

Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes auf das quasistatische Verformungsverhalten technischer Vulkanfiber*

*Bastian Penning, Frank Walther,
Dominik Dumke und Bernd
Künne, Dortmund*

Ein detailliertes Wissen über die Werkstoffeigenschaften stellt für Konstrukteure und Fertigungsingenieure die Grundvoraussetzung zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Betriebs von Bauteilen dar. Ziel dieser Untersuchung ist es, den nur wenig untersuchten Konstruktionswerkstoff Vulkanfiber hinsichtlich des Einflusses der Verformungsgeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes auf die quasistatischen Eigenschaften mikrostrukturbasiert zu charakterisieren und zu bewerten. Neben materialografischen und mikroskopischen Einrichtungen wurden ein Ultramikrohärteprüfsystem sowie zur mechanischen Charakterisierung eine elektromechanische Universalprüfmaschine, ein taktils und ein Videoextensometer, Thermolemente und ein Thermografiesystem sowie eine Hochgeschwindigkeitskamera zur Detektierung des Rissbildungs- und -ausbreitungsverhaltens eingesetzt.

Aufgrund stagnierender Forschungsaktivitäten hinsichtlich technischer Vulkanfiber existieren nur wenige Angaben zu Materialeigenschaften und potenziellen Einsatzmöglichkeiten. Bisweilen wird Vulkanfiber als Dichtungsmaterial, Isoliermaterial [1, 2], Trägermaterial für Schleifscheiben und für diverse Tiefziehprodukte, wie z. B. Schweißer-Schutzschirme [2, 3, 4], eingesetzt (Bild 1). In der Vergangenheit wurde Vulkanfiber aber auch für Schutzhelme, Koffer, Verpackungen und Fadenführungen in der Textilindustrie verwendet.

Technische Vulkanfiber besteht vorrangig aus Baumwollinters bzw. aus recycelten Hadern. Letztere werden durch einen Kochprozess aufgeschlossen und als Rohmaterial für die Papierproduktion bereitgestellt. Da Vulkanfiber industriell entweder im diskontinuierlichen Wickelverfahren

oder kontinuierlich auf einer Fertigungsstraße gefertigt wird (Bild 2), dienen ungeleimte und saugfähige Baumwollpapiere als Ausgangsprodukt (a). Ein wesentlicher Fertigungsschritt ist die Pergamentierung. Für dünne Vulkanfiber kann als Reaktionsmittel Schwefelsäure [5] und für stärkere Vulkanfiber Zink-Chlorid-Säure verwendet werden [6, 7]. Wie in Bild 2 zu sehen ist, durchläuft das Papier die Säure in einem hierfür vorgesehenen Becken (c). Die Säure wird von dem Papier aufgenommen und löst die Oberflächen der Fasern auf. Mehrfachzuckermoleküle werden gebildet, die Fasern verwinden sich und schrumpfen. Während dieser Zeit ist es möglich, einzelne Lagen an Papier durch leichten Anpressdruck zu einem größeren homogenen Verbund zu verschmelzen (h).

Nach einer kurzen Reifezeit (i) wird die Säure wieder entfernt (j). Dies ist einerseits notwendig, um ein endgültiges Zersetzen der Fasern zu verhindern, und andererseits, um ein unbedenkliches Endpro-

dukt zu erhalten. Die Auswaschbecken werden hierbei im Gegenstromprinzip betrieben, so dass die Konzentration an Säure von Becken zu Becken niedriger wird. Zwecks Umweltfreundlichkeit werden alle verwendeten Flüssigkeiten im geschlossenen System betrieben. Säure und Wasser werden stets wiederverwendet und durch Osmose-Anlagen neu aufbereitet. Nach einer Trocknungsphase ist die Produktion abgeschlossen (l). Das Endprodukt ist frei von Säure und chemisch sowie biologisch unbedenklich. Vulkanfiber kann industriell derzeit als Rollen- oder Plattenware zur Verfügung gestellt werden. Rohre mit definiertem Außen- und Innendurchmesser sind ebenfalls möglich [5].

Technische Vulkanfiber weist nahezu die Eigenschaften von technischen Kunststoffen auf (Tabelle 1), basiert aber auf Naturrohstoffen. Dies führt dazu, dass Vulkanfiber, wie auch das Ausgangsmaterial, hydrophile Eigenschaften besitzt. Damit einhergehend ist auch ein Quellverhalten zu beobachten.

* Untersuchungen mit unterschiedlichen Beanspruchungs- und Klimaprofilen

Um dieses Verhalten detailliert zu analysieren und um Optimierungsmöglichkeiten auszumachen, wird das Material anhand eines vollfaktoriellen Versuchsplans charakterisiert. Die Ergebnisse werden in grafischer Form dargestellt sowie Stärken und Schwächen der Untersuchungen aufgezeigt [4, 9].

Versuchsaufbau und -parameter

Die hier durchgeführten Untersuchungen erfolgten an Proben aus industriell hergestellter Vulkanfaser. Aus Vulkanfaserplatten der Dicke von etwa 0,8 mm wurden Proben

mit den Abmessungen 140 mm x 15 mm herausgeschnitten bzw. -gestanzt. Aus dem Bereich der Einflussgrößen wurden im ersten Schritt zwei wesentliche ausgewählt, die Prüfgeschwindigkeit und die relative Luftfeuchtigkeit, deren Einfluss auf die quasistatischen Eigenschaften charakterisiert und quantitativ bewertet wurde.

Die deutsche Industrienorm 7738 schreibt eine Prüfgeschwindigkeit von 10 % der freien Einspannlänge pro Minute mit einer Toleranz von ± 2,5 % vor. Bei 70 mm freier Einspannlänge ergibt dies eine Prüfgeschwindigkeit von ca. 7 mm/min. In dieser Untersuchung wurden Geschwindigkeiten von 1, 5, 10, 100 und 1.000 mm/min verwendet. Dieselbe Norm benennt luftfeuchtebetreffend ein Klima von 65 % relativer Luftfeuchte. Ergänzend hierzu wurden auch Auslagerungen bei 25, 40 und 90 % relativer Luftfeuchte betrachtet. Die Proben wurden hierzu in ei-



Bild 1. Applikationen: Isoliermaterial (a), Schleifscheiben (b), Schweißer-Schutzschirm (c)

Figure 1. Applications: Insulating material (a), grinding wheels (b), welding helmet (c)

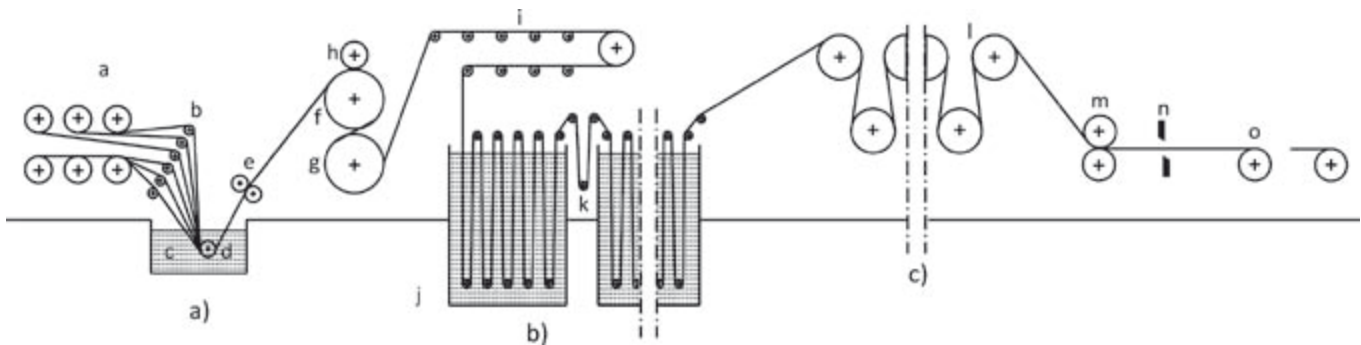


Bild 2. Kontinuierliche Fertigung technischer Vulkanfaser [5]

Figure 2. Continuous production of vulcanized fiber [5]

Materialkennwerte	Rohmaterial						
	Dichte [g/cm ³]	Elastizitätsmodul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	Isolationsfestigkeit [kV/mm]	Temperaturstabilität [°C]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Vulkanfaser*	1,10-1,45	4.000-8.000	60-120	1,3-12	5,2-12	180-220	0,31
PPO/PS (Alloy 30 % Glass Fiber)	1,27-1,36	6.900-8.960	103-128	2-5	21,7-24,8	83-97	0,16-0,17
DAP (Molding, Mineral Filled)	1,65-1,85	8.270-15.200	34,5-55,2	3-5	15,7-17,7	152-169	0,29-1,05
PA (Typ 66, 15-33 % Glass Fiber)	1,20-1,34	6.500-8.480	75,2-140	4,37-5,05	15-17	77-97	0,40-0,42
ABS (Flame Retarded)	1,06-1,21	1.860-2.760	27,6-55,2	1,5-80	13,8-19,7	62-77	0,26-0,27
PC (6 % Stainless Steel Fiber)	1,27-1,29	2.760-2.900	64,4-70,9	4,37-5,05	-	117-133	0,28-0,30
PSU (30-40 % Mineral Filler)	1,48-1,61	3.790-4.480	65,5-67,6	2-5	17-18,4	180-200	0,35-0,36
Aluminiumlegierungen	2,8	70.000	350	5-20	-	250	80-230
Holz	0,2-1,2	10.000	70-130	< 1	-	185-250	0,13-0,18

*„Materialeigenschaften aus DIN 7737, Daten der Krüger GmbH & Co KG und Untersuchungsergebnissen des Fachgebiets Maschinenelemente der TU Dortmund“

Tabelle 1. Eigenschaften technischer Vulkanfaser im Vergleich zu anderen Werkstoffen [3, 8]

Table 1. Properties of vulcanized fiber in relation to other materials [3, 8]

nem Klimaschrank (Binder, Typ KBF 240) bei einer Temperatur von 20 °C und den genannten Luftfeuchtigkeiten gelagert. Nach der Entnahme der Proben aus dem Klimaschrank wurden die Versuche unmittelbar durchgeführt.

Aufgrund dessen, dass jeweils fünf Wiederholungen pro Versuch durchgeführt wurden, ergaben sich einschließlich aller Kombinationen 100 Versuche. Die statistische Modellanalyse ergibt hierbei, dass sich bei einem Signifikanzniveau von 0,05 und einem Signal-Rausch-Verhältnis von mind. Faktor 2 alle linearen Effekte und Mischungseffekte zu 100 % vorhersagen lassen. Auch die quadratischen Effekte des Einflussfaktors Materialfeuchtigkeit lassen sich eindeutig bestimmen. Aufgrund der relativ groß gewählten Abstufungen der Prüfgeschwindigkeit ergibt sich ein Vorhersagefaktor der kubischen Anteile der Prüfgeschwindigkeit zu 76,4 %.

Die Zugversuche an den Vulkanfaserstreifenproben wurden an einer Universalprüfmaschine (Shimadzu, Typ AGS-X) mit einer Maximallast von 5 kN (Bild 3) durchgeführt. Die freie Einspannlänge der Proben betrug 70 mm, zur Dehnungsmessung kam ein Extensometer (Shimadzu, Typ SSG25-50H) mit der Messlänge 50 mm zum Einsatz. Durch die exakt senkrechte Ausrichtung der Proben in der Prüfmaschine wurden Querkräfte ausgeschlossen.

Versuchsergebnisse

Werkstoff. Ziel der Herstellung von technischer Vulkanfaser ist es, die einzelnen Lagen aufzulösen und die Fasern der Lagen miteinander zu verschmelzen. Dass dies nicht immer vollständig gelingt, zeigen die Mikrostrukturaufnahmen (Bild 4), auf denen die einzelnen Lagen voneinander zu unterscheiden sind.

Gleichzeitig zeigt sich eine gute, homogene Verschmelzung der Fasern innerhalb einzelner Lagen. Die Fasern scheinen keine bevorzugte Richtung, sondern eine stochastische Verteilung aufzuweisen (Bild 5).

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen bestätigen die Verschmelzung einzelner Fasern untereinander (Bild 6).

Im Rahmen der Mikrostrukturuntersuchung wurde eine instrumentierte Eindringprüfung nach DIN EN ISO 14577-1 mit einem Ultramikrohärteprüfsystem (Shimadzu, Typ DUH 211/S) in Form eines Load-Unload-Tests durchgeführt. Bei diesem Test dringt als Prüfkörper eine Diamantpyramide nach Vickers mit einer definierten Maximalkraft in die Vulkanfi-

berprobe ein. Die Kraft wird für wenige Sekunden konstant gehalten, bevor die Probe wieder entlastet wird. Während der Prüfung wird die aufgebrachte Kraft in mN als Funktion der Eindringtiefe in µm aufgezeichnet. Durch das Anlegen einer Tangente an die Entlastungskurve im Bereich von 70 bis 100 % der Maximalkraft,

kann der elastische Eindringmodul bestimmt werden, der einen Hinweis auf den Elastizitätsmodul des Werkstoffes liefert. Für die Prüfung wurde eine Maximalkraft von 98 mN (10 P) gewählt, entsprechend einer Prüfung nach HV 0,01. In Tabelle 2 sind die im Probenquerschliff ermittelten Kennwerte dargestellt.

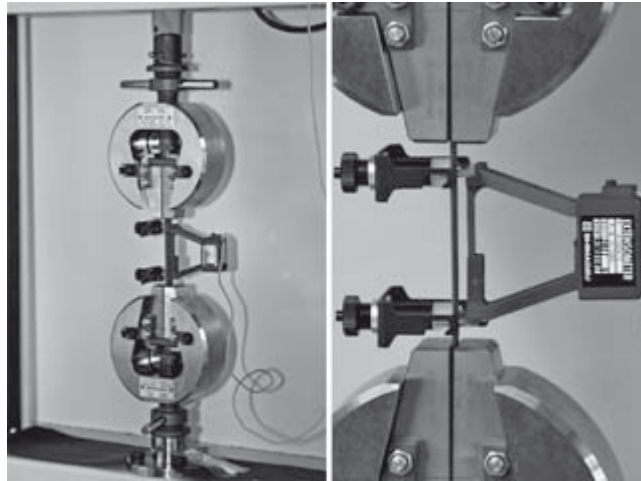


Bild 3. Versuchsaufbau für Zugversuche

Figure 3. Experimental set up for tensile tests

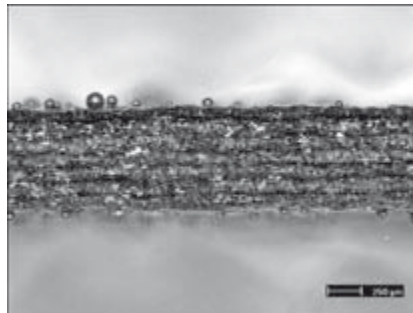


Bild 4. Lichtmikroskopische Mikrostrukturaufnahme, Querschliff

Figure 4. Light micrograph, transversal cross-section

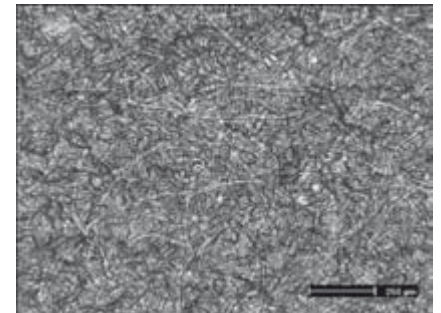


Bild 5. Lichtmikroskopische Mikrostrukturaufnahme, Oberflächenlängsschliff

Figure 5. Light micrograph, longitudinal surface cross-section

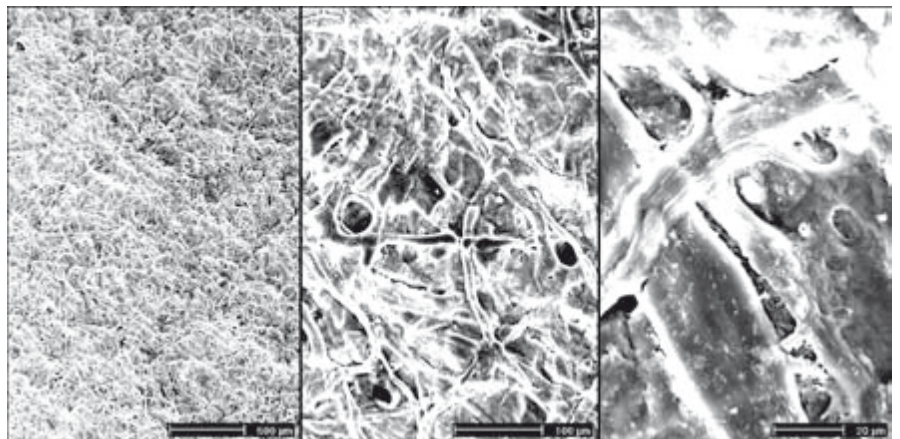


Bild 6. Rasterelektronenmikroskopische (REM) Mikrostrukturaufnahmen

Figure 6. Scanning electron micrographs (SEM)

Einfluss der Zuggeschwindigkeit. Für die Untersuchung des Einflusses der Zuggeschwindigkeit auf die quasistatischen Kennwerte der Vulkanfaser kamen auf Raumtemperatur mit 40 % relativer Luftfeuchtigkeit klimatisierte Proben zum Einsatz. Einleitend sind in Bild 7 exemplarisch die Verfestigungskurven für die beiden Zuggeschwindigkeiten 1 mm/min und 1.000 mm/min dargestellt.

Mit Zunahme der Zuggeschwindigkeit von 1 auf 1.000 mm/min ist ein deutlicher Anstieg des E-Moduls, der Nennspannung σ_N , der $R_{p0,2}$ -Dehngrenze und der Zugfestigkeit R_m zu beobachten, während die Maximaldehnung ϵ_{max} (bei Bruch) deutlich zurückgeht.

In Bild 8 sind der Elastizitätsmodul, die Zugfestigkeit und die Maximaldehnung als Funktion der Zuggeschwindigkeit in linearer und logarithmischer Skalierung dargestellt. Am größten ist der E-Modul bei der Zuggeschwindigkeit 1.000 mm/min, mit einem fast doppelt so großen Wert wie bei den übrigen Zuggeschwindigkeiten. Dennoch deutet der Verlauf der Kurven bei linearer Skalierung der Zuggeschwindigkeit einen Sättigungszustand an, so dass auch bei Zuggeschwindigkeiten > 1.000 mm/min die Auswirkung auf die Kennwerte nur noch klein zu sein scheint.

Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit. Die Untersuchung des Einflusses der relativen Luftfeuchtigkeit auf die Proben wurde bei Raumtemperatur mit einer Zuggeschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt. Bild 9 stellt die σ_N - ϵ -Verfestigungskurven für die relativen Luftfeuchten 25 % und 90 % dar.

Mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit nehmen der E-Modul, die Nennspannung, die $R_{p0,2}$ -Dehngrenze und die Zugfestigkeit ab, während die Maximaldehnung merklich zunimmt. Das mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit zwischen E-Modul bzw. Zugfestigkeit und Maximaldehnung gegenläufige Verhalten verdeutlicht Bild 10.

Wie sich in vorstehenden Darstellungen zeigt, haben die beiden untersuchten Faktoren Zuggeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit einen großen Einfluss auf die im Zugversuch ermittelten Materialkennwerte. In einem weiteren Schritt wurden die Wechselwirkungen zwischen den beiden Einflussfaktoren untersucht.

Kreuzeffekte. Die Kreuzeffekte wurden überwiegend unter Einsatz der Software JMP 10 Pro (SAS Institute Inc.) analysiert. Hierbei wird der verwendete Versuchsplan übernommen und alle Versuchsparameter berücksichtigt. Die grafische Ausgabe erfolgt bei der folgenden Analyse mittels Polynomen.

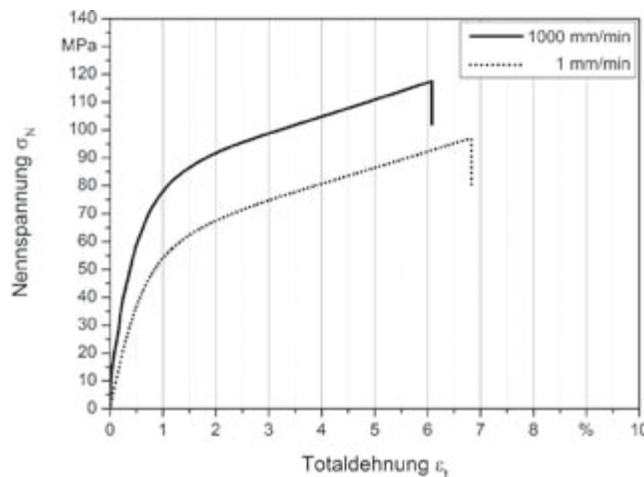


Bild 7. Einfluss der Zuggeschwindigkeit auf das Nennspannung-Totaldehnungs-Diagramm

Figure 7. Influence of the traverse speed on nominal stress-total strain diagram

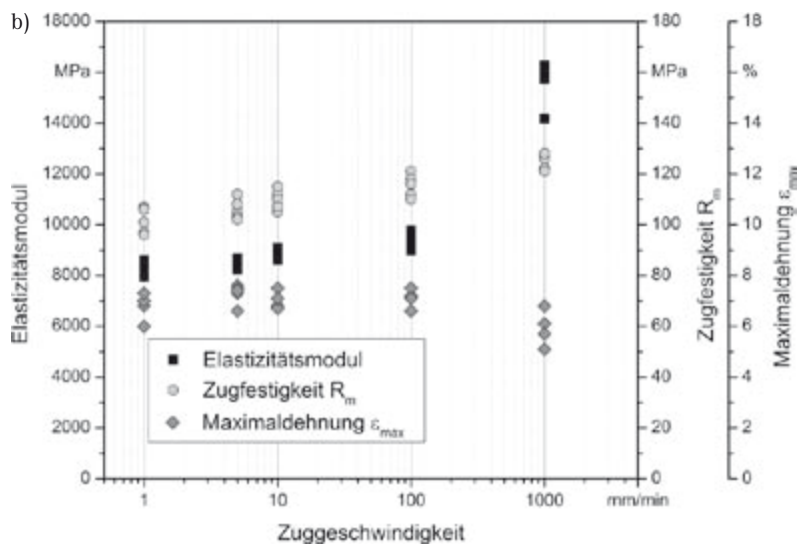
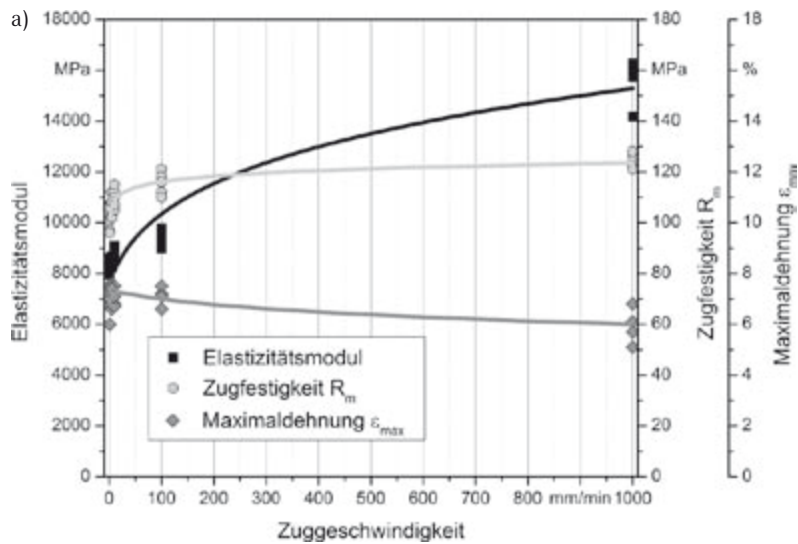


Bild 8. Einfluss der Zuggeschwindigkeit auf den E-Modul, die Zugfestigkeit und die Maximaldehnung in linearer (a) und logarithmischer (b) Darstellung

Figure 8. Influence of traverse speed on E-modulus, tensile strength and maximum strain in linear (a) and logarithmic (b) illustration

Die Anpassungsgüte der verwendeten Modelle liegt stets in einem Bereich von mindestens $r^2 = 0,90$ und die Modellgüte im Bereich von mindestens $r^2_{\text{koriert}} = 0,89$. Lediglich das Modell für die Verformungsenergie fiel aufgrund der Messlücke zwischen 100 und 1.000 mm/min niedriger aus. Dieses hat eine Anpassungsgüte von $r^2 = 0,70$ und eine Modellqualität von $r^2_{\text{koriert}} = 0,68$. Dennoch lassen sich die Kurven aufgrund der aussagekräftigen Verläufe für Aussagen zum Materialverhalten nutzen. Zur besseren Übersicht und Absicherung sind die gestrichelten Vertrauensbereiche ergänzend zur durchgehenden Modellkurve in Bild 11 angegeben. Alle Modelle wurden im Sinne eines möglichst realistischen Abbildens des realen Materialverhaltens der auf Naturfasern basierenden Vulkanfiber auf ein mathematisches Polynom beschränkt, das maximal quadratische Anteile enthält. Vorversuche ergaben zudem, dass kubische Modellgleichungen lediglich die Freiheitsgrade senken, jedoch kein verbessertes Modell oder gar eine abweichende Aussage ergeben. Die Gültigkeit der Modelle bezieht sich somit auf die im Versuch verwendeten Rahmenbedingungen, wie sie anfänglich im Text beschrieben werden. Die gestrichelten Vertrauensbereiche (Toleranzlinien) sind zu berücksichtigen.

Wie Bild 11 zu entnehmen ist, verhalten sich bei steigender relativer Feuchtigkeit rH die Werkstoffsteifigkeit (Bild 11a) und Werkstofffestigkeit (Bild 11b) gegenläufig zur Duktilität (Bild 11c). Im Bereich von 25 bis 50 % relativer Feuchtigkeit verhalten sich für die Zuggeschwindigkeit 10 mm/min Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit nahezu konstant, wohingegen die Maximaldehnung ansteigt. Dies erklärt auch ein anfänglich leichtes Ansteigen der Verformungsenergie (Bild 11d), da sich die Fläche unterhalb der aufgezeichneten Nennspannung-Totaldehnung-Kurven vergrößert.

Das Wechselwirkungsdiagramm (Bild 12) zeigt, dass sich in Abhängigkeit von der relativen Feuchtigkeit ein Maximum der Maximaldehnung (Bild 12a) für Prüfgeschwindigkeiten im Bereich 400-600 mm/min ergibt. Es ergeben sich bei handelsüblicher Vulkanfiber Werte von 5 bis 13 % Maximaldehnung. Bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit, d. h. relativ trockenem Material, begünstigt eine kleinere Verformungsgeschwindigkeit das Fließen des Materials (Bild 12b). Bei höheren Feuchtigkeitswerten ist hingegen eine schnellere Verformungsgeschwindigkeit für eine größtmögliche Maximaldehnung zu wählen, wie dies z. B. bei Umformprozessen erwünscht

Härteabdruck	Materialkennwerte						
	Maximalkraft F_{max} [mN]	Maximale Eindringtiefe h_{max} [μm]	Elastischer Eindringmodul E_{IT} [N/mm ²]	Eindringkriechen C_{IT} [%]	Eindringhärte H_{IT} [N/mm ²]	Mittlere Länge Eindruckdiagonale [μm]	Vickershärte HV 0,01
1	99,74	4,92	7.997	10,56	166,01	33,57	16,74
2	99,76	4,80	7.359	10,62	178,56	33,57	16,74
3	99,75	4,98	7.532	12,92	163,10	32,97	17,35
4	99,72	5,27	7.107	9,75	144,52	33,20	17,11
5	99,74	5,14	7.430	9,13	151,96	34,02	16,30
6	99,73	4,99	7.029	10,41	164,54	34,02	16,30
7	99,76	4,56	8.151	10,46	198,66	31,25	19,31
8	99,72	4,91	7.405	13,04	169,03	32,97	17,35
9	99,72	5,26	7.139	10,74	145,31	33,94	16,37
10	99,86	4,94	7.048	10,61	168,81	33,49	16,83
Mittelwert	99,75	4,98	7.420	10,83	165,05	33,30	17,04
Standardabweichung	0,04	0,02	368	1,17	15,26	0,78	0,84

Tabelle 2. Messwerte der instrumentierten Eindringprüfung

Table 2. Measurement values of the instrumented indentation test

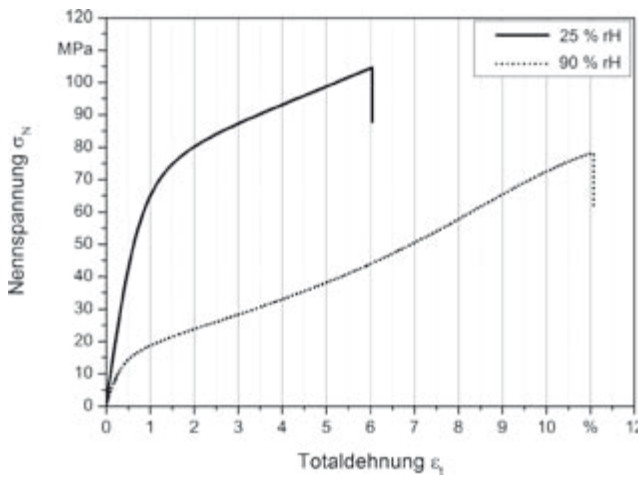


Bild 9. Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das Nennspannung-Totaldehnungs-Diagramm

Figure 9. Influence of the relative humidity on nominal stress-total strain diagram

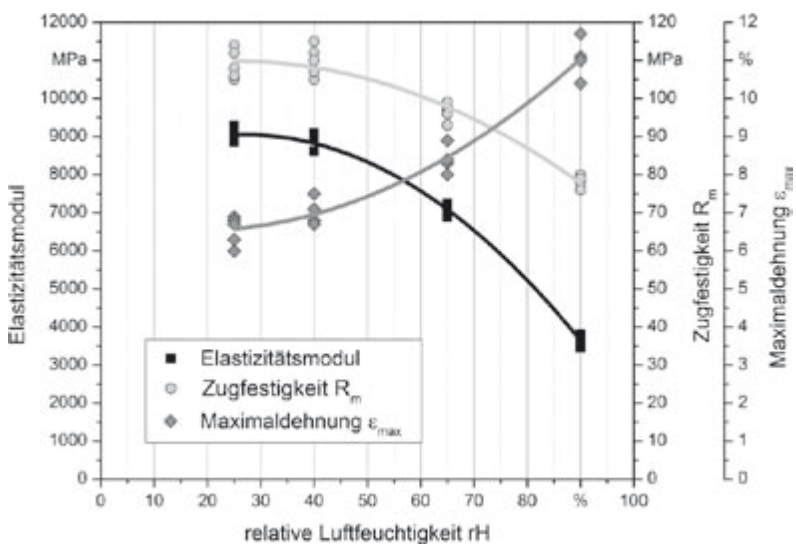


Bild 10. Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf den E-Modul, die Zugfestigkeit und die Maximaldehnung

Figure 10. Influence of relative humidity on E-modulus, tensile strength and maximum strain

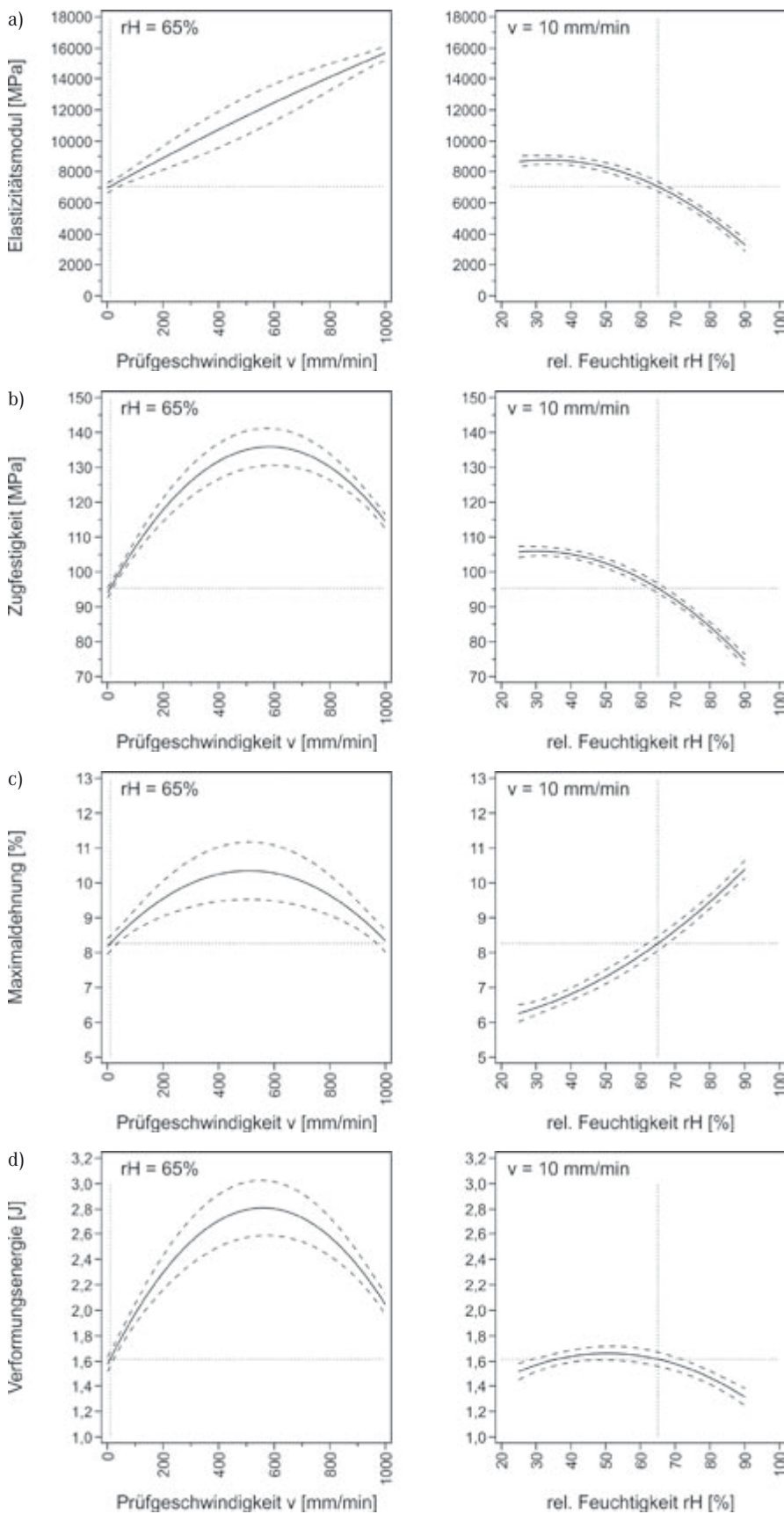


Bild 11. Einflüsse von Prüfgeschwindigkeit und relativer Luftfeuchte auf E-Modul (a), Zugfestigkeit (b), Maximaldehnung (c) und Verformungsenergie (d)

Figure 11. Influences of traverse speed and relative humidity on E-modulus (a), tensile strength (b), maximum strain (c) and deformation energy (d)

wird. Der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit und relativen Feuchtigkeit auf die Maximaldehnung ist in Bild 12c in Abhängigkeit voneinander dargestellt.

Die Abnahme von Steifigkeit und die Festigkeit bei höherer relativer Luftfeuchtigkeit (Bild 11a, b) hängen u. a. auch mit der von Vulkanfiber bekannten exponentiell steigenden Materialfeuchtigkeit zusammen [3]. Aufgrund der sinkenden Materialkennwerte sinkt auch die sich hieraus ergebende Verformungsenergie (Bild 11d). Diese bildet zunächst im Bereich von etwa 45 bis 55 % relativer Luftfeuchtigkeit ein Maximum, bevor sie wieder absinkt. Das Wechselwirkungsdiagramm (Bild 13) unterstreicht, dass dies insbesondere für niedrige Prüfgeschwindigkeiten zutreffend ist (Bild 13b). Zwar steigt der Elastizitätsmodul weiterhin mit steigender Prüfgeschwindigkeit (Bild 11a), jedoch sinkt mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit die Maximaldehnung wieder ab (Bild 11c). Dies erklärt, warum die Verformungsenergie ebenfalls bei hohen Prüfgeschwindigkeiten wieder niedriger ausfällt (Bild 11d, 13a).

Ein ebenfalls absinkender Wert der Zugfestigkeit bei höheren Prüfgeschwindigkeiten (Bild 11b) konnte nicht verifiziert werden und ist auf das Fehlen einer Stützstelle bzw. eines Versuches in diesem Bereich zurückzuführen. Ein Vergleich zwischen Bild 11b, das mittels eines quadratischen Polynoms erstellt wurde, und Bild 8, das durch eine Ausgleichskurve generiert wurde, verdeutlicht diese Thematik. Die Einflüsse von Prüfgeschwindigkeit und relativer Feuchtigkeit auf die Verformungsenergie sind in Bild 13c zusammengefasst.

In den folgenden Formeln werden die relative Luftfeuchtigkeit mit rH und die Prüfgeschwindigkeit mit v dargestellt.

Als Modell für die Prognose des Elastizitätsmoduls technischer Vulkanfiber wurde vereinfacht folgende Formel bestimmt ($r^2 = 0,91$, $r^2_{\text{korrigiert}} = 0,90$):

$$\begin{aligned}
 E = & 11556,1564569147 + \\
 & (-65,965114290749 \times rH) + \\
 & 8,96859082417068 \times v \\
 & + (rH - 55) \times ((v - 223,2) \times \\
 & 0,03843368553942) \\
 & + (rH-55) \times ((rH - 55) \times \\
 & (-1,6962970361233)) \\
 & + (v - 223,2) \times ((v - 223,2) \times \\
 & (-0,0011617741282)) \quad (1)
 \end{aligned}$$

Das Modell zur Vorhersage der Zugfestigkeit lautet ($r^2 = 0,95$, $r^2_{\text{korrigiert}} = 0,95$):

$$\begin{aligned}
 R_m = & 128,632100265918 + \\
 & (-0,4248610357068 \times rH) + \\
 & 0,08843382335625 \times v
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ (rH - 55) \times ((v - 223,2) \times \\
 &0,00004259045534) \\
 &+ (rH - 55) \times ((rH - 55) \times \\
 &(-0,086992357421)) \\
 &+ (v - 223,2) \times ((v - 223,2) \times \\
 &(-0,0001232620294)) \quad (2)
 \end{aligned}$$

Als Prognosemodell für die Maximaldehnung konnte folgende Formel ermittelt werden ($r^2 = 0,94$, $r^2_{\text{korrigiert}} = 0,94$):

$$\begin{aligned}
 A_t = &4,30851781206556 + \\
 &0,06589614929916 \times \\
 &rH + 0,0045602016576 \times v \\
 &+ (rH - 55) \times ((v - 223,2) \times \\
 &0,00002334492811) \\
 &+ (rH - 55) \times ((rH - 55) \times \\
 &0,00054258031237) \\
 &+ (v - 223,2) \times ((v - 223,2) \times \\
 &(-0,0000083705336)) \quad (3)
 \end{aligned}$$

Für die Vorhersage der Verformungsenergie hat folgende Formel Gültigkeit ($r^2 = 0,70$, $r^2_{\text{korrigiert}} = 0,68$):

$$\begin{aligned}
 W_g = &1,8255946894313 + \\
 &(-0,0002893957581 \times rH) + \\
 &0,00257485583575 \times v \\
 &+ (rH - 55) \times ((v - 223,2) \times \\
 &0,00000801375713) \\
 &+ (rH - 55) \times ((rH - 55) \times \\
 &(-0,0002220644735)) \\
 &+ (v - 223,2) \times ((v - 223,2) \times \\
 &(-0,0000039354715)) \quad (4)
 \end{aligned}$$

Weitere Messverfahren. Im Rahmen der Untersuchung wurden neben den oben vorgestellten Messverfahren weitere Systeme mit dem Ziel angewandt, den Werkstoff noch detaillierter charakterisieren zu können. Um den Einfluss der Kerbwirkung durch die Hartmetallschneiden des taktilen

Extensometers auf die Materialkennwerte auszuschließen, kam für Dehnungsmessungen zusätzlich ein Videoextensometer (Shimadzu, Typ TRViewX) zum Einsatz. Dabei wurden zwei Referenzmarken auf der Probenoberfläche angebracht und die Dehnung berührungslos optisch über das Videobild bestimmt (Bild 14). Die sich einstellenden Dehnungskennwerte bestätigten die Messungen mit dem taktilen Aufnehmer.

Weitere Aufschlüsse über das Materialverhalten liefern Thermometrie- und Thermografiemessungen, wie sie zum Nachweis plastischer Dehnungen in metallischen Werkstoffen bereits etabliert sind [10, 11]. Die Vulkanfaser-Streifenproben nahmen zu Beginn des Zugversuchs, im Bereich der elastischen Verformung, Energie in Form von Wärme auf, wodurch die

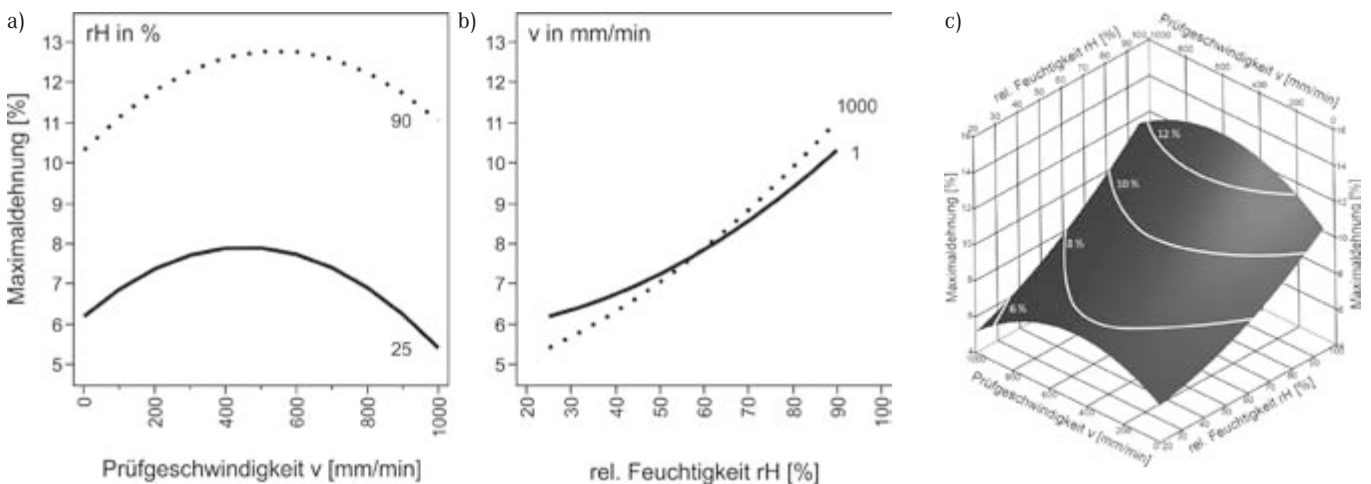


Bild 12. Einflüsse der relativen Feuchtigkeit (a), Prüfgeschwindigkeit (b) auf die Maximaldehnung sowie Kreuzeffekte (c)

Figure 12. Influences of relative humidity (a), traverse speed (b) on maximum elongation and cross effects (c)

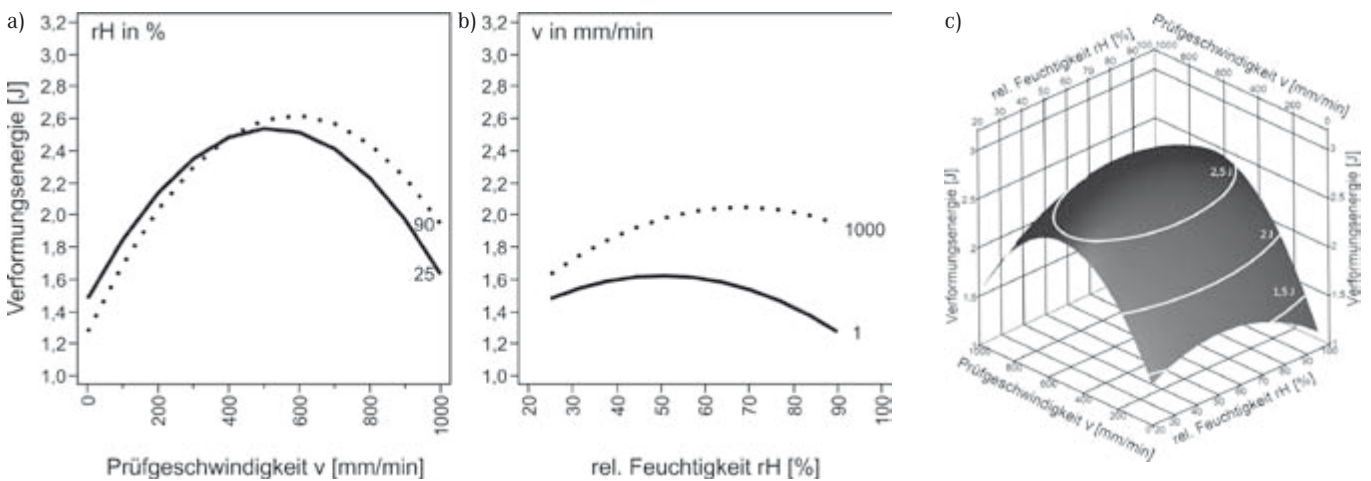


Bild 13. Einflüsse der relativen Feuchtigkeit (a), Prüfgeschwindigkeit (b) auf die Verformungsenergie sowie Kreuzeffekte (c)

Figure 13. Influences of relative humidity (a), traverse speed (b) on deformation energy and cross effects (c)

Temperatur der Probe leicht absank. Beim Übergang in den plastischen Dehnungsbereich stieg die Temperatur bis zum Bruch deutlich an (Bild 15).

Weiterhin wurde das Rissbildungs- und -ausbreitungsverhalten der technischen Vulkanfiber untersucht. Die Thermografie (InfraTec, Typ IR8800) liefert einen zuverlässigen Hinweis auf den Ausgangspunkt des Risses, wobei sich der Rissverlauf aufgrund der auf

20 Hz begrenzten Aufnahme Frequenz nicht detailliert aufzeichnen lässt. Um den Rissverlauf mit ausreichender Auflösung und Frequenz zu verfolgen, wurde ein Hochgeschwindigkeitskamerasystem (Shimadzu, Typ Hyper Vision II) eingesetzt (Bild 16).

Mit einer Aufnahme Frequenz von 500 000 Bildern pro Sekunde konnte festgestellt werden, dass der Riss im Zugversuch etwa 3×10^{-4} Sekunden benötigt, um durch die Vulkanfiber-Streifenprobe zu wandern (Bild 17).

Zusammenfassung

Zur Charakterisierung technischer Vulkanfiber bei verschiedenen Zuggeschwindigkeiten und relativen Luftfeuchtigkeiten im Zugversuch wurden neben konventionellen Spannungs- und Dehnungsmessverfahren ein Videoextensometer, ein Thermografie-system und ein Hochgeschwindigkeitskamerasystem eingesetzt. Die Verformungsgeschwindigkeit und die relative Feuchtigkeit haben einen deutlichen Einfluss auf

die quasistatischen Kennwerte. Mit zunehmender relativer Feuchtigkeit sanken der Elastizitätsmodul und die Zugfestigkeit, während die Maximaldehnung zunahm. Bei steigender Zuggeschwindigkeit nahm der Elastizitätsmodul zu, während Zugfestigkeit und Maximaldehnung im mittleren Bereich einen Maximalwert ausbildeten. Es wurden weiterhin die Kreuzeffekte zwischen den beiden Einflussfaktoren Geschwindigkeit und Feuchtigkeit hinsichtlich der Kennwerte E-Modul, Zugfestigkeit, Maximaldehnung und Verformungsenergie charakterisiert und quantitativ bewertet. Mit dem Wechselwirkungsprofiler konnten Modelle für E-Modul, Zugfestigkeit, Maximaldehnung und Verformungsenergie mit einem Bestimmtheitsmaß bis zu 95 % generiert werden. Darüber hinaus hat sich die ergänzende Anwendung der Videoextensometrie, Thermografie und Hochgeschwindigkeitsbildaufzeichnung hervorragend geeignet, um das Verformungsverhalten technischer Vulkanfiber detailliert zu charakterisieren.

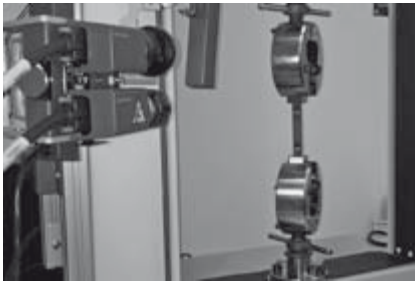


Bild 14. Versuchsaufbau mit Videoextensometer

Figure 14. Experimental set up with video extensometer

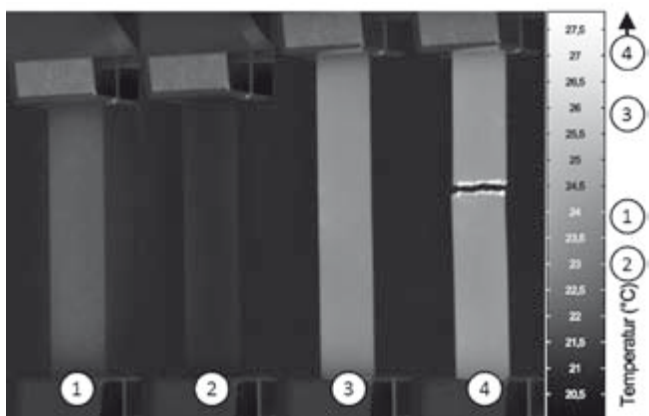
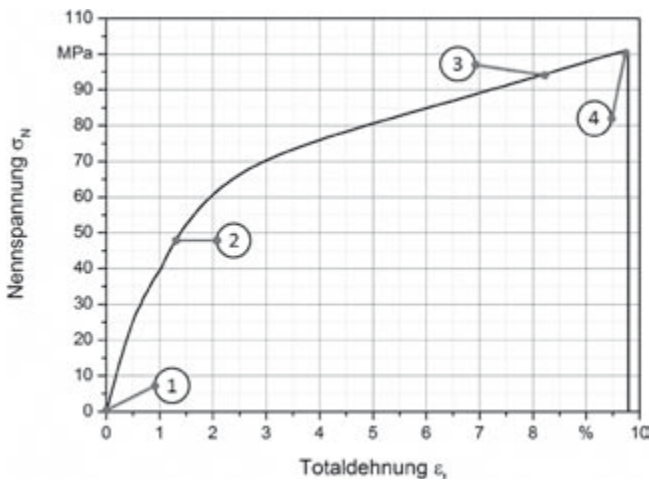


Bild 15: Wärmebildaufnahmen verschiedener Stadien des Zugversuches

Figure 15: Thermal images of different tensile test stages

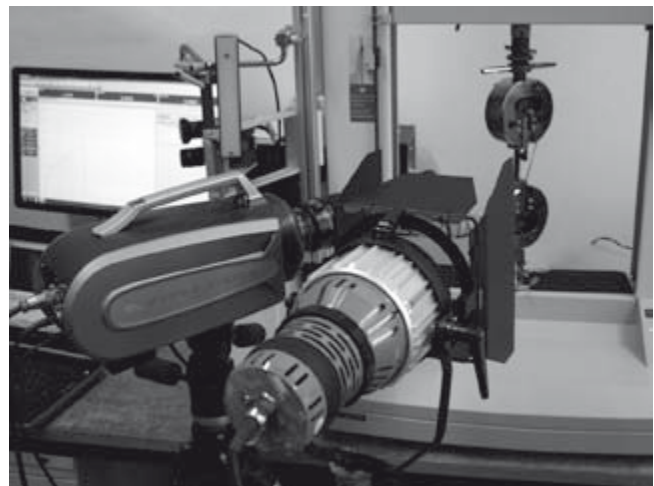


Bild 16: Versuchsaufbau mit Hochgeschwindigkeitskamerasystem

Figure 16: Experimental set up with highspeed-camera system

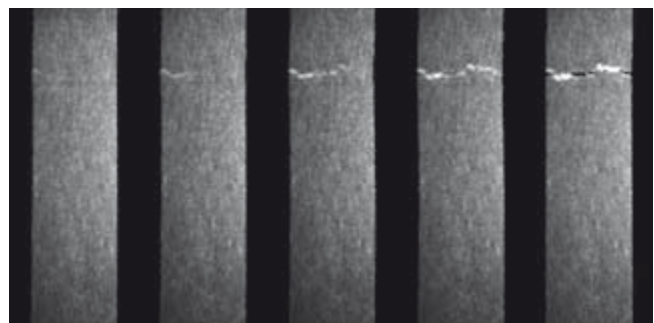


Bild 17: Rissbildungs- und -ausbreitungsverhalten im Zugversuch

Figure 17: Crack formation and propagation behavior in tensile test

Ausblick

Nachdem in dem vorliegenden Artikel die quasistatischen Kennwerte technischer Vulkanfaser im Vordergrund stehen, wird in einem an gleicher Stelle publizierten Folgeartikel das Ermüdungsverhalten charakterisiert. Auf der Grundlage umfangreicher quasistatischer und zyklischer Werkstoffkennwerte wird es möglich, die Werkstoffeigenschaften prozess- und produktgerecht zu optimieren und technische Vulkanfaser für vielfältige neue Anwendungsgebiete und wirtschaftliche Branchen zu qualifizieren.

Literatur

- 1 M. Joseph: Vulcanized fiber – a key to reliable electrical insulation, *Electrical Review* 188 (1971), No. 15, pp. 482-483
- 2 M. Joseph: Vulcanized fiber – renaissance of a known material, *Proc. of the 3rd Intern. Congress Naro.Tech. Materials Made Renewable Natural Resources*, Erfurter Wirtschafts- und Kommunalverlag, Erfurt (2001), pp. 1-4
- 3 B. Künne, U. Willms, C. Stumpf: Vulcanized fiber as a high-strength construction material for highly loaded construction units, *Proc. Progress in Paper Physics Seminar*, Verlag der Technischen Universität Graz, Graz (2011), pp. 319-321
- 4 B. Künne, D. Dumke: Capabilities and modifiability of vulcanized fiber, *IPW Journal* 03, (2013) (im Druck)
- 5 R. Vieweg, E. Becker: Abgewandelte Naturstoffe – Herstellung, Eigenschaften, Verarbeitung und Anwendung, *Kunststoff-Handbuch*, Band III, Carl Hanser, München (1965), pp. 26-70
- 6 K. Suzuki: Production and characteristics of vulcanized fiber produced from the raw materials of nonwood fiber, *Japanese Journal of Paper Technology* 47 (2004), No. 6, pp. 42-47
- 7 A. Nezamoleslami, K. Suzuki, T. Ueno, N. Toyama, T. Kadoya: Preparation and properties of vulcanized fibers derived from kenaf pulps, *Japan Tappi Journal* 52 (1998), No. 6, pp. 96-106
- 8 B. Künne, D. Dumke: Vulkanfaser auf dem Prüfstand: Eigenschaften und Potentiale hochfester Faserwerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, *Der Konstrukteur* 11 (2011), pp. 68-70
- 9 B. Künne, D. Dumke: Vulcanized fiber as a high-strength construction material for highly loaded construction units, *Proc. Progress in Paper Physics Seminar*, Stockholm (2012), pp. 50-55
- 10 F. Walther, D. Eifler: Cyclic deformation behavior of steels and light-metal alloys, *Materials Science and Engineering A* 468-470 (2007), pp. 259-266
- 11 F. Walther, D. Eifler: PHYBAL – Kurzzeitverfahren zur Berechnung der Lebensdauer metallischer Werkstoffe auf der Basis physikalischer Messgrößen, *Materials Testing* 50 (2008), No. 3, pp. 142-149

Abstract

Influence of Deformation Speed and Humidity on Quasistatic Deformation Behavior of Vulcanized Fiber – Experiments with Different Load and Climate Profiles. The detailed knowledge of the material properties is the basic requirement for design and production engineers, to ensure safe and efficient operation conditions of structural components. The insufficiently studied construction material vulcanized fiber shall be investigated microstructure-based and evaluated, regarding the influence of deformation speed and relative humidity on the quasistatic properties. Besides materialographic and microscopic investigations an ultra-micro hardness tester was used. The mechanical characterization was done with an electro-mechanical universal testing system, a clip-gage and a video extensometer, thermocouples and a thermography system and a high-speed camera to detect crack formation and propagation.

Die Autoren dieses Beitrages

Dipl.-Wirt.-Ing. Bastian Penning, Jahrgang 1983, studierte an der TU Dortmund Wirtschaftsingenieurwesen mit dem Schwerpunkt Produktionsmanagement. Nach dem Abschluss seiner Diplomarbeit ist er seit 2011 als wissenschaftlicher Angestellter am Fachgebiet Werkstoffprüftechnik im Bereich der zerstörenden Werkstoffprüfung tätig.

Prof. Dr.-Ing. Frank Walther, Jahrgang 1970, studierte von 1992 bis 1997 Maschinenbau mit Vertiefungsrichtung Werkstofftechnik an der TU Kaiserslautern und promovierte 2002 am dortigen Lehrstuhl für Werkstoffkunde (WKK) über das Ermüdungsverhalten hochbeanspruchter ICE-Radstähle. Nach der Tätigkeit als Leiter des Forschungsbereichs Schwingfestigkeit am WKK von 2002 bis 2008, im Rahmen derer er sich 2007 in Werkstoffkunde habilitierte, war er bei der Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG in Herzogenaurach in der Zentralen Entwicklung für öffentliche Forschungsförderung und werkstoffwissenschaftliche Sonderprojekte verantwortlich. Seit Dezember 2010 ist er Professor für Werkstoffprüftechnik (WPT) in der Fakultät Maschinenbau der TU Dortmund. Im Bereich der zerstörenden und zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung beschäftigt er sich mit der mess- und prüftechnischen Ermittlung von Struktur-Eigenschaft-Beziehungen von Konstruktionswerkstoffen unter Berücksichtigung der Einflussgrößen Fertigung, Betriebsbeanspruchung und Korrosion. Daneben stellt die Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens unter mechanischen und/oder thermischen Randbedingungen vom Low-Cycle-Fatigue-(LCF-) bis Very-High-Cycle-Fatigue-(VHCF-)Bereich sowie die Berechnung des Schädigungsfortschritts und der (Rest-)Lebensdauer einen weiteren Forschungsschwerpunkt dar. frank.walther@tu-dortmund.de, www.wpt-info.de

Dipl.-Ing. Dominik Dumke, Jahrgang 1978, studierte an der TU Dortmund Maschinenbau mit

dem Schwerpunkt Maschinentechnik. Seit Abschluss arbeitet er als wissenschaftlicher Angestellter am Fachgebiet Maschinenelemente. Neben allgemeinen Ingenieurstätigkeiten und Aufträgen für die Wirtschaft liegen die Forschungsschwerpunkte bei Faserwerkstoffen und Prüftechniken. Darunter fallen statistische Versuchsplanungen, Analysen und Qualitätsoptimierungen.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne, Jahrgang 1956, studierte an der Universität Paderborn. Nach Abschluss arbeitete er von 1980 bis 1984 als wissenschaftlicher Angestellter am Laboratorium für Konstruktionslehre der Universität Paderborn und promovierte 1984 auf dem Gebiet „Schaltverhalten von Reibkupplungen“. Im Jahre 1990 erhielt er die Berufung zum Professor an die Fachhochschule Ostfriesland, Emden, Fachgebiet „Konstruktionslehre, Konstruktionssystematik und CAD“. Im Jahre 1993 erlangte er an der Universität Paderborn die Habilitation auf dem Gebiet „Kostenbewusstes Konstruieren“. 1993 erfolgte die Berufung zum Universitätsprofessor an die Universität Dortmund, Fachgebiet „Maschinenelemente.“ Neben Untersuchungen im Bereich Automatischer Parksysteme, der Lebensdauer von Schwerlastträgern und dem e-Learning ist ein Forschungsschwerpunkt die Untersuchung faseriger Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Seit 1995 forscht er auf dem Gebiet der Faserformprodukte. Ziel der Forschung ist die Optimierung dieser Faserwerkstoffe, insbesondere die Festigkeits- und Steifigkeitssteigerungen sowie eine starke Verminderung des hydrophilen Materialverhaltens. Seit März 2012 verfolgt er zudem die grundlagentechnische Weiterentwicklung des Werkstoffes Vulkanfaser. Hier erfolgt die Steigerung der Warmfestigkeit und der Dimensionsstabilität. Die Untersuchungen führen zu einer Erschließung neuer Einsatzfelder und zur Etablierung der technischen Vulkanfaser als Konstruktionswerkstoff.

You will find the article and additional material by entering the document number MP110435 on our website at www.materialstesting.de