

3D-Terahertz - Eine Möglichkeit zur zerstörungsfreien Prüfung von Vulkanfiber

Norman SIEVERS*, Wolfgang TILLMANN*, Stefan BECKER**,
Hans-Georg RADEMACHER*, Reiner ZIELKE*

* Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie

** Becker Photonik GmbH

Kurzfassung. Vulkanfiber ist ein seit ca. 1855 bekanntes Verbundmaterial, welches dem Papier in seiner werkstofflichen Zusammensetzung sehr ähnlich ist. Mit dem Aufkommen der Kunststoffe geriet der Werkstoff zunehmend in Vergessenheit. Jedoch im Zuge des wachsenden Umweltbewusstseins erlebt dieser leicht herzustellende aber auch wiederverwertbare Werkstoff eine "Renaissance" und tritt vermehrt in das öffentliche Interesse. Vulkanfiber bietet aufgrund seiner exzellenten mechanischen Eigenschaften, wie der hohen Festigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte im Vergleich zu Stahl, ein hervorragendes Potential für Leichtbaustrukturen. Intensive Bemühungen in der grundlegenden Forschung und Entwicklung versuchen dieses Potential noch zu steigern, um Vulkanfiber auf vielfältige Art und Weise industriell nutzbar zu machen. Spätestens bei der Erschließung von sicherheitsrelevanten Bauteilen wird die zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen und Strukturen aus Vulkanfiber unumgänglich. Der vorliegende Beitrag demonstriert anhand erster Untersuchungen den Einsatz von 3D-Terahertz-Bildgebung zur zerstörungsfreien Prüfung von Vulkanfiber. Hierzu wurden Testmessungen an ausgewählten Referenzkörpern unternommen und mit konventionellen zerstörungsfreien Prüfverfahren verglichen. Insbesondere wurde auch untersucht, welchen Einfluss räumlich begrenzte Feuchtigkeit auf das Ergebnis hat.

Einleitung

Ressourcenknappheit und die Umsetzung moderner Leichtbaukonzepte verlangen nach neuen Werkstoffen, die die hohen technischen Anforderungen erfüllen. Gerade die nachwachsenden Rohstoffe gelangen bei der Fragestellung bezüglich einer nachhaltigen Produktion immer mehr in den Fokus des öffentlichen Interesses. Einer dieser aus Naturprodukten gewonnenen Werkstoffe ist das auf Zellstoff basierende Vulkanfiber, dessen Herstellung bereits 1855 von Thomas Taylor entwickelt und letztendlich 1859 zum Patent angemeldet wurde. Fand der Werkstoff zunächst zahlreiche Anwendungen in Form von Gebrauchsgegenständen wie Koffern oder Behältern, konnten in industriellen Anwendungen auch seine elektrisch isolierenden Eigenschaften begeistern. Jedoch mit Entwicklung moderner Kunststoffe auf Polymerbasis wurde das Vulkanfiber nach und nach verdrängt und geriet in Vergessenheit. Im Zuge des wachsenden Umweltbewusstseins wurde Anfang des neuen Jahrtausends bereits von einer Renaissance des alten Werkstoffes gesprochen [1], konnte sich allerdings nicht durchsetzen. Aktuell wird Vulkanfiber noch in Nischenprodukten als Trägermaterial für Schleifscheiben, osmotische Membran oder als

Isoliermaterial in Tonabnehmern für Musikinstrumente genutzt. Neue Erkenntnisse und Grundlagenforschungen in der Produktion des Materials lassen darauf deuten, dass in wenigen Jahren die Eigenschaften weiter verbessert werden können, so dass eine Ausdehnung des Anwendungsspektrums absehbar ist und auch ein Einsatz in Form von sicherheitsrelevanten Bauteilen möglich wird. Hierzu bedarf es aber zerstörungsfreier Prüfkonzepte, um die hohen Sicherheitsstandards auch an Bauteilen aus Vulkanfiber zu garantieren, die bisweilen aber noch fehlen.

Aufgrund seiner Beschaffenheit erweist sich Vulkanfiber als anspruchsvolle Prüfaufgabe, so dass die meisten Prüfsysteme an einer exakten Fehlerdetektion scheitern. In diesem Beitrag wird daher die Prüfung von Vulkanfiber mit Hilfe von Terahertz-Strahlung vorgestellt, die in den Untersuchungen hervorragende Ergebnisse lieferte.

Vulkanfiber

Im Jahre 1855 gelang dem Engländer Thomas Taylor mehrere Lagen von Papier unter der Einwirkung von Zinkchlorid und Druck zu einem widerstandsfähigen Material zusammen zu pressen, das im Vergleich zum Ausgangsprodukt erheblich bessere Eigenschaften aufwies. Da der Herstellungsprozess dem der Vulkanisation von Kautschuk, um widerstandsfähiges Hartgummi zu erzeugen, ähnelte und als Ausgangsstoff Papierfasern Verwendung fanden, gab Thomas Taylor seinem neu kreierten Werkstoff den Namen Vulkanfiber [2]. Das dazugehörige Patent meldete Thomas Taylor 1859 an. Für damalige Ansprüche zeigte das Material eine besonders hohe mechanische Festigkeit bei geringem Gewicht und einer akzeptablen Beständigkeit gegen Feuchte. So fand Vulkanfiber Anwendung in Gebrauchsgegenständen der Massenproduktion wie Koffern oder Behältern. Aber auch der hohe elektrische Widerstand machte das Material als einen ausgezeichneten Isolator in der Industrie populär. Die seit 1959 aktuelle DIN 7737 von Schichtpreßstoff-Erzeugnissen aus Vulkanfiber definiert unterschiedliche Typen von Vulkanfiber die sich nach Art, Farbe und Eigenschaften unterscheiden. Die Dichte kann von 1,1 bis 1,5 g/cm³ variieren, während die Zugfestigkeit Werte zwischen 34 bis 69 N/mm² annimmt, wobei aufgrund des anisotropischen Verhaltens die Kennwerte eine starke Richtungsabhängigkeit bezüglich der Faserorientierung haben [3]. Auf der Suche nach Herstellern von Vulkanfibern können heute nur noch einige wenige Produzenten am Standort Deutschland identifiziert werden, so dass folglich auch der Begriff nahezu vollkommen aus dem Sprachgebrauch verschwunden ist. Einer der Gründe liegt in dem kurz nach der Entdeckung von Vulkanfiber entwickelten Kunststoffe, die das umweltfreundliche Material nach und nach aus zahlreichen Anwendungen verdrängten. Begründet ist dieser Umstand unter anderem darin, dass Vulkanfiber mit zunehmendem Feuchtegehalt seine mechanischen Eigenschaften verliert [4] und damit einhergehend bei bakteriellem Befall schnell verfault. In trockenen Umgebungen und bezüglich des Preis/Festigkeitsverhältnis erweist sich Vulkanfiber dennoch als ein äußerst beeindruckender Werkstoff [5].

Möglichkeiten, Konzepte oder Erfahrungen zur volumetrischen zerstörungsfreien Prüfung von Vulkanfiber konnten bei einer vorangegangenen Literaturrecherche nicht gefunden werden, so dass sich dieser Beitrag erstmals dieser bedeutsamen Thematik annähert. Zerstörungsfreie Prüfverfahren wie die Ultraschallprüfung oder der Thermographie konnten im Rahmen dieser Publikation unternommenen Untersuchungen keine überzeugenden Ergebnisse liefern, wie sie beispielsweise bei eigenfaserverstärkten Kunststoffen auf Basis von Polypropylen erzielt wurden [6]. So wird daher im Folgenden die Prüfung von Vulkanfiber mittels der Terahertzstrahlung näher vorgestellt.

Terahertz-Messsystem

Die Terahertzprüfung ist im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren noch ein recht junges Prüfverfahren. So ermöglicht die Terahertzstrahlung eine berührungslose Volumenprüfung von Bauteilen [7]. Dabei hat es ähnlich der Ultraschallprüfung den Vorteil anhand einer Laufzeitauswertung direkt die Tiefenlage von Reflektoren zu bestimmen. Im Vergleich zur Röntgendurchstrahlung ist die Strahlung der Terahertzprüfung allerdings nicht ionisierend, so dass keine aufwendigen Schutzmaßnahmen getroffen werden müssen. War die Erzeugung von Terahertzstrahlung zunächst nur mit Hilfe von kostspieligen Kurzpuls-Lasern möglich, können mittlerweile durch moderne vollelektronische Messköpfe auch kostengünstigere Messsysteme bereitgestellt werden. Eines der populärsten Anwendungsbeispiele sind hierbei die Ganzkörperscanner die aus Sicherheitsgründen weltweit an verschiedenen Flughäfen bereits eingesetzt werden. Aber auch in der Bauteilprüfung setzen sich zunehmend Messsysteme der Terahertztechnik durch. Metallische Flächen wirken für die Strahlung als Spiegel, während Wasser die Strahlung vollständig absorbiert. Kunststoffe und Keramiken sind hingegen hervorragend für eine Prüfung mit Terahertz geeignet, da sie verschiedene Schwächungskoeffizienten besitzen.

Das hier verwendete Messsystem SynViewCompact der Firma Beckerphotonik ist in Abbildung 1 dargestellt. Durch die kompakte Bauweise ist das Gerät leicht zu transportieren und ermöglicht deshalb die Untersuchung von großen Proben oder in unterschiedlichen Laboren bzw. Produktionsstätten. Es handelt sich um ein portables Prüfsystem, welches aus einer Messeinheit (links) und einem tragbaren Rechner (rechts) besteht. Durch die Kombination der SynViewHead-Technologie mit einem xy-Scanner werden 3D-Terahertz-Bilder der untersuchten Proben erstellt. Hierbei wird in Reflektion mit kohärentem frequenzmodulierten Dauerstrichverfahren (FMCW) in z-Richtung gemessen und die Probe beim Scan abgerastert. Der zur Verfügung stehende Messbereich beträgt 30x20 cm. Zur Prüfung können zwei unterschiedliche Frequenzbereiche zwischen 0.07 bis 0.11 THz und 0.23 bis 0.32 THz verwendet werden. In Bezug auf Vulkanfiber hat sich eine maximale Eindringtiefe von etwa 12 mm ergeben.



Abbildung 1. Terahertz-Prüfsystem SynViewCompact

Zerstörungsfreie Prüfung von Vulkanfiber

Zur Qualifizierung der Terahertzprüfung wurde zunächst ein Testkörper aus Vulkanfiber erstellt, der sowohl unterschiedlich große Sacklochbohrungen als auch Stufen in verschiedenen Ebenen aufweist. Der Testkörper ist in Abbildung 2 auf der linken Seite dargestellt und hat eine äußere Abmessung von 100x50x8 mm. Der Durchmesser der Sacklochbohrungen variiert in 1 mm Schritten von 1 mm bis 9 mm. Die Tiefe der Bohrungen beträgt in der linken Reihe 5 mm und in der Mitte 1 mm. Die Abstufungen auf der rechten Seite fangen an der Oberfläche an und haben jeweils eine Tiefe von 1 mm, so dass die Restwandstärke an der letzten Stufe nur noch 4 mm beträgt.

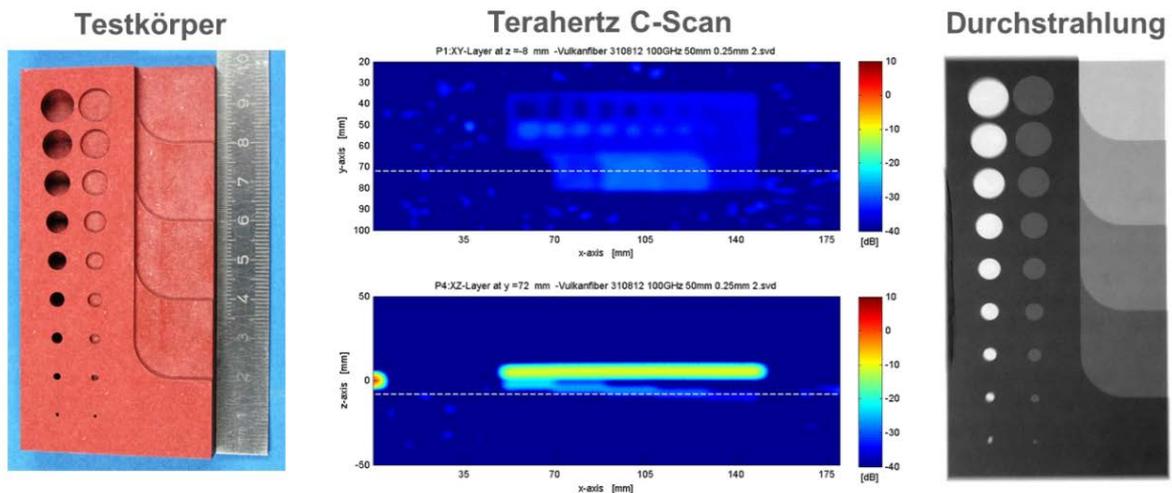


Abbildung 2. Vergleich eines Testkörpers (links) mit Hilfe von Terahertz- (mittig) und Durchstrahlungsprüfung (rechts)

Für die Terahertzprüfung wurde der Testkörper unter das SynViewCompact gelegt, so dass die Bohrungen und Abstufungen verdeckt waren. In Abbildung 2 ist mittig ein C-Scan des Testkörpers dargestellt, der bei einer Frequenz von 100 GHz durchgeführt wurde. Die Software erlaubt in verschiedenen Tiefenlagen den C-Scan darzustellen, so dass eine 3D-Prüfung der Proben möglich ist. Hier ist der Schnitt in 8 mm Tiefe bzw. von der Rückwand abgebildet. In dem Bild sind alle Bohrungen von Durchmesser 9 bis 3 mm eindeutig zu identifizieren. Kleinere Bohrungsdurchmesser sind nicht mehr zu erkennen. Von den Treppenstufen konnten alle erfolgreich detektiert werden. Je nach Tiefenlage besitzen die von den Reflektoren verursachten Signale eine unterschiedlich starke Amplitude, die in der Absorption der Strahlung durch das Material begründet ist. Zum Vergleich wurde von dem Testkörper eine Durchstrahlungsaufnahme angefertigt, die im rechten Teil von Abbildung 2 zu sehen ist. Zunächst fällt die deutlich höhere laterale Auflösung durch den Detektor auf. Jedoch werden durch die punktförmige Strahlungsquelle einige Bohrungen unscharf abgebildet. Auch hier tritt ein deutlicher Kontrast durch die verschiedenen Wandstärken auf, so dass theoretisch anhand der Graufärbung die Tiefenlage bestimmt werden kann. Hier besitzt die Terahertzprüfung mit Hilfe der Software des SynViewCompact den Vorteil, durch die Laufzeitauswertung der Strahlung direkt die Tiefenlage zu bestimmen.

Bei der Herstellung von großflächigen Platten aus Vulkanfiber können unstetige Prozessbedingungen zu Delaminationen führen. Diese können bei einer anschließenden visuellen Qualitätsprüfung nicht erkannt werden, da sie sich innerhalb des Materials befinden und werden beispielsweise für gewöhnlich erst bei einer spanenden Weiterverarbeitung entdeckt. Da jedoch das Auftreten von solchen Delaminationen für die Hersteller erhebliche Qualitätseinbußen bedeuten, wurde eine derartige Probe zur

Verfügung gestellt, um die Detektionsmöglichkeiten mit Hilfe der Terahertzstrahlung zu evaluieren.

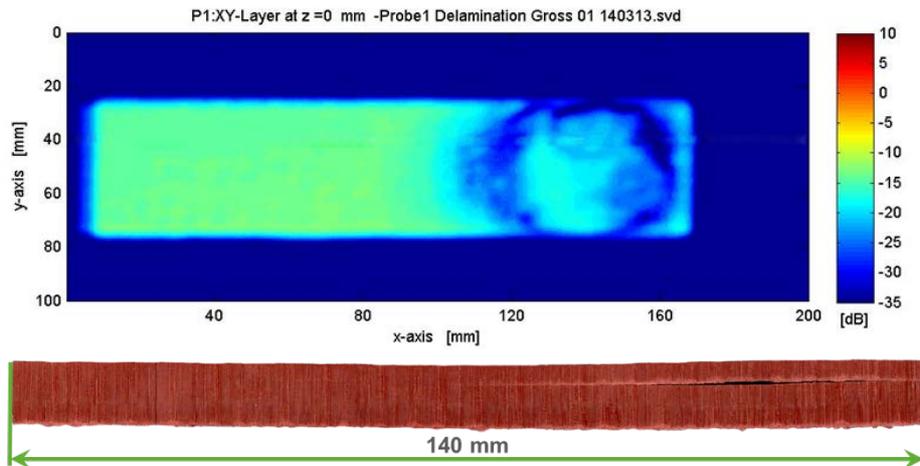


Abbildung 3. Detektion einer Delamination im Verbundmaterial (oben) und Seitenansicht der aufgeschnittenen Materialprobe (unten)

In Abbildung 3 ist oben der C-Scan der Terahertzprüfung dargestellt, während darunter das Teilstück mit enthaltener Delamination abgebildet ist. Im Querschnitt des 140 mm langen Teilstückes ist der Riss ca. 4 mm unterhalb der Oberfläche gut zu erkennen, wie er von der rechten Seite aus knapp 80 mm in das Bauteil hineinragt. In dem C-Scan ist die großflächige Delamination in ihrer Ausprägung sehr gut zu erkennen. Sie betrifft hier annähernd kreisförmig das gesamte Areal der rechten Probenseite und breitet sich noch weiter in x-Richtung aus, als es auf dem Bild des Querschnitts zu erkennen ist. Versuche diese Delamination mit anderen zFP-Verfahren wie der Durchstrahlungs-, Lock-In Thermographie oder Ultraschallprüfung darzustellen, scheiterten, so dass hier die Terahertzprüfung die einzige Möglichkeit ist, derartige Produktionsfehler zerstörungsfrei zu identifizieren.

Da Wasser eine absorbierende Wirkung auf die Terahertzstrahlung und der Feuchtegehalt einen nachhaltigen Effekt auf die Eigenschaften des Vulkanfibers hat, wurde in einer weiteren Untersuchung überprüft, ob der Feuchtegehalt von Vulkanfiber mittels der THz-Prüfung visualisiert werden kann. Hierzu wurden 3 gleichartige Proben unterschiedlich stark für ca. 1 Stunde mit Wasser befeuchtet. Das Ergebnis der Terahertzprüfung ist in Abbildung 4 zu sehen. Hierbei wurde wieder die zu sehende Ebene auf die Rückwand bzw. die feuchte Seite des Vulkanfibers gelegt.

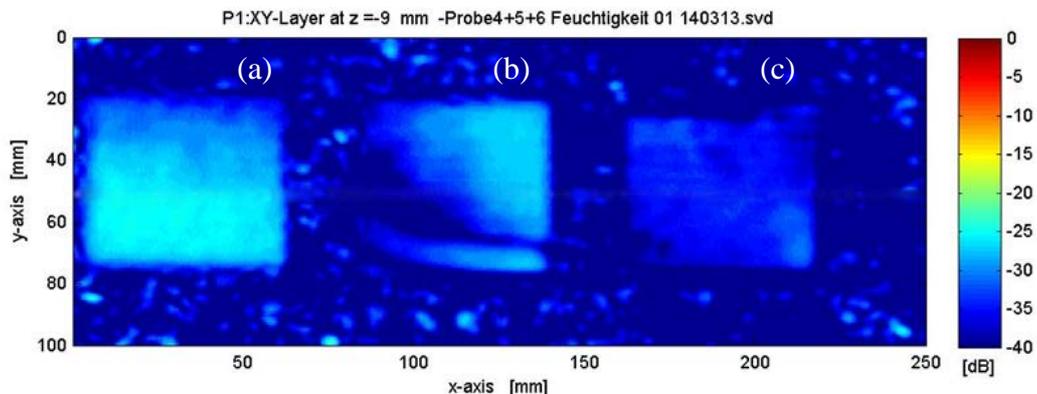


Abbildung 4. Einfluss des Feuchtegehaltes von Vulkanfiber auf die Terahertzprüfung: (a) trocken, (b) partiell befeuchtet, (c) flächig befeuchtet

Während die trockene Probe (a) einen nahezu homogenen Verlauf bei ca. -25 dB Signalstärke aufweist, hat das partiell befeuchtete Teil (b) einen deutlichen Signalverlust

von -40 dB in den feuchten Bereichen. Bei dem flächig befeuchteten Vulkanfiber (c) ist die Signalstärke gleichmäßig über die Fläche auf etwa -35 dB abgefallen. Somit bietet die Terahertzstrahlung eine sowohl zerstörungsfreie, volumetrische als auch berührungslose Möglichkeit den Feuchtegehalt von Vulkanfiber zu bestimmen. Durch weitere Untersuchungen und Korrelation mit Festigkeitswerten wäre sogar eine direkte Bestimmung der Festigkeit von Strukturbauteilen aus Vulkanfiber denkbar.

Neue Tendenzen verfolgen den Gedanken, Vulkanfiber für Verbundwerkstoffe zu nutzen und mit anderen Materialien zu kombinieren. Um auch in diesem Bereich die Terahertzstrahlung zu qualifizieren, wurden zwei Vulkanfiberplatten zusammengeklebt und verschiedene metallische Körper wie ein Stück Alufolie und zwei Kupferdrähte mit 1 und 3 mm Durchmesser eingebettet. Zusätzlich wurde in einem Teilbereich der Naht kein Klebstoff aufgetragen, um auch diesen Einflussfaktor mit abzubilden. Der hierzugehörige C-Scan ist in Abbildung 5 dargestellt.

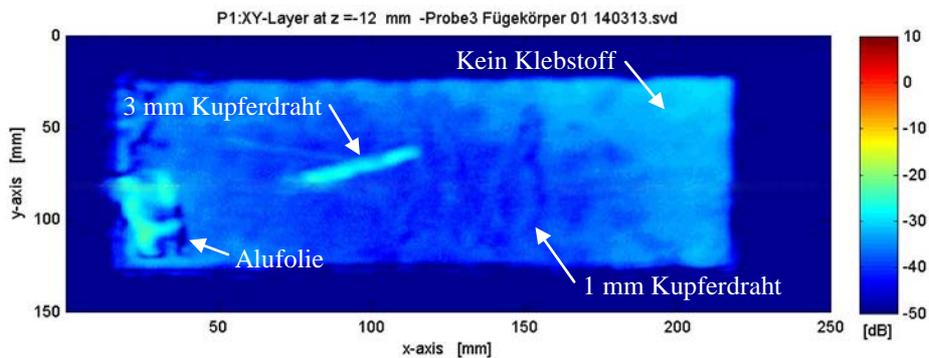


Abbildung 5. Detektion von Fremdkörpern in einer Fugestelle von 2 Vulkanfiberplatten

Bis auf den 1 mm starken Kupferdraht, der nur sehr schwach zu erkennen ist, haben alle anderen eingelegten metallischen Körper eine im Vergleich zur Naht hohe Reflektion von ca. -25 dB und sind gut zu erkennen. Der ohne Klebstoff bestrichene Teil der Naht hat eine um bis zu 10 dB höhere Amplitude, so dass es mit Hilfe der Terahertzprüfung auch möglich ist die Benetzungsfläche zu bestimmen bzw. Fehler in der Fügenaht zu identifizieren.

Abschließend ist somit festzustellen, dass die Terahertzprüfung ein äußerst effektives zerstörungsfreies Prüfverfahren ist, um in den unterschiedlichsten Prüfaufgaben bezüglich der Anwendung von Vulkanfiber genutzt zu werden.

Zusammenfassung

Vulkanfiber ist ein zu Unrecht in Vergessenheit geratener Konstruktionswerkstoff, da es hervorragende mechanische Eigenschaften aufweist, zudem eine Dichte unterhalb der meisten Leichtmetalle besitzt, und dabei noch kostengünstig bzw. umweltschonend aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen ist. Die Terahertzprüfung als junges zerstörungsfreies Prüfverfahren konnte im Gegensatz zu anderen etablierten zFP-Verfahren als einziges in verschiedensten relevanten Prüfaufgaben für Vulkanfiber bestehen. Somit qualifiziert sich die Terahertzprüfung hochgradig zum Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung von Vulkanfiber sowohl in der industriellen Umgebung zum Auffinden von Delaminationen wie auch auf Laborebene zur wissenschaftlichen Grundlagenforschung.

Referenzen

- [1] Joseph, M.: Vulkanfiber, Renaissance eines alten Werkstoffes; naro.tech, Internationales Symposium, Werkstoffe aus Nachwachsenden Rohstoffen, 3, International Congress, Materials made from Renewable Natural Resources; 2001
- [2] Beneke, K.: Die Entwicklung der Kolloidwissenschaften – Ein historischer Abriß, Institut für anorganische Chemie, Christian-Albrechts-Universität Kiel
- [3] N., N.: Schichtpreßstoff-Erzeugnisse Vulkanfiber Typen, DIN 7737, 1959
- [4] Penning, B. Walther, F, Dumke, D., Künne, B.: Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes auf das quasistatische Verformungsverhalten technischer Vulkanfiber, Materialprüfung, 2013
- [5] Künne, B., Dumke, D.: Vulcanized fiber as a high-strength construction material for highly loaded construction units, Proc. Progress in Paper Physics Seminar, Stockholm, 2012
- [6] Sievers, N., Tillmann, W., Melchers, C., Zielke, R., Ries, A., Heim, H.P.: Evaluation of Nondestructive Methods for the Characterization Self-Reinforced Polypropylene Composites, 1st International Conference on Thermo-Mechanically Graded Materials, ISBN: 978-3-942267-58-8, 2012
- [7] Becker, S.: Aufbruch in eine neue Welt. 3D-Terahertz-Bildgebung zur Volumenprüfung von Bauteilen, QZ - Qualität und Zuverlässigkeit, ISSN: 0720-1214, 2012