einer Plattenwelle statt (Bild 3). Dabei ist v_a die Phasengeschwindigkeit des Ultraschalls in Luft und v_p die der Plattenwellenmode. Durch diese Gleichung wird ebenfalls der Ausbreitungswinkel der Wellen bestimmt, die zu beiden Seiten der Platte als Luftschall abgestrahlt werden und einen einseitigen Messaufbau ermöglichen. Der Winkel θ wird per Hand variiert bis zum optimalen Empfangssignal. Er hängt ebenfalls von der angeregten Wellenmode ab. Hier

ist es die nullte Ordnung der antisymmetrischen Mode (a_0) mit einer überwiegend out-of-plane Polarisation.

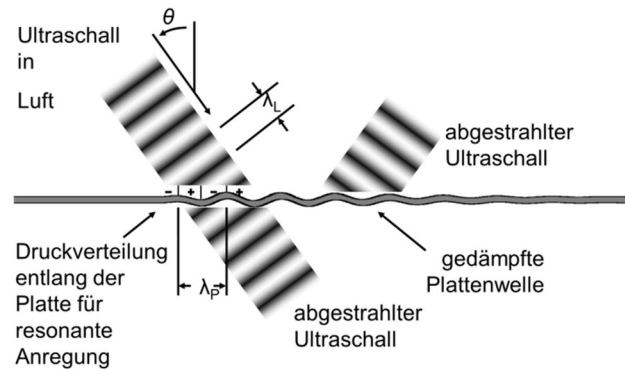


BILD 3. Anregung einer Plattenwelle durch Luftultraschall [13].

Eine Verfälschung des Empfangssignals durch reflektierten Schall oder Direktschall durch die Luft wird mit Hilfe einer Abschirmung zwischen Sender und Empfänger (beam shield) verhindert. Im Experiment werden für alle Messungen handelsübliche 207 kHz luftgekoppelte Prüfköpfe mit einem Durchmesser von 8 mm verwendet. Zur Anregung wird ein Burst aus 10 Perioden gewählt, der eine geringe Bandbreite gewährleistet. Mit einer Fouriertransformation wird die Phase des Ausgangssignals berechnet, die zur Bestimmung der Phasengeschwindigkeit notwendig ist. Außerdem lassen sich so Störungen z.B. durch die Schwingprüfmaschine oder die Schrittmotorsteuerung herausfiltern. Um die gemessenen Geschwindigkeiten auf Plausibilität zu überprüfen, wird sie mit berechneten Werten der Software Disperse [14] verglichen. Dies bestätigt auch, dass es sich bei der angeregten Plattenwelle um die nullte Ordnung der antisymmetrischen Mode handelt. Eine Berechnung ist nur für symmetrischen Lagenaufbau möglich, so dass für den unsymmetrischen Fall die Ergebnisse nur eine Näherung darstellen.

3.1. Messung der Plattenwellengeschwindigkeit

Vor der Ermüdung werden alle Proben charakterisiert. Zur Ermittlung der Plattenwellen-Phasengeschwindigkeit wird die Laufstrecke variiert (siehe Bild 4). Der Empfängerprüfkopf wird parallel zur Probenoberfläche mit Hilfe eines schrittmotor-betriebenen Scantisches entlang des Ausbreitungspfad der Welle verschoben.

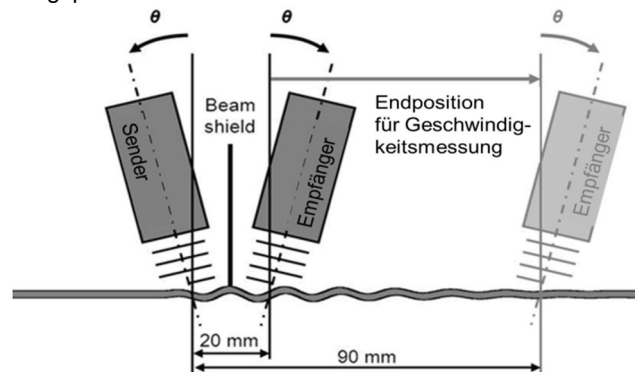


BILD 4. Messprinzip zur Probencharakterisierung vor der Ermüdung [15].

Diese Verschiebung beträgt insgesamt 70 mm in 1 mm Schritten. So verändert sich die Laufstrecke, die die Welle in der Platte zurücklegt um Δx . Auf diese Art wird eine Bahn in der Mitte der Probe viermal gemessen, da auch bei den späteren Versuchen in der Schwingprüfmaschine nur eine Bahn gemessen wird. Aus der Änderung der Laufstrecke, der entstehenden Phasendifferenz $\Delta\varphi$ und der Ultraschallfrequenz f lässt sich nach [16, 17]

$$(2) \quad v_p = 2\pi f \frac{\Delta x}{\Delta\varphi}$$

die Phasengeschwindigkeit der Plattenwellenmode berechnen. Diese Geschwindigkeit wird der Berechnung der relativen Geschwindigkeitsänderung aus der gemessenen Phasenverschiebung während des Ermüdungslebens dienen.

3.2. Ermüdungsversuche

Die Ermüdungsversuche werden auf einer Schwingprüfmaschine mit einer Frequenz von 6 Hz durchgeführt. Untersucht wird Belastungen im reinen Zugbereich bei einer maximalen Spannung von 85 MPa an Proben die in 90° zur Hauptverstärkungsrichtung orientiert sind.

Da eine absolute Plattenwellengeschwindigkeits-Messung wie in der Vorcharakterisierung in dem an der Schwingprüfmaschine zur Verfügung stehenden Bauraum nicht zu realisieren ist, wird ein Versuchsaufbau wie in Bild 5 verwendet.

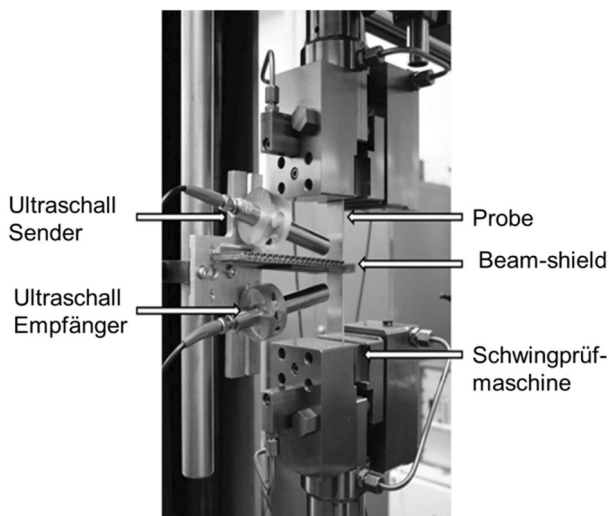


BILD 5. Messaufbau für die Geschwindigkeitsmessung während der Ermüdung.

Die Prüfköpfe sind unbeweglich im Winkel Θ auf die Probenmitte gerichtet, so dass die gesamte Laufstrecke der Welle entlang der Probe etwa 30 mm beträgt. Nach jedem einzelnen Ermüdungsschritt lässt sich eine relative Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zu dem Ausgangswert ermitteln. Aus der gemessenen Phasendifferenz, der Laufstrecke der Plattenwelle x_p , der Ausgangsgeschwindigkeit $v_{(0)}$ und der Kreisfrequenz $\omega=2\pi f$ lässt sich nach [18]

$$(3) \quad v_{(n)} = \frac{\omega x_p v_{(0)}}{\omega x_p + \Delta\varphi v_{(0)}}$$

die Plattenwellengeschwindigkeit $v_{(n)}$ nach einer durchlaufenen Zyklenzahl berechnen.

Da durch äußere Spannung die Messungen beeinflusst werden, ist ein Vergleich zwischen den Geschwindigkeiten während des Ermüdungslebens mit den Ausgangswerten nur durch eine Unterbrechung der zyklischen Belastung und einer Entlastung der Proben möglich. Um den Wärmeeinfluss infolge Rissuferreibung auszuschließen, wird ein Temperaturfühler angebracht und erst gemessen, wenn eine konstante Temperatur von etwa 23 °C vorliegt. Für die Messung bleibt die Probe in der Zugmaschine eingespannt, ein den Ermüdungsvorgang verfälschendes Ein- und Ausspannen wird vermieden.

3.3. Rissdichtebestimmung

Zusätzlich wird zu festgelegten Zyklenzahlen die Rissdichte der Proben ermittelt. Dazu wird eine photographische Nahaufnahme derselben Stelle gemacht. Auf einem Ausschnitt von 2x2 mm wird an drei Bildausschnitten jeweils die Risse pro Fläche gezählt.

4. ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ermüdungsversuchen vorgestellt. Das sind neben dem Steifigkeitsverlauf in Zugrichtung die Änderung der Rissdichte im Laufe des Ermüdungslebens und die Geschwindigkeitsänderung, die sich aus der in-situ durchgeführten Ultraschallmessung ergibt.

4.1. Steifigkeitsänderung

In Bild 6 ist der Verlauf der relativen Steifigkeit in Zugrichtung über das Ermüdungsleben dargestellt, der aus den Daten der Schwingprüfmaschine ermittelt wird.

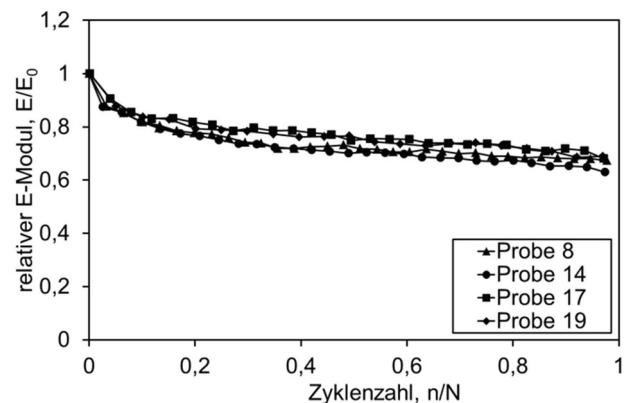


BILD 6. Verlauf der relativen E-Moduländerung über das Ermüdungsleben.

Im Bereich I (bis zu 15 % der Lebensdauer) findet ein starker Abfall des E-Moduls in Zugrichtung um 20 % der Ausgangssteifigkeit statt. Über das weitere Ermüdungsleben in Bereich II fällt der relative E-Modul schwach bis um 30-35 % des Ausgangswertes bei etwa 90 % der Lebensdauer. Der Verlauf der gemessenen Werte zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Verlauf (Bild 1). Andere Arbeiten über das Ermüdungsleben von GFK ([2], [15]) bestätigt dies. Die absoluten Werte der Zyklenzahlen, bei denen Versagen auftritt, liegen zwischen etwa 5000 und 10000 Zyklen. Diese Streuung lässt sich durch die Inhomogenität des Materials begründen.

4.2. Rissdichteverlauf

Zunehmende Schädigung im Material verursacht die Steifigkeitsabnahme während des Ermüdungslebens. Sie lässt sich anhand der Rissdichte verfolgen (Bild 7).

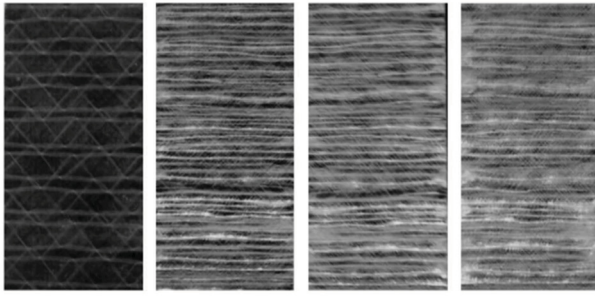


BILD 7. Photographische Nahaufnahme einer Probe (von links nach rechts) vor der Ermüdung, nach 8%, 19% der Lebensdauer und kurz vor dem Versagen.

Vor der Ermüdung sind nur die Binfäden zu erkennen, die die Rovinge zusammenhalten. Die Matrix ist annähernd transparent, so dass der schwarze Hintergrund durchscheint. Auf dem zweiten Foto ist dieselbe Probe nach 8 % ihrer Lebensdauer zu sehen. Die Entstehung der Matrixrisse ist deutlich an der Trübung der Probe zu erkennen. Der schwarze Hintergrund scheint nur noch an wenigen Stellen unbeschädigter Matrix hindurch. Das dritte Foto von links zeigt die Probe nach 19 % Lebensdauer. Die Zahl der Risse scheint nicht mehr stark zugenommen zu haben. Auf dem rechten Bild befindet sich die Probe kurz vor dem Versagen. Zu den bisher vorhandenen Rissen sind noch Delaminationen hinzugekommen. Sie sind an den flächigen weißen Stellen zu erkennen, vor allem am linken Rand. Diese Entwicklung stimmt mit dem vorhergesagten Verhalten überein. Aus diesen Bildern werden die Risse gezählt und daraus die Darstellung der Rissdichte über der Lebensdauer (Bild 8) ermittelt.

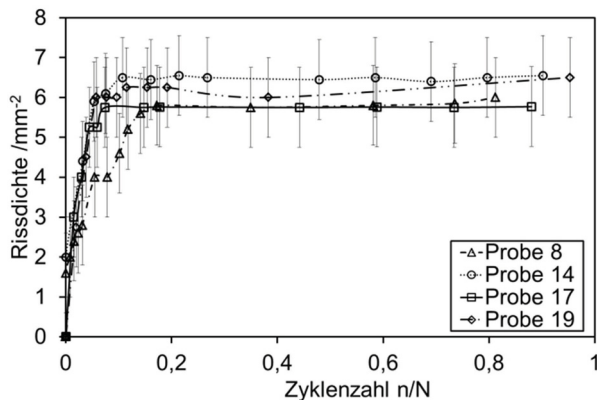


BILD 8. Verlauf der Rissdichte über das Ermüdungsleben.

Der Fehler wird auf 1 Riss pro mm^2 abgeschätzt. Da durch die geringe Auflösung der Fotografien zwei eng nebeneinander liegende Risse nicht voneinander unterschieden werden können, ist die gezählte Rissdichte eher zu niedrig als zu hoch. Der Verlauf, der sich für die vier Proben ergibt, zeigt in Bereich I (bis 15 % der Lebensdauer) einen starken Anstieg bis in Bereich II ein Sättigungswert zwischen 6 und 7 Risse pro mm^2 erreicht wird. Dieses Verhalten entspricht der Theorie und wurde unter anderem in der Literatur [2] oder [15] ebenfalls festgestellt.

4.3. Geschwindigkeitsänderung

Der dazugehörige Verlauf der relativen Phasengeschwindigkeit ist in Bild 9 gegen das Ermüdungsleben aufgetragen.

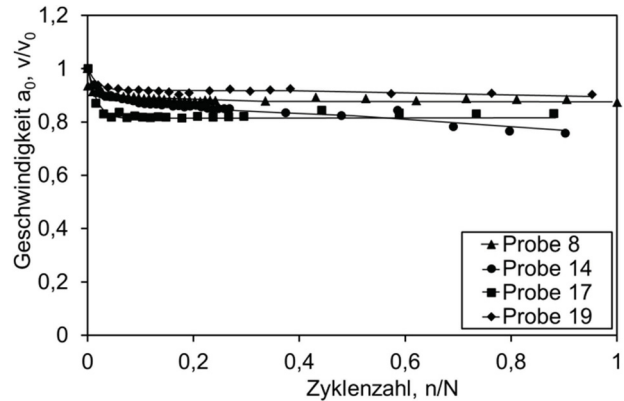


BILD 9. Relative Änderung der Geschwindigkeit über das Ermüdungsleben.

In Bereich I (bis 15 % der Lebensdauer) findet eine starke Geschwindigkeitsabnahme um 10-19 % statt. Im weiteren Verlauf von Bereich II sinkt die Geschwindigkeit auf 75 -90 % der Ausgangsgeschwindigkeit. Zu einem Fehler in der Geschwindigkeit führen eine Messungenauigkeit der Laufstrecke, die Standardabweichung des ermittelten Phasenwertes und Geometrieänderungen der Probe im Laufe des Ermüdungslebens. Der Verlauf der Plattenwellengeschwindigkeit entspricht der Vorhersage. Auf Grund zunehmender Schädigung (vgl. Rissdichteverlauf) findet eine Abnahme der Steifigkeit in Zugrichtung statt (vgl. Steifigkeitsverlauf). Diese Reduktion des E-Moduls führt zu einer Abnahme der Lambwellengeschwindigkeit [12].

5. ZUSAMMENFASSUNG

Der Verlauf des Ermüdungslebens von Faser-Kunststoff-Verbunden konnte mit Hilfe von luftgekoppelten Plattenwellen zerstörungsfrei und berührungslos verfolgt werden. Im Laufe der schrittweisen mechanischen Ermüdung der Proben, konnte die Phasengeschwindigkeit der a_0 -Plattenwellenmode in der Schwingprüfmaschine bei konstanter Laufstrecke ermittelt werden. Es wurde gezeigt, dass mit sinkendem E-Modul auch die Plattenwellengeschwindigkeit abnimmt. Ebenfalls wurde die Rissdichte der Proben über das Ermüdungsleben verfolgt. Dabei konnte gezeigt werden, dass eine höhere Rissdichte zu einem stärkeren Abfall von Steifigkeit und Plattenwellengeschwindigkeit in Zugrichtung führt. Die Verfolgung der Plattenwellengeschwindigkeit kann daher als geeignete Methode betrachtet werden den Ermüdungsverlauf von Faser-Kunststoff-Verbunden zu verfolgen.

6. DANKSAGUNG

Der Dank geht an die Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG) für die Unterstützung dieser Arbeit als ein Teil des Projektes PAK267. Außerdem an die Abteilung für Zerstörungsfreie Prüfung am IKT der Universität Stuttgart und Prof. Busse für die Betreuung der Arbeit, sowie der IABG mbH.

LITERATUR

[1] S. Adden, K. Pfeleiderer, I. Solodov, P. Horst, G. Busse. Characterisation of stiffness degradation caused by fa-

- tigue damage in textile composites using circumferential plate acoustic waves. *Composites Science and Technology* 2008; 68: 1616-1623
- [2] A.L. Gagel, Bodo Fiedler, Karl Schulte. On modelling the mechanical degradation of fatigue loaded glass-fibre non-crimp fabric reinforced epoxy laminates. *Composites Science and Technology* 2006; 66: 657-664
- [3] A. L. Highsmith, K. L. Reifsnider. Stiffness-reduction mechanisms in composite laminates. *Damage in Composite Materials* 1982; 103-117
- [4] J. J. Nevadunsky, J. J. Lucas, M. J. Salkind. Early fatigue damage detection in composite materials. *Journal of composite materials* 1975; 9: 394- 408
- [5] O. I. Lobkis, D. E. Chimenti, Han Zhang: In-plane elastic property characterization in composite plates. *J. Acoust. Soc. Am.* 2000; 107, No. 4: 1852-1858
- [6] K. Mal, M. R. Gorman, and W. H. Prosser. Material characterization of composite laminates using low-frequency plate wave dispersion data. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* 1992; 11: 1451-1458.
- [7] M. D. Seale, B. T. Smith, and W. H. Prosser. Lamb wave assessment of fatigue and thermal damage in composites. *Journal of the Acoustic Society of America* 1998; 103: 2416-2424.
- [8] J.-H. Shih, A. K. Mal, and M. Vemuri. Plate wave characterization of stiffness degradation in composites during fatigue. *Research in Nondestructive Evaluation*. 1998; 10: 147-162.
- [9] R. Böhm, W. Hufenbach. Experimentally based strategy for damage analysis of textile reinforced composites under static loading. *Composites Science and Technology*. 2010; 70: 1330- 1337.
- [10] I. Solodov, K. Pfeleiderer, H. Gerhard, S. Predak and G. Busse. New opportunities for NDE with air-coupled ultrasound. *NDT & E International* 2006; 39: 176-183.
- [11] [www. Saertex.de](http://www.Saertex.de), Stand: 02.12.2010
- [12] I. Victorov . A. Rayleigh and lamb waves. New York: Plenum Press; 1967.
- [13] M. Rheinfurth: Monitoring of fatigue in composites using air-coupled guided waves. *ECNDT 2010 Moskau*
- [14] B. Pavlacovic, M. Lowe: *Software Disperse: User's Manual*
- [15] M. Rheinfurt, F. Schmidt, D. Döring, I. Solodov, G. Busse, P. Horst. Air-coupled guided waves combined with thermography for monitoring fatigue in biaxially loaded composite tubes. *Composites Science and Technology* 2001; 71: 600-608.
- [16] D. Döring; I Solodov; G. Busse. Air-coupled surface acoustic waves: opportunities and limitations for NDT-applications. *4th NDT in Progress, Prag, 2007*
- [17] D. Döring. *Luftgekoppelter Ultraschall und geführte Wellen für die Anwendung in der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung; Dissertation am Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart 2010*
- [18] I. Solodov , K. Pfeleiderer, H. Gerhard, G. Busse. Non-linear acoustic approach to material characterisation of polymers and composites in tensile tests. *Ultrasonics* 2004; 42: 1011-1015.