

Der Einfluss verschiedener Belastungsparameter auf das Ermüdungsverhalten von E-glasfaserverstärktem Epoxidharz

Autor(en): **Mandell, John F. / Meier, Urs**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **104 (1986)**

Heft 15

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76128>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Der Einfluss verschiedener Belastungsparameter auf das Ermüdungsverhalten von E-glasfaserverstärktem Epoxidharz

Von John F. Mandell, Cambridge, USA, und Urs Meier, Dübendorf

Bei aus E-glasfaserverstärktem Epoxidharz aufgebauten Kreuzverbunden wurde die Wechselwirkung zwischen Belastungszeit und Anzahl Schwingspiele unter Zugschwellbeanspruchung studiert. Die Schwingspielfrequenz variierte von 0,01 bis 1,0 Hz und das Verhältnis Unter- zu Oberspannung von 0 bis 1,0. Wöhler-Kurven von Versuchen unter rechteck- und nadelförmiger Belastung zeigen eine höhere Anfangsschwingfestigkeit, aber auch einen stärkeren Abfall der Zeitschwingfestigkeit je Dekade Schwingspiele für Belastungsformen, bei denen der zeitliche Anteil der Oberspannungen geringer ist. Unabhängig von der Form der Belastung zeigen die bei verschiedenen Schwingspielfrequenzen ermittelten Wöhler-Kurven mit zunehmender Anzahl Schwingspiele einen konvergenten Verlauf.

Einführung

Glasfaserverstärkte Kunststoffe sind in der Regel bezüglich Ermüdungsverhalten empfindlicher als solche, die über Verstärkungsfasern mit höheren Moduln verfügen [1]. Der verhältnismässig tiefe Elastizitätsmodul von Glas hat zur Folge, dass typische Laminatstypen bei gleichen äusseren Beanspruchungen grösseren Dehnungen unterworfen sind, als dies mit Hochmodulfasern der Fall ist. Dies beansprucht die Matrix und die Grenzflächen Matrix/Faser derart, dass Matrixrisse bei geringeren Spannungen auftreten, als dies der Fall ist bei Faserverbundwerkstoffen mit hochmoduligen Fasern. Bei unter Ermüdungsbeanspruchung stehenden Faserverbundwerkstoffen beginnt der Schädigungsprozess in der Regel in der Matrix. Mikrorisse in den Grenzflächen zwischen Fasern und Matrix, in der Matrix parallel zu den Fasern oder senkrecht zu den Maximalspannungen, verursachen einen Abfall der verbleibenden mechanischen Eigenschaften. Das Versagen ist je nach Laminataufbau direkt eine Folge der Matrixschädigung oder ist auf Faserbruch zurückzuführen. Im Forschungsbereich «Ermüdungsverhalten faserverstärkter Kunststoffe» wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Übersichtsbeiträge verfasst, so unter anderem [1 bis 6]. Frühere Versuchsergebnisse [1, 7] deuten daraufhin, dass für glasfaserverstärkte Kunststoffe das Ermüdungsverhalten ähnlich ist, wie für nicht imprägnierte Glasfaserstränge. Dies gilt nicht nur für schwingende Beanspruchung, sondern auch für Zeitstandversuche.

Bei Rovingsträngen oder Faserverbundwerkstoffen, die aus E-Glaselementarfasern aufgebaut sind, vermin-

dert sich die Zeitstandfestigkeit je Dekade der Zeit um rund 3 bis 5% der Kurzzeitfestigkeit. Ursache dieses Abfalls ist die bereits auf geringste Mengen Feuchtigkeit zurückzuführende Spannungsrissskorrosion [7, 8]. Eine schwingende Belastung verursacht einen noch grösseren Abfall der Zeitschwingfestigkeit. Dieser erreicht für in der 0°-Richtung beanspruchte Laminate etwa 10% je Dekade der Zeit bzw. der Anzahl Schwingspiele, bezogen auf die Anfangsfestigkeit [1, 7]. Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag geleistet werden, den Einfluss der Parameter Belastungszeit und Anzahl Schwingspiele bei E-glasfaserverstärkten Epoxidharzen aufzuzeigen. Die durchgeführten Versuche waren von verhältnismässig kurzer Dauer, der längste lief während rund drei Monaten. Die Belastungshöhe war in allen Fällen so hoch, dass bereits beim ersten Schwingspiel Mikrorisse in der Matrix auftraten. Die Studie beschränkt sich darauf, die Bedingungen für ein vollständiges Versagen des Werkstoffs zu untersuchen.

Versuchsdurchführung

Alle Versuchskörper wurden aus unidirektionalem Scotchply 1002 der Firma 3M aufgebaut. Die einzelnen Versuchsplatten bestehen aus elf unidirektionalen, alternierend kreuzweise (0°- und 90°-Orientierung) angeordneten Schichten. Die 0°-Richtung der unidirektionalen Schichten ist identisch mit der Belastungsrichtung. Die Prüfkörper wurden derart aus den Platten herausgeschnitten, dass es sich bei den äussersten um 90°-Schichten handelt. Das heisst, fünf Einzelschichten sind parallel zur Belastungsrichtung. Für diese Arbeit wurden zwei verschiedene Mate-

riallieferungen von Scotchply 1002 verwendet, die geringfügig unterschiedliche Eigenschaften aufwiesen. Alle Versuchsplatten wurden bei 160 °C und einem Druck von 6,6 kPa gepresst. Der Druck wurde wie folgt aufgebracht: Kontakt mit den heissen Druckplatten während 3 Minuten, langsame Erhöhung des Druckes während zwei Minuten zum Maximaldruck von 6,6 kPa. Dieser wurde anschliessend während 35 Minuten konstant gehalten. Nach dem Entfernen aus der Presse erfuhren die Versuchsplatten zwischen zwei Isolationsschichten eine langsame Abkühlung. Das aus der Lieferung «1» hergestellte Material wurde nicht nachgehärtet. Jenes aus der Lieferung «2» erfuhr eine Nachhärtung bei 150 °C während acht Stunden. Der Faservolumengehalt betrug bei den Platten aus Lieferung «1» 50%, bei denjenigen aus Lieferung «2» 49%. Der Luftporenvolumenanteil lag bei 7 bzw. 4%. Die durchschnittliche Dicke betrug bei allen Versuchsplatten 2,6 mm.

Die Herstellung der Prüfkörper (Bild 1) erfolgte mit einem Fingerfräser. Die Kanten erfuhren eine sorgfältige Nachbearbeitung mit feinem Glaspapier. Die Prüfkörperform gemäss Bild 1 ist das Ergebnis umfangreicher Vorversuche. Die Schultern des Prüfkörpers wurden derart optimiert, dass einerseits ein Versagen in der Einspannung verhindert werden konnte, und andererseits die Schultern nur minimale Spannungskonzentrationen verursachten. Die Versuche wurden auf servohydraulischen Prüfmaschinen (Instron 1251 bzw. 1273) bei 23 °C und 50% relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Zugversuche an Prüfkörpern der Lieferung «2» ergaben bei einer Verformungsgeschwindigkeit von 1,0 mm/min eine Zugfestigkeit von 391 N/mm² und eine Bruchdehnung von 2,23%. Beim Erreichen der Schädigungsgrenze (Kniepunkt) betrug die Zugspannung 65 N/mm² bei einer entsprechenden Dehnung von 0,27%. Die Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve entsprach derjenigen eines typischen Kreuzverbundes [9]. Die verschiedenen verwendeten Belastungsformen sind in Bild 2 dargestellt. Nominal als Rechteck- bzw. Nadelspitz-Funktionen angegeben, ergaben sich (bedingt durch die technischen Möglichkeiten der Prüfmaschinen, die Masse der hydraulischen Klemmbacken und die Steifigkeit der Prüfkörper) Belastungsformen, wie sie in Bild 2 dargestellt sind. Die Empfindlichkeit des Regelkreises wurde so eingestellt, dass im allgemeinen eine Anstiegsgeschwindigkeit von 0,10 s und ein Überschwingen von maximal 2% der Oberlast eintrat. Alle Versuche standen unter Lastregelung.

V Versuchsergebnisse und Diskussion

Die Versuche sollten einen Beitrag zur Abklärung des Einflusses der Frequenz, der Belastungszeit, der Schwingspielzahl und des Spannungsverhältnisses Unterspannung zu Oberspannung leisten. Ein rechteckförmiger Belastungsverlauf erlaubt eine eindeutige Bestimmung der Belastungszeit unter Ober- bzw. Unterlast. Ein nadelförmiger Belastungsverlauf, beginnend bei Unterlast, oder eine nadelförmige End- und Wiederbelastung, beginnend bei Oberlast, gestattete die möglichst grosse Differenzierung zwischen kumulativer Zeit unter Oberlast und der Anzahl Schwingspiele. Um während der Schwingversuche eine wahrnehmbare Erwärmung der Prüfkörper infolge innerer Dämpfung zu verhindern, betrug die Prüffrequenzen nur 1,0, 0,1 und 0,01 Hz. Bei höheren Prüffrequenzen entsteht eine Wechselwirkung zwischen Wärme- und mechanischem Einfluss, wie in [2] diskutiert. Dies sollte verhindert werden.

Es ist ausserordentlich schwierig, mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand Prüfkörper für Zugschwellversuche aus glasfaserverstärkten Kunststoffen herzustellen, die unter schwingender Beanspruchung im Bereich der freien Länge versagen. Die hohe Dehnung bei Bruch verursacht in der Regel eine Delamination von zusätzlich im Einspannbereich aufgeklebten Verstärkungsschichten. Wie bereits früher erwähnt, fiel der Entscheid zugunsten der Prüfkörper gemäss Bild 1 nach eingehenden Vorversuchen. Diese Prüfkörper gewährleisteten Versagen innerhalb der freien Strecke. Dieses Versagen trat jedoch immer in der Nähe einer Schulter auf. Quasistatische und schwingende Versuche ergaben das gleiche Bruchbild (Bild 3). Die Oberspannungen lagen bei allen Schwingversuchen über der Schädigungsgrenze (Kniepunkt). Demzufolge trat in allen Versuchen beim ersten Lastspiel eine Schädigung in den Laminaten auf. Diese, in Form von Mikrorissen in der Matrix auftretende Schädigung, setzte sich im Verlauf der Schwingversuche kontinuierlich fort.

gungsgrenze (Kniepunkt). Demzufolge trat in allen Versuchen beim ersten Lastspiel eine Schädigung in den Laminaten auf. Diese, in Form von Mikrorissen in der Matrix auftretende Schädigung, setzte sich im Verlauf der Schwingversuche kontinuierlich fort.

Einfluss der Frequenz

Die in Bild 4 dargestellten Ergebnisse von Schwingversuchen bei Frequenzen von 1,0, 0,1 und 0,01 Hz gelten für rechteckförmige Belastungsformen gemäss Bild 2. Die Daten scheinen in allen drei Fällen ähnlich, mit dem für diese Werkstoffe typischen Streubereich. In Bild 5 mit logarithmisch geteilter Abszisse (Schwingspielzahl N) und arithmetisch geteilter Ordinate (Oberspannung σ_o) finden sich die Regressionsgeraden nach den Gleichungen (1) bis (3) für die Schwingspielzahlen bis zum Bruch bei den entsprechenden Spannungshöhen und Frequenzen:

- (1) $\sigma_o = 405 - 45,0 \log N$
- (2) $\sigma_o = 378 - 40,7 \log N$
- (3) $\sigma_o = 355 - 37,0 \log N$

Für jede dieser Geraden beträgt der Spannungsabfall je Dekade Schwingspiele rund 10% der Spannung des ersten Schwingspiels. Ähnliche Versuchsergebnisse wurden bei verschiedenen Glasfaserverbundwerkstoffen unter gleichen Belastungsbedingungen [1, 7], bei Scotchply-1002-Laminaten und ähnlichen [9 bis 11] unter lastgeregelter sinusförmiger Beanspruchung und auch unter dehnungsgeregelter Beanspruchung [12] gefunden. Wie bereits früher erwähnt, wurde ein gleicher Abfall in der Wöhler-Kurve bei nicht imprägnierten E-Glasfaserrovings beobachtet. Dies deutet darauf hin, dass es sich um eine Eigenschaft der Verstärkungsfasern [1, 7] handelt.

Ein anderes bemerkenswertes Ergebnis der Darstellung in Bild 5, ist der bestimmende Einfluss der Prüffrequenz. Hö-

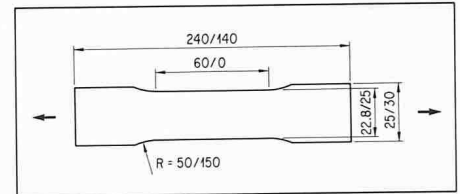
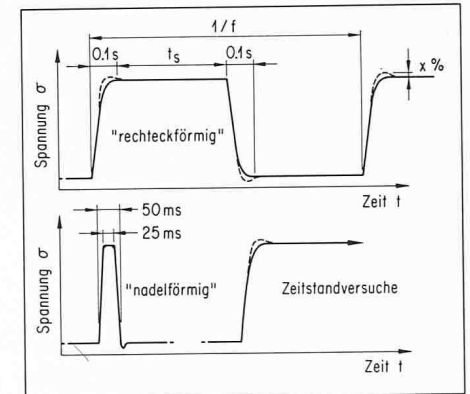


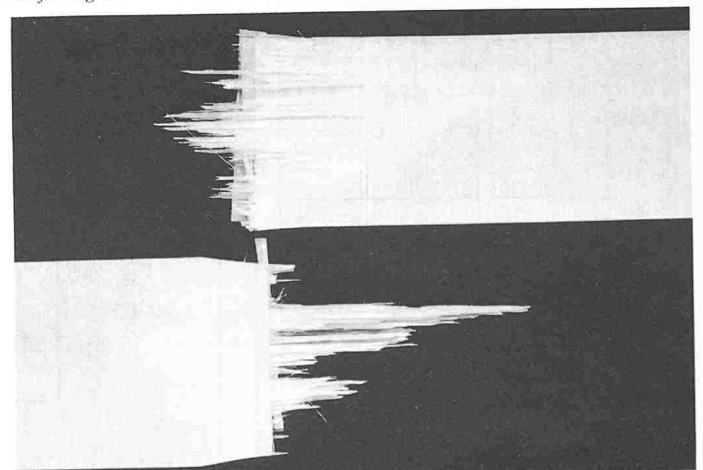
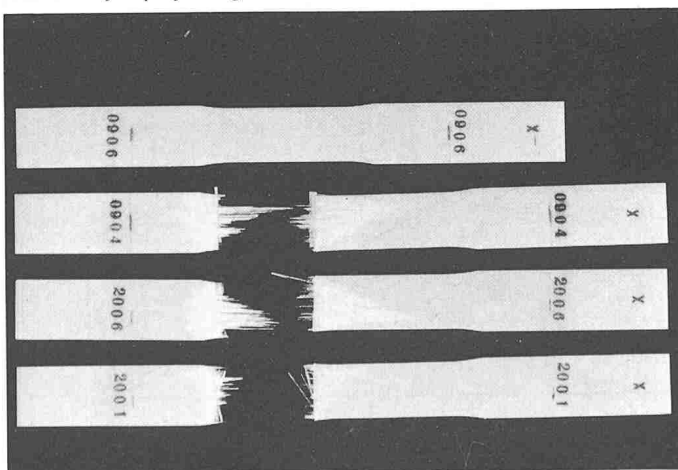
Bild 1. Prüfkörpergeometrien: Alle Masse sind in [mm]. Die jeweils vor dem Schrägstrich stehenden Abmessungen gelten für aus Material der Lieferung «1», die nach dem Schrägstrich stehenden Zahlen für aus Material der Lieferung «2» gefertigte Prüfkörper

Bild 2. Untersuchte Belastungsverläufe. x = Mass für das Überschwingen in [%], bezogen auf die Oberspannung



heren Prüffrequenzen unterworfenen Prüfkörper ergaben jeweils über die gesamte Lebensdauer des Prüfkörpers höhere Lastspielzahlen N gegenüber Prüfkörpern mit niedrigeren Frequenzen bei gleichen Beanspruchungen. Die drei Geraden (Wöhler-Kurven) zeigen einen konvergenten Verlauf. Eine graphische Extrapolation ergibt einen Schnittpunkt der Geraden bei einer Zeitschwingfestigkeit von rund 125 N/mm² und einer Schwingspielzahl N von $\log N = 6,2$. Im doppelt logarithmisch dargestellten Massstab lassen sich die Ergebnisse nicht befriedigend durch Regressionsgeraden annähern, da die Wöhler-Kurven mit zunehmender Schwingspielzahl steiler verlaufen. Dies bestätigt die Ergebnisse

Bild 3. Prüfkörper für Zugschwellversuche vor und nach der Prüfung. Material der Lieferung «1»



einer früher durchgeführten Studie [11]. In der vorliegenden Arbeit wurden die Regressionsgeraden anhand der logarithmischen Mittelwerte der Schwingspielzahlen N bei Bruch auf jeder Spannungsebene bestimmt. Die Regressionskoeffizienten erreichten in allen Fällen Werte grösser als 0,99.

Einfluss der Belastungszeit

In Bild 6 sind die Daten aus Bild 5, anstatt in Abhängigkeit der Schwingspielzahl, in Abhängigkeit der aufsummierten Belastungszeit (Anzahl der schwingenspiele N bis zum Bruch multipliziert mit der Zeit t_s gemäss Bild 2), dargestellt. Ausserdem finden sich die Ergebnisse von Zeitstandversuchen. Diese können durch folgende Regressionsgerade angenähert werden:

$$(4) \sigma_o = 369 - 16,5 \log t_s$$

Aus Bild 6 ist klar ersichtlich, dass der geprüfte Verbundwerkstoff unter schwingender Beanspruchung bei allen untersuchten Frequenzen bedeutend mehr geschädigt wird als unter statischer Beanspruchung. Die Steigung der sich aus den Schwingversuchen ergebenden Regressionsgeraden ist über doppelt so gross im Vergleich zur Geraden der Zeitstandversuche. Aus der Darstellung wird auch klar, dass sich die Ergebnisse aus den Schwingversuchen in dieser Darstellung nicht überlagern lassen, wie dies nach [13] für ähnlich aufgebaute Verbundwerkstoffe mit Kohlenstoffasern der Fall ist. D. h., die kumulative Belastungszeit hat einen dominanten Einfluss auf die Lebensdauer eines Prüfkörpers. Die Regressionsgeraden der Schwingversuche zei-

gen mit abnehmenden Spannungen – im Gegensatz zu Bild 5 – einen divergenten Verlauf.

Bei hohen Spannungen müssen die Wöhler-Kurven der Zeitschwingversuche durch die Zeitstandkurve begrenzt werden. Falls jedoch die Regressionsgeraden in Bild 5 bis $\log N = 0$ extrapoliert und in Bild 6 dargestellt werden, liegen diese durch horizontale Marken dargestellten Werte über der Zeitstandkurve. Daraus kann geschlossen werden, dass die lineare Extrapolation nach links (Bild 5) in den Bereich niedriger Schwingspielzahlen nicht korrekt ist. Die Zeitschwingfestigkeiten weisen scheinbar in diesem nicht experimentell belegten Abschnitt ein Plateau auf. Die Steigung der Zeitstandkurve (Gl. 4) von $-6,5 \text{ N/mm}^2$ je Dekade Standzeit würde für den vertikalen Abstand zwischen der 1,0- und der 0,01-Hz-Wöhler-Kurve in Bild 5 beim ersten Lastspiel ($\log N = 0$), beruhend auf der Zeit t_s gemäss Bild 2, unter Vernachlässigung des Rests der Belastungskurve einen Wert von $33,0 \text{ N/mm}^2$ erwarten lassen. Der Abstand der extrapolierten Kurven beträgt aber 50 N/mm^2 . D. h., dass die Festigkeitswerte für ein Schwingspiel, wie sie dem Bild 5 entnommen werden, nicht exakt mit den Werten, die sich anhand der Zeitstandkurve berechnen lassen, übereinstimmen. Wie zu erwarten war, korrespondieren höhere Prüffrequenzen mit höheren Spannungen, die Beträge sind jedoch grösser, als im Vergleich zu den Zeitstandwerten anzunehmen wäre. Diese Beobachtungen zeigen, dass die Verhältnisse bei den ersten Lastspielen sehr komplex sein müssen, was nicht

erstaunlich ist. Trotz der erwähnten Widersprüche mag die Frequenzabhängigkeit im Bereich der hohen Spannungen den Einfluss des Zeitstandverhaltens widerspiegeln. Dies zeigt sich, bedingt durch die längere Zeit unter Oberspannung, in Form einer Verminderung der Schwingfestigkeit für das erste Schwingenspiel. Im Gegensatz dazu bestimmt bei niedrigen Spannungen die Anzahl Schwingenspiele die Bruch-Schwingenspielzahl. Dies ist eine Erklärung für den konvergenten Verlauf der Wöhler-Kurven in Bild 5.

In Bild 7 sind die Wöhler-Kurven von zusätzlichen Varianten im Beanspruchungsverlauf dargestellt: einerseits nadelförmige Belastung von einer Minimal- zu einer Maximallast, andererseits nadelförmige Ent- und Wiederbelastung, ausgehend von einer Maximallast. Die nadelförmigen Be- bzw. Entlastungen erfolgten in Intervallen von 10 s entsprechend Bild 2. Diese Untersuchungen erfolgten an Material der Lieferung «2». Die in Bild 7 dargestellten Ergebnisse für rechteckförmige Beanspruchung wurden, um vergleichbare Resultate zu erhalten, ebenfalls mit Material der Lieferung «2» durchgeführt.

Das Material der Lieferung «2» zeigt gegenüber demjenigen der Lieferung «1» allgemein eine höhere Festigkeit. Die drei Wöhler-Kurven in Bild 7 lassen sich durch die folgenden Regressionsgeraden annähern:

- (5) $\sigma_o = 446 - 49,9 \log N$
- (6) $\sigma_o = 508 - 58,8 \log N$
- (7) $\sigma_o = 428 - 42,6 \log N$

Die Gleichung (5) entspricht der recht-

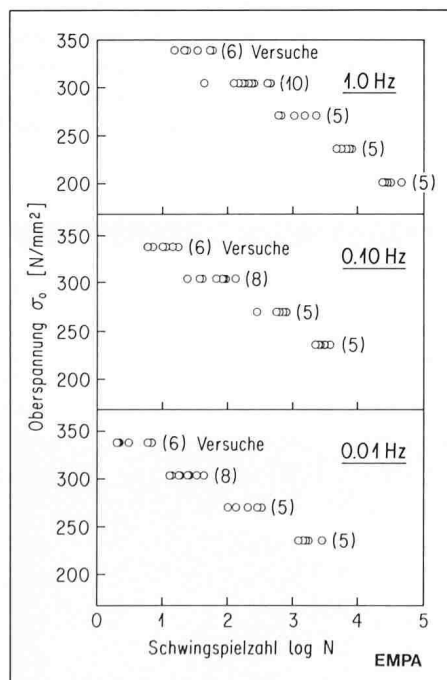
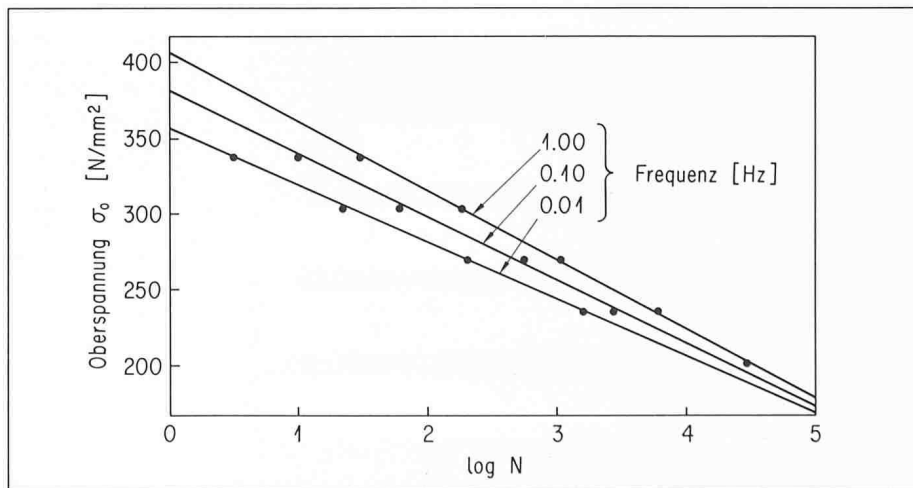


Bild 4 (links). Versuchsergebnisse für Zugschwellversuche mit rechteckförmiger Belastung bei verschiedenen Schwingspielfrequenzen. Die Unterspannung betrug in allen Fällen 17 N/mm^2 . Material der Lieferung «1»

Bild 5. Wöhler-Kurven für verschiedene Schwingspielfrequenzen. Bei den eingetragenen Punkten handelt es sich um Mittelwerte der Logarithmen der Bruch-Schwingenspielzahlen ($\log N$). Die Wöhler-Kurven wurden nach dem Verfahren der kleinsten Quadrate eingepasst. Material der Lieferung «1»



eckförmigen, die Gleichung (6) der nadelförmigen Be- und die Gleichung (7) der nadelförmigen Entlastung.

Die Zeitstandkurve für das Material der Lieferung «2» wird durch die Gleichung (8) beschrieben.

$$(8) \sigma_0 = 424 - 23,4 \log t$$

Diese Zeitstandversuche dauerten in einzelnen Fällen bis zu 10^7 Sekunden (116 Tage).

Die Ergebnisse der Wöhler-Kurven für nadelförmige Be- bzw. Entlastung konvergieren rasch zu ähnlichen Standzeiten bei weniger als 10^5 Schwingspielen. Dieses Ergebnis ist im Vergleich zu jenem in Bild 5 überraschend. Für diese beiden Belastungsmodi ist ein grösserer Unterschied und vor allem ein langsames Konvergieren der Wöhler-Kurven erwartet worden. Nach den Gleichungen (5) für rechteckförmige und (6) für nadelförmige Belastungen schneiden sich diese Kurven bei $\log N = 5,9$ nahe beim Punkt in Bild 5. D.h., diese Daten stehen in Übereinstimmung mit jenen, die an aus der Lieferung «1» hergestelltem Material gewonnen wurden. Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten des unter nadelförmiger Entlastung untersuchten Materials der Lieferung «2» ist unklar. Es mag sich um einen wirklichen Einfluss des Materials oder um Unregelmässigkeiten im Versuchsablauf handeln. Der einzige bekannte Unterschied zwischen den Untersuchungen an den Materiallieferungen «1» und «2» im Versuchsablauf besteht darin, dass bei den Versuchen «2» ein kurzfristiges Überschwingen der Belastung von maximal 2%, wie in Bild 2 durch die gestrichelten Linien dargestellt, zugelassen wurde. Warum aber dadurch die gleich gefahrenen Versuche unter rechteckförmiger Belastung in Bild 7 nicht beeinflusst wurden, ist nicht erklärlich. Falls die unter nadelförmiger Entlastung durchgeführten Versuche nicht berücksichtigt werden, unterstützen die Ergebnisse in Bild 7 sowohl qualitativ als auch quantitativ die früheren Folgerungen über die Frequenzabhängigkeit, wie noch gezeigt wird.

Einfluss der schwingenden Beanspruchung auf die Schädigung

Schwingende Beanspruchung schädigt den zur Diskussion stehenden Faserverbundwerkstoff rascher als Zeitstandsbeanspruchung, wenn auch ein gewisser Einfluss der Zeit unter Beanspruchung je Schwingenspiel über einen grossen Bereich der Standzeit offensichtlich ist. Bild 8 zeigt eine vereinfachte Darstellung dieser möglichen Einflüsse. Eine schwingende Beanspruchung verursacht in der Regel eine Herabsetzung

der Restfestigkeit von Prüfkörpern. Entsprechende Versuchsergebnisse für das untersuchte Material werden in [10] und [14] gegeben. Nicht nur die Restfestigkeit, sondern auch die Zeitstandfestigkeit wird vermindert, wie in [3, 15] für Lamine mit willkürlicher Faseranordnung gezeigt. In Bild 8 findet sich die Darstellung einer Serie von Zeitstandkurven. Jede dieser Kurven weist je Dekade Zeit dieselbe, auf der Kurzzeitfestigkeit beruhende, prozentuelle Verminderung der Zeitstandfestigkeit auf. Die Kurven sind, unter Einbezug der Abminderung der ursprünglichen Kurzzeitfestigkeit, durch die Gleichung (4) beschrieben. Diese angenommenen Kurven, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht experimentell nachgewiesen wurden, sind in Übereinstimmung mit [15].

Im Schwingversuch betrage die Oberspannung, welche für die Abminderung der Restzeitstandfestigkeit massgebend ist, wie in Bild 8 dargestellt, 250 N/mm^2 . Ein Prüfkörper versagt am Ende des ersten Schwingespieles, falls die Zeitstandkurve die gestrichelte Linie der Oberspannung zur Belastungszeit t_s schneidet. Bei einer kürzeren Belastungszeit t_s und der gleichen Oberspannung wäre eine grössere Anzahl Schwingspiele bis zum Bruch oder eine zusätzlich abgeminderte Restzeitstandfestigkeit erforderlich. Wieviel grösser die Bruchschwingspielzahl N für eine Prüffrequenz von $1,0 \text{ Hz}$ gegenüber $0,01 \text{ Hz}$ ist, hängt davon ab, wie rasch sich die Kurve der Restzeitstandfestigkeit ändert. Ergebnisse in [15] deuten darauf hin, dass sich diese Kurve zwischen 50 und 75% der Lebenserwartung eines Prüfkörpers, beim Erreichen eines charakteristischen Schädigungszustandes [16], stabilisiert. In der letzten Phase des Schädigungsprozesses fällt die Restzeitstandfestigkeit stark ab. Das eigentliche Versagen wird meist auf örtliche Unregelmässigkeiten zurückgeführt [9, 15]. Im Rahmen dieser Arbeit trat der Bruch immer auf der freien Prüfkörperlänge, jedoch nahe bei den Schultern, ein. Vor dem Versagen war es jeweils nicht möglich, die Entwicklung von makroskopischen Rissen zu beobachten. Nach dem Bruch konnten jedoch im Bereich der nicht gebrochenen Schulter kleine Gruppen von gebrochenen Faserbündeln festgestellt werden.

Der Einfluss der Frequenz auf die Bruch-Schwingspielzahl N (Bild 8) ist abhängig von der Steigung der Zeitstandkurve. Die Diskussion würde bedeutend vereinfacht, wenn die Restzeitstandfestigkeit in einem gewissen Bereich nur durch die Anzahl der durchgeführten Schwingspiele und nicht

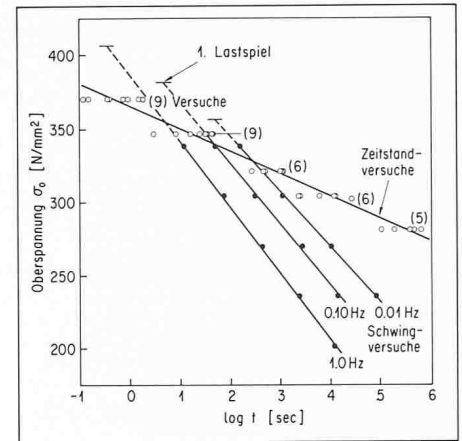


Bild 6. Ergebnisse von Bruchversuchen unter schwingender bzw. Zeitstand-Beanspruchung in Abhängigkeit der kumulativen Zeit ($\log t$) unter Oberspannung. Material der Lieferung «1». ● = Schwingversuche, ○ = Zeitstandversuche

Bild 7. Wöhler-Kurven für rechteckförmige Belastung, nadelförmige Belastung von einer Minimal- zu einer Maximalast (o) und nadelförmige Ent- und Wiederbelastung, ausgehend von einer Maximalast (Δ)

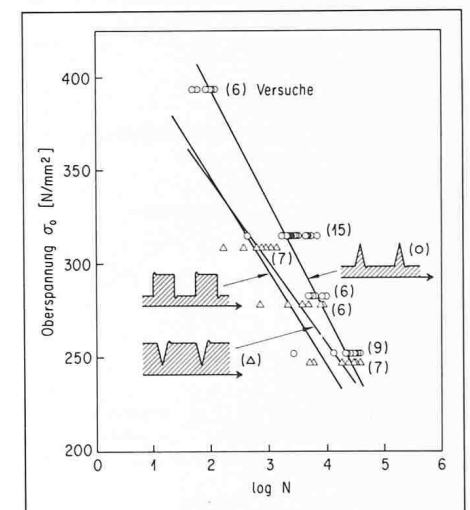
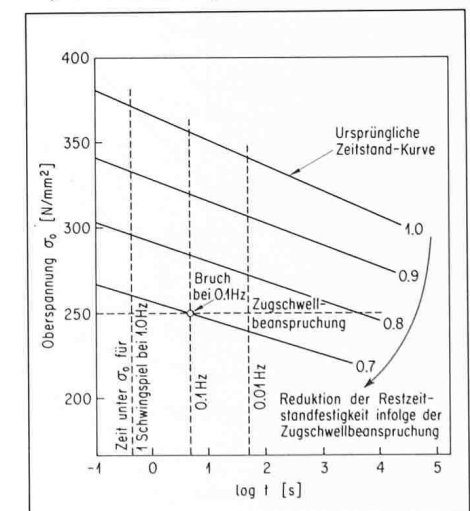


Bild 8. Schematische Darstellung des angenommenen Einflusses der Schwingspielfrequenz bei rechteckförmiger Beanspruchung, falls nur die Abminderung der Restzeitstandfestigkeit als für das Versagen verantwortlich betrachtet und kumulative Zeiteinflüsse vernachlässigt werden



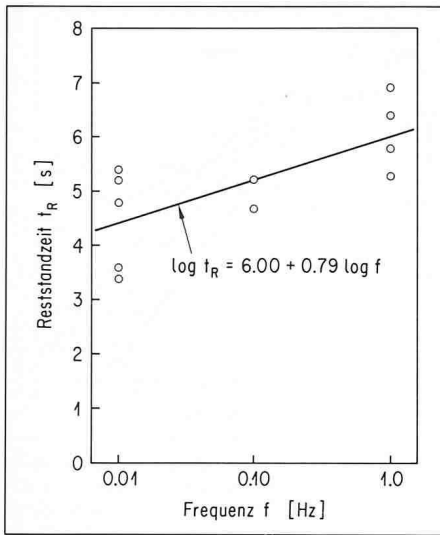


Bild 9. Reststandzeit unter einer Spannung von 270 N/mm² nach einer Vorbeanspruchung von je 100 Schwingspielen mit einer Oberspannung von 270 N/mm² und verschiedenen Schwingfrequenzen. Material der Lieferung «1»

Bild 10. Normalisierte Steigung der Wöhler-Kurven in Abhängigkeit der Zeit unter Oberspannung t_s je Schwingspiel

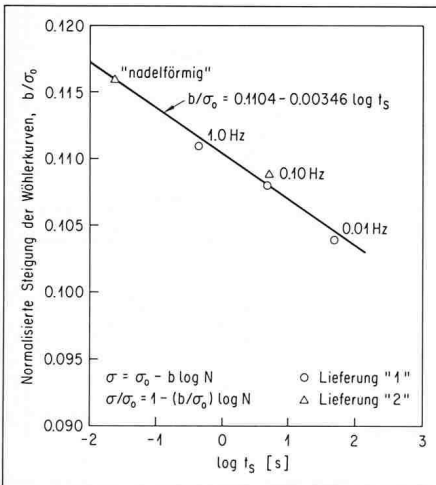
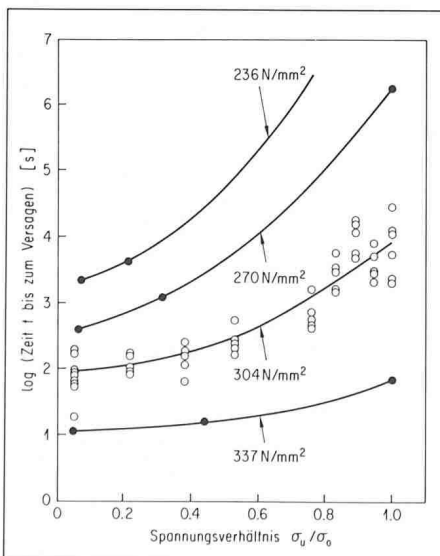


Bild 11. Kumulative Standzeit bis zum Versagen in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses σ_u/σ_0 für verschiedene Oberspannungen. Material der Lieferung «1». ● = Mittelwerte, ○ = Einzelwerte



auch noch durch die Schwingspielfrequenz und die Belastungsform (Bild 2) bestimmt würde. Die vorhandenen Daten (Bild 9) zeigen, dass eine derart vereinfachende Annahme nicht gerechtfertigt wäre. Prüfkörper wurden zwischen 17 und 270 N/mm² bei drei verschiedenen Frequenzen je 100 Schwingspielen unterworfen. Unmittelbar im Anschluss an das letzte Schwingspiel erfolgte jeweils eine Zeitstandbeanspruchung bei 270 N/mm². Es handelte sich um Material der Lieferung «1». Bei den Schwingversuchen erreichte das Überschwingen (Bild 2) maximal 5%. Die in Bild 9 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen einen bedeutsamen Trend zu einer geringeren Restzeitstandfestigkeit für geringere Schwingspielfrequenzen. Einhundert Schwingspiele bei 0,01 Hz schädigen den Verbundwerkstoff mehr als die gleiche Zahl bei 1,0 Hz.

Die mit den Gleichungen (1), (2), (3), (5) und (6) beschriebenen Wöhler-Kurven zeigen alle die Tendenz zu höheren Anfangsfestigkeiten bei kürzeren Belastungszeiten t_s verbunden mit entsprechend grösseren Festigkeitseinbüssen während dem Schwingversuch. Die Ergebnisse lassen sich gut mit folgender Gleichung beschreiben:

$$(9) \quad \sigma = \sigma_0 - b \log N$$

Eine Erhöhung der Anfangsfestigkeit σ_0 durch eine Verkürzung der Belastungszeit t_s hat eine Vergrösserung der Steigung b zur Folge. Dies steht in Übereinstimmung mit der früher gemachten Feststellung, dass glasfaserverstärkte Kunststoffe, auch bei stark verschiedenen Festigkeiten, je Dekade Schwingspiele ungefähr 10% der Anfangsfestigkeit einbüßen [1, 7]. Dementsprechend wird der Quotient b/σ_0 ungefähr 0,10.

Die Ergebnisse der Schwingversuche in dieser Arbeit liegen in einem ähnlichen Bereich. Aus Bild 10 lässt sich ein gesetzmässiger Einfluss der Belastungszeit t_s auf das Verhältnis b/σ_0 herleiten. In dieser Darstellung wurden die Ergebnisse der Gleichung (7), aus früher erwähnten Gründen, nicht berücksichtigt. Eine Verkürzung der Belastungszeit t_s hat, wie bereits erwähnt, nicht nur eine Erhöhung der Anfangsfestigkeit σ_0 , sondern auch des Quotienten b/σ_0 , d.h. der Abminderung der Zeitschwingfestigkeit je Dekade der $\log t_s$ mit 3,1% für die Schwing- und 4,3% für die Standversuche [Gleichung (4)] in der gleichen Grössenordnung liegen. Dementsprechend ist die Anfangsschwingfestigkeit σ_0 höher bei

kürzeren Belastungszeiten t_s , aber ein ähnlich grosser Betrag dieser Festigkeit geht in der Folge je Dekade Schwingspiele wieder verloren. Die Wöhler-Kurven weisen deshalb einen konvergenten Verlauf auf.

Bei Temperaturen unter 213...223 K ist Glas nicht mehr der Spannungsrissskorrosion unterworfen [17, 18]. Da jedoch auch bei diesen Temperaturen unter schwingender Beanspruchung noch Versagen eintritt, ist dies auf eine Schädigung infolge schwingender und nicht Zeitstandbeanspruchung zurückzuführen. Das Verhältnis b/σ_0 ist auch im Falle von tiefen Temperaturen nahezu gleich wie im Falle des Bildes 10 [19].

Einfluss des Spannungsverhältnisses

Mit einer beschränkten Anzahl von Versuchen wurde der Einfluss der Spannungsamplitude, bei jeweils konstanter Oberlast, auf die Standzeit untersucht. In Bild 11 sind die Ergebnisse für diese, unter rechteckförmiger Belastung durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Die Unterlast variierte jeweils von 1,7 N/mm² bis zur Oberlast, das Spannungsverhältnis dementsprechend von 0,05 bis 1,00. Letzterem entspricht eine reine Zeitstandbeanspruchung. Für diese an Material der Lieferung «1» durchgeführten Versuchsreihen erlaubte die vorgewählte Regelung der Prüfmaschine kein Überschwingen. Abgesehen von Beanspruchungen mit Oberspannungen, die bereits nahe bei den Zeitstand-Bruchspannungen liegen, hat die Erhöhung der Unterspannung eine kontinuierliche Verlängerung der Standzeit zur Folge. Schwingende Beanspruchungen mit kleinen Amplituden beeinflussen die Standzeit im Vergleich zur Zeitstandbeanspruchung kaum. Bei einer Oberspannung von 304 N/mm² zeigen die Ergebnisse in Bild 11 für Spannungsverhältnisse zwischen 0,8 und 1,0 eine zunehmende Streuung. Für die Schwingversuche wurden die kumulativen Standzeiten konsequent wie bisher durch die Multiplikation der Anzahl Schwingspiele mit der Belastungszeit t_s gemäss Bild 2 berechnet. Dies wird jedoch mit zunehmender Unterspannung fraglicher. Wie erwartet, ist der Einfluss des Spannungsverhältnisses bei hohen Oberspannungen bedeutend geringer. Bei tieferen Spannungen ist die Bedeutung des Quotienten σ_u/σ_0 dagegen gross.

Die Ergebnisse in Bild 11 stehen in Übereinstimmung mit Untersuchungen, die an nicht imprägnierten E-Glasfaserbündeln durchgeführt wurden [1, 7]. D.h., die in Bild 11 dargestellten Zusammenhänge sind vor allem auf die Eigenschaften der Verstärkungfasern zurückzuführen.

Schlussfolgerungen

Der Verlauf der Wöhler-Kurven wird bei E-Glas/Epoxidharz-Kreuzverbunden durch die Belastungsform und die Schwingungsfrequenz beeinflusst. Dies gilt auch, wenn die Versuchsparameter so gewählt werden, dass die Schwingversuche zu keiner merklichen Eigenerwärmung der Prüfkörper führen. Mit abnehmender Oberspannung zeigen die bei verschiedenen Schwingungsfrequenzen ermittelten Wöhler-Kurven einen konvergenteren Verlauf. Im allgemeinen verursacht die schwingende Beanspruchung eine grössere Schädigung als die Zeitstandsbeanspruchung. Die Wöhler- bzw. Zeitstand-Kurven konvergieren jedoch mit abnehmender Spannungsamplitude.

Adresse der Verfasser: Dr. John F. Mandell, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Mass. 02139, USA; Urs Meier, dipl. Bauing. ETH, Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA), 8600 Dübendorf.

Literatur

- [1] Mandell J.F.: «Developments in Reinforced Plastics» - 2; G. Pritchard, Ed. Applied Science Publishers, London, 1982, p. 67
- [2] Hahn T.H.: Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference), ASTM STP 674, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1979, p. 383
- [3] Owen M.J.: Static and Fatigue Strength of Glass Chopped Strand Mat/Polyester Resin Laminates. Proceedings of ASTM Symposium on Short Fiber Reinforced Composite Materials, Minneapolis, April 1980
- [4] Agarwal B.D. and Broutman L.J.: Analysis of Performance of Fiber Composites, Wiley, New York, 1980, p. 223
- [5] Stinchcomb W.W. and Reifsnider K.L.: Fatigue Mechanisms, ASTM STP 675, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1979, p. 762.
- [6] Hertzberg R.W. and Manson J.A.: Fatigue of Engineering Plastics, Academic Press, New York, 1980, p. 185
- [7] Mandell J.F., Huang D.D. and McGarry F.J.: «Composites Technology Review», Vol. 3, p. 96
- [8] Lifshitz J.M.: «Composite Materials», Vol. 5, Fracture and Fatigue, L.J. Broutman, Ed., Academic Press New York, 1974, p. 249
- [9] Broutman L.J. and Sahu S.: Proceedings of the 24th Annual Conference of the RP/C Institute, Paper 11D, Society of the Plastics Industry, New York, 1969
- [10] Broutman L.J. and Sahu S.: «Composite Materials»: Testing and Design (Second Conference), ASTM STP 497, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1972, p. 170
- [11] Mandel J.F. and Meier U.: «Fatigue of Composite Materials», ASTM STP 569, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1975, p. 28
- [12] Agarwal B.D. and Dally J.W.: «Journal of Materials Science», Vol. 10, 1975, p. 193
- [13] Sendekyj G.P. and Stalnaker H.D.: «Composite Materials»: Testing and Design (Fourth Conference), ASTM STP 617, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1977, p. 39
- [14] Mandell J.F., McGarry F.J., Im J. and Meier U.: Failure Modes in Composites II, Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, 1974, p. 33
- [15] Howe R.J. and Owen J.J.: Progressive Damage of a Glass Reinforced Plastic During Fatigue, in Proceedings of the Eighth International R.P. Conference, Paper 21, British Plastics Federation, Brighton, England, 1972
- [16] Reifsnider K.: «International Journal of Fracture», Vol. 16, 1980, p. 563
- [17] Charles R.J.: «Fracture», B.L. Averbach, D.K. Felbeck, G.T. Hahn and D.A. Thomas, Eds., Technology Press (M.I.T), Cambridge, and Wiley, New York, 1959, p. 225
- [18] Cameron N.M.: «Glass Technology», Vol. 9, 1968, p. 14
- [19] Chamberlain D.W., Lloyd B.R. and Tennent R.L.: Determination of the Performance of Plastic Laminates at Cryogenic Temperatures, Air Force Materials Laboratory Report ASD-TDR-62-794 Part II, 1964

Überlegungen zur Optimierung von Leichtbaustützen aus Faserverbundwerkstoffen

Von P. Lutz, Basel

Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen stellt eine Herausforderung an den dimensionierenden Ingenieur dar, indem ihm die Möglichkeit gegeben wird, zusammen mit der makroskopischen Optimierung des Bauteiles zugleich auch den Werkstoff selbst in seinem inneren Aufbau zu optimieren. Insbesondere in Luft- und Raumfahrtanwendungen, wo neben den mechanischen Anforderungen oft auch Sekundärbeanspruchungen wie grosse Temperaturwechsel, Vakuum usw. auftreten, ist für eine optimale Werkstoffauslegung der Blick ins Werkstoffinnere unerlässlich.

Einleitung

Die Luft- und Raumfahrtindustrie hat schon seit jeher Pionierarbeit im Ersteinsatz von neuen Werkstoffen geleistet. So waren sie es, die schon früh Verklebungen als ein taugliches Verbindungsmittel anerkannten, und sie waren auch mit unter den ersten, die Faserverbundwerkstoffen zum eigentlichen Durchbruch verhelfen. Für diese Pionierleistung gibt es viele Gründe:

- Nirgendwo sonst spielt der Faktor Masse eine so entscheidende Rolle
- Besonders in der Raumfahrt können oft spezielle Anforderungen mit herkömmlichen Werkstoffen nicht mehr erreicht werden.
- Die Wirksamkeit wurde zumindest in der Anfangsphase des Luft- und Raumfahrtzeitalters über die Kostenfrage gestellt.

Der Anteil von Faserverbundwerkstoffen hat in der Luft- und Raumfahrt be-

reits eine beachtliche Grösse erreicht. Insbesondere in Sekundärbauteilen ist dieser Werkstoff kaum mehr wegzudenken. Strukturelle Teile in Composite-Bauweise findet man auch schon zahlreich; das Potential ist jedoch dort noch bei weitem nicht ausgeschöpft.

Mit den Faserverbundwerkstoffen wird dem dimensionierenden Ingenieur nicht einfach ein neuer Werkstoff in die Hand gegeben, sondern es wird auch sein Aufgabenbereich vergrössert. Während er bei der Optimierung eines Bauteiles mit einem herkömmlichen Werkstoff einzig die äussere Geometrie und die Materialstärken variieren kann, eröffnet sich ihm mit den Faserverbundwerkstoffen eine neue Dimension: Er kann den Werkstoff selbst massschneiden und demzufolge als neue Variable in die Optimierung einbeziehen.

Die konsequente Ausnützung dieser neuen Dimension erfordert aus vielerlei Gründen einen beträchtlichen Mehraufwand:

- bei gegebenen Grundmaterialien (Fasertyp, Harzsystem) ist der resultierende Werkstoff von einer Vielzahl von Variablen abhängig: z.B. Faserorientierungen, Packungsdichte