

Zur Frage der Schadensakkumulation bei Bauteilen aus GFK

T 2397

T 2397

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Abschlußbericht

über das Forschungsvorhaben

Zur Frage der Schadensakkumulation bei Bauteilen aus GFK

L. Franke und H.-J. Meyer

Auftraggeber :
Institut für Bautechnik, Berlin
Az.: IV 1-5-445/85

Dezember 1991

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Experimentelle Realisation	4
2.1	Verifikation des mechanischen Verhaltens	4
2.1.1	Herstellung geeigneter Probekörper	4
2.1.2	Versuchsdurchführung	11
3	Bewertung der Versuchsergebnisse	18
3.1	Zeitstandeigenschaften des Laminates	18
3.1.1	Bruchzeitpunkte bei konstanter Lasteinwirkung	18
3.1.2	Bruchzeitpunkte bei zyklischer Lasteinwirkung	21
3.1.3	Bruchzeitpunkte bei stufenförmiger Lasteinwirkung	24
3.1.4	Bruchzeitpunkte bei nicht ruhender Belastung	27
3.2	Dehnungsverlauf	29
3.3	Schädigungsverlauf	32
4	Folgerungen für die Bemessung von GFK gegen Materialversagen	37
4.1	Darstellung des aktuellen Bemessungsverfahrens	37
4.2	Vorschläge für das Bemessungsverfahren für glasfaserverstärkte Kunststoffe im Bauwesen	39
5	Zusammenfassung	48

1 Einleitung

Unsicherheiten bei der Bemessung von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK), insbesondere im Hinblick auf die Frage der Akkumulation der Auswirkungen von veränderlichen Zeitstandlasten gaben Anlaß, das mechanische Verhalten des Materials näher zu untersuchen.

Auf der Basis von Ergebnissen einer Reihe von Zug- und Zeitstandversuchen mit unterschiedlichen Lasten an Laminatproben wird eine geschlossene Beschreibung der Laminatreaktion vorgenommen und vorgestellt. Von besonderem Interesse ist hier der niedrige Lastbereich, der bei der Dimensionierung zu berücksichtigen ist, da die Beanspruchung des Bauteils infolge Lasteinwirkung derzeit „S-fach“ zu berücksichtigen sind. S repräsentiert den globalen Sicherheitsfaktor. Dieser wird in den Bau- und Prüfgrundsätzen für oberirdische Behälter und Behälterteile des IfBT [1] (Erläuterungen in [5]) mit $S = 2$ für den Festigkeitsnachweis angegeben. Außerdem werden im Hinblick auf die Verhinderung der Rißbildung in Deckschichten einzuhaltende Grenzdehnungen vorgeschrieben. In den Richtlinien für Windkraftanlagen [3] (Erläuterungen in Wölfel [2]) beträgt der dort eingeführte Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_m = 2,2$. Er berücksichtigt jedoch noch eine Reihe von Einflußfaktoren.

Ziel des Forschungsprojektes war die Ermittlung des Verformungs- und Zeitstandverhaltens bzw. der resultierenden Materialschädigungsgrade bei stufenförmiger und zyklischer Einwirkfunktion zur Klärung der Frage, ob und in welchem Umfang eine Schadensakkumulation auftritt und im Bemessungsverfahren gegen Materialversagen zu berücksichtigen ist.

Derzeit wird der Schadensfortschritt in erster Linie über die Dehnung des Materials erklärt und beschrieben und in Dehnungen „oberhalb und unterhalb der Rißbildungsgrenzen“ geteilt [4]. Um den Schaden nun auch bei niedrigen Lasteinwirkungen greifbar zu machen und von den Dehnungen zu separieren, war es notwendig, den Schädigungsfortschritt experimentell zu erfassen. Dies geschah mit Hilfe eines Laser- Reflexionsmeßverfahrens.

Am Schluß des Berichtes werden einige Vorschläge im Hinblick auf die Bemessung gegen Materialversagen unterbreitet.

2 Experimentelle Realisation

Um das mechanische Verhalten bei unterschiedlichen Lasteinwirkungen zu prüfen, wurden insgesamt über 500 Versuche an Laminatproben durchgeführt. Hierzu wurden zum einen die einwirkenden Lasten, zum anderen die Harzzusammensetzungen und die Probenformen variiert. Mittels Registrierung der Dehnungen, der Bruchzeitpunkte sowie des Schädigungsverlaufes konnte das mechanische Verhalten zeitabhängig verfolgt werden. Die mechanischen Versuche wurden an einer servohydraulischen Prüfmaschine der Firma Schenck und an Zeitständen mit Federpaketen zur Kraftkonstanthaltung sowie an Zeitständen nach dem Hebelprinzip eigener Herstellung durchgeführt. Im einzelnen sollen die Prüfbedingungen nachfolgend näher erläutert werden.

2.1 Verifikation des mechanischen Verhaltens

2.1.1 Herstellung geeigneter Probekörper

Als Matrixmaterial diente ungesättigtes Polyesterharz Leguval W16-3 der Firma DSM Kunstharze GmbH (Niederlande). Durch definierte Zugabe von Härter, Beschleuniger, Inhibitor, Verzögerer und Styrol konnte unter Berücksichtigung der Herstellerangaben eine definierte Verarbeitungszeit (Topfzeit) von ca. 30 Minuten erreicht werden, die zur Herstellung von zwei im folgenden noch zu beschreibenden Plattenlaminaten notwendig war. Außerdem konnte mit der oben gewählten Rezeptur eine gute Transparenz der Proben erzielt werden, wie sie für Rißbeobachtungen unerlässlich ist.

Die Harzzusammensetzung mit Leguval W16-3 allein ergab eine zu niedrige Bruchdehnung und einen sehr hohen Elastizitätsmodul. Diese Eigenschaften erwiesen sich im Verbund mit Glasfasern als unvorteilhaft. Dies äußerte sich durch eine zu geringe Kurzzeitfestigkeit und große Streuungen im Zeitstandverhalten. Durch sukzessive Elastifizierung mittels Beimengung des Harzes Leguval E81 der Firma DSM, konnten die Verbundeigenschaften verbessert werden. Um den Weg zum optimalen Harz zu verdeutlichen, sind in Tabelle 1 die mechanischen Eigenschaften

von vier verschiedenen Matrixharzen im Glasfaserverbund aufgezeigt. Ein 50 % - iger Anteil beider Harze brachte die besten Ergebnisse. Die Kraft- Dehnungslinien der Reinharzprobe und des Laminates dieser Zusammensetzung sind in Bild 1 vergleichend eingetragen. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der oben beschriebenen Laminare und vergleichend die mechanischen Werte von unidirektional bewehrten GFK- Stäben dargestellt. Die Streuungen der Festigkeitsverteilung sind hier sehr viel geringer als bei glasfasermattenbewehrten Laminatproben und der Mittelwert der Festigkeit ist um eine Größenordnung höher. Für eine nähere Beschreibung der Versuchsergebnisse und des Bruchmechanismus sei auf die Literatur verwiesen (u. a. [14],[16],[17] [21]).

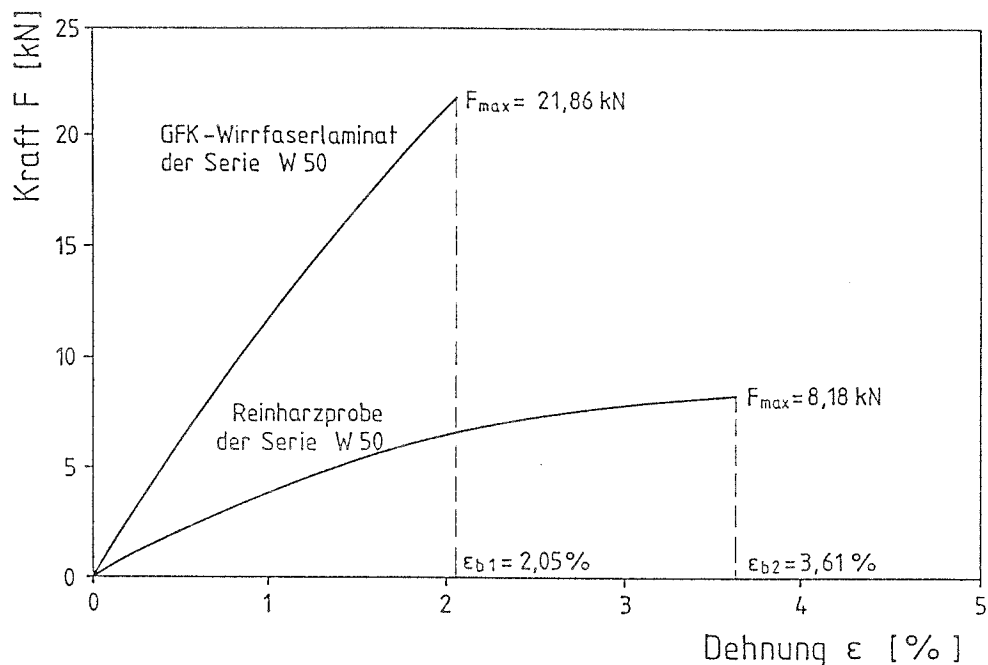


Bild 1: Kraft- Dehnungslinien einer Reinharzprobe und der aus dem Harz hergestellten GFK- Probe

Bild 2 zeigt den Vergleich des Zeitstandverhaltens zweier Versuchsreihen mit unterschiedlichen Harzzusammensetzungen. Das spröde Material mit 60% Leguval W16 und 40% Leguval E81 zeigte sowohl größere Streuungen als auch einen sehr flachen Zeitstandverlauf, der wenig geeignet erschien, Schadensakkumulationsregeln zu verifizieren. Hingegen zeigten die weicheren Proben zufriedenstellende Ergebnisse.

Zur Herstellung der Proben wurden zunächst Platten der Größe $400 * 450 \text{ mm}^2$ mit

MATERIALKENNWERTE				
	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Variations- koeffizient %	E - Modul [N/mm ²]	Bruchdehnung [%]
Polyesterharz ¹				
50 % W 16 50 % E 81	32	4%	1700	3,5
Laminat ²				
50 % W 16 ³ 50 % E 81	120	4,7%	7400	2,1
60 % W 16 40 % E 81	116	≈ 4,2%	8300	1,8
100 % W 16	95	≈ 4,2%	11000	1,35
100 % E 81	102	-	4840	2,4
Unidirektional bewehrte GFK- Stäbe ⁴				
UP- Harzmatrix	1550	2,6%	56000	3,1
EP- Harzmatrix	1750	1,4%	56000	3,6
E- Glas Roving	1150	-	76000	≈ 1,4

Tabelle 1: Kennwerte der GFK- Materialien

- 1- Mittelwert aus 7 Einzelversuchen
- 2- Mittelwert aus mindestens 14 Einzelversuchen
- 3- Mittelwert aus 36 Einzelversuchen
- 4- Mittelwert aus mindestens 6 Einzelversuchen

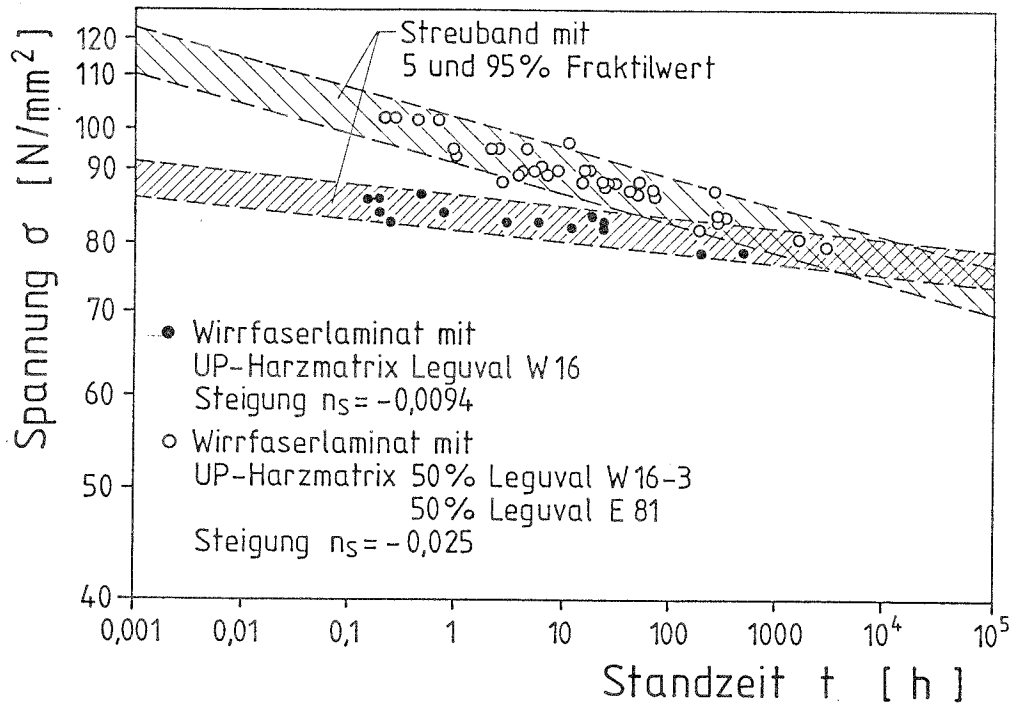


Bild 2: Zeitstandvergleich mit spröder und mit weicher Matrix

5 Lagen Glasfasermatte M113 der Firma Gevetex mit einem Flächengewicht von $G = 450\text{g/m}^2$ im Handauflegeverfahren zwischen zwei Glasplatten hergestellt. Nach einem Tag Aushärtung konnten die Laminatplatten ausgeschalt und für 24 Stunden zum Tempern bei 80°C in den Trockenschrank gelegt werden. Die Herstellungsbedingungen sind in Tabelle 2 noch einmal zusammengefaßt.

Aus den ausgehärteten Platten wurden Proben der Breite 40 mm und 50 mm mit einer speziell hierfür ausgewählten kunststoffgebundenen Diamanttrennscheibe mit einer Diamantkörnunggröße D81 und einer Diamantkonzentration von C31 der Firma Ernst Winter und Sohn (Hamburg) geschnitten. Aus den 50 mm breiten Streifen konnten mit Hilfe einer Frässhablone in Anlehnung an die Norm EN 61 Schulterproben hergestellt werden (vergl. Bild 3). Die 40 mm breiten Streifen wurden direkt in geeignete Halterungen gespannt. Da jedoch die Schulterproben unter Zugbelastung zu fast 90 % im Schulteransatz versagten, wurde wieder auf Proben konstanter Breite zurückgegriffen. Diese erwiesen sich als die wesentlich geeignetere Probenform und wurden somit ausschließlich für die weiteren Versuche verwandt. Verankerungsbrüche waren so gut wie nicht festzustellen.

Um für dynamische Versuche den Schlupf und die Reibung in den Klemmveran-

GFK - POLYESTERLAMINAT	
Herstellung :	im Handauflegeverfahren 5 Lagen Glasfasermatten M113 der Fa. Gevetex PE- Harz : Leguval W16-3 der Fa. DSM Leguval E81 der Fa. DSM mit Härter, Beschleuniger, Verzögerer und Zusatz von Styrol
Temperung :	24 Stunden bei 80 °C
Glasgehalt :	ca. 30 Gew. %
Versuchsbedingungen :	Normalklimate der Klasse 1 23°C und 50 % rel. Luftfeuchte nach DIN 50014

Tabelle 2: Herstellungsspezifikation des GFK- Wirrfaserlaminates

kerungen zu minimieren, wurden 5 mm dicke „Bremsbeläge“ Jurid 940 der Firma Jurid (Reinbek) aufgebracht. Die Bremsbeläge wiesen zum einen nahezu denselben Elastizitätsmodul wie die GFK- Proben auf und hatten zum anderen eine große Oberflächenreibung.

Bild 4 zeigt eine Auswahl der verwendeten Proben und in Bild 5 ist eine Probe während der Dehnungsmessung dargestellt.

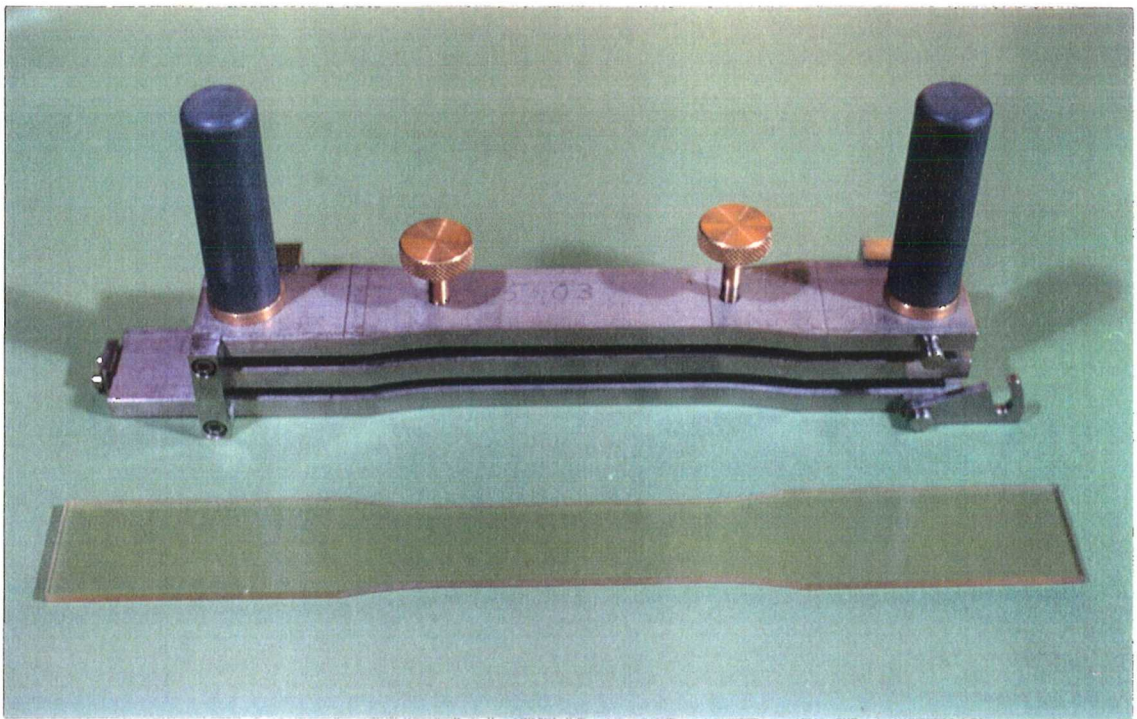


Bild 3: Frässhablone zur Herstellung von Schulterproben

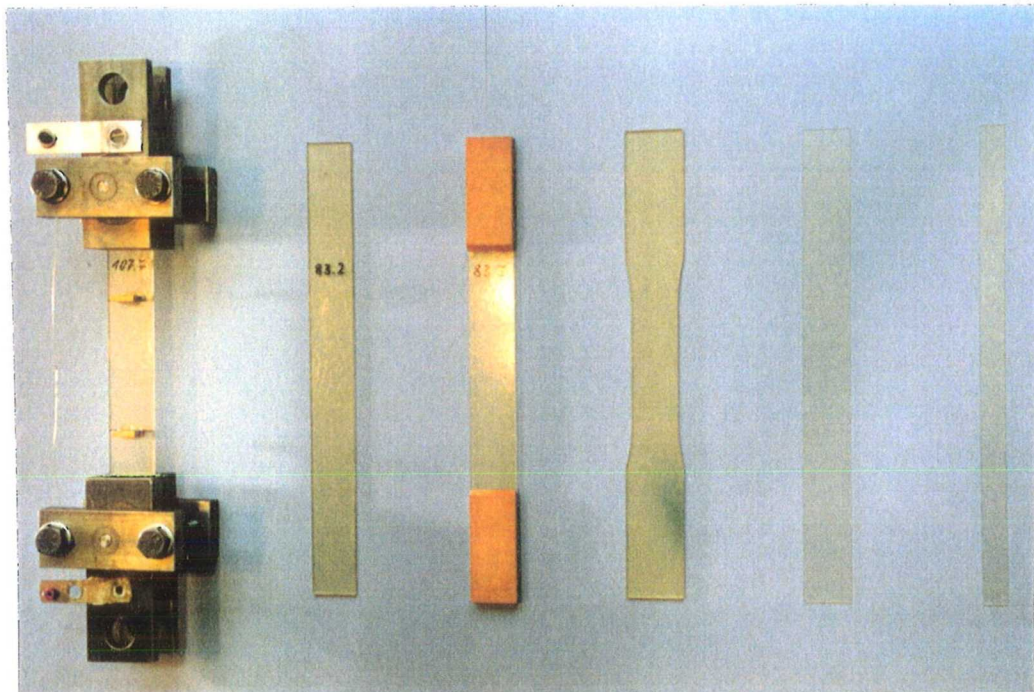


Bild 4: Eine Auswahl der unterschiedlichen getesteten Probenformen

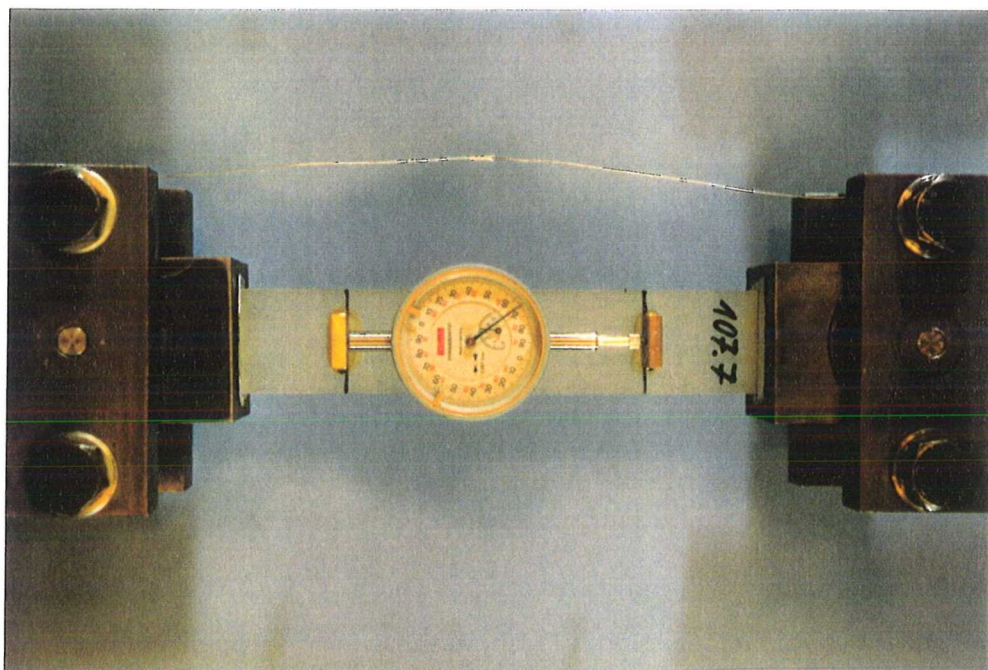


Bild 5: Eingespannte Probe während der Dehnungsmessung. (Die Meßuhr wurde nur zur Messung eingesetzt)

2.1.2 Versuchsdurchführung

Die Kurzzeitversuche zur Ermittlung der Zugfestigkeit unter einachsigen Zug wurden in Anlehnung an DIN 53455 mit einem Dehnungszuwachs von 1 % pro Minute durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Die erreichte Zugfestigkeit betrug (Mittelwert aus 36 Versuchen mit Ansatz einer logarithmischen Normalverteilung) $\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$ bei einem Glasgehalt von 30 Gew.%. Der Variationskoeffizient betrug $V = 0,047$.

Die Zeitstandgerade wurde mit Hilfe von Dauerstandversuchen an den oben erwähnten Zeitständen ermittelt. Bild 8 zeigt die Hebelstände. Die Dehnung wurde mit aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen (DMS) oder mit Meßuhren, die zwischen zwei aufgeklebten Messingplättchen geklemmt wurden, verfolgt (vergl. noch einmal Bild 5). Für sehr langandauernde Versuche erwies sich die Methode mit aufgeklebten Messingplättchen als die zuverlässigere, da keine Temperaturdrift zu befürchten war. Infolge eines relativ elastischen Klebers war die Klebefuge an der sich dehnenen Laminatprobe sehr zuverlässig. Beispielhaft ausgewählte Dehnungskurven, aufgetragen im linearen Maßstab, zeigt Bild 6.

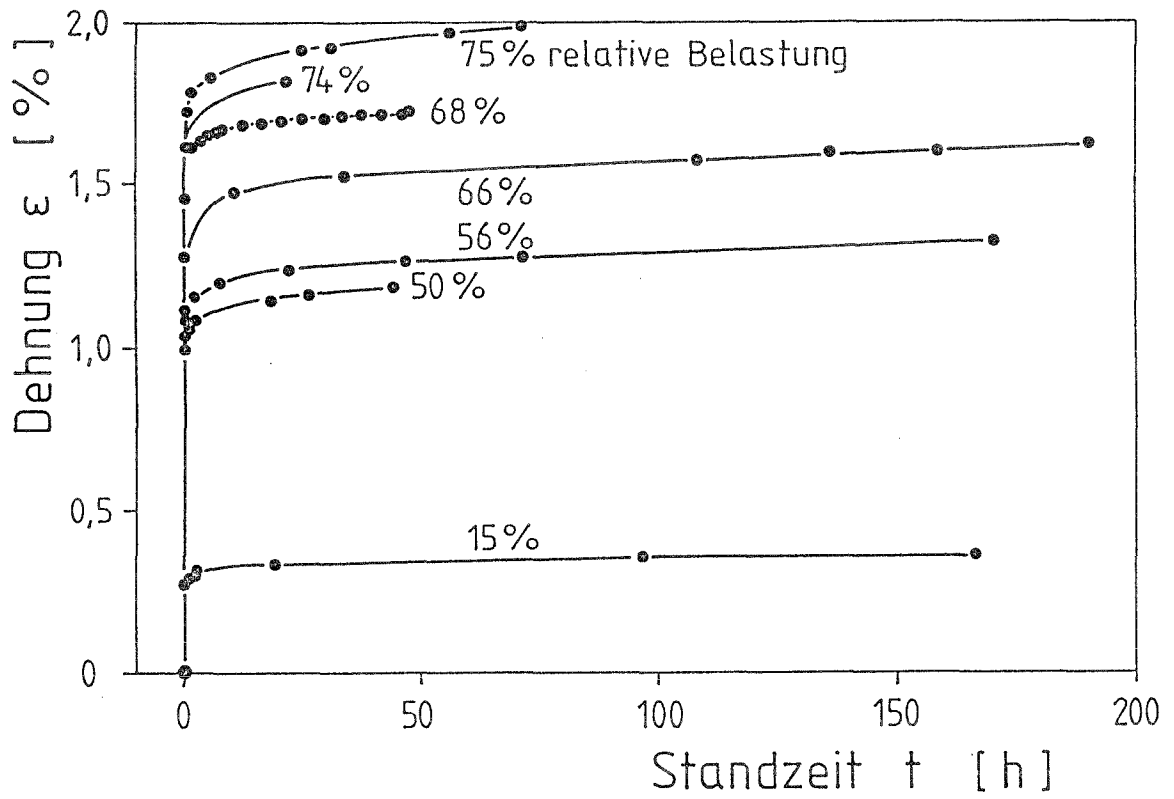


Bild 6: Beispielhaft ausgewählte gemessene Kriechkurven für konstante Lasteinwirkung im linearen Maßstab

Die Versuche mit zyklischen und stufenförmigen Belastungen wurden ebenfalls in den oben beschriebenen Versuchsständen durchgeführt. Der Dehnungsverlauf einer Probe bei einer Lasthöhe von 66 % der Kurzzeitbruchlast ist in Bild 7 dargestellt.

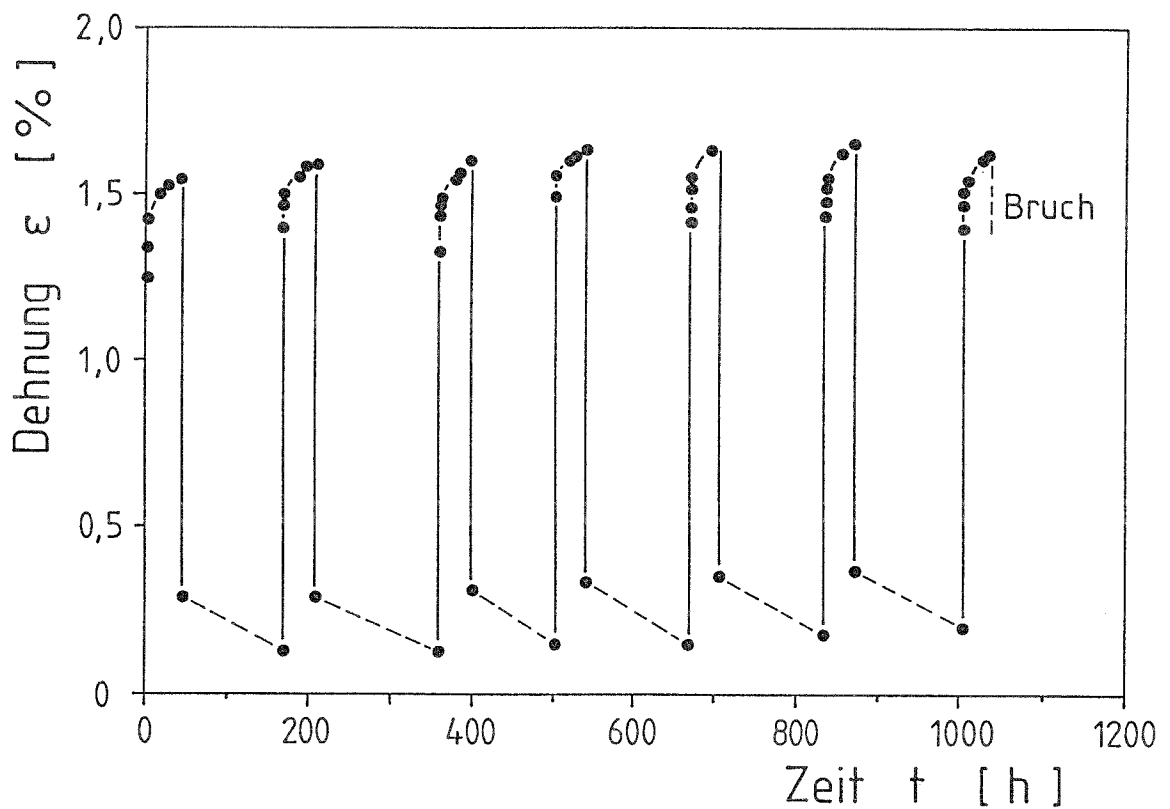


Bild 7: Ausgewählte gemessene Kriechkurven bei zyklischer Lasteinwirkung im linearen Maßstab

Die Prüfungen fanden in einem klimatisierten Raum mit dem Klima „Normklima 23/50 der Klasse 1“ nach DIN 50014 statt. Dynamische Einwirkfunktionen in Sinus- und Dreiecksform wurden zur vergleichenden Betrachtung mit Hilfe der erwähnten servohydraulischen Prüfmaschine realisiert.

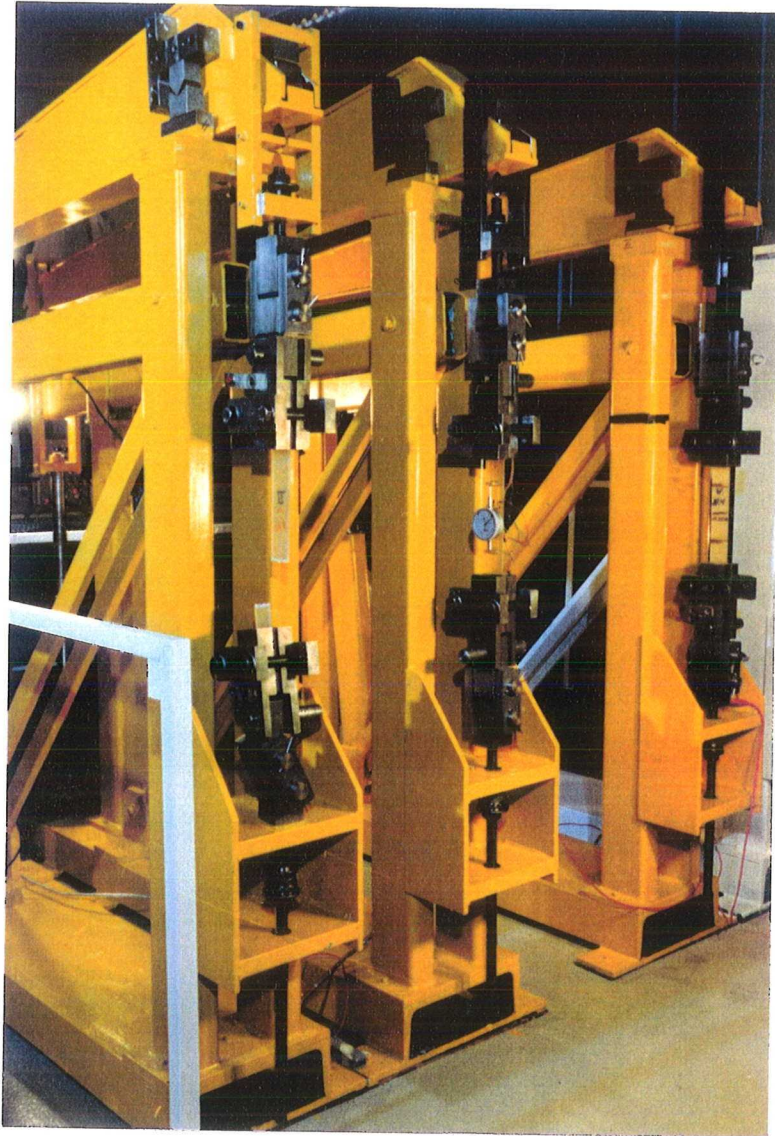


Bild 8: Versuchsstände nach dem Hebelprinzip

Um die Reaktion des Laminates auch im niedrigen Lastbereich beurteilen bzw. um den Schadensfortschritt messen zu können, mußte der Rißfortschritt qualitativ, aber auch quantitativ erfaßt werden. Qualitative Beobachtungen konnten mit dem Lichtmikroskop durchgeführt werden, bei denen sich bei einer Kombination von polarisiertem Auf- und Durchlicht Fehlstellen im Material sehr gut abzeichneten. Die Proben wurden mit und ohne Belastung betrachtet.

Quantitative Fehlstellenanalysen konnten mittels Durchstrahlung mit einem fokussierten Laserstrahl erzielt werden. Zu diesem Zweck wurden 1 mm dicke Proben mit nur einer Glasfasermattenlage hergestellt und in einem hierfür geeigneten Hebelstand mit einer konstanten Kraft belastet. Ein Helium- Neon- Laser durchstrahlte die Probe und rasterte eine Fläche von $7,5 * 7,5 \text{ mm}^2$ zeilenförmig ab. Bei Fehlstellen, die sich in Form von nicht vollständig benetzten Glasfasern, von Delaminierungen, Rißbildungen, Staubeinschlüssen usw. zeigten, wurde das Laserlicht gestreut. Luftblasen waren kaum im Laminat vorhanden. Das Streulicht wurde durch eine Fotodiodenkette am Rand der GFK- Probe registriert. Eine Auswerteeinheit ordnete jedem Rasterpunkt gemessenes oder fehlendes Streulicht zu. Die Meßdauer zur Erstellung eines Rißbildes betrug ca. 2 Stunden. Der Strahlengang des Lasers wurde mittels einer Kondensorlinse mit einem Fokusabstand von 20 mm auf ca. $32 \mu\text{m}$ und alternativ mit einem Fokusabstand von 40 mm auf ca. $67 \mu\text{m}$ gebündelt. Der konfokale Parameter b , eine Art Tiefenschärfe, betrug bei einem Fokusabstand von 20 mm $b_1 = 2,3 \text{ mm}$ und für den Abstand $f = 40 \text{ mm}$ ergab sich für $b_2 = 11 \text{ mm}$. Beide Parameter b_1 und b_2 sind sehr viel größer als die Probendicke, die im Mittel $d = 1,1 \text{ mm}$ betrug. Es kann also von ungefähr gleichen Reflexionsverhältnissen über die Probendicke ausgegangen werden. Durch Regelung der Empfindlichkeit des Photoverstärkers konnte infolge der Gauß' schen Intensitätsverteilung des Laserlichtes ein noch kleinerer effektiver Strahldurchmesser als oben beschrieben erreicht werden. Mit $3000 * 750$ Rasterpunkten wurde der Rißfortschritt statistisch ausgewertet und durch ortsabhängige Registrierung des Schadens ein Rißbild erstellt. Bild 9 zeigt die Laserapparatur und Bild 10 ein ermitteltes Rißbild bei einer Belastung von 65% der Bruchlast.

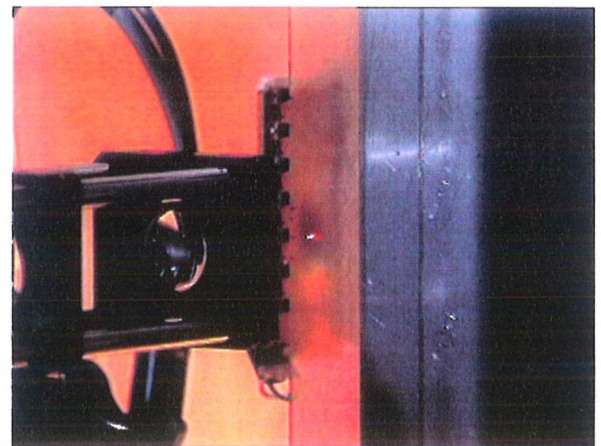
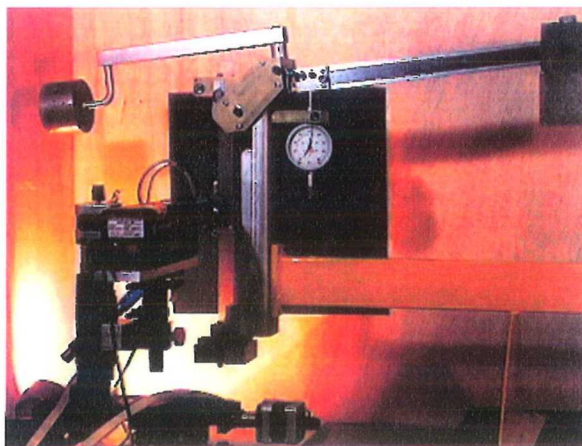
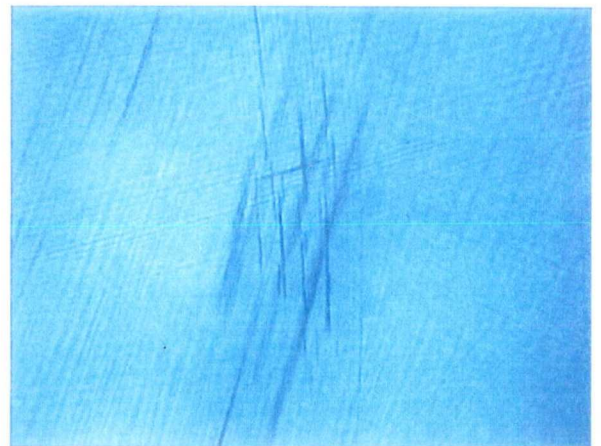


Bild 9: Laserapparatur zur Ermittlung des Rißfortschrittes in GFK- Laminaten, Auswerteeinheit und eine mikroskopisch ermittelte Übersichtsaufnahme eines Probenausschnittes nach Belastung

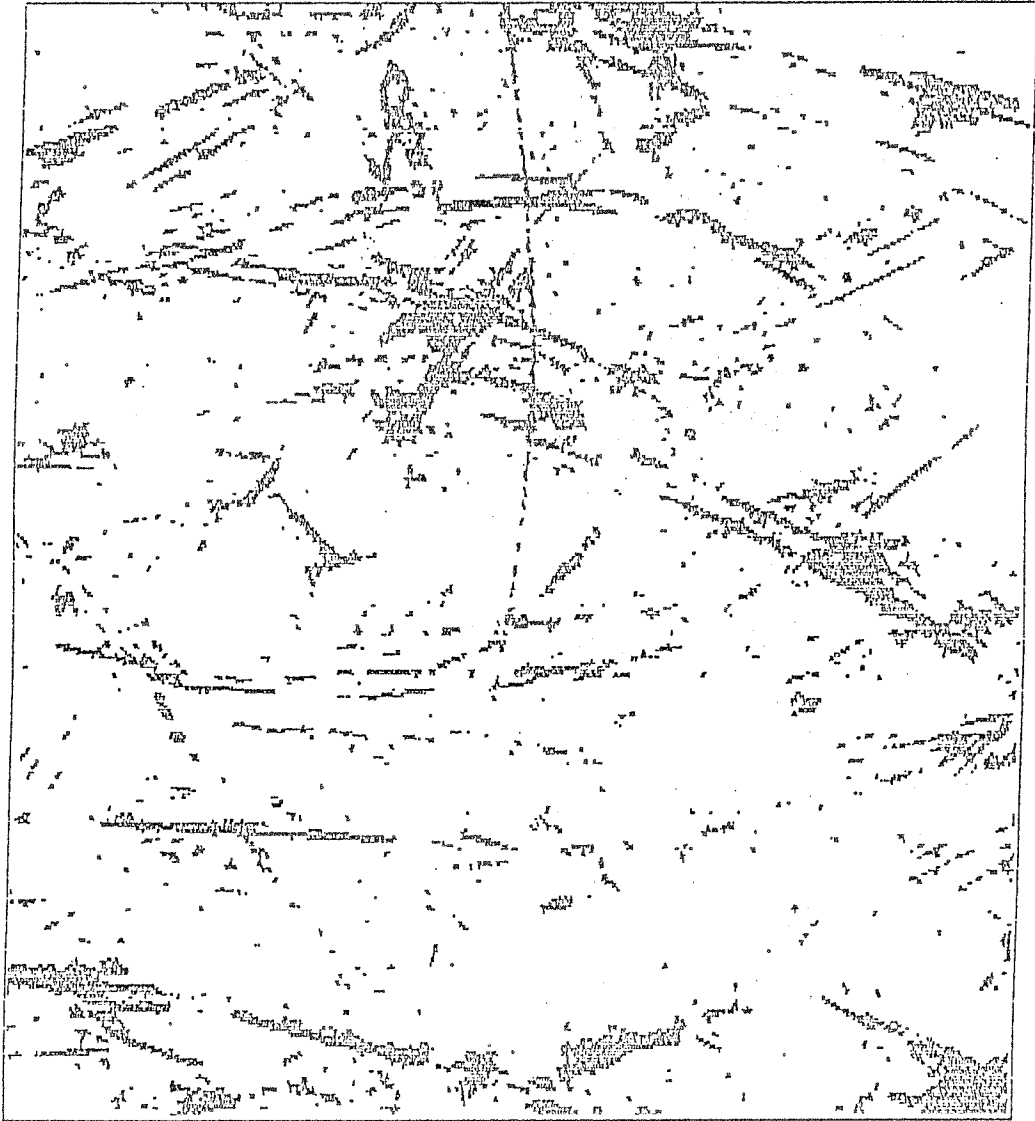


Bild 10: Rißbild einer 1mm dicken Laminatprobe bei 65 % der Bruchlast nach einer Belastungszeit von ca. 120 Stunden (Summe der inneren Schädigungen). Die abgerasterte Fläche betrug $7,5 * 7,5 \text{ mm}^2$

3 Bewertung der Versuchsergebnisse

3.1 Zeitstandeigenschaften des Laminates

3.1.1 Bruchzeitpunkte bei konstanter Lasteinwirkung

Die ermittelte Zeitstandgerade für das ausgewählte Laminat ist in Bild 11 dargestellt. Sie wurde aus 40 Einzelversuchen auf unterschiedlichen Niveaus ermittelt. Alle Versuche, die eine Standzeit von über einer Stunde aufwiesen, konnten „gut“ approximiert werden.

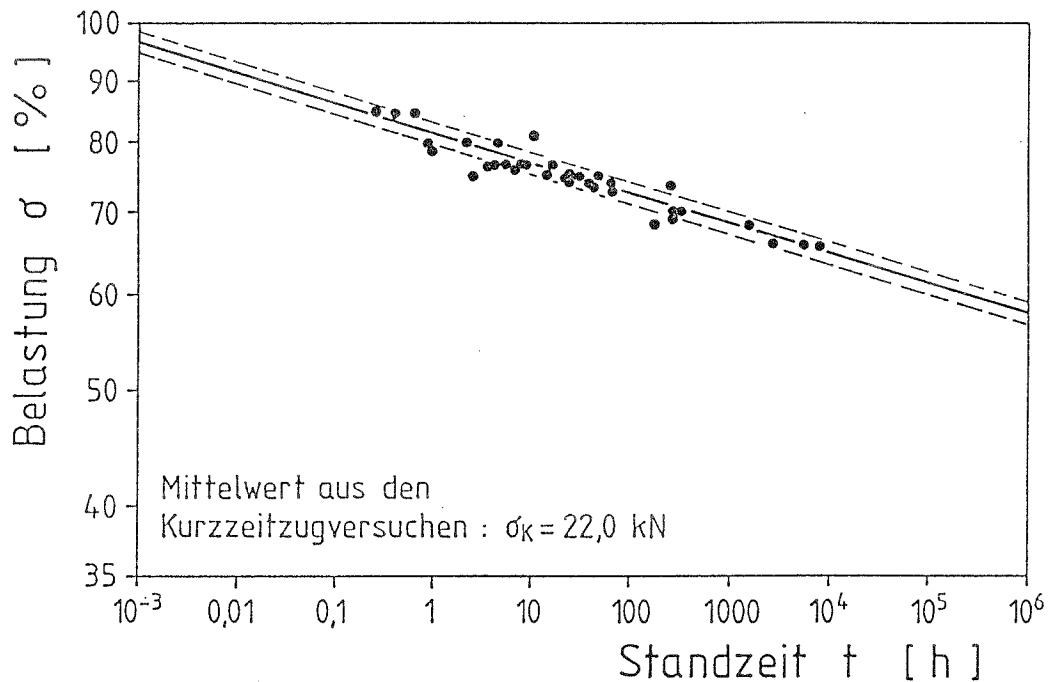


Bild 11: Ermittelte Zeitstandgerade mit dem Streuband der Standardabweichungen

Werden alle Versuchsergebnisse auf ein Niveau bezogen, bzw. mit der Geradengleichung der Zeitstandapproximation auf dieses Niveau umgerechnet, so ergibt sich bei gewählter logarithmischer Auswertung die in Bild 11 eingezeichnete Streubreite als Wert der Standardabweichungen. In Bild 12 wurden die 5 und 95 %- Fraktilwerte als Streuband eingezeichnet und mit den Ergebnissen der Kurzzeitzugversuche verglichen. Angemerkt sei, will man Überlebenswahrscheinlichkeiten aus den Kurzzeitzugversuchen mit denen aus den Zeitstandversuchen vergleichen, ist es sicher

sinnvoll, für beide Verteilungsdichtefunktionen die Weibullverteilung zu wählen, da nur sie einen echten Vergleich der Überlebenswahrscheinlichkeiten zuläßt. Eine Herleitung findet sich in Franke [16]. Aber auch bei einer logarithmisch normalen Auswertung ergab sich eine sinnvolle Korrelation zwischen der Verteilungsdichte der Kurzzeitversuche und der der Zeitstandergebnisse (vergl. noch einmal Bild 12). Die Ergebnisse der Zeitstandversuche sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Hier ist noch einmal zum Vergleich das Ergebnis des spröden Laminates mit 100 % Leguval W16-3 als Matrixmaterial aufgeführt.

Der Kehrwert der Steigungen der Zeitstandgeraden verminderte sich von $n = -106$ beim spröden Laminat mit 100 % Leguval W16, über $n = -86$ mit einer Beimischung von 40 % E 81, bis hin zu $n = -40$ bei Verwendung der weichen Matrix. Die Steigung der Zeitstandgeraden bei unidirektional bewehrten GFK- Stäben mit UP-Harz Matrix liegt im übrigen bei $n \approx -48$ (vergl. [16], [14],[20] u. a.).

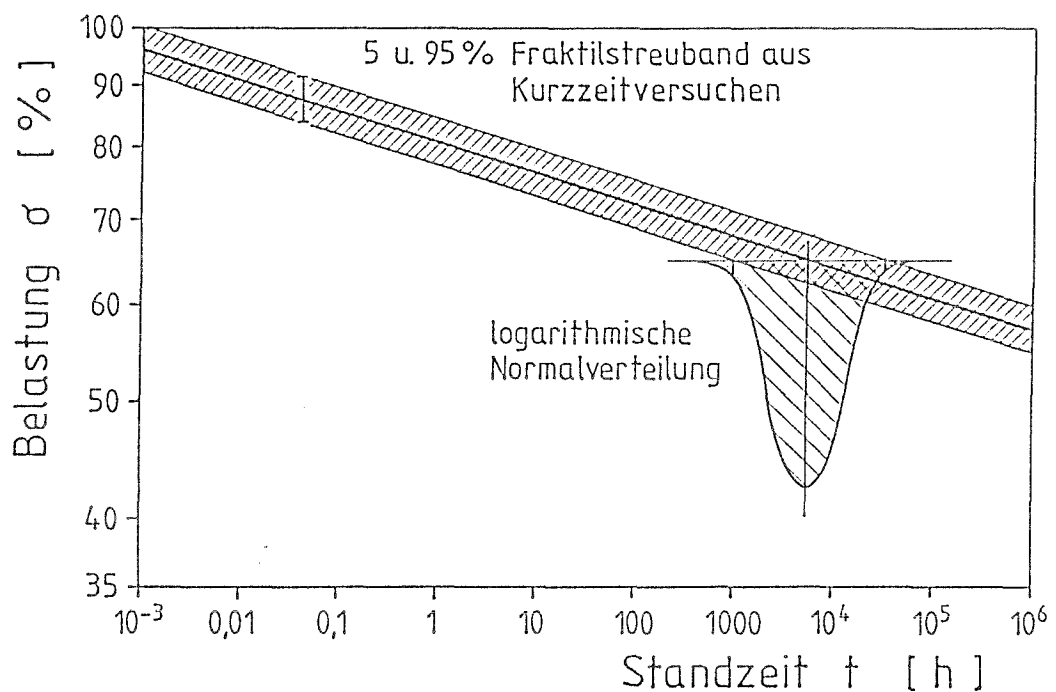


Bild 12: Vergleich der Zeitstandergebnisse mit den Kurzzeitzugversuchen

Vergleichend zu den mit konstanter Last gefahrenen Versuchen wurden Versuche mit zyklischer und stufenförmiger Lasteinwirkung durchgeführt.

Kennwerte der Zeitstandgeraden		
Matrixmaterial :	50 % W 16, 50% E 81 ¹	100 % W 16 ²
Steigung :	$n = -0.02496$	$n = -0.0094$
Wert bei $t = 1h$:	$t_0 = 80,7\%$	$t_0 = 87,9\%$
Bezugwerte auf dem 65% Niveau		
Mittelwert :	$lg t = 3,7735$	$lg t = 13,987$
Streuung :	$lg \sigma = 0,3655$	$lg \sigma = 0,9614$
Abweichung des Mittelwertes vom Wert der Zeitstandgeraden :		
	1,8%	28 %

Tabelle 3: Vergleich der Streuungen der Zeitstandversuchsergebnisse der beiden hergestellten Lamine

1- Versuchszahl : $n = 40$

2- Versuchszahl : $n = 16$

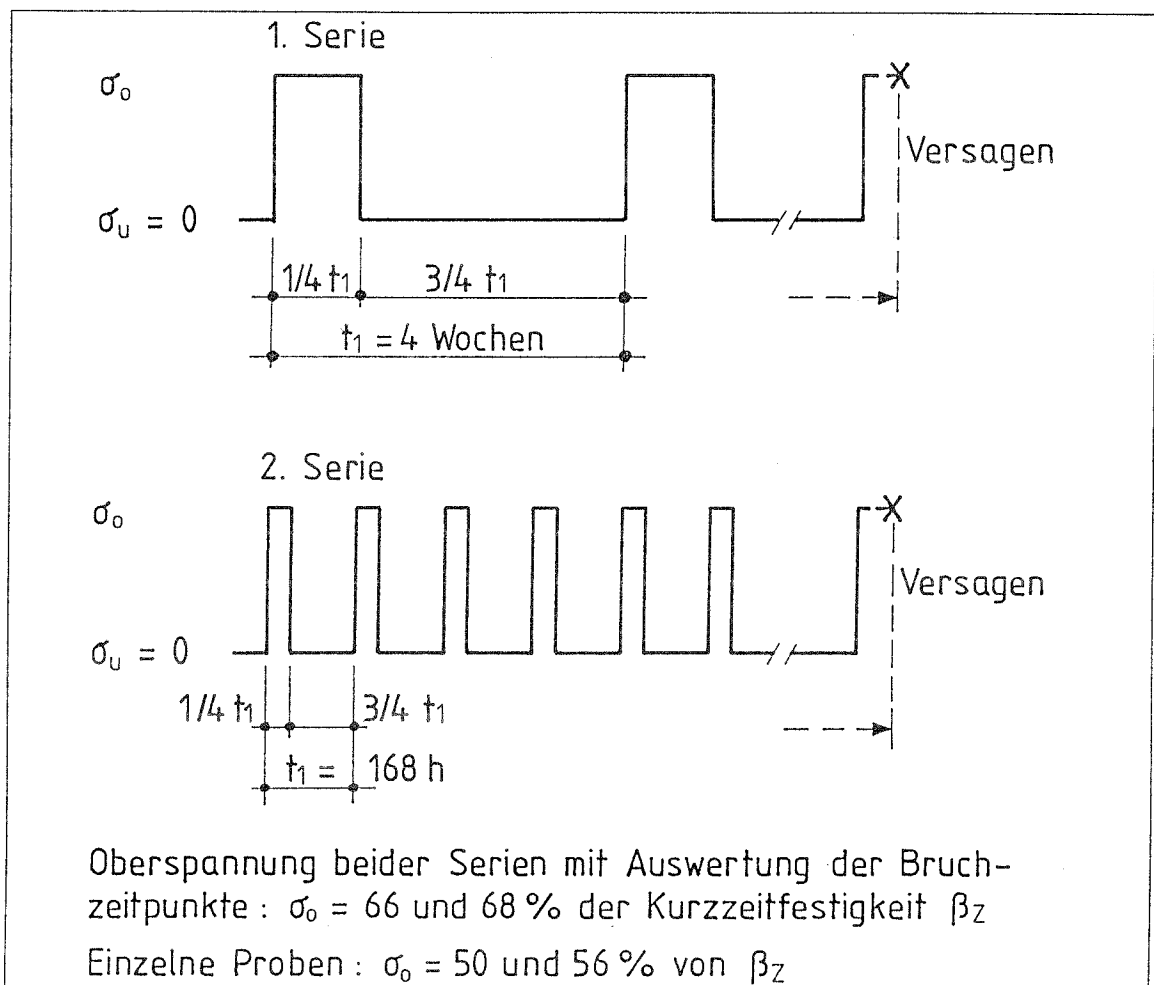
3.1.2 Bruchzeitpunkte bei zyklischer Lasteinwirkung

Auf Basis der ermittelten Zeitstandgeraden wurden zur Überprüfung der Schadensakkumulation Versuche mit zyklisch wiederkehrender Lasteinwirkung durchgeführt. Zu untersuchen war, ob die Akkumulationsregel für Zeitstandbelastungen

$$\sum_i \frac{t(\sigma_i)}{T_B(\sigma_i)} = 1 \quad (1)$$

durch die Zeitstandversuche bestätigt wird.

Zwei unterschiedliche zyklische Belastungsintervalle wurden wie folgt skizziert durchgeführt :



Die Proben wurden zum einen eine Woche belastet und drei Wochen entlastet (langer Zyklus, Serie 1) und zum anderen 42 Stunden belastet und 126 Stunden entlastet (kurzer Zyklus, Serie 2). Das Verhältnis der Be- und Entlastungszeiten von 1 : 3 ist den Be- und Entlastungszeiten nachempfunden, die bisher bei der Bemessung infolge Schneelasteinwirkung anzusetzen sind. Für die Höhe der Last wurden vier Niveaus gewählt. Diese entsprachen folgenden auf die Kurzzeitfestigkeit bezogenen gerundeten Werten :

$$\sigma_1 = 68\% ,$$

$$\sigma_2 = 66\% ,$$

$$\sigma_3 = 56\% \text{ und}$$

$$\sigma_4 = 50\% \text{ der Zugfestigkeit.}$$

Bild 13 zeigt den Dehnungsverlauf einer Probe bei $\sigma_{konst.} = 66\%$ bis zum Bruch. Die Bruchzeitpunkte konnten von den ersten beiden Niveaus erreicht und ausgewertet werden. Bild 14 zeigt die Mittelwerte und die Streuungen aus den kurzen und langen Zyklen.

Betrachtet man die Belastungszeiten und addiert nur diese, so ist statistisch abgesichert eine Verkürzung der Lebensdauer im Vergleich zur Zeitstandlebensdauer zu verzeichnen.

Weiterhin mußte festgestellt werden, daß sich die Streuungen der Verteilungsdichtefunktion der Bruchzeitpunkte vergrößert hatten.

Aus diesen Versuchen muß gefolgert werden, daß sich ein Erholungseffekt infolge der Entlastungszeiten zumindest bei den untersuchten Niveaus nicht eingestellt hat. Es muß daher von einer Schadensakkumulation innerhalb des Laminates ausgegangen werden.

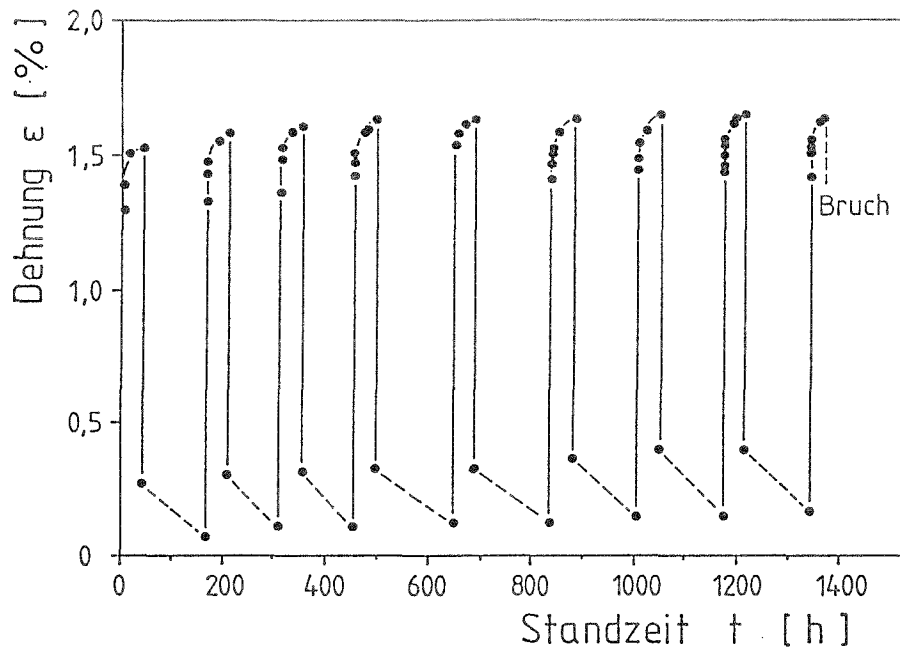


Bild 13: Ausgewählte Kriechkurve bei zyklischer Lasteinwirkung im linearen Maßstab

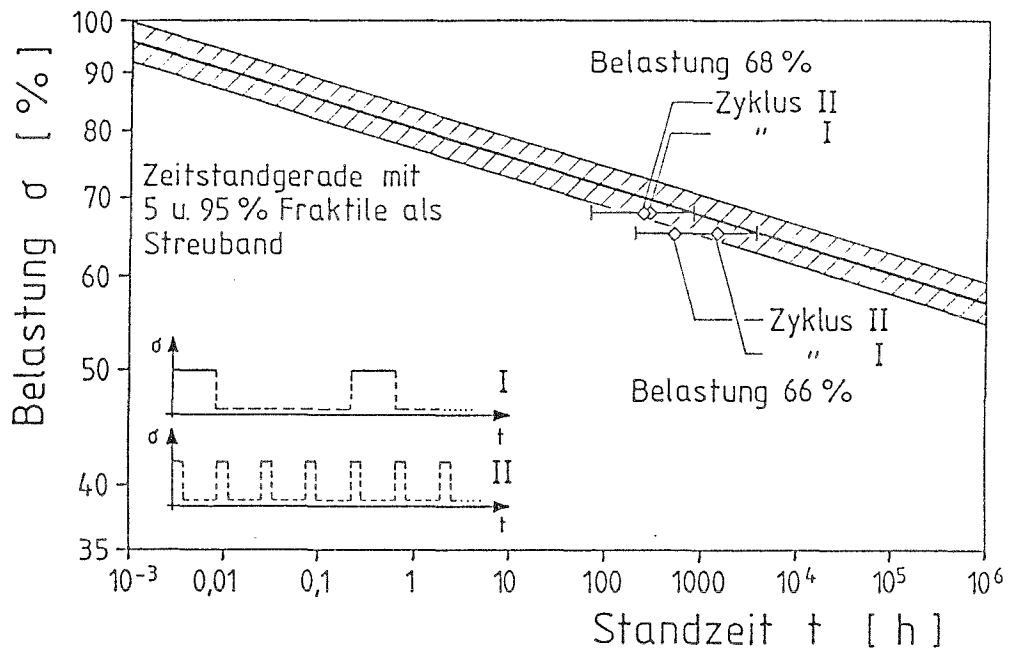
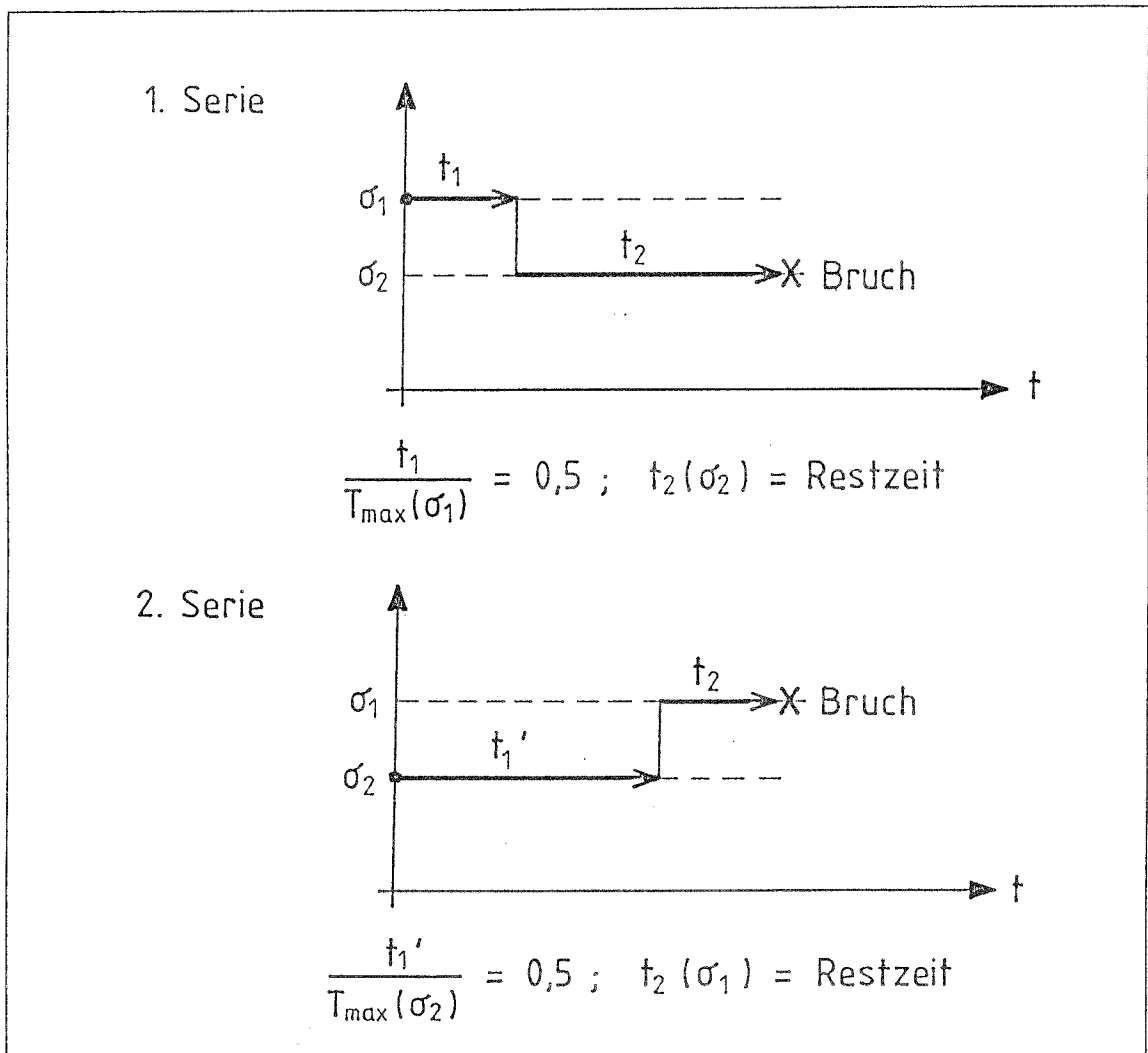


Bild 14: Vergleich der Lebensdauerlinien aus den Zeitstandversuchen und den Versuchen mit zyklischer Einwirkungsfunktion (hier Addition nur der Zeiten unter Last)

3.1.3 Bruchzeitpunkte bei stufenförmiger Lasteinwirkung

Auf der Basis der ermittelten Zeitstandgeraden wurden 2 Serien Zeitstandversuche mit entgegengesetzter Belastungsreihenfolge entsprechend folgender Skizze durchgeführt:



Die Ergebnisse der Stufenversuche zeigt Bild 15. Es wurden hier die Belastungsniveaus 75% und 68% gewählt und wie folgt verfahren :

- Serie 1 :

Belastung mit $\sigma_1 = 75\%$ der Bruchlast über 11 Stunden, entsprechend 50 % der dortigen Lebensdauer; danach herunterfahren auf $\sigma_2 = 68\%$ bis zum Bruch, wobei sich die Lebensdauer im Vergleich zum 1. Niveau verzehnfachte.

- Serie 2 :

Belastung mit $\sigma_1 = 68\%$ der Bruchlast über 168 Stunden, entsprechend 50 % der Lebensdauer; danach hochfahren auf $\sigma_2 = 75\%$ bis zum Bruch, wobei sich die Lebensdauer in bezug auf das 1. Niveau um den Faktor 10 verkürzte.

Zur Auswertung wurde das zweite Niveau mittels linearer Schadensakkumulationsregel auf das erste umgerechnet und addiert. Die Ergebnisse zeigt Bild 15. Hier wurden jeweils 6 Versuche pro Belastungsart durchgeführt und logarithmisch normal ausgewertet. Die Verteilungsdichte, ausgedrückt durch die Streubreite der Standardnormalverteilung lag innerhalb der Streubreite der Zeitstandversuche. Die Mittelwerte stimmten nahezu überein. Kontrollversuche auf niedrigeren und auch höheren Niveaus bestätigten dies.

Es kann somit bei dieser Versuchsart von der Richtigkeit bzw. Anwendbarkeit der Schadensakkumulationsregel ausgegangen werden.

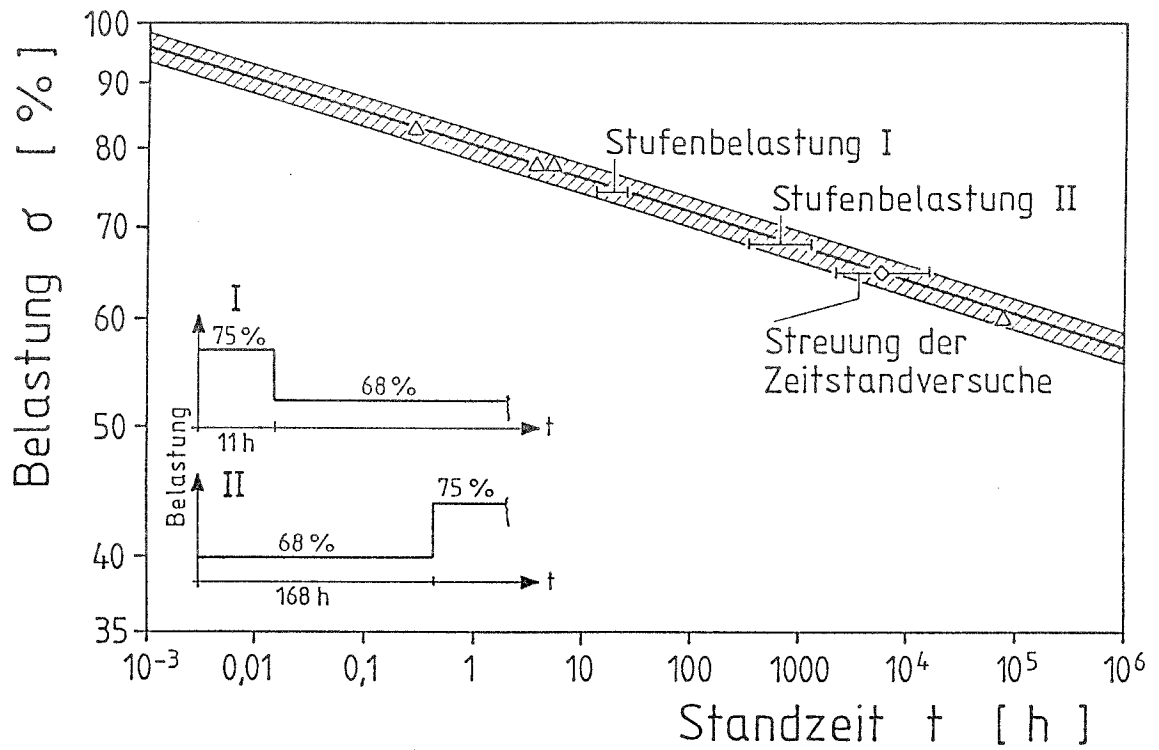
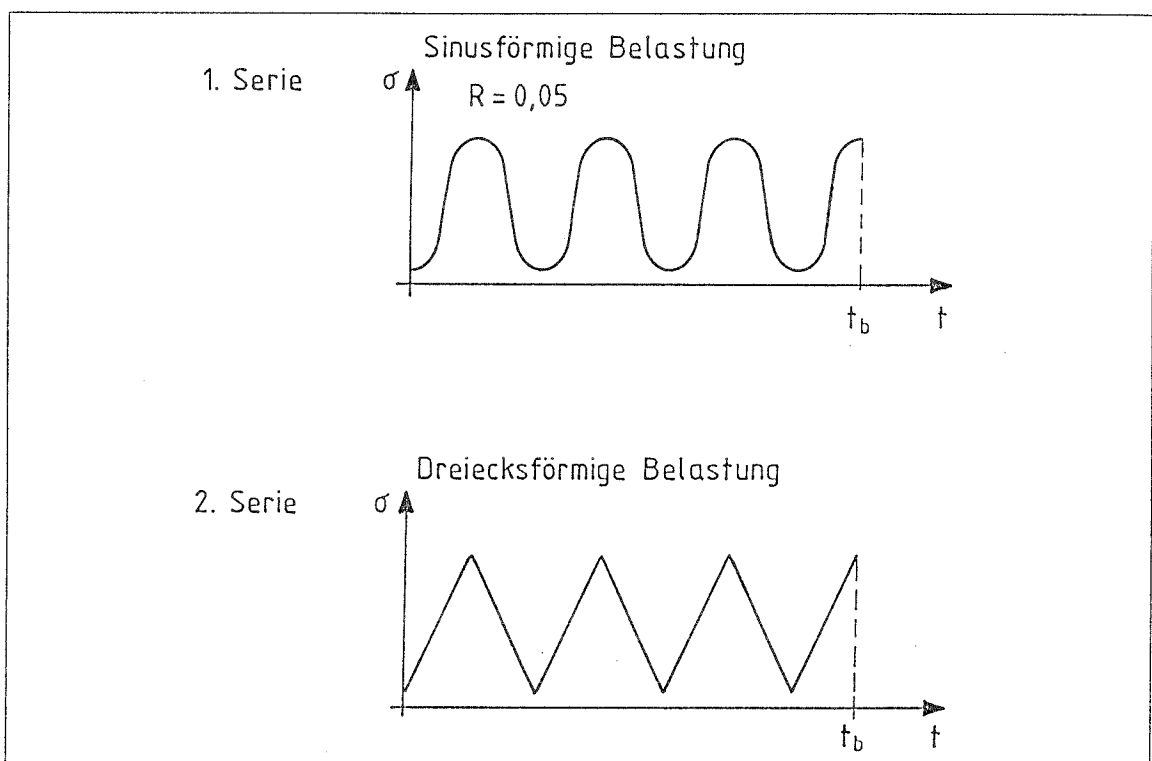


Bild 15: Auswertung der Standzeiten der Proben bei stufenförmiger Einwirkfunktion im Vergleich zur Zeitstandgeraden (jeweils 6 Einzelwerte) Δ : Einzelversuche

3.1.4 Bruchzeitpunkte bei nicht ruhender Belastung

Um den zuvor beschriebenen Einfluß der Be- und Entlastungen beurteilen zu können wurden Schwingversuche mit sinusförmiger und mit dreiecksförmiger Belastung unterschiedlicher maximaler Spannungshöhe gemäß folgender Skizze durchgeführt:



Das Verhältnis R der Oberlast zur Unterlast wurde konstant mit $R = 0,05$ beibehalten. Die Frequenz der Schwingversuche betrug 0,2 Hertz. Die Dreiecksversuche wurden entsprechend den Kurzzeitversuchen mit einer Frequenz von 0,01 Hertz und vergleichend mit 0,2 Hertz gefahren. Die mit 0,2 Hz gefahrenen Versuche zeigten bei dreiecks- und bei sinusförmiger Belastung ähnliches Bruchverhalten. Die sinusförmige Belastung ergab eine etwas steilere Lebensdauerlinie. Diese Versuche dienten zur Berechnung des Be- und Entlastungseinflusses bei der Berechnung der

Lebensdauer der zyklischen Versuche, die im vorigen Kapitel zu 1,5 bis 2 % abgeschätzt werden konnten. Bild 16 zeigt die ermittelten Lebensdauerlinien für die oben beschriebenen Versuche.

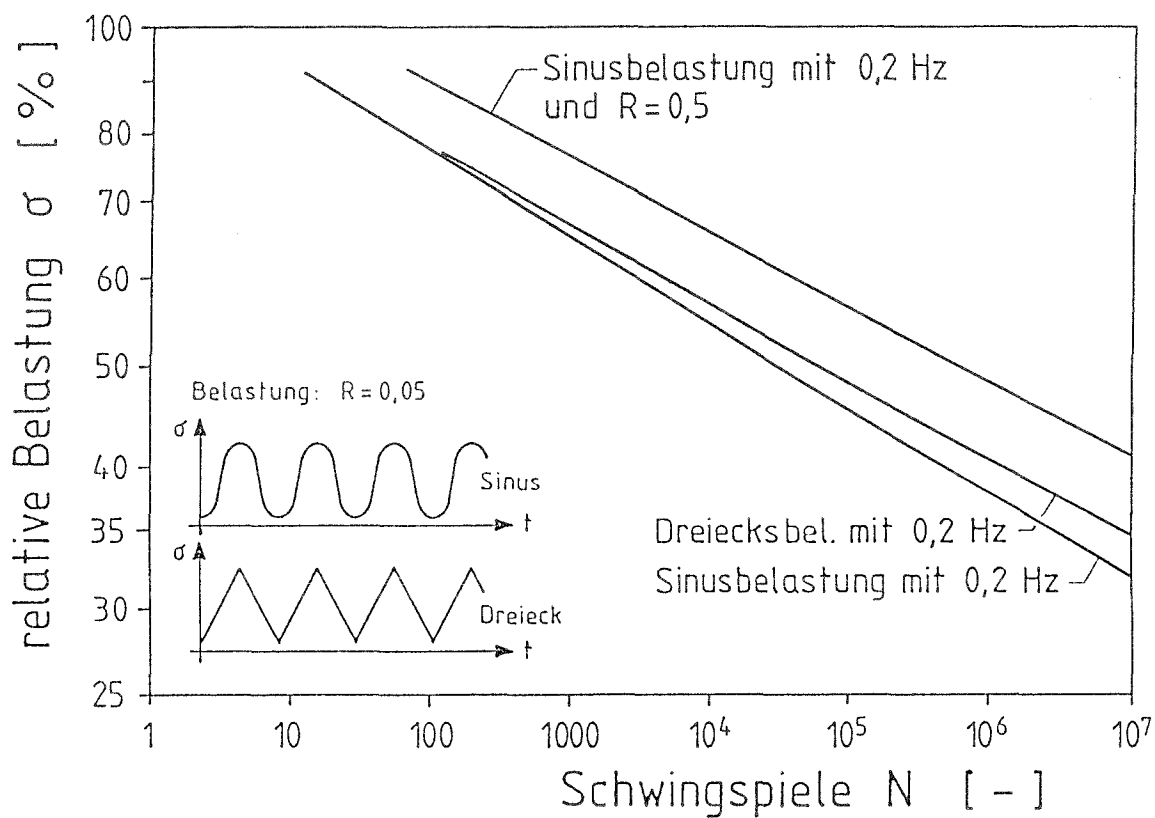


Bild 16: Vergleich der Lebensdauer der Schwingversuche mit den Versuchen mit dreiecksförmiger Belastungsfunktion

3.2 Dehnungsverlauf

Bei fast allen Zeitstandversuchen wurde die Dehnung mit verfolgt. Bild 17 zeigt einige ausgewählte Kriechverläufe bei konstanter Lasteinwirkung, doppelt logarithmisch aufgetragen. Die Dehnungen konnten durch lineare Regression mit Korrelationskoeffizienten größer $r = 0,98$ approximiert werden. Dies zeigt, daß zur Beschreibung des Kriechverhaltens die einfache Potenzfunktion nach Gleichung 2 bzw. Gleichung 3 hinreichend ist.

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 + \epsilon_{Kr.}(t) \tag{2}$$

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} + a \cdot t^n \cdot \sigma(t)^m \tag{3}$$

Hierin sind $\sigma(t)$ die Spannung, $E(t)$ der Elastizitätsmodul, a,n,und m Parameter und t die Zeit.

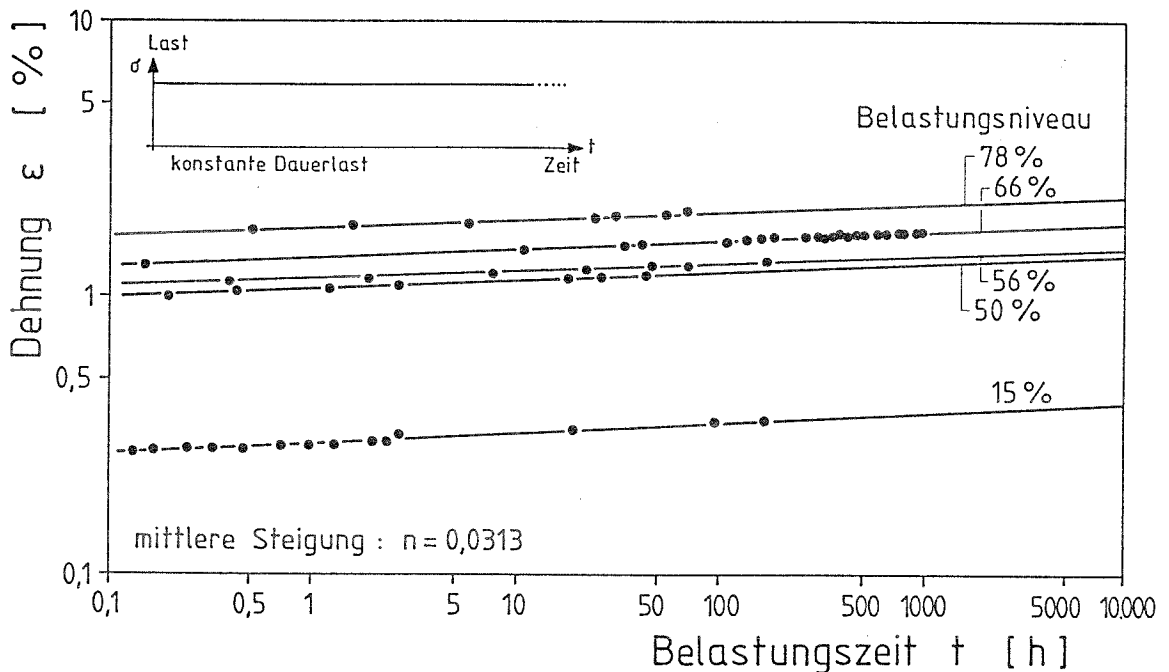


Bild 17: Kriechfunktionen doppelt logarithmisch approximiert mittels linearer Regression ($\sigma^m(t)$ aus Gleichung 3 ist hierin gleich 1.0)

Vorteil dieser Darstellung ist die einfache Vergleichbarkeit der Kriechkurven im doppelt logarithmischen Maßstab.

Für die zyklischen Versuche kann mit diesem Formalismus die obere Einhüllende beschrieben werden (vergl. nochmal den linearen Verlauf in Bild 7).

Zu prüfen war auch hier der Sachverhalt einer Erholung des Laminates bei zyklischer Einwirkfunktion. Für diesen Vergleich wurden die reinen Belastungszeiten addiert und am Ende einer jeden Belastung registriert. Die sich ergebenden Zeit-Dehnungswertepaare wurden anschließend doppelt logarithmisch aufgetragen und ebenfalls durch lineare Regression approximiert.

Vergleicht man nun die Steigung und die Lage der über alle Versuche gemittelten Geraden, so zeigt sich zumindest ein gleiches Dehnungsverhalten wie bei den Kriechkurven; es war eher eine erhöhte zeitabhängige Dehnung zu verzeichnen. Die mittlere Steigung der doppeltlogarithmischen Kriechgeraden betrug $n = 0,031$, während die mittlere Steigung für die zyklischen Versuche mit $n = 0,042$ um 25% größer war (vergl. Bild 18).

Ein „Erholungseffekt“ konnte daher auch hier nicht registriert werden.

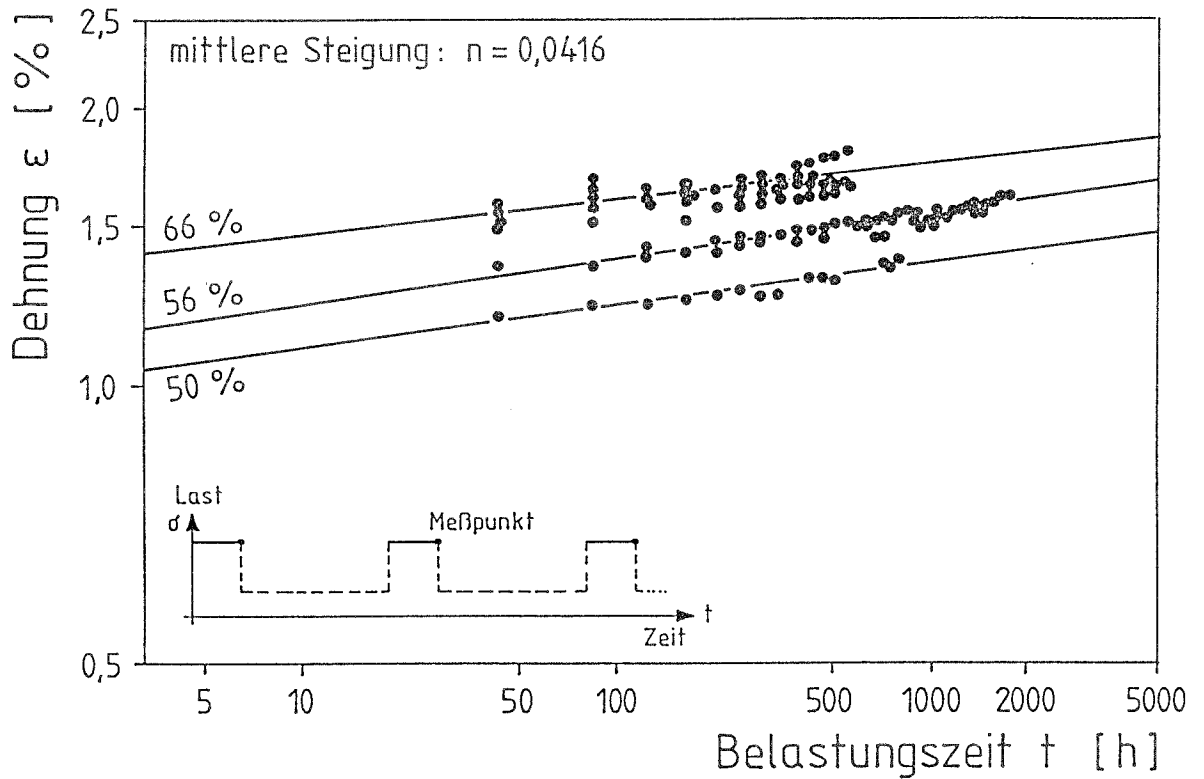


Bild 18: Dehnungsverlauf der zyklischen Versuche doppelt logarithmisch approximiert mittels linearer Regression (aufgezeichnet für die addierten Zeiten unter Last)

3.3 Schädigungsverlauf

Bei niedrigen Anfangsdehnungen bzw. Belastungen in Höhe der Gebrauchslast können Zeitstandversuche bis zum Bruch nicht mehr durchgeführt werden. Es existieren daher auch keine Meßwerte darüber, ob die Zeitstandgerade (im doppelt logarithmischen Maßstab) unverändert bis zu diesem Lastniveau herunterreicht oder ein Einschwenken in die Horizontale erwartet werden kann. Die früheren Arbeiten von Menges (vergl. [7], Roskoth [12] u. a.) mit der dortigen Postulierung einer Mikrorißgrenze sollten dies nachweisen.

Daher ist es von großem Wert in Form des Laserprüfverfahrens ein zusätzliches Prüfverfahren zur Verfügung zu haben, das auch bei sehr kleinen Dauerlasten registrieren kann, ob Fehler und in welchem Umfang diese in einer transparenten Laminatprobe bei Dauerstandbelastung entstehen. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurden einige Analysen durchgeführt, um eine Vorstellung über das wahrscheinliche Verhalten zu erhalten. Diese Ergebnisse werden im folgenden wiedergegeben. Obwohl im Prinzip hier weitere Untersuchungen zur Absicherung der Analysen notwendig sind, ergeben sich aber eindeutige Hinweise. Das Laserverfahren wurde bereits in Abschnitt 2.1.2 charakterisiert.

Zur Auswertung der Schadenszunahme wurde die Anzahl der gemessenen Reflexionen auf einer Fläche von $7,5 \cdot 7,5 = 56,25 \text{ mm}^2$ und einer Rasterpunktzahl von $2,25 \cdot 10^6$ bei unterschiedlichen Spannungs- Dehnungszuständen ausgewertet. Um vergleichbare Verhältnisse für alle Meßreihen zu erhalten mußte die Zahl der gemessenen Reflexionen nach Aufbringen der Last gemäß Gleichung 4 normiert werden. Hierin wurde der Anfangsschaden a_o vom gemessenen Schaden a_{mess} subtrahiert und der so berechnete Wert durch a_o dividiert. a_o kann als eine Art Anfangsrißlänge interpretiert werden.

$$S(t) = \frac{a_{mess}(t) - a_o}{a_o} \quad (4)$$

Im folgenden ist mit dem Schaden immer der relative Schaden $S(t)$ gemeint. Dieser registrierte Schaden bei Dauerlasteinwirkung zeigte bei allen Niveaus die gleiche Charakteristik. Der anfänglich schnellere Anstieg kann als eine Art Anrißphase

verstanden werden, bei der sich infolge der starken Dehnungszunahme die Risse öffnen. Dieser Anstieg verlangsamt sich dann. Der zeitliche Verlauf ist mit dem Dehnungsverhalten der Proben vergleichbar. Bei dem Schadensfortschritt ist nach anfänglicher starker Steigung ein geringer, aber stetiger Zuwachs zu verzeichnen, wie er bei Proben mit mehreren Anrissen, bei Addition aller Rißfortschritte zu erwarten war.

Nach Ablauf der Anrißphase läßt sich das Verhalten mit Ansätzen des K_C -Konzeptes der linearen Bruchmechanik beschreiben, wenn für den Anrißzustand ein virtuelles a_0 eingeführt wird [22].

Der Schadensmechanismus bei Belastung einer Mattenlaminatprobe konnte wie folgt festgestellt werden:

- Die Glasfasern, die sich nahezu in Zugrichtung befinden, werden an den Enden herausgezogen.
- Die quer zur Zugrichtung liegenden Fasern werden zunehmend delaminiert.
- Alle Fasern zwischen den beschriebenen Richtungen zeigen gemischte Erscheinungen.
- Die anfänglich vorhandenen Fehlstellen, insbesondere die Delaminierungen vergrößern sich.
- Fehlstellen wachsen zusammen und schädigen die Probe zunehmend.

Diese Beobachtungen finden sich in der Literatur z. B. bei Roskothen [12] und insbesondere Grunert [19] bestätigt. Eine Begründung für diese Rißentstehungen finden sich z. B. in Thebing [4].

Bild 19 zeigt herausgezogene Fasern bei ca. 0,2% Dehnung der Probe. In Bild 20 ist ein fortgeschrittenes Schädigungsbild bei ca. 0,75% Dehnung der Probe dargestellt.

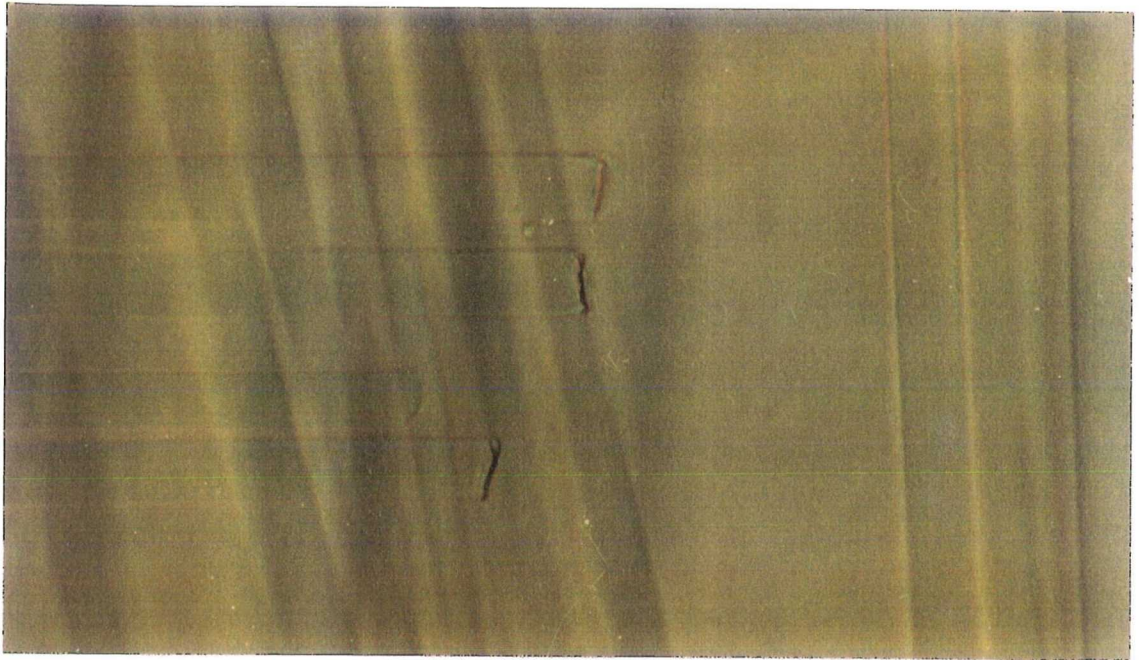


Bild 19: Schadensbild bei 0,2 % Dehnung im Lichtmikroskop (Vergrößerung : 200- fach)



Bild 20: Fortgeschrittenes Schadensbild bei einer Dehnung der Probe von ca. 0,75 % im Lichtmikroskop (Vergrößerung: 200- fach)

In Bild 21 ist der zeitabhängige Verlauf als Addition aller Fehlstellen auf vier ausgewählten Niveaus für konstante Dauerlast skizziert und durch Potenzansatz approximiert. Deutlich ist bei der Kurve mit 77% Dauerlast die Abweichung der drei letzten Meßwerte vor dem Bruch zu erkennen, die einen erhöhten Schadenszuwachs bis hin zum Bruch anzeigen. Dies Verhalten skizziert noch einmal die Rißwachstumscharakteristik der Laminatproben.

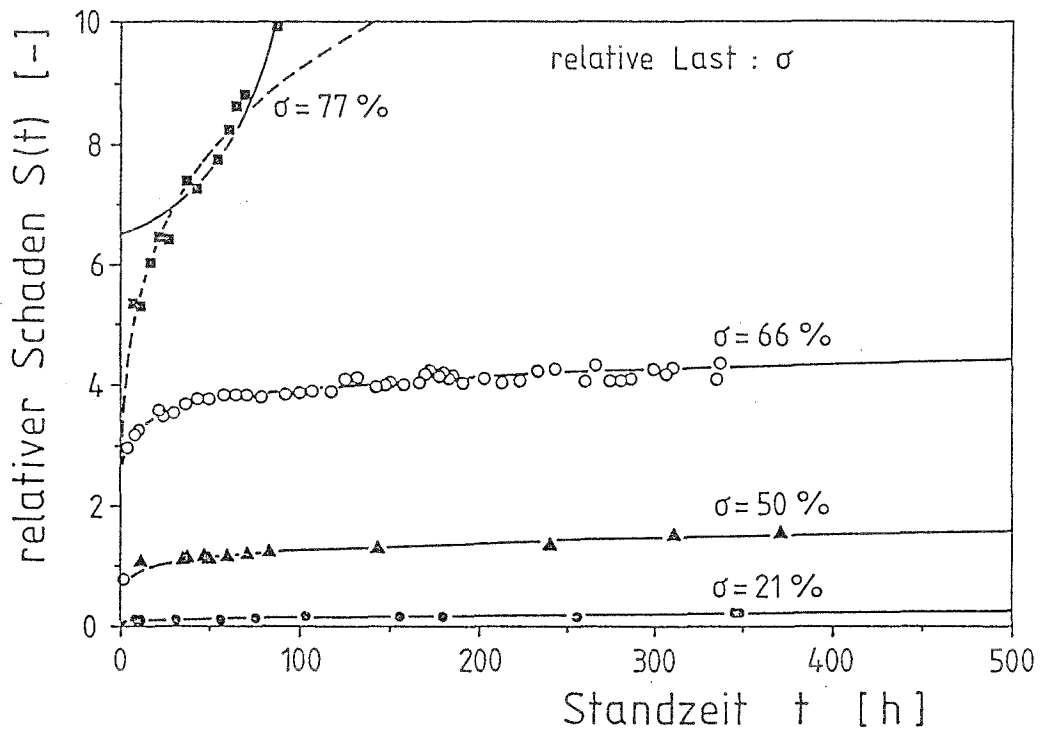


Bild 21: Schadensfortschrittskurven, ermittelt an der Laser- Apparatur bei konstanter Lasteinwirkung

Auch bei den zyklischen Versuchen wurde der Schadensfortschritt beobachtet. Die Versuche, die im niedrigen Lastbereich gefahren wurden, zeigten bei der quantitativen Erfassung einen gleichen bis etwas erhöhten Anstieg des registrierten Schadens im Vergleich zu den Proben unter Dauerlast. Dies bestätigt, daß auch im niedrigen, für die Schneelastbemessung relevanten Bereich, bei konstanter zyklischer Einwirkung der Schadenszuwachs mindestens demjenigen bei Zeitstandbelastung entspricht (vergl. Bild 22).

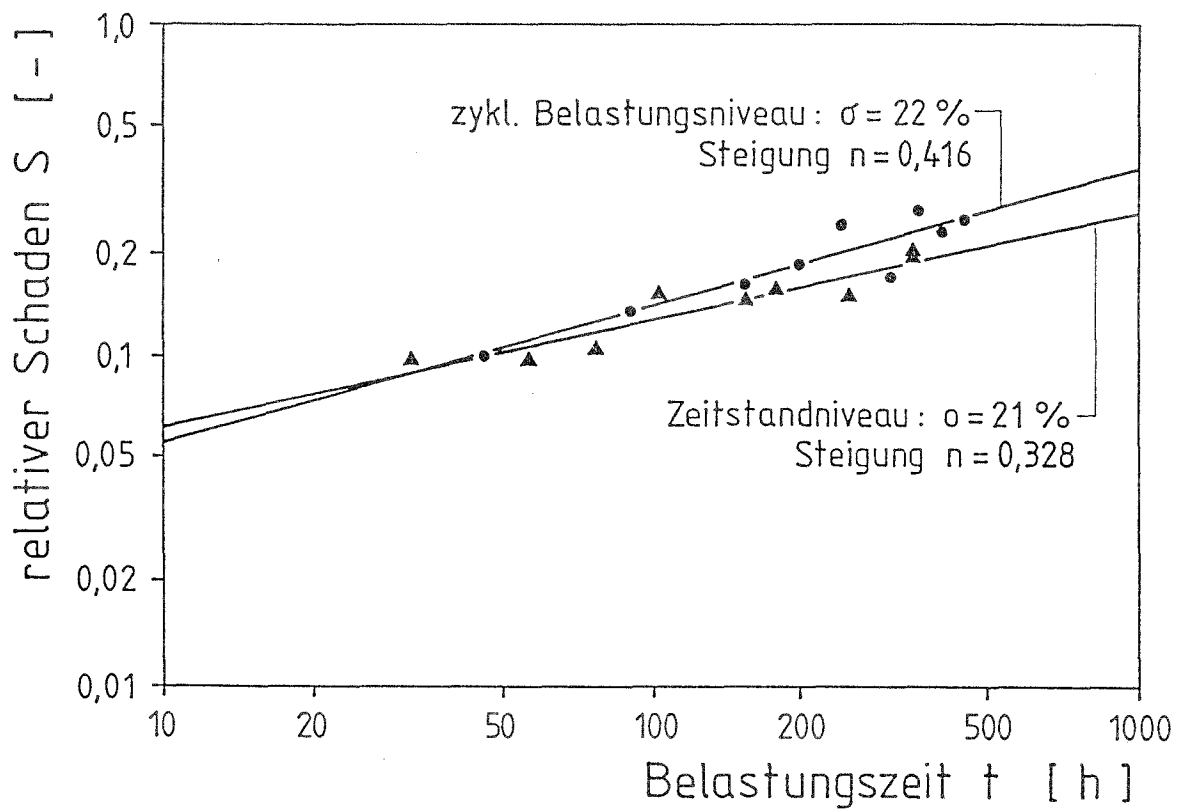


Bild 22: Schadensfortschrittskurven, bei zyklischer Lasteinwirkung und bei konstanter Dauerlast, dargestellt im doppeltlogarithmischen Maßstab

4 Folgerungen für die Bemessung von GFK gegen Materialversagen

4.1 Darstellung des aktuellen Bemessungsverfahrens

GFK- Bauteile werden aktuell weitgehend nach deterministischen Bemessungsregeln dimensioniert. Zulässige Spannungen ermitteln sich als Fraktile unter Zugrundelegung einer logarithmischen Normalverteilung (vergl.[1]).

Zusätzlich wird die Spannung mit Abminderungsfaktoren infolge besonderer äußerer Einwirkungen, wie beispielsweise Temperatur, bzw. Reaktionen des GFK- Bauteils, wie beispielsweise Kriechen, versehen.

Die zulässige Spannung σ_{zul} ermittelt sich danach gemäß Gleichung (5).

$$\sigma_{zul} = \frac{\beta}{S \cdot A_{1B} \cdot A_{2B} \cdot \dots \cdot A_{iB}} \quad (5)$$

β ist nach den Prüfgrundsätzen des IfBT [1] die Kurzzeitfestigkeit als 5%- Fraktile bei 75%- iger Aussagewahrscheinlichkeit unter Zugrundelegung einer logarithmischen Normalverteilung. Die Abminderungsfaktoren A_{iB} berücksichtigen den zeitlichen Festigkeitsabfall infolge äußerer Lasteinwirkung, Temperatur- und Medieneinfluß sowie Fertigungsungenauigkeiten.

Der Festigkeitsnachweis wird für Bruchversagen geführt. In ähnlicher Form wird zusätzlich ein Stabilitätsnachweis gefordert. Außerdem muß in bestimmten Fällen der Nachweis des nicht Erreichens einer Grenzdehnung geführt werden, insbesondere wenn die Deckschichten eines Behälterlaminates aus einer Wirrfaserlage besteht, wie dies beispielsweise von Franken[11] empfohlen wird. Eine zusätzliche Gel-Coat- Schicht verbessert die Beständigkeit. Das IfBT gibt hier einen Grenzwert von $\epsilon_{Rand} = 0.35\%$ bis $0.5\%/A_{1I}$ an [5]. A_{1I} wird durch Kriechversuche ermittelt (vergl. [?]). In DIN 18820 Teil I wird im wesentlichen dieselbe Vorgehensweise vorgeschlagen. Im Teil II dieser Norm und in den Musterberechnungen des IfBT [5] sowie in Franken [11] werden Abminderungsfaktoren von Typenlaminaten angegeben.

Zur Berücksichtigung von Lastkombinationen wird der Festigkeitsnachweis mit den

entsprechend gewichteten einwirkenden Kräften und Momenten nach Gleichung (6) vorgenommen.

$$\frac{S_B \cdot \sum_i (A_{B_i} \cdot n_i)}{n_b} + \frac{S_B \cdot \sum_i (A_{B_i} \cdot m_i)}{m_B} \leq 1 \quad (6)$$

S_B ist der maßgebliche globale Sicherheitsbeiwert, der in den Musterberechnungen des IfBT [5] mit $S_B = 2,0$ angegeben ist. n_B und m_B sind die bei Normalklima ermittelten Kurzzeitbruchkräfte bzw. -bruchmomente. n_i und m_i sind die einwirkenden äußeren Kräfte, bzw. Momente. Der Mindestwert des Abminderungsfaktors wird wie folgt angegeben : $A_B * S \geq 4$ (vergl. [5].)

Die Lasten sind entsprechend ihrer Einwirkdauer zu bewerten. Die Bewertung wird durch die Abminderungsfaktoren A_B vorgenommen. Hierbei gelten folgende Einwirkzeiten bzw. Abminderungsfaktoren (aus den Musterberechnungen des IfBT [5]) :

- Schnittgrößen aus ständiger Last (Eigengewicht, Füllung, Betriebsdruck):
 A_1 für $2 \cdot 10^5 h$;
- Schnittgrößen aus Temperatur: $A_1 = 1,0$;
- Schnittgrößen aus Schnee: A_1 für $2 \cdot 10^3 h$;
- Schnittgrößen aus Verkehrslast, Wind und kurzzeitigem Betriebsdruck:
 $A_1 = 1,0$ (für Kurzzeitbelastungen).

Die Schneelasten sind also beispielweise nur einmal anzusetzen. Es wird mit einer vollständigen Erholung des Bauteils in der Entlastungsperiode gerechnet.

4.2 Vorschläge für das Bemessungsverfahren für glasfaser- verstärkte Kunststoffe im Bauwesen

GFK- Bauteile müssen bekanntlich für eine vorgegebene Lebensdauer bemessen werden, da der Materialwiderstand sich unter Zeitstandeinfluß und Dauerschwingbelastung verändert.

Für die Dimensionierung gegenüber Zeitstandbelastung wird im wesentlichen ein linearer Verlauf der Zeitstandgeraden im doppeltlogarithmischen Maßstab angenommen, der eine Extrapolation auf große Zeiträume zuläßt. Dies konnte durch die oben beschriebenen Versuche bestätigt werden und hat sich nach Auswertung der Rißfortschrittmessungen auch für den niedrigen Lastbereich als richtig erwiesen. Sowohl die Rißfortschrittmessungen als auch die Dehnungsmessungen zeigten im oberen wie im unteren Lastbereich (etwa Gebrauchslast) dieselbe Charakteristik und lassen somit auch den Schluß des vergleichbaren Bruchmechanismus zu. Auch in der Literatur findet sich kein Hinweis auf eine Dauerfestigkeit. In Bild 23 werden zwei Literaturstellen mit den eigenen Versuchen verglichen (vergl. auch [15], [11] u. a.).

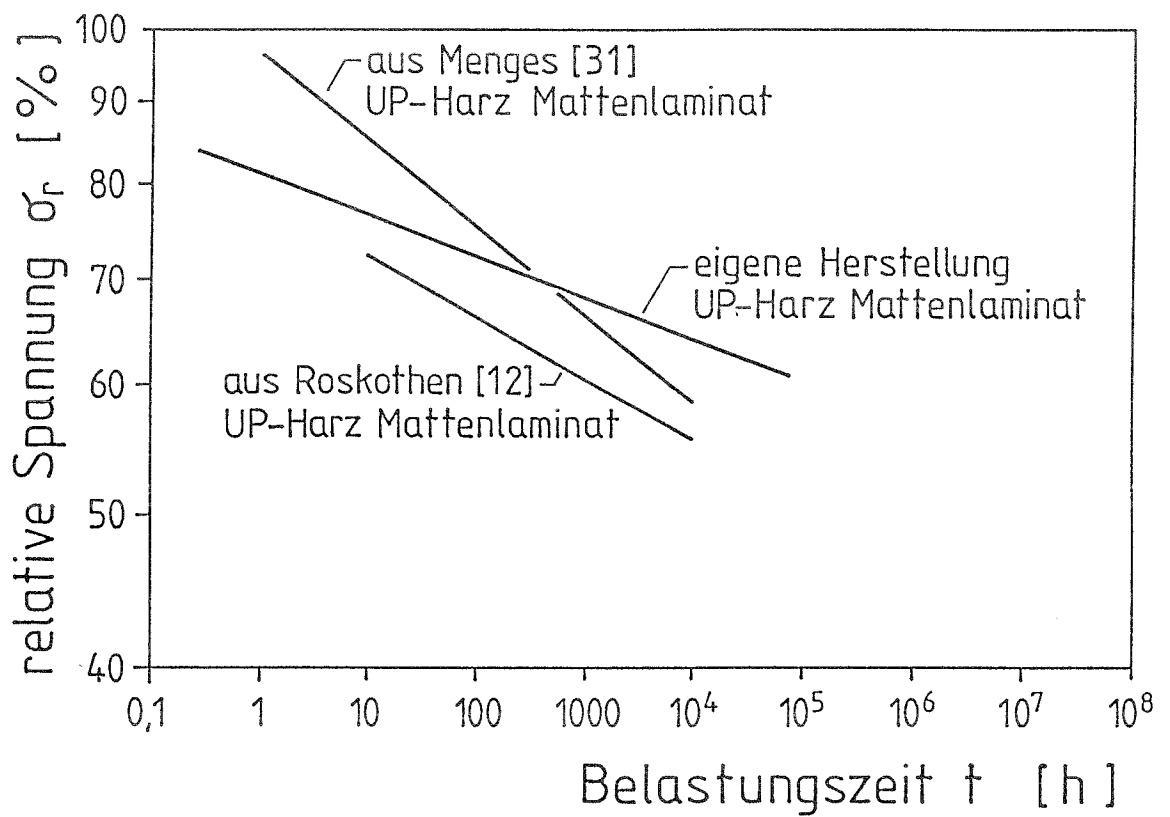


Bild 23: Zeitstandergebnisse aus der Literatur im Vergleich mit der ermittelten Zeitstandgeraden

Auch Ergebnisse zur Dauerschwingfestigkeit von GFK- Laminaten zeigen, daß eine Dauerfestigkeit des Materials unter γ_{Qi} - fachen Lasteinwirkungen nicht angesetzt werden kann. Die folgenden Bilder 24 bis 26 zeigen aus der Literatur ausgewählte Lebensdauerlinien (vergl. auch [26], [28],[29],[30],[24],[27] u. a.)

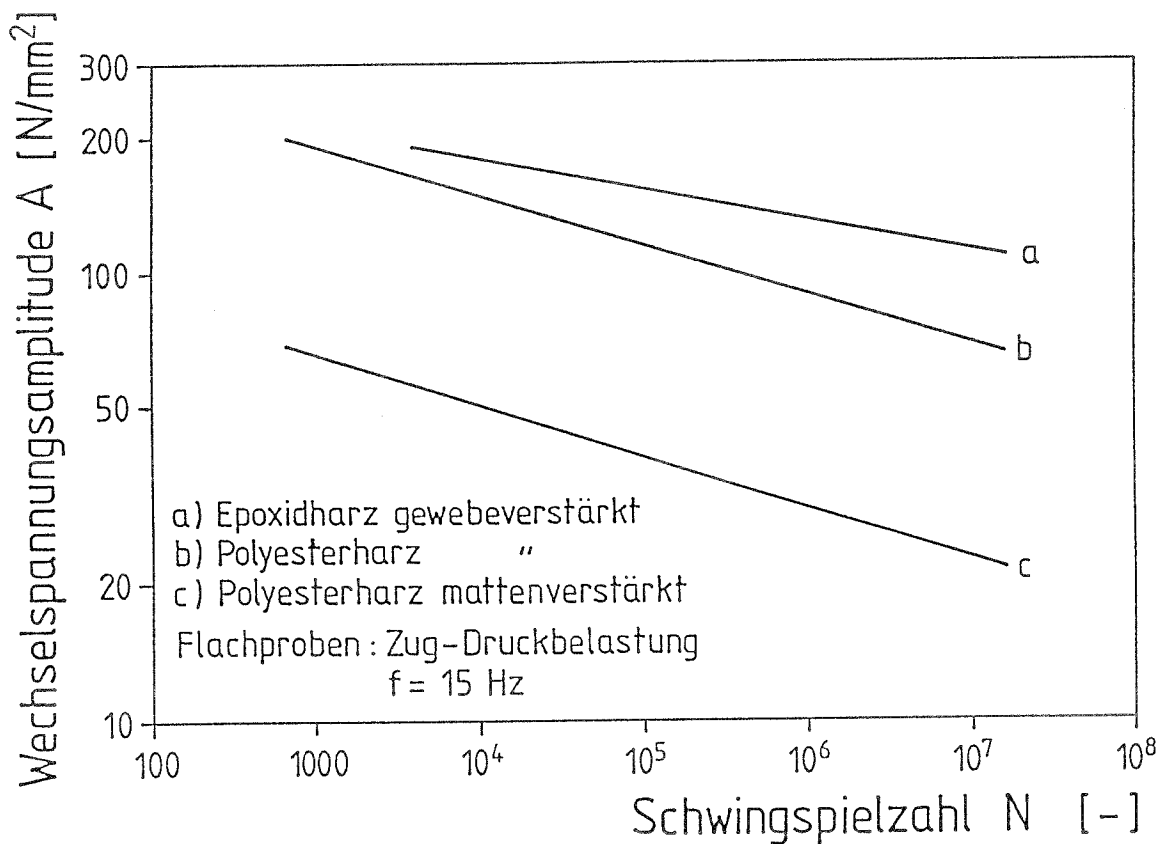


Bild 24: Lebensdauerlinie von drei GFK- Laminaten aus der Norm VDI 2013 [32]

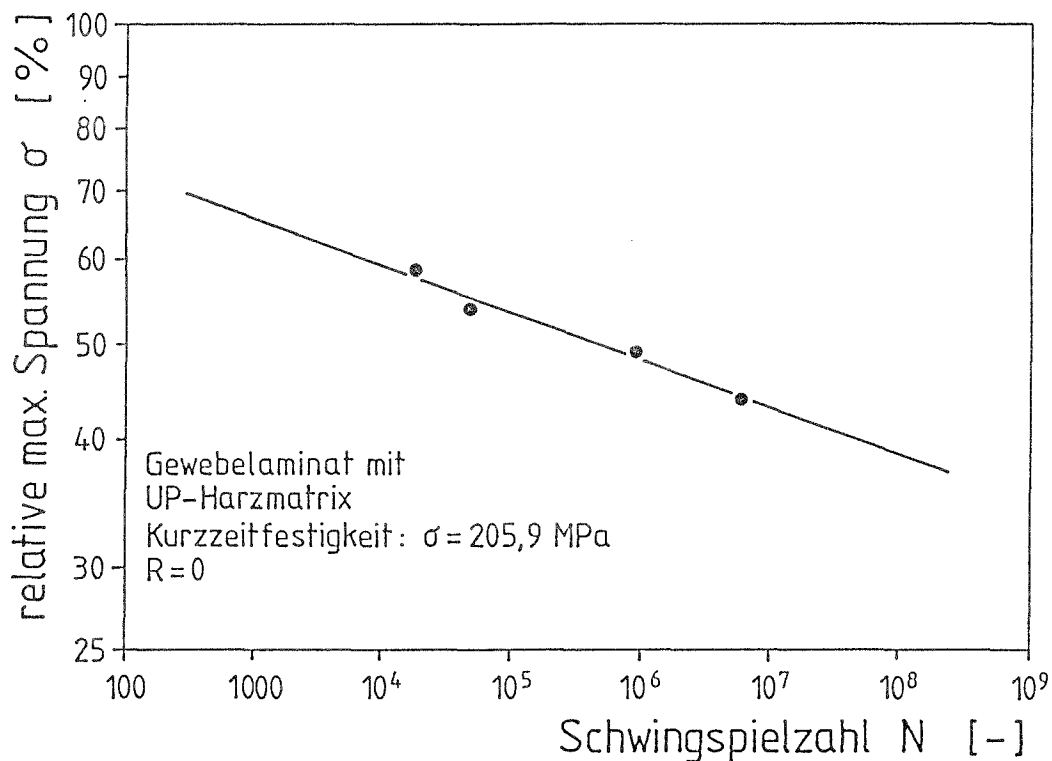


Bild 25: Lebensdauerlinie eines Gewebelaminates aus Tanimoto [25]

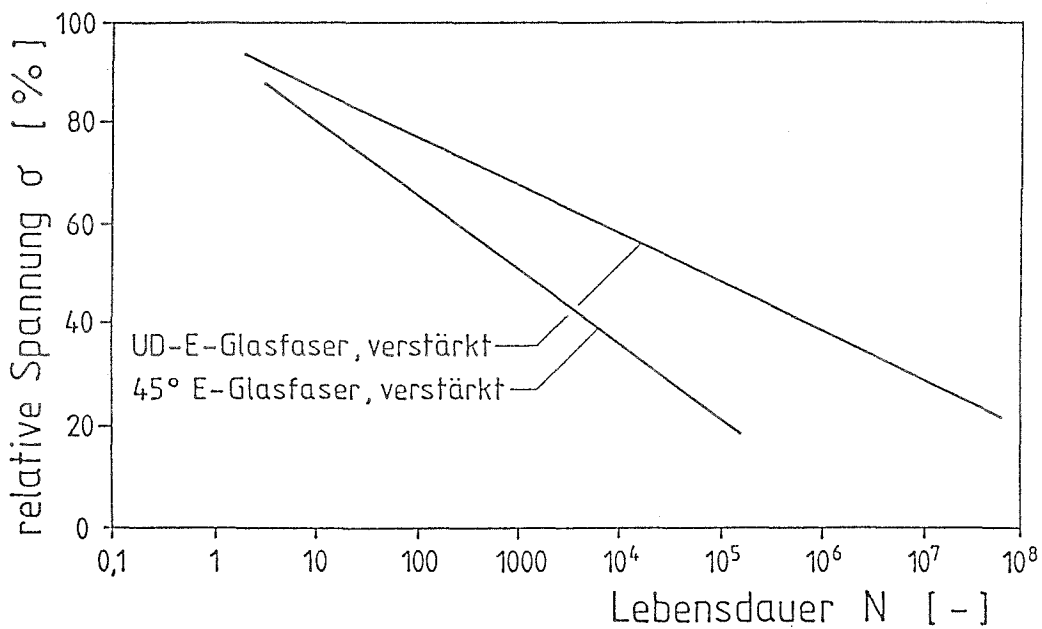


Bild 26: Lebensdauerlinie von zwei Laminaten aus Konur [23]

Es wird vorgeschlagen, folgende Gesichtspunkte bei einem Bemessungsverfahren für GFK- Bauteile im Bauwesen zu berücksichtigen :

- Es muß eine Schadensakkumulation für periodische Lasten über die gesamte geplante Bauteillebensdauer zugrundegelegt werden, im Sinne einer Betriebsfestigkeits- oder Dauerfestigkeitsgrenze.
- Das Bemessungsverfahren sollte auf der Basis probabilistischer Betrachtungsweisen aufgebaut sein. Dabei sollten die tatsächlichen Wahrscheinlichkeiten des Auftretens der Einwirkungen bzw. Lasten hinsichtlich der Lasthöhe und der Einwirkungshäufigkeit bzw. der Einwirkdauer präziser berücksichtigt werden (Beispielsweise mit Teilsicherheitsbeiwerten und Wichtungsfaktoren).

Die daraus resultierenden Bemessungsschritte und Teilsicherheitsbeiwerte müßten unterscheiden :

- einen Teilnachweis zur Sicherheit gegenüber dem Erreichen der Materialkurzzeitfestigkeit und
- einen Teilnachweis zur Lebensdauer bei Einwirkungen der periodisch veränderlichen Zeitstandlasten und von Dauerschwingbelastungen, wobei die schädigende Wirkung der Lastarten zu addieren ist;
- ggf. einen Teilnachweis zur Begrenzung der Dehnungen zur Verhinderung von Oberflächenrissen bzw. Sicherung der Materialeigenschaften bei Einwirkung von chemischen Medien.

Eine solche Verfahrensweise läßt eine wirtschaftlichere Bemessung als bisher erwarten.

Eine Begrenzung der Materialdehnungen (zur Verhinderung von Oberflächenrissen) kann in der Regel nicht ohne weiteres als Ersatz für Zeitstand- oder Dauerschwingfestigkeitsnachweise herangezogen werden, wie das z. Z. bei Windkraftanlagen (vergl. [2]) geschieht. Insbesondere stark unidirektional verstärkte Bauteile können bei nur geringer Dehnungszunahme eine ausgeprägte Schadensakkumulation aufweisen

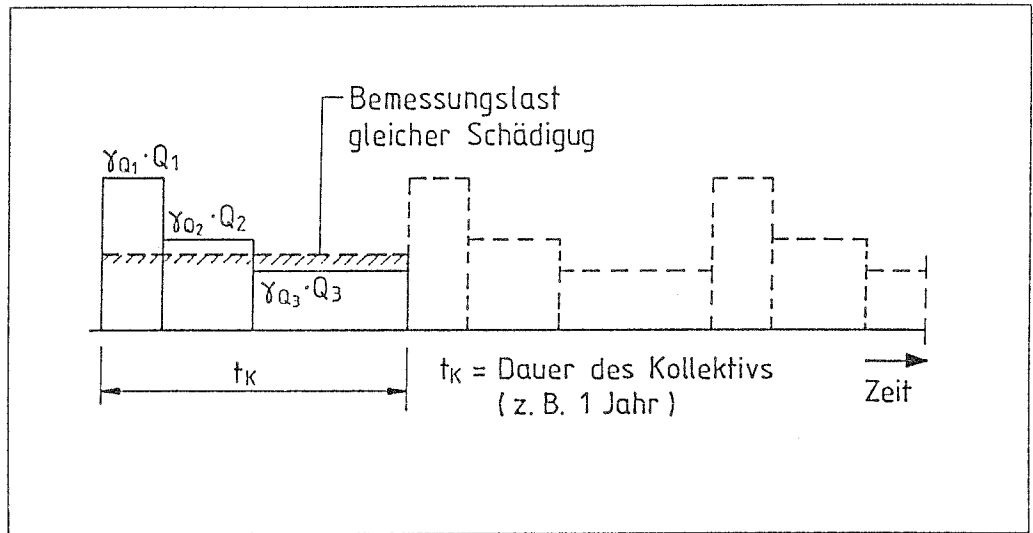
und ggf. entsprechend versagen. Eine Materialdehnungsgrenze kann nur dann als Ersatz für einen Lebensdauernachweis gelten, wenn die zugehörige Betriebsbeanspruchungen zwangsläufig so niedrig sind, daß ein Versagen des Bauteils wegen Überschreitens der Betriebsfestigkeit nicht eintreten kann.

Das unter 4.1 beschriebene zur Zeit benutzte Bemessungsverfahren könnte ergänzt werden durch einen Lebensdauernachweis zur genaueren Berücksichtigung der Schädigungseinflüsse bei vorliegenden periodischen Belastungen verschiedener Ursachen unter Anwendung der Akkumulationsregel für Zeitstandbelastungen ähnlich des Verfahrens bei Behältern aus Thermoplasten.

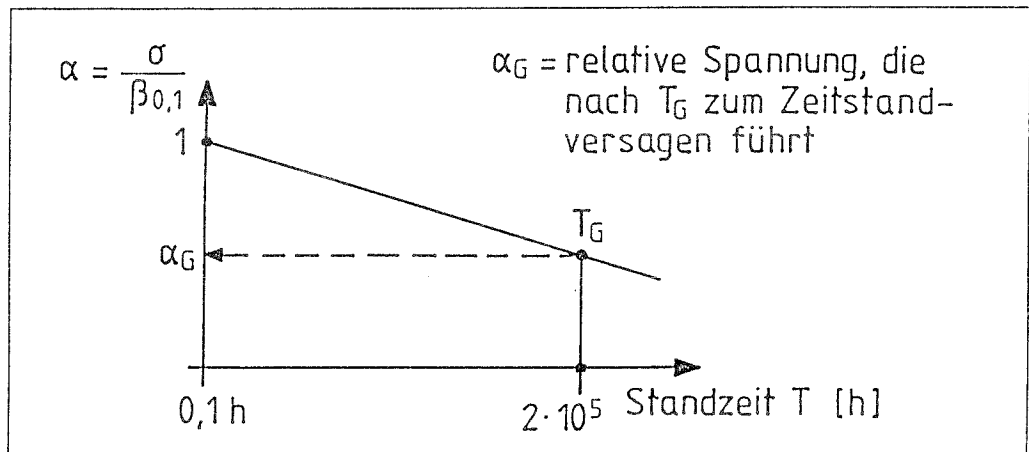
Folgende anschauliche Vorgehensweise wird vorgeschlagen :

1. Gegebene Daten :

- Belastungskollektiv für einen repräsentativen Zeitabschnitt (z. B. 1 Jahr) :



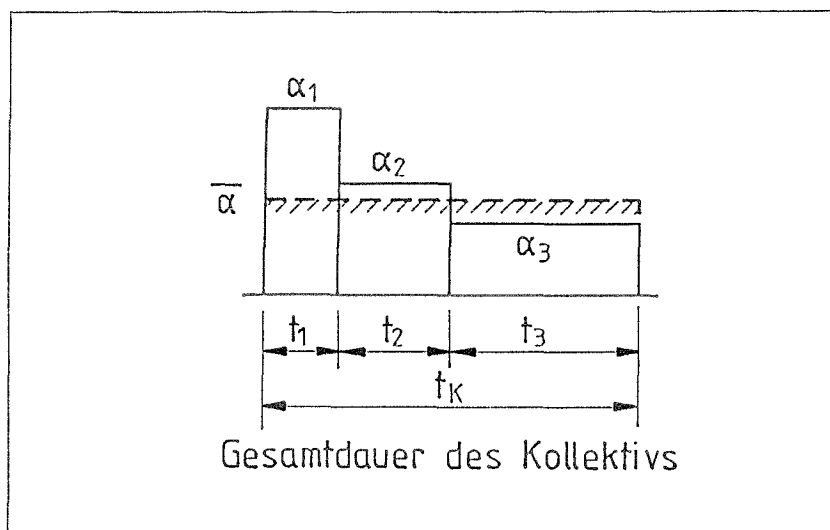
- Zeitstandgerade (Nennfestigkeit bzw. mit probabilistischen Ansätzen unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_m) im doppellogarithmischen Maßstab :



2. Bemessungsforderung : $\bar{\alpha} \leq \alpha_G$

d. h. die dem Kollektiv gleichwertige konstante Spannung $\bar{\alpha}$ (die zur gleichen Materialschädigung führt) darf nicht größer sein als α_G .

$$\alpha_i = \frac{\sigma(\gamma_{Qi} \cdot Q_i)}{\beta_{0,1h}} \quad , \quad (7)$$



3. Berechnung der „äquivalenten Spannung“ $\bar{\alpha}$:

Auf der Basis der Zeitstandgeraden :

$$\alpha = C \cdot T^{-1/n} \quad \text{bzw.} \quad T = \frac{1}{D \cdot \alpha^n} \quad (8)$$

und der Akkumulationsregel

$$\sum_j \frac{t(\alpha_j)}{T(\alpha_j)} = 1 \quad (9)$$

folgt für das Kollektiv ($i = 1$ bis 3 im Beispiel)

$$\bar{\alpha} = \left(\frac{\sum_i \alpha_i^n \cdot t_i}{t_k} \right)^{1/n} \quad (10)$$

5 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojektes war es zu überprüfen, ob eine Schädigung von GFK-Laminaten infolge periodischer Zeitstandlasten über die gesamte Lebensdauer auftritt und ob ggf. diese Schädigung mit Hilfe der Akkumulationsregel für die Standzeiten

$$\sum \frac{t(\alpha_i)}{T(\alpha_i)} = 1$$


beschrieben werden kann.

Hierzu wurde eine große Zahl von Kurzzeit- und periodischen Zeitstandversuchen unter gleichzeitiger Messung der Dehnungen durchgeführt. Als Laminat wurde ein Wirrfaserlaminat mit 30-% Glasgehalt und einem nach vorgegebenen Kriterien flexibilisierten UP-Harz (Leguval) benutzt. Aufgrund des großen Kontrollaufwandes bei der Laminatherstellung waren die Ergebnisse mit vergleichsweise kleinen Streuungen behaftet.


Zusätzlich zu den Belastungsversuchen wurde an einem Vergleichslaminat mit Hilfe eines neu entwickelten Laserstrahlprüfverfahrens (durch rasterförmige Abtastung ausgewählter Laminatteilflächen) die Rißentwicklung bzw. Schädigungszunahme bei Zeitstandbelastungen quantitativ verfolgt.

Die Auswertung aller Versuche und Beobachtungen führt zu dem Schluß, daß hinab bis zu Belastungen in Höhe der üblichen Gebrauchslasten bei Zeitstandbelastungen ein Schädigungsfortschritt stattfindet, der nicht daraufhin deutet, daß GFK eine Zeitstandfestigkeits- bzw. Dauerschwingfestigkeitsgrenze aufweist. Es muß daher unterstellt werden, daß die Zeitstandgerade (im doppeltlogarithmischen Maßstab) auch zu geringen Beanspruchungen hin ihren linearen Verlauf beibehält. Ferner bestätigten die Untersuchungen, daß die Akkumulationsregel für Standzeiten offensichtlich in der Lage ist, die Schadensakkumulation (zumindest für die Benutzung im Rahmen von Bemessungsverfahren) ausreichend genau zu erfassen. Es wird vorgeschlagen, das aktuelle Bemessungsverfahren für GFK-Bauteile auf der Basis probabilistischer Betrachtungsweisen neu zu überdenken. Hierfür werden einige Hinweise gegeben. Zumindest sollte eine genauere Erfassung der Einwirkungsseite,

durch genauere Berücksichtigung der Schädigungseinflüsse bei vorliegenden periodischen Belastungen stattfinden, ähnlich der Verfahrensweise bei Behältern aus Thermoplasten. Hiervon kann im entsprechenden Fall eine höhere Laminatausnutzung erwartet werden.



Prof. Dr.-Ing. L. Franke



Dipl.-Phys. H.-J. Meyer

Literaturverzeichnis

- [1] N. N.
Bau- und Prüfgrundsätze für den Gewässerschutz
Schriften des Institutes für Bautechnik (IfBt)
Reihe B, Heft 3, Berlin, Januar 1985
- [2] Wölfel, E.
Erläuterungen zu vorläufigen Richtlinien für statische Nachweise von Windkraftanlagen
Mitteilungen des IfBT 5, Berlin, 1988
- [3] N. N.
Norm: Vorläufige Richtlinien für die Auslegung, Aufstellung und das Betreiben von Windkraftanlagen.
Amtsblatt für das Land Schleswig- Holstein 1982, S. 206 ff.
- [4] Thebing, U.,
Beitrag zur Dimensionierung von GF-UP unter wechselnden Beanspruchungen
Diss. TU Aachen, 1979
- [5] N. N.
Musterberechnungen für Kunststoffbehälter zur Lagerung wassergefährlicher Flüssigkeiten
Schriften des IfBt, Reihe B, Heft 4, Berlin, März 1986
- [6] Ehrenstein, G. W. ; u. a.
Glasfaserverstärkte Kunststoffe
Expert Verlag, Grafenau, 1981
- [7] Menges, G.
Abschätzen der Tragfähigkeit mässig beanspruchter Kunststoffteile
Kunststoffe Bd. 57, Heft 6, Seite 476 - 484, 1967

- [8] N. N.
Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen,
Berlin, Beuth-Verlag 1981
- [9] König, G.; Hosser, D.; Schobbe, W.
Sicherheitsanforderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen nach den Empfehlungen des NaBau
Sicherheit im Stahlbetonbau
Bauingenieur 57, S. 68 - 78, 1982
- [10] Turkstra, C. J.
Theory of Structural Design Decision
Solid Mechanics Division, University of Waterloo, 1970
- [11] Franken, W.,
Forschungsbericht 11/88 F
Beurteilung der Lebensdauer von langfristig beanspruchten GF-UP-Bauteilen
IfBt, Berlin, 1988
- [12] Roskothen, H.-J.
Untersuchung zur Dimensionierung von Bauteilen aus Kunststoffen
Diss. Aachen, 1974
- [13] Thebing, U.
Forschungsbericht: Ermittlung von A_{1I} -faktoren bei wechselnden Beanspruchungen
Ministerium f. Landes- und Stadtentwicklung, Nordrhein-Westfalen, 1985
- [14] Overbeck, E.
Zur Bruchfestigkeit und Zeitstandfestigkeit von Glasfasern und unidirektionalen GFK- Stäben
VDI Verlag, Reihe 5, Nr. 127, Düsseldorf, 1987

- [15] Franke, L.
Schadensakkumulation und Restfestigkeit im Licht der Bruchmechanik
Fortschritte im konstr. Ingenieurbau ; Rehm - Festschrift, 1984
- [16] Franke,L. ; Overbeck,E. ; Meyer,H.-J.
Vorhersage der Zeitstandfestigkeit von GFK- Stäben
Bautechnik 68, Heft 1, Seite 21 - 24, 1991
- [17] Franke,L.; Overbeck,E.; Meyer, H.-J.
Vorhersage der Zugfestigkeit von GFK - Stäben
Bautechnik 67, Heft 10, Seite 341 - 345, 1990
- [18] Kothe, E., Beanspruchung glasfaserverstärkter Plaste bei zweiachsigen Spannungszuständen
Plaste und Kautschuk, 22. Jahrg., Heft 9, 1975
- [19] Grunert, S. ; Grunert, B. ; Schneider, H.
Mikroskopische Untersuchungen an geschädigten GUP- Laminaten
Plaste und Kautschuk , 22. Jahrgang, Heft 8, 1975
- [20] Rehm, G.; Franke,L.
Kunstharzgebundene Glasfaserstäbe als Bewehrung im Spannbetonbau
Schriftenreihe des DAfStb, Heft 304, 1979
- [21] Franke, L.
Schadensakkumulation für dynamisch beanspruchte Werkstoffe und Bauteile
Bauingenieur 60, Seite 271 - 279, 1985
- [22] Meyer, H.-J.
Zur Bemessung von GFK- Bauteilen unter Zuhilfenahme der linear elastischen Bruchmechanik und probabilistischer Versagenskriterien
Dissertation an der Technischen Universität Hamburg- Harburg, 1992
- [23] Konur, O. ; Matthews F. L.
Effect of the properties of the constituents on the fatigue performance of

- composites : a review
Composites, Volume 20, Number 4, P. 317 .. 328, July 1989
- [24] Janzen, W. ; Ehrenstein, G. W.
Bemessungsgrenzen von glasfaserverstärktem PBT bei schwingender Beanspruchung
Kunststoffe 81, Seite 231 bis 236 , 3/1991
- [25] Tanimoto, T. ; Amijima, S.
Fatigue Life and its Reliability of FRP under Multi-Stepping Loading
Composite Materials, K. Kawata & T. Akasaka, Ed.
Proc. Japan-U.S. Conference, P. 145 - 163, Tokyo, 1981
- [26] Hofer, K. E. ; Skaper, G. N. and Bennett, L. C.
Effect of Moisture on Fatigue and Residual Strength Losses for Various Composites
Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 6, P. 53 - 65, January 1987
- [27] Jessen, S. M. ; Plumtree, A.
Fatigue damage accumulation in pultruded glass/polyester rods
Composites, Volume 20, Number 6, P. 559 - 567, Nov. 1989
- [28] Hawang, W. ; Han, K. S.
Statistical study of strength and fatigue life of composite materials
Composites, Volume 18, No. 1, P. 47 - 53, Jan. 1987
- [29] Shih, G. C. ; Ebert, L. J.
The effect of the Fiber/Matrix Interface on the Flexural Fatigue Performance of Unidirectional Fiberglass Composites
Composite Science and Technology, Vol. 28, P. 137 - 161, 1987
- [30] Horstemeyer, M. F. ; Staab, G. H.
Interface Debonding in Fatigue Cycling of Glass Reinforced Plastics
Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 9, P. 446 - 455, 1990

[31] Menges, G. ; Schwarz, O.

Untersuchungen zum mechanischen Verhalten glasfaserverstärkter Kunststoffe bei statischer Langzeitbeanspruchung

Der Plastverarbeiter (PV), Vol. 19 , 1968

Normen

- [32] VDI- Richtlinie: VDI 2013
Dimensionierung von Bauteilen aus GFK, Januar 1970
- [33] Entwurf zur Deutschen Norm : DIN 16 944
Glasfaserverstärkte Reaktionsharzformstoffe ; Prüfverfahren; Mai 1984
- [34] Entwurf zur Deutschen Norm : DIN 53 455
Prüfung von Kunststoffen ; Zugversuch ; Juni 1988
- [35] Deutsche Norm : EN 61
Glasfaserverstärkte Kunststoffe , Zugversuch; November 1977
- [36] Entwurf der Deutschen Norm : DIN 18 820
Textilglasverstärkte ungesättigte Polyesterharze für tragende Bauteile,
Teil 1 bis 3 ; November 1986
- [37] Deutsche Norm : DIN 1055
Lastannahmen für Bauten, Teil 4
Verkehrslasten, Windlasten für nicht schwingungsanfällige Bauwerke ;
August 1986
- [38] Norm: Eurocode Nr. 3
Gemeinsame einheitliche Regeln für Stahlbauten
Kommission der Europäischen Gemeinschaft, Bericht EUR 8849, Brüssel 1984

Projet de recherche :

Accumulation de dommages aux éléments de construction en matières plastiques renforcées de fibres de verre

Résumé

Dans le projet de recherche, on a vérifié la détérioration de stratifiés en matière plastique renforcée par des fibres de verre sur l'ensemble de la durée de service due à des charges de longue durée périodiques et constantes. Il y avait à étudier si cette détérioration peut être décrite à l'aide de la règle d'accumulation de détériorations:

$$\sum_i \frac{t(\alpha_i)}{T(\alpha_i)} = 1$$

$t(\alpha_i)$ est la durée de temps d'une charge partielle α_i et $T(\alpha_i)$ la durée de temps qui aurait conduit à la défaillance conformément aux lignes de durée de vie sur ce niveau.

On a réalisé pour cela un grand nombre d'essais de courte durée et de durées périodiques en mesurant simultanément les extensions. En tant qu'échantillons en matière plastique renforcée par des fibres de verre, on a utilisé un stratifié composé de 30 % de fibres de verre et de résine polyester UP (Leguval) flexibilisée d'après des critères donnés. A cause de grands efforts de contrôle lors de la fabrication et d'optimisation du module d'élasticité de la résine, les résultats montraient en comparaison de petites dispersions.

Au-delà des essais de charge, on a poursuivi quantitativement sur un stratifié comparable le développement de fissures et l'intensification de détérioration à l'aide d'une méthode d'essai à rayon laser nouvellement mise au point.

L'appréciation de tous les essais et des observations conduit à la conclusion qu'il y a, lors de charges de longue durée aussi au montant de charges de service, un progrès de détérioration qui n'indique pas une limite de résistance aux sollicitations dynamiques ou de longue durée. C'est pourquoi que l'on doit supposer que les lignes de résistance (dans l'échelle à double logarithme) conservent leur parcours droit jusqu'au niveau des sollicitations de service. En outre, la règle d'accumulation est capable de saisir suffisamment exactement l'accumulation de dommages (au moins pour l'utilisation dans le cadre des procédures de dimensionnement).

On propose de réfléchir de nouveau sur le procédé actuel de dimensionnement des éléments de construction en matière plastique renforcée par des fibres de verre tenant compte de procédés de calcul probabilistes. Quelques indications sont données de ce point de vue. Au moins une saisie plus exacte du côté des sollicitations devrait avoir lieu en considérant plus exactement les influences de détérioration en cas de charges périodiques, similaire à la façon de procéder au cas des réservoirs en thermoplastique. On peut en attendre une plus haute exploitation du stratifié.

Research project :

Damage accumulation in GRP- components

Summary

The research project examined the damage to GRP laminates caused by periodic and constant long-time loads throughout the service life of the components. One of the aims was to establish whether this damage can be described with the help of the following accumulation rule :

$$\sum_i \frac{t(\alpha_i)}{T(\alpha_i)} = 1$$

$t(\alpha_i)$ is the duration of the partial load α_i and $T(\alpha_i)$ the time which would have led to failure according to the creep rupture straight lines at this level.

This was done by conducting a large number of short-time and periodic creep-rupture tests while measuring elongation. The GRP- specimen was a matted laminate with 30 % glass content and a UP resin (Leguval) rendered flexible using specified criteria. Due to the elaborate inspection procedures employed in manufacturing the laminate and the optimization of the modulus of elasticity of the resin, the results were subject to relatively small statistic scatter.

In addition to the stress tests, a comparison laminate and a newly developed laser beam testing technique (grid scanning selected parts of areas in the laminate) were used to follow the development of cracks and the increase of damage during creep rupture loads.

The evaluation of all tests and observations leads to the conclusion that down to stress values equal to working load when under creep rupture load,

a progression of damage takes place that does not indicate that GRP has a long-time rupture strength or endurance limit. It was therefore be assumed that the creep rupture straight lines (on a double logarithmic scale) will remain linear even towards lower stresses. The examinations also confirm that the accumulation rule for endurance is obviously capable of registering the accumulation of damage (at least for use as part of dimensioning technique) with sufficient accuracy.

We propose reappraising the current dimensioning technique for GRP on the basis of a probabilistic approach. Several suggestions are provided for this, and at least the acting side should be more accurately registered by taking more exact account of the damaging influences under periodic stresses, similar to the methods applied to containers made of thermoplastics. In the corresponding application, this can be expected to allow higher utilization of the laminate.