

Papierfaserstoffe erreichen Festigkeiten von Kunststoffen

Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne und Dipl.-Ing. Christian Schejok

Einleitung

Papierfaserstoffe lassen sich in Primär- und Sekundärfaserstoffe unterteilen. Zu den Primärfaserstoffen zählen Holzschliffe und Zellstoffe, wobei es sich bei Holzschliff um mechanisch zerkleinertes, bei Zellstoff dagegen um chemisch aufgeschlossenes Holz handelt. Unter Sekundärfaserstoffen lassen sich Primärfasern verstehen, die bereits einen vollständigen Recyclingkreislauf vom Aufschluss, über die Aufbereitung, die Herstellung bis zur erneuten Auflösung durch Wasserzugabe durchlaufen haben.

Zur Herstellung dreidimensionaler Produkte auf der Basis von Papierfaserstoffen, die in der Papierindustrie zur Erzeugung von Papier und Karton genutzt werden, kommt das sog. Faserformverfahren zum Einsatz. Im Gegensatz zur Papierherstellung, bei der das Blatt auf einem umlaufenden Endlossieb gebildet wird, entsteht das Faserformprodukt auf einem festen, dreidimensionalen Siebkörper. Die Papierfaserstoffe werden zunächst mit Hilfe von Wasser in eine pumpfähige Fasersuspension überführt. Aufgrund einer zwischen der Oberfläche des Siebkörpers und dessen Innenseite erzeugten Druckdifferenz durchströmt die Fasersuspension die Siebporen. Während das Wasser ungehindert passieren kann, legen sich die Fasern an der Sieboberfläche an und bilden einen dreidimensionalen Körper. Im Anschluss an diesen sog. Anformvorgang erfolgt eine Verdichtung und Trocknung des Faservlieses. Dadurch werden eine Verbesserung der Oberflächeneigenschaften und eine Stärkung des Faserverbands herbeigeführt.

Ausgangssituation

Da Papierfaserstoffe aus Holz gewonnen werden, zählen sie zu den nachwachsenden Rohstoffen. Faserformprodukte gelten somit als umweltfreundlich, da sie recyclingfähig und ökologisch unbedenklich kompostier- bzw. verbrennbar sind. Ihre Anwendung beschränkt sich zurzeit fast ausschließlich auf die Verpackungsindustrie. Sie dienen dort als Transportsicherungen oder Transportverpackungen, denen der Rohstoff Altpapier zugrunde liegt. Der Hauptgrund für eine momentane Beschränkung der positiven Eigenschaften der Faserformtechnologie auf den Verpackungssektor ist die relativ geringe Ausgangsfestigkeit der Papierfaserstoffe. Zur Nutzung des Faserformverfahrens für Bauteile, die technische Funktionen erfüllen sollen, reichen die vorhandenen mechanischen Eigenschaften der Faserwerkstoffe noch nicht aus.

Motivation

Technische Funktionsbauteile, deren Festigkeitsansprüche nicht so hoch sind, dass ausschließlich Stahl zum Einsatz kommen kann, werden heute zumeist aus Kunststoffen hergestellt, deren Grundlage der fossile Energieträger Rohöl darstellt. Die weltweite Produktion der Kunststoffchemie beträgt jährlich etwa 150 Mio. t, bei der Polyvinylchlorid einen hohen Anteil einnimmt [1]. Ein Energieverbrauch auf der Grundlage fossiler Energieträger bewirkt Kohlenstoffemissionen, die die wichtigste Ursache der globalen Erderwärmung sind. Da sich die Nachfrage nach Erdöl in den nächsten Jahren weiter erhöhen wird, ist mit steigenden Energiepreisen und einem bedrohlichen Anstieg der klimaschädlichen Treibhausgase zu rechnen, die Jahrzehnte in der Atmosphäre verbleiben. Neben dem hohen Verbrauch an Erdöl galt das o. g. Polyvinylchlorid aufgrund des ungewöhnlich großen Chloranteils und der damit bei der Verbrennung entstehenden Nebenprodukte lange Zeit als umweltschädlichster Kunststoff. Zudem ist das zur Herstellung benötigte Vinylchlorid krebserregend [1].

Ein weiterer Aspekt ist die Umweltproblematik. Die polymeren Bestandteile der Kunststoffe sind zum einen nicht wasserlöslich und zum anderen nicht in der Lage, die Zellmembranen von Mikroorganismen zu passieren. Das heißt, eine Wechselwirkung mit lebenden Organismen ist außer bei den biologisch abbaubaren Kunststoffen weitgehend ausgeschlossen. Eine Umwandlung der Polymere in der belebten Natur ist folglich nicht möglich, so dass Kunststoffe nur sehr langsam verrotten [2].

Unter diesen Gesichtspunkten und der Tatsache, dass die Industrie bemüht sein sollte, die Folgen der Erderwärmung in Grenzen zu halten, gewinnen nachwachsende Rohstoffe als Werkstoff immer mehr an Bedeutung. Sie bieten die Möglichkeit, auf immer weiter vorhandene Rohstoffquellen zurückzugreifen und die Entsorgung durch Recycling oder andere umweltfreundliche Möglichkeiten ökologisch sinnvoll zu gestalten, so dass ein weiteres Anwachsen der Mülldeponien verhindert und eine Schonung der weltweit nur beschränkt vorliegenden, natürlichen Ressourcen herbeigeführt werden können.

Umweltminister Sigmar Gabriel appelliert zudem an die Unternehmen, weiter in energiesparende und effiziente Technologien zu investieren. „Ein vernünftiger Umgang mit den natürlichen Ressourcen werde immer mehr zum Markenzeichen einer erfolgreichen Volkswirtschaft.“ Industrie und Energieversorger müssen ihren Ausstoß des klimaschädlichen Kohlendioxids (CO₂) ab 2008 deutlich mindern, so die verschärften Obergrenzen beim Emissionshandel von Umweltminister Sigmar Gabriel (SPD).

Forschungstätigkeit

In dieses Konzept des Umweltbewusstseins passt ein vom Fachgebiet

Maschinenelemente der Universität Dortmund bearbeitetes Forschungsprojekt, bei dem es um die Entwicklung von Unterarmorthesen aus nachwachsenden Rohstoffen geht und welches von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoff e. V. und vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz gefördert wird. Da es sich bei der zu entwickelnden Orthese um ein technisches Hilfsmittel der Orthopädie handelt, welches das Handgelenk der oberen Extremität stützen und dadurch ruhig stellen soll, muss der zum Einsatz kommende Werkstoff bestimmte mechanische Eigenschaften zwingend aufweisen.



Abb. 1: Faserformversuchsanlage



Abb. 2: Zellstoff-Orthese

Da das Faserformverfahren dem der Papierherstellung gleicht, scheint der Einsatz von Faserstoffen sinnvoll zu sein, die in der Papierindustrie Verwendung finden. Vielen Papierfabriken wird Altpapier und häufig auch Zellstoff in trockener Form angeliefert, wohingegen die Produktion von Holzstoff in den meisten Fällen in den Papierfabriken selbst erfolgt. Die Ausgangsbasis zur Herstellung der Unterarmorthese bilden neben Zellstoff und thermomechanischem Holzstoff (TMP) auch fraktionierte und entwickelte Sekundärfasern. Die Verwendung von Sekundärfasern als Rohstoff ist sehr wirtschaftlich und umweltschonend, weil die Aufbereitung der Fasern mittels Reinigung und Mahlung weniger aufwendig ist als die Erzeugung von Primärfasern. Umweltbewusstes Handeln steht somit bei der Bearbeitung des Forschungsprojekts im Vordergrund.

Zur Herstellung der Unterarmorthese (s. Abb. 2) ist eine Faserformversuchsanlage nach dem Druckverfahren entwickelt worden (s. Abb. 1), an der eine Analyse einzelner Anlagenkomponenten und Systemparameter durchgeführt wurde. Ziel war es, ein besseres Verständnis über den kompletten Fertigungsprozess zu erhalten und eine Grundlage zur Aufschlüsselung aller Einflusskennwerte zu schaffen, um eine mathematische Koppelmatrix des Herstellungsprozesses erstellen zu können, die sich von der materiellen Ebene ablöste und so eine teil- bis vollautomatisierte Prozessoptimierung

ermöglichte. Darüber hinaus ließen sich Schwachstellen und unwirksame Produktionskennwerte aufzeigen. Zur Verifizierung der analytisch ermittelten Werte wurde eine Versuchsreihe nach den Gesetzmäßigkeiten der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Das mathematische Modell war ein sog. orthogonaler, zentral zusammengesetzter Versuchsplan, der in einem Versuchsrahmen von 36 Versuchen die Untersuchungen der Einflussgrößen Anformdruck, Anformdauer, Trocknungszeit während des Anformprozesses und Verdichtungsdruck bei einer Variation von 5 Einstellungen erlaubte.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass sich die Ergebnisgröße des Versuchs, in diesem Fall war es das ertragbare Biegemoment der Orthese, durch eine Anpassung der Einflussgrößen gezielt variieren lässt. In Versuchen war eine Erhöhung des Biegemomentes um einen Faktor von bis zu 1,5 nachweisbar.

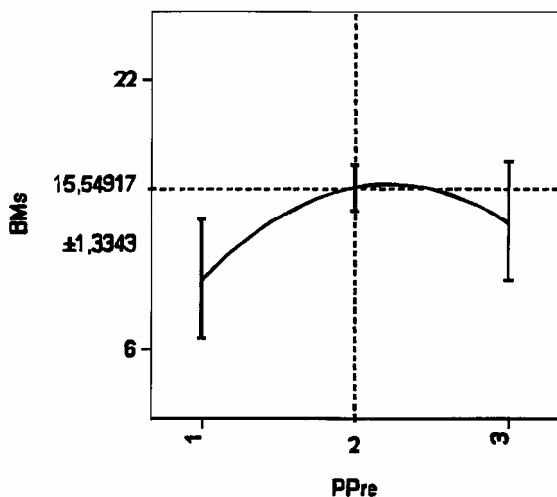


Abb. 3: Einfluss des Anformdrucks



Abb. 4: Biegemomentprüfung TMP-Orthese

Als besonders signifikante Einflussgröße stellte sich der Anformdruck heraus, dessen 5 Variationen 1 bar, 1,5 bar, 2 bar, 2,5 bar und 3 bar waren (s. Abb. 3). Die Messung des Biegemomentes der in Abb. 4 exemplarisch ausgewählten TMP-Orthese erfolgte auf einer eigens für diesen Anwendungsfall gefertigten Biegevorrichtung.

Abb. 3 verdeutlicht, dass das Biegemoment, welches von großer Bedeutung und eine der wichtigsten Eigenschaften des Faserformproduktes im Hinblick auf seinen späteren Einsatz als Unterarmorthese im medizinischen Bereich ist, bis zu einem Anformdruck von 2,2 bar ansteigt. Es lässt sich also schlussfolgern, dass die Höhe der Druckdifferenz, mit der die Fasern an den Siebkörper angeformt werden, einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit des Faserformproduktes nimmt. Der Faserverbund wird also bereits beim Anformvorgang gestärkt, was zu positiven mechanischen Eigenschaften führt.

Bei dem Versuch, dem nach der Biegemomentprüfung noch unbeschädigten Randbereich

der Orthese eine Streifenprobe zu entnehmen und an dieser eine Zugprüfung durchzuführen, zeigte sich, dass diejenigen Streifenproben hohen Zugkräften standhielten, die aus denjenigen Orthesen stammten, bei denen große Biegemomente gemessen worden sind. Diese Beobachtung deckt sich mit der Erkenntnis, dass ausgehend von der Zugfestigkeit qualitativ auf die Druck- und Biegefestigkeit eines Faserformproduktes geschlossen werden kann. Gefunden wurde dieser Zusammenhang in einem früheren, vom Fachgebiet Maschinenelemente der Universität Dortmund bearbeiteten Forschungsprojekt, zu dessen Inhalt die Auswahl und Erfassung geeigneter Auslegungskenndaten für Faserformprodukte zählte.

Aufgrund des existierenden Zusammenhangs zwischen der Zug- und der Biegefestigkeit wurden im Rahmen der Weiterentwicklung der Unterarmorthese ausschließlich Zugprüfungen an genormten Streifenproben durchgeführt, zu deren Herstellung die in Abb. 1 gezeigte Faserformversuchsanlage zum Einsatz kam. Die Festigkeitsuntersuchung an einer genormten Streifenprobe hat zwei entscheidende Vorteile. Zum einen lässt sich eine Streifenprobe mit geringerem Aufwand herstellen, zum anderen ist es einfacher, einen Festigkeitskennwert des Werkstoffs zu ermitteln. Die zur Angabe der Zugfestigkeit erforderliche Querschnittsfläche einer Streifenprobe lässt sich deutlich einfacher berechnen als das zur Bestimmung der Biegespannung notwendige Biegewidstandsmoment einer Orthese.

Losgelöst von den Untersuchungen der Einflussgrößen Anformdruck, Anformdauer, Trocknungszeit während des Anformprozesses und Verdichtungsdruck sind auch Versuche zur Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften von Faserformprodukten mit Hilfe chemischer Zusatzstoffe durchgeführt worden. Ziel sollte ein besseres Aneinanderlegen der einzelnen Fasern und letztlich ein stabilerer Gesamtfaserverbund sein. Nach einer Kontaktaufnahme mit dem ChemAdd-Paper-Net konnte, aufbauend auf der Erfahrung der dortigen Ansprechpartner, eine Auswahl an geeigneten Zusatzstoffen getroffen werden. In sog. Screening-Versuchsreihen, die für die Rohstoffe Zellstoff, thermomechanischer Holzstoff und Sekundärfaserstoff durchgeführt wurden, stellte sich heraus, dass die Effekte der Flockung und der Leimung zu einem Anstieg der Festigkeit bei Faserformprodukten beitragen. Teilweise wurden Steigerungen der Zugfestigkeiten um Faktoren von bis zu 5,6 registriert. Die diesen Effekt bewirkenden Nassfestmittel, Trockenfestmittel, Retentionsmittel, Stärken und Neutralleimungsmittel entsprechen der BfR-Richtlinie XXXVI („Papier, Kartons und Pappen für den Lebensmittelkontakt“) und sind somit äußerst umweltfreundlich.

Tab. 1 stellt die Ergebnisse der Screening-Versuchsreihen in übersichtlicher Form dar. Als erste wichtige Aussage bleibt festzuhalten, dass die hohe Ausgangsfestigkeit des

Zellstoffs und des thermomechanischen Holzstoffs mit der im Vergleich zu Sekundärfaserstoff größeren Faserlänge begründet werden kann, wobei sich die Zellstofffaser von der Länge her über der der Holzstofffaser ansiedeln lässt. Die zweite wichtige Erkenntnis ist die Tatsache, dass das Potential zur Erhöhung der Zugfestigkeit mit Hilfe von chemischen Additiven, die primär zusätzliche Wasserstoffbrückenbindungen erzeugen, umso größer ausfällt, je geringer der Mahlgrad des Rohstoffes ist.

Tab. 1: Versuchsergebnisse der Screening-Versuchsreihen

Rohstoff	Zugspannung ohne chem. Additive [N/mm ²]	max. Zugspannung mit chem. Additiven [N/mm ²]	max. Zugsp. mit chem. Add./Zugsp. ohne chem. Add. []	Konstellation der chem. Additive bei max. Zugspannung	als „statistisch signifikant“ zu bezeichnendes chem. Additiv
Sekundär-faserstoff	4,9	27,3	5,6	kat. Nass-festm. + kat. Trockenfestm. + kat. Leim + nicht ion. Leim	nicht ion. Leim
Zellstoff	20,5	34,0	1,7	kat. Nass-festm. + kat. Trockenfestm. + an. Kart.-stärke	
thermo-mechanischer Holzstoff (TMP)	17,6	19,5	1,1	kat. Nass-festm. + kat. Trockenfestm. + kat. Leim + kat. Kart.-stärke	

Zur besseren Beurteilung der erzielten Versuchsergebnisse werden die Zugspannungen der eingesetzten Papierfaserstoffe denen wichtiger im Bereich der Konstruktion eingesetzter Kunststoffen gegenübergestellt (s. Tab. 2).

Tab. 2: Zugspannungen von Papierfaserstoffen und Kunststoffen [3]

Papierfaserstoffe	max. Zugspannung [N/mm ²]
Sekundärfaserstoff	27,3
Zellstoff	34,0
thermomechanischer Holzstoff (TMP)	19,5
unverstärkte, thermoplastische Kunststoffe (Konstruktionswerkstoffe)	
Niederdruckpolyethylen (LDPE)	18...35

Hochdruckpolyethylen (HDPE)	8...23
Polypropylen (PP)	21...37
Polyvinylchlorid (PVC) weich	10...25
Acrylnitril/Butadien/Styrol-Copolymer (ABS)	32...60
Polytetrafluorethylen (PTFE)	25...36

Wirtschaftliche Bedeutung

Weltweit werden jedes Jahr Kunststoffe in einer Größenordnung von etwa 150 Mio. t produziert. Etwa 90 % davon entfallen in der Reihenfolge ihres Anteils auf die Kunststoffe Polyethylen, Polypropylen, Polyvinylchlorid, Polystyrol, Polyurethan und Polyethylenterephthalat. Der umweltschädlichste Kunststoff wird also am dritthäufigsten eingesetzt. Bei einem Vergleich der maximalen Zugspannungen von mit chemischen Additiven versetzten Papierfaserstoffen mit denen der drei am häufigsten verwendeten Kunststoffen wird deutlich, dass diese durch nachwachsende Rohstoffe ersetzt werden könnten (s. Tab. 2). Wie bei Kunststoffen, bei denen sich die technischen Eigenschaften durch eine entsprechende Auswahl von Ausgangsmaterial, Herstellungsverfahren und Beimischung von Additiven variieren lassen, können die mechanischen Eigenschaften von Faserformprodukten durch eine Variation des Rohstoffs, der Prozessparameter und der chemischen Zusatzstoffe ebenfalls gezielt beeinflusst werden.

In Versuchen sind Papierfaserstoffe Temperaturen von bis zu 250 °C ausgesetzt worden, Temperaturen um 200 °C konnten dauerhaft ertragen werden, so dass bzgl. der Temperatur- und Wärmeformbeständigkeit sogar Vorteile gegenüber Kunststoffen bestehen (Schmelzpunkt von PE: max. 140 °C, von PP: max. 168 °C) [4]. Darüber hinaus wurde experimentell bestätigt, dass das Dämpfungsverhalten eines nach dem Faserformverfahren produzierten Bauteils durch den Grad der Verpressung einstellbar ist. Durch die Verwendung wässriger Dispersionen nanoskaliger Polymere lässt sich zudem der entscheidende Nachteil von Faserformprodukten, dass sie nämlich aufgrund ihres hydrophilen Charakters leicht benetz- und quellbar sind, umgehen.

Bei einer Betrachtung der Rohstoffpreise lässt sich feststellen, dass Kunststoffe (PE: 0,13 – 0,23 Euro/kg, PP: 0,34 Euro/kg, PVC: 0,17 Euro/kg) [5] ungefähr um das Zweieinhalbfache günstiger sind als Papierfaserstoffe, sofern ausschließlich thermomechanischer Holzstoff (0,49 Euro/kg) [6] oder Zellstoff (0,48 – 0,52 Euro/kg) [7] Verwendung finden. Wie Tab. 2 zeigt, reicht es zur Erreichung der Festigkeiten der drei am häufigsten eingesetzten Kunststoffe aus, Sekundärfaserstoff, der Altpapier unterschiedlicher Sorten enthält, einzusetzen, sofern bestimmte, umweltfreundliche chemische Additive hinzugegeben werden. Der Rohstoffpreis für Altpapier liegt mit 0,06 –

0,14 Euro/kg [8] je nach Qualität unterhalb der Preise für Polyethylen, Polypropylen und Polyvinylchlorid, so dass nicht nur unter umweltbezogenen Gesichtspunkten, sondern auch bzgl. der Kosten Vorteile von Papierfaserstoffen gegenüber Kunststoffen bestehen. In Anbetracht der Tatsache, dass es gelungen ist, die bereits erwähnte Unterarmorthese, die als technisches Funktionsbauteil angesehen werden kann, aus Papierfaserstoffen herzustellen, ließen sich auch weitere Bereiche der Medizintechnik erschließen. Darüber hinaus wäre durch eine gezielte Auswahl passender chemischer Additive und durch eine entsprechende Einstellung der für den Herstellungsprozess relevanten Einflussgrößen auch ein Einsatz in der Automobil- und Möbelindustrie denkbar. Durch die besonders in der Automobilindustrie vorherrschenden hohen Stückzahlen bestünde ein großes Kosteneinsparpotential. Zudem könnte ein wichtiger Beitrag zur Schonung der Umwelt geleistet werden.

Quellen:

- [1] Kaiser W.: Kunststoffchemie für Ingenieure, Hanser, München, 2006, ISBN 3-446-22069-0
- [2] Müller, R.-J.: Biologie in unserer Zeit, 30, 2000, S. 218
- [3] Technisches Taschenbuch: Schaeffler KG, 2002
- [4] Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 1997
- [5] <http://plasticker.de/recybase/pms.php>
- [6] reports.andritz.com/2004/report-2004-de-geschaeftsbericht-final.pdf
- [7] <http://www.a-p-r.de/archiv/news/2006/05/news.html>
- [8] <http://www.industriemagazin.at>

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne ist Leiter des Fachgebiets Maschinenelemente an der Universität Dortmund, Dipl.-Ing. Christian Schejok betreut dort das Projekt zur Entwicklung von Unterarmorthesen aus nachwachsenden Rohstoffen, Tel.: 0231-755-5734, c.schejok@me.mb.uni-dortmund.de