

Biologisch abbaubare Verbundwerkstoffe Nutzung von Pflanzenfasern

Andreas Keller, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon
Erich Wintermantel und Kurt Ruffieux, Professur für Biokompatible Werkstoffe und Bauweisen (BWB), ETHZ,
CH-8952 Schlieren

Wachsendes Umweltbewusstsein und schwindender Deponieraum führen zur Suche nach neuen Wiederverwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten von Kunststoffen. Kompostierbare, biologisch abbaubare Polymere stellen eine interessante Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen dar. Basieren diese auf nachwachsenden Rohstoffen, so bieten sie der Landwirtschaft eine Möglichkeit der Landumnutzung, womit der herrschenden Nahrungs-

mittelüberproduktion unter Beibehaltung der landwirtschaftlichen Nutzfläche entgegengewirkt werden kann.

Abbaubare Polymere weisen jedoch oft nur geringe mechanische Eigenschaften auf. Diese können durch eine Verstärkung mit Bastfasern wie Flachs und Hanf verbessert werden. Am vielversprechendsten sind degummierte, fein aufgeschlossene Bastfasern, die spezifische Festig-

keiten im Bereich von technischen Glasfasern erreichen. Die technische Entwicklung auf dem Gebiet pflanzenfaserverstärkter biologisch abbaubarer Werkstoffe läuft auf drei Schienen: 1. Verbesserung der Fasereigenschaften durch Züchtung, Optimierung des Anbaus und der Aufschlussmethoden. 2. Erweiterung der Palette biologisch abbaubarer Polymere durch massgeschneiderte Werkstoffe. 3. Optimierung von Verarbeitungsverfahren.

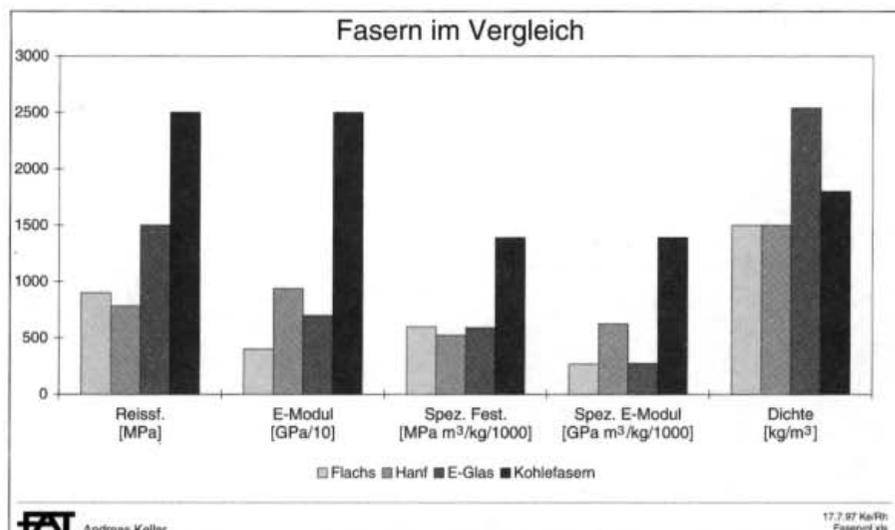


Abb. 1. Dank ihrer vergleichsweise geringen Dichte erreichen Pflanzenfasern spezifische (dichtebezogene) mechanische Eigenschaften, die im Bereich derjenigen von Glasfasern liegen. Sie sind also für den Einsatz im Leichtbaubereich prädestiniert.

Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Biologisch abbaubare Kunststoffe	2
Pflanzenfasern	4
Verbundwerkstoffe	7
Ausblick	7
Literatur	8

Problemstellung

Umwelt

Der Deponieraum für nicht verwertbare Abfallstoffe wird immer knapper. Weltweit fallen 25 Mio. t Kunststoffabfälle pro Jahr an, bei deren energetischen Verwertung grosse Mengen CO₂ freigesetzt werden [19]. Die Schonung fossiler Rohstoffe und somit die Verminderung des CO₂-Ausstosses stellt eine notwendige Massnahme für den Klimaschutz dar. Die Kompostierung biologisch abbaubarer Werkstoffe bietet eine interessante ökologische Alternative in der Entsorgungsproblematik. Bestehen solche Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, ist für eine weitgehende CO₂-Neutralität gesorgt.

Landwirtschaft

In der Schweiz wird zirka eine Mio. Hektaren landwirtschaftliche Nutzfläche bewirtschaftet. Es besteht eine Überproduktion an Futter- und Nahrungsmitteln. Daher sollten in den nächsten Jahren für eine Fläche von über 100 000 ha alternative

Landnutzungen gefunden werden. Dazu werden Extensivierung, ökologischer Ausgleich, Stilllegung und die Produktion nachwachsender Rohstoffe für die Industrie in Betracht gezogen [21].

Entwicklung biologisch abbaubarer Werkstoffe

Die Kunststoffindustrie stellt schon heute eine Vielzahl biologisch abbaubarer Polymere grosstechnisch her, wovon einige auf nachwachsenden Rohstoffen basieren. Deren noch verbesserbare Eigenschaften genügen bereits für viele Anwendungen [8]. Die Weiterentwicklung biologisch abbaubarer Werkstoffe kann diesen das Feld technischer Konstruktionswerkstoffe öffnen. Verstärkt man diese Polymere mit Pflanzenfasern, so lassen sich Verbundwerkstoffe herstellen, deren Eigenschaften einen Einsatz in technisch anspruchsvollen Bereichen (zum Beispiel Fahrzeuge, Sportgeräte) zulassen.

Thermoplastische Stärke (TPS)

Native Stärke (C₆H₁₀O₅)_n, wie sie zum Beispiel aus Weizen, Mais und Kartoffeln gewonnen werden kann, bildet die zwei strukturell verschiedenen Makromoleküle Amylose (M_w = 10⁵-10⁶ g/mol) und Amylopektin (M_w = 10⁷-10⁹ g/mol).

Native Stärke hat eine semikristalline Struktur. Um eine thermoplastische Verarbeitung zu ermöglichen, müssen die kristallinen Stärkekörner in eine homogene, amorphe Phase transformiert werden. Diese Destrukturierung der Stärke wird unter Einbringung von mechanischer und thermischer Energie unter Zuhilfenahme von Plastifizierern wie Wasser, Glycerol, Glycerin, Polyvinylalkohol u.a. durchgeführt. Das entstehende Produkt wird als thermoplastische Stärke bezeichnet und lässt sich auf herkömmlichen Extrusions-, Folienblas- und Spritzgussanlagen verarbeiten [9], [1].

Aufgrund ihrer geringen Bruchdehnung und der starken Feuchtigkeitsabhängigkeit ihrer Eigenschaften wird thermoplastische Stärke häufig mit Polycaprolacton geblendet. Polymerblends, die einen wesentlichen Anteil Stärke enthalten, sind wegen deren hydrolytischen Spaltbarkeit nicht wasserbeständig.

Biologisch abbaubare Kunststoffe

Die in den letzten Jahren entwickelten biologisch abbaubaren Kunststoffe sind mit den herkömmlichen Verfahren der Thermoplastverarbeitung, wie Extrudieren, Spritzgiessen, Folienblasen etc., verarbeitbar. Dadurch müssen Verarbeitungsbetriebe keine speziellen Maschinen anschaffen, um biologisch abbaubare Produkte herzustellen. Dies erhöht die Marktchancen eines solchen Werkstoffes. Über die erwähnten Verfahren lassen sich grosse Stückzahlen günstig produzieren, was einen Absatz dieser Werkstoffe ermöglicht. Das Marktpotential für biologisch abbaubare Kunststoffe liegt weltweit bis ins Jahr 2000 bei 1,4 Mio. t pro Jahr [19].

Biologisch abbaubare Polymere aus nachwachsenden Rohstoffen

Biologisch abbaubare Polymere aus nachwachsenden Rohstoffen bieten der Landwirtschaft alternative Produktionsmöglichkeiten, schonen die fossilen Ressourcen und tragen wesentlich weniger zum Treibhauseffekt als petrochemische Polymere bei.

Poly(hydroxybutyrat/-valerat) (PHB/V)

Verschiedene Bakterien reichern in ihren Zellen bis zu 90% ihrer Bio-trockenmasse in der Form von Polyhydroxyfettsäuren (PHF) als Energiespeicher an. Diese thermoplastischen Polyester lassen sich extrahieren und technisch nutzen. Unter den verschiedenen PHF sind die bereits auf dem Markt befindlichen Polyhydroxybutyrat/-valerat-Copolyester (PHB/V) am besten untersucht.

Glossar

Amorph	Von ungeordneter, nicht kristalliner Struktur
Copolymer	Aus verschiedenen Monomeren hergestelltes Polymer
Fibrille	Feinste Faserstruktur
Native Stärke Phase	Stärke in ihrem natürlichen, semikristallinen Zustand
Polymerblend	Bereich gleicher physikalischer und chemischer Eigenschaften
Thermoplast	Mehrphasige Mischung verschiedener Polymere
	Schmelzbarer Kunststoff

Tabelle 1. Auswahl heute erhältlicher biologisch abbaubarer Thermoplaste aus nachwachsenden Rohstoffen. Als Vergleich ist der häufig eingesetzte, nicht abbaubare Thermoplast Polypropylen aufgeführt.

Biologisch abbaubare Polymere aus nachwachsenden Rohstoffen	Herkunft	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]	Bruchdehnung [%]	Schmelzpunkt [°C]	Preis [sFr./kg]
Thermoplastische Stärke (20% Glycerin) [1]	Mais	6	0,4	10	--	4,90
Poly(hydroxybutyrat/-valerat) (Biopol D400G) [4]	Zucker	28	0,9	15	153	25.--
Cellulosediacetat (Bioceta) [9]	Cellulose	31,5	1,35	18,9	180	9.--
Polypropylen (Vergleich) [9]	Erdöl	30	1,3	650	185	2,30

Für die fermentative Produktion werden Glucose, Saccharose, Methanol und Propionsäure als Substrate eingesetzt. Über die Substratzusammensetzung lässt sich das Verhältnis von Hydroxybutyrat- zu Hydroxyvalerateinheiten einstellen. Typen mit höherem Valeratanteil haben einen niedrigeren E-Modul, niedrigere Festigkeit, einen tieferen Schmelzpunkt und eine höhere Schlagzähigkeit. Zusätzlich lassen sich die Eigenschaften über Additive wie Weichmacher und Nukleierungsmittel beeinflussen. Die PHB/PHV-Werkstoffe sind heute im Vergleich mit herkömmlichen, nicht abbaubaren Thermoplasten noch sehr teuer. Abschätzungen zeigen, dass mit optimalen Bakterienstämmen, Prozessbedingungen und -kapazitäten ein Preis von sFr. 2.70/kg erreichbar wäre. Noch günstiger könnte die Produktion von PHF in transgenen Pflanzen ohne bakterielle Fermentation kommen. Die Machbarkeit dieses Produktionsweges wurde bereits bewiesen [22].

Cellulosediacetat (CA)

Cellulosediacetat wird durch Acetylierung und anschließender Hydrolyse aus Cellulose (zum Beispiel aus Holz) gewonnen.

Mit Plastifizierern wie Dimethylphtalat, Triacetin und Triphenylphosphat lässt sich CA thermoplastisch verarbeiten. CA hat eine hohe Wasserabsorption, eine beschränkte Alterungsbeständigkeit und eine geringe chemische Beständigkeit. Dank der guten mechanischen Eigenschaften und der hohen Transparenz findet es für fotografische Anwendungen und als Verpackungsmaterial Verwendung [9].

Biologisch abbaubare Thermoplaste petrochemischen Ursprungs

Biologisch abbaubare Polymere petrochemischen Ursprungs bieten gegenüber solchen aus nachwachsenden Rohstoffen (heute noch) einige Vortei-

le. Ihre Eigenschaften lassen sich besser massschneidern, und sie haben eine höhere Verarbeitungsstabilität [10]. Sie sind jedoch nicht erneuerbar, da sie auf Erdöl basieren.

Poly(-ε-caprolacton), (PCL)

Das Polyester PCL kann wegen seines niedrigen Schmelzpunktes von 60 °C kaum allein als Konstruktionswerkstoff eingesetzt werden. Hingegen gibt es einige Blends von PCL mit TPS auf dem Markt. Die PCL-Phase ermöglicht höhere Bruchdehnungen und Festigkeiten, während die TPS-Phase für höhere Temperaturbeständigkeit sorgt. Durch die Stärkekomponente geht allerdings die Wasserbeständigkeit verloren.

Copolyester und Polyesteramide

Die Nachteile von PCL konnten durch die Synthese von statistischen Copolyestern und Polyesteramiden behoben

Tabelle 2. Auswahl heute erhältlicher biologisch abbaubarer Thermoplaste petrochemischen Ursprungs. Als Vergleich ist der häufig eingesetzte, nicht abbaubare Thermoplast Polypropylen aufgeführt.

Biologisch abbaubare Polymere petrochemischen Ursprungs	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]	Bruchdehnung [%]	Schmelzpunkt [°C]	Preis [sFr./kg]
Poly(-ε-Caprolacton) [9]	26-42	0,4	600-1000	60	9,70
Copolyester 14766 (Eastman) [3]	18	0,08	495	112	--
Polyesteramid (BAK 2195) [10]	--	0,55	120	175	5,80
Polypropylen (Vergleich) [9]	30	1,3	650	185	2,30

ben werden. Diese Gruppe von Polymeren lässt sich auf die Bedürfnisse der jeweiligen Anwendung masschneidern [10], [3]. So ist zum Beispiel BAK 1095 (ein Copolymer aus PA 6 und PCL, Bayer) mit einer Reissdehnung von 400% und einer Festigkeit von 25 MPa für die Herstellung von Blasfolien prädestiniert, während sich BAK 2195 (ein Copolymer aus PA 6,6 und PCL) bei einer höheren Festigkeit und einer Bruchdehnung von 120% für den Spritzguss eignet.

Pflanzenfasern

Die Zugfestigkeiten und Elastizitätsmoduli von Polymeren genügen den Anforderungen vieler Konstruktionsbauteile nicht. Im Fahrzeug-, Flugzeug- oder Sportgerätebau werden daher häufig faserverstärkte Polymere eingesetzt. Auch hier ist es möglich, biologisch abbaubare Werkstoffe zu verwenden. Sucht man nach biologisch abbaubaren Fasern hoher spezifischer, das heisst dichtebezogener Festigkeiten, so bieten sich Pflanzenfasern an. Im Unterschied zu Holz oder Gräsern mit Faserlängen vom wenigen Millimetern bilden Bastpflanzen wie Hanf und Flachs Fasern von einer Länge von bis zu 50 mm. Dies eröffnet ihnen einen breiten Einsatzbereich in der Polymerverstärkung, wo sie sich gegenüber Glasfasern behaupten müssen:

Vorteile von Pflanzenfasern gegenüber Glasfasern

- Niedrigere Abrasivität bei der Verarbeitung
- Geringe Dichte
- Erneuerbar
- Biologisch abbaubar
- Alternative Landnutzung
- Keine Schlackenbildung in der Kehrlichtverbrennungsanlage

Nachteile von Pflanzenfasern

- Starke Quellung mit Feuchtigkeit
- Schlechte Haftung an der Matrix
- Schwankende Qualität



Abb. 2. Vom agronomischen Standpunkt und vom technischen Potential her stellt Hanf eine vielversprechende Faserpflanze dar. Sie bietet die Möglichkeit einer alternativen Landnutzung, braucht kaum Pflege und erzeugt Fasern hoher technischer Qualität. Probleme bereitet die grosse Streuung der Fasereigenschaften.

Pflanzenfasern haben gegenüber Glasfasern einige Vorteile: Die im Gegensatz zu Glasfasern niedrige Abrasivität von Pflanzenfasern führt bei den häufig verwendeten Arbeitstechniken wie Spritzguss oder der Herstellung von Pressformteilen zu geringerem Werkzeugverschleiss [11]. Weitere Vorteile liegen im ökologischen Bereich: Pflanzenfasern lassen sich biologisch abbauen und sind somit bei der Verwendung von ebenfalls abbaubaren Bindern oder Matrices zum Beispiel kompostierbar. Auch in Kehrlichtverbrennungsanlagen bieten sie weniger Probleme als Glas, das sich in der Schlacke sammelt und somit als Sondermüll deponiert werden muss [11], [13], [17].

Es gibt auch Nachteile zu verzeichnen: Pflanzenfasern sind stark hygroskopisch. Bei der Aufnahme von Feuchtigkeit quellen sie. Wenn die Fasern an die Oberfläche des Werkstoffes geraten und somit mit Wasser in Kontakt treten, kann der Werkstoff durch die bei der Faserquellung entstehenden Kräfte von innen zerstört werden. Ein weiterer Punkt stellt die geringe Haftung der Fasern an bisher eingesetzten Matrices dar. Dies führt dazu, dass die bei Belastung auf den Werkstoff eingebrachten Kräfte nur ungenügend von der Matrix auf die Fasern übertragen werden können und somit die guten

mechanischen Fasereigenschaften gar nicht zum Tragen kommen. Die Hygroskopie und die Faserhaftung müssen mit verschiedenen Faseroberflächen-Behandlungen optimiert werden [5]. Die Qualität von Pflanzenfasern schwankt naturgemäss. Nicht nur zwischen den Erntejahren, sondern auch innerhalb einer Ernte ist immer eine wesentlich breitere Eigenschaftsverteilung der Fasern zu finden als dies bei synthetischen Fasern der Fall ist. Dies wirkt sich nicht nur auf die Bauteile, sondern auch auf den Produktionsprozess aus.

Bastfasergewinnung

Aufbau von Bastpflanzen

Um den Holzkern des Stengels sind in der Rindenschicht Bastfaserbündel angeordnet, die aus bis zu 50 Einzelfasern bestehen. Diese sind mit Kittsubstanzen (vor allem Lignin) zusammengeklebt. Eine solche Faserzelle, die über 50 mm lang werden kann, besteht aus einer aufwendigen Architektur von Fibrillen [23].

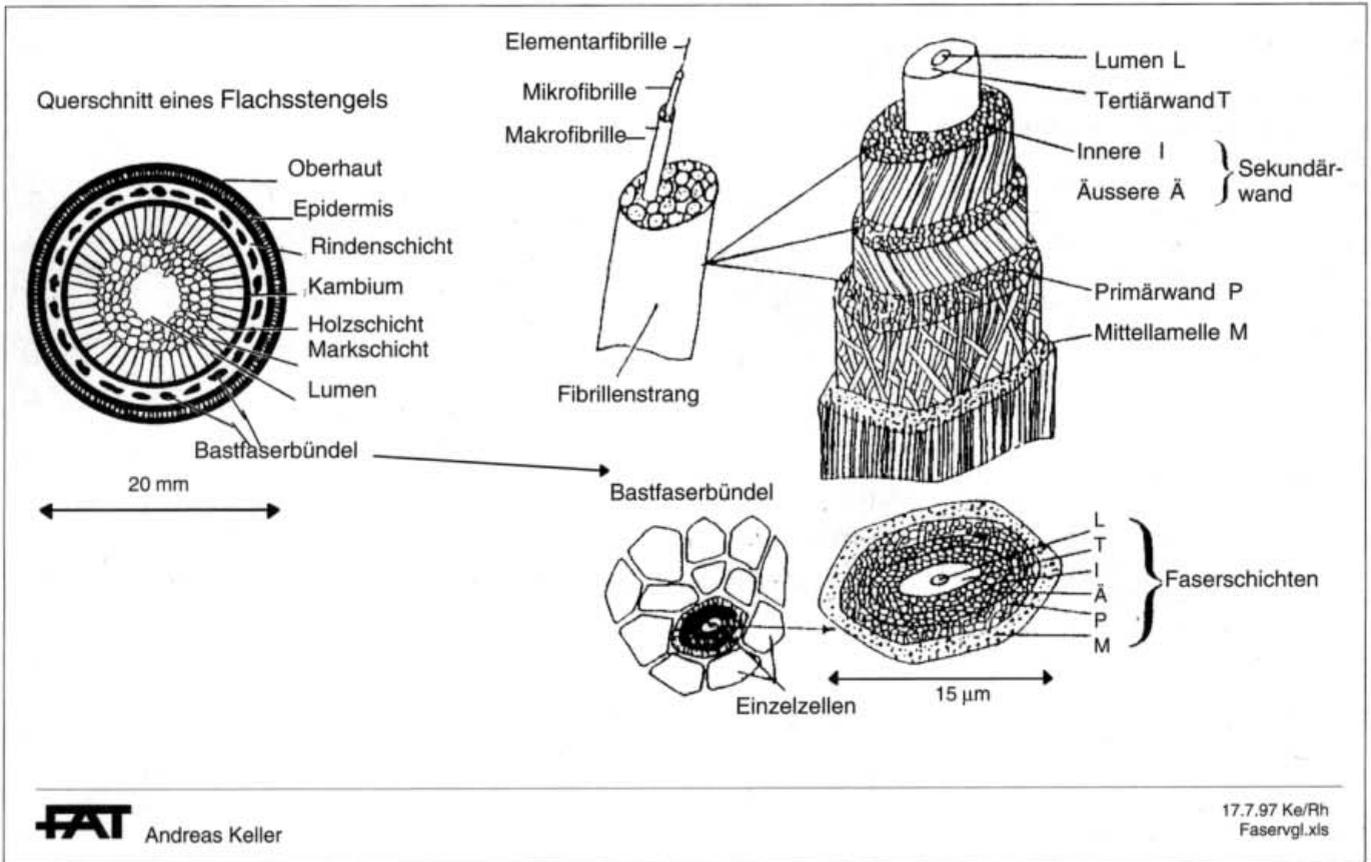


Abb. 3. Bastfaseraufbau am Beispiel Flachs [12].

Decortisierung

Die Bastfaserbündel können vom Holzkern rein mechanisch getrennt werden, indem die gesamten Pflanzenstengel

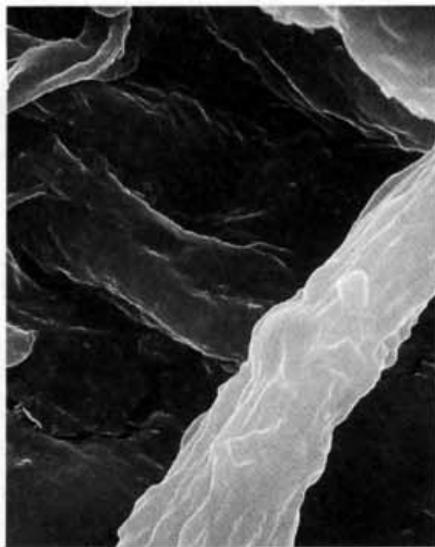


Abb. 4. Mechanisch separierte Hanffaser (x 4000) mit rauher Oberflächen-topographie, welche von den noch anhaftenden Kittsubstanzen wie Lignin, Pektin und Hemicellulosen herrührt.

durch ein System von profilierten Brecherwalzenpaaren geführt werden. Dort wird das Holz gebrochen und fällt als sogenannte Schäben an. Die flexibleren Faserbündel passieren die Walzen unbeschadet und können als sogenannter Bast gewonnen werden. Für die Konstruktion von Verbundwerkstoffen sind feine Fasern gefordert, um möglichst viel Faseroberfläche pro tragenden Querschnitt zu haben, über welche Kräfte von der Matrix auf die Fasern übertragen werden können. Daher ist es erwünscht, die zusammengekitteten Einzelfasern zu trennen. Dies ist auf rein mechanischem Wege nicht möglich. Im Anschluss an die Decortisierung werden feinere Aufschlussverfahren benötigt (Degummierung).

Degummierung

Dampfaufschluss

Dieses Verfahren, welches auch in der Papierindustrie Verwendung findet, wurde vom Institut für Angewandte

Forschung der Fachhochschule Reutlingen (D) auf Flachs- und später Hanffasern übertragen [15]. Dabei wird der Bast in einem Autoklav mit Dampf bei 8–12 bar beaufschlagt. Es wird je nach Ausgangsmaterial (Röstgrad) in einem mehr oder weniger basischen Milieu gearbeitet. Durch eine schlagartige Entspannung explodiert der zwischen den Elementarfasern kondensierte Dampf und reißt diese auseinander [24]. Durch anschließendes Waschen werden gelöste Kittsubstanzen entfernt.

Ultraschall

Die Ultraschallbehandlung erzeugt lokal sehr hohe Drücke und Temperaturen, die während sehr kurzer Zeit wirken. Durch die günstige Wahl der Prozessparameter lassen sich die Faserzellen auf diese Weise ähnlich wie beim Dampfaufschluss vereinzeln [26].

Chemischer Aufschluss

Die Fasern lassen sich auch durch rein chemischen Aufschluss vereinzeln.

Dazu sind Bäder mit Zugabe von beispielsweise Schwefelsäure, Chlorkalk, Natronlauge, Kaliseife oder Soda zu verwenden. Die Kittsubstanzen lösen sich dadurch, die Fasern sind somit anschliessend durch Kämmen trennbar. Die Schwierigkeit besteht darin, die Badzusammensetzung, Prozesstemperatur und -dauer so zu wählen, dass die Kittsubstanzen gut gelöst werden, die Cellulosefasern dabei aber noch keinen Schaden nehmen [23].

Biologischer Aufschluss

Beim biologischen Aufschluss werden die Kittsubstanzen durch Enzyme von Mikroorganismen zerstört. Dies ist auch bei der traditionellen Röste auf dem Feld der Fall, nur ist dort der Vorgang wegen wechselnder Witterungsbedingungen schlecht kontrollierbar und die Gefahr einer Überröste mit Angriff der Cellulose gegeben. Der Aufschluss kann aber auch in Reaktoren stattfinden, so dass durch eine gezielte Temperaturführung, Animpfung und Online-Qualitätskontrolle der Prozess steuerbar ist.

Beeinflussung der Faserqualität

Nicht nur durch die Aufschlussmethode, sondern bereits beim Anbau der Pflanzen wird die Faserqualität wesentlich beeinflusst. Dies zeigen Untersuchungen an Hanf, wobei der Erntezeitpunkt, die Saatlücke und die Röstdauer bei den Sorten Futura 77 und Fedora 19 variiert wurden.

Die Zugfestigkeit des Bastes weist bei den in der Woche 32 geernteten Pflanzen ein deutliches Maximum auf. Die Sorte Futura zeigt durchwegs eine bis zu 25% höhere Festigkeit als Fedora. Sie erreichte eine Bastfestigkeit von 922 ± 133 MPa. Es existiert also ein optimaler Erntezeitpunkt. Es gilt nun diesen in Zusammenhang mit leicht erkennbaren Merkmalen des entsprechenden Entwicklungsstadiums der Pflanze zu bringen. Damit ist für jedes Jahr der optimale Erntezeitpunkt erlernbar.

Der Einfluss der Feldröste auf die mechanischen Eigenschaften von Hanfbast wurde untersucht. Die Sorte Futura zeigte eine kontinuierliche Abnahme sowohl der Festigkeit als auch des

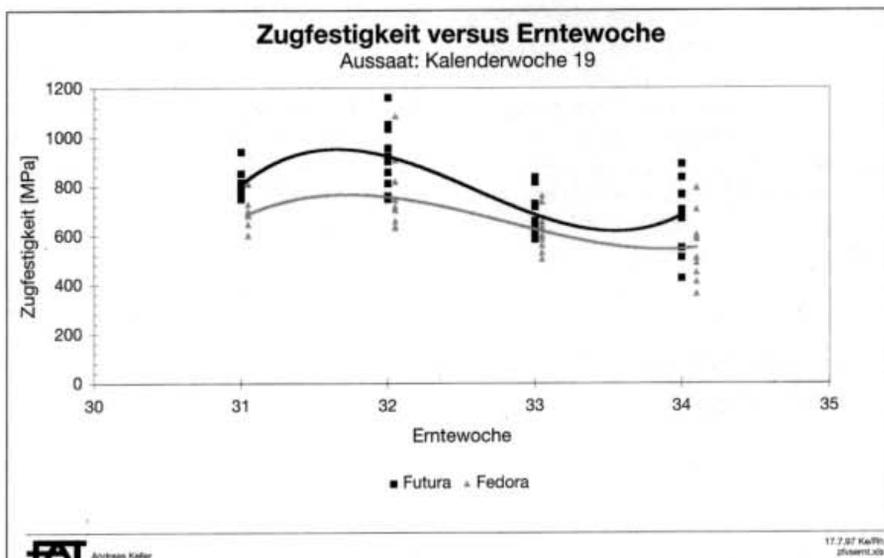


Abb. 5. Der Erntezeitpunkt beeinflusst die Basteigenschaften deutlich.

Elastizitätsmoduls. Die Festigkeitseinbuße betrug innerhalb von 20 Tagen 24%. Der E-Modulverlust betrug über 70%, wobei die für Hanf typische starke Streuung der Messwerte zu beachten ist. Bei der Sorte Fedora war keine solche Tendenz nachweisbar. Moderne Faseraufschlussverfahren sind nicht mehr auf eine Feldröste angewiesen. Es wäre aber wünschenswert, die Pflanzen vor dem Ballenpressen auf dem Feld trocknen zu können, damit sie lagerfähig sind. Die Trocknung kann

je nach Witterungsbedingungen ohne weiteres bis zu drei Wochen dauern, was einer unerwünschten Feldröste gleichkommt. Einen Lösungsansatz für dieses Problem könnte die Decortierung von frischen Stengeln, wie sie bei Ramie angewendet wird, bieten [20]. Die getrennten Fasern trocknen wesentlich schneller.

Die starke Streuung der Fasereigenschaften ist einerseits auf die unterschiedliche Ausbildung der Fasern innerhalb eines Pflanzenstengels und an-

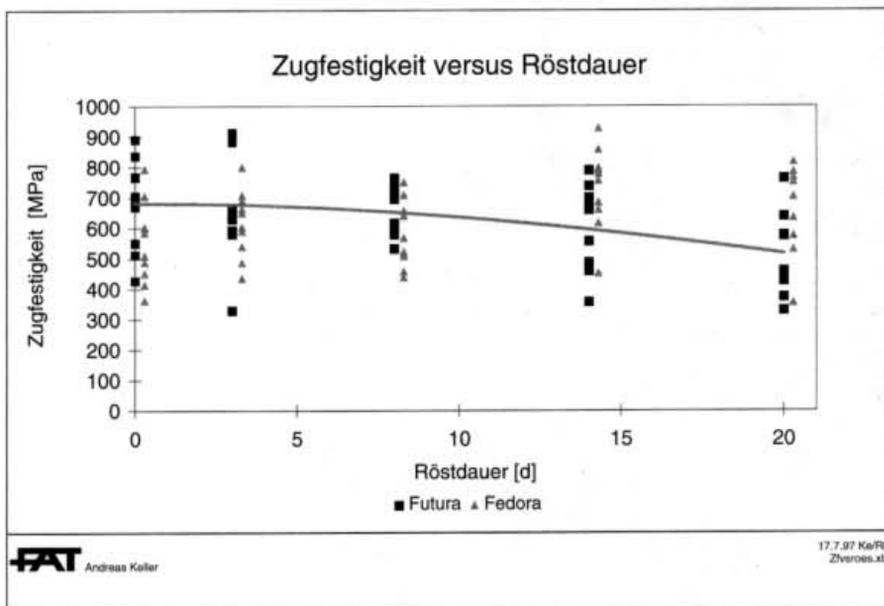


Abb. 6. Moderne Aufschlussverfahren sind nicht auf die Röste, welche sich negativ auf die Bastfestigkeit auswirkt, angewiesen.

derseits auf Unterschiede von Pflanze zu Pflanze zurückzuführen. Dazu kommen noch Unterschiede zwischen den Erntejahren. Diese breite Eigenschaftsverteilung wirkt sich nicht nur auf Bauteile, sondern auch auf den Produktionsprozess aus. So treten zum Beispiel im Spinnprozess bei unregelmässiger Vorlagequalität Fadenbrüche gehäuft auf [2].

Faseroberflächenmodifikation

Durch eine Modifikation der Faseroberfläche kann die bei Pflanzenfaser-Biopolymer-Verbundwerkstoffen häufig ungenügende Haftung zwischen Faser und Matrix und die Benetzbarkeit erhöht werden [5]. Mögliche Methoden sind:

- Copolymerisation der Cellulose mit Polymeren, die mit der Matrix kompatibel sind;
- Aufbringen von Sizings (Vermittler-substanzen), die sowohl an der Faser als auch an der Matrix gut haften;
- Koronabehandlung, bei der über elektrische Entladungen die Polarität der Faseroberfläche verändert wird.

Verstärkte Spritzgusswerkstoffe

Das Spritzgussverfahren eignet sich für die Massenproduktion auch kompliziert gestalteter Formteile. Im Bereich der biologisch abbaubaren Spritzgusswerkstoffe gibt es verschiedene Anstrengungen, Naturharze, wie sie zum Beispiel bei der Zellstoffproduktion anfallen, mit Pflanzenfasern zu einem Spritzgussgranulat zu compoundieren [25], [7]. Solche Werkstoffe finden Anwendung in mechanisch wenig belasteten Teilen in Einsatzbereichen, wo die biologische Abbaubarkeit einen wesentlichen Vorteil darstellt (zum Beispiel Golftees, Trauerware, Pflanztöpfe, Wegwerfartikel, Verpackungselemente). Spritzgussfähige Flachsfaser-TPS/PCL-Verbunde mit 20 Gew. % Flachsfasern einer durchschnittlichen Faserlänge von 0,59 mm erreichen eine Festigkeit von 22 MPa bei einer Bruchdehnung von 200% [1]. Damit konnte die Festigkeit von TPS/PCL um 35% erhöht werden. Die mechanischen Eigenschaften dieses Verbundes liegen allerdings immer noch wesentlich tiefer als diejenigen eines unverstärkten Polypropylens. Ziel weiterer Entwicklungen muss es sein, Eigenschaften zu erreichen, die einen Einsatz auch in mechanisch stark belasteten Teilen zulassen. Dies kann erreicht werden durch

- Verbesserung der Faser-Matrix-Haftung [6],
- höhere Fasergehalte,
- grössere Faserlängen bei guter Faserverteilung,
- Optimierung der Matrixsysteme.

Labor- oder Technikumsanlagen vorhanden. Für die Weiterentwicklung technischer Pflanzenfasern stellen folgende Aspekte Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung dar:

- Wie wirken sich die Anbaubedingungen auf die Faserqualität aus?
- Entwicklung von Methoden der Faserqualitätsbestimmung.
- Wo liegen die technischen, ökologischen und ökonomischen Vor- und Nachteile der verschiedenen Aufschlussverfahren?
- Optimierung der Aufschlussverfahren.

Polymere

Die Normung und Zertifizierung biologisch abbaubarer Polymere ist weit vorangeschritten. Für eine breite Markteinführung braucht es folgende Schritte [8]:

- Die Konzepte für eine möglichst flächendeckende Entsorgung insbesondere von Verpackungswerkstoffen müssen umgesetzt werden.
- Die Palette der vorhandenen biologisch abbaubaren Polymere ist durch massgeschneiderte Werkstoffe mit besseren Eigenschaften (zum Beispiel niedrigere Gasdurchlässigkeit für Verpackungszwecke) zu erweitern.
- Eine grössere Nachfrage ermöglicht eine rationellere Produktion. Zusammen mit der Weiterentwicklung der Herstellverfahren wird eine Preissenkung möglich, so dass biologisch abbaubare Polymere mit konventionellen Thermoplasten konkurrieren können.

Verbundwerkstoffe

Sheet-Moulding-Compounds (SMC)

Die Automobilindustrie will vermehrt recyclinggerechte Fahrzeuge entwickeln. Glasfaserverstärkte Kunststoffe sind nur unter relativ hohem Aufwand wiederverwendbar [14]. Ausserdem lassen sich pflanzenfaserverstärkte Kunststoffe mit geringerem Werkzeugverschleiss verarbeiten und zeigen ein sichereres Crashverhalten. Schon heute werden Automobilteile wie Türinnenverkleidungen oder Hutablagen mit Pflanzenfasern im Pressverfahren (SMC) gefertigt. Dieses Verfahren eignet sich zur Herstellung von flächigen Bauteilen. Als Matrices werden Polypropylen oder Epoxidharze eingesetzt. Diese Bauteile sind jedoch nicht biologisch abbaubar.

Ausblick

Fasern

Die mechanische Decortisierungstechnologie für Bastpflanzen ist im industriellen Massstab realisiert. Entsprechende Fasern für die Produktion einfacher Formpressteile und Dämmstoffe sind bereits auf dem Markt erhältlich. Anders verhält es sich mit den Degummierv Verfahren zur Produktion von feinsten Fasern. Hier sind erst

Verbundwerkstoffe

Biologisch abbaubare Verbundwerkstoffe für einen höheren technischen Anwendungsbereich stehen noch nicht vor der unmittelbaren Markteinführung. Hier sind noch einige Schritte nötig, welche von den Entwicklungen im Bereich der biologisch abbaubaren Matrices und Fasern abhängen:

- Verbesserung der Faser-Matrix-Haftung,
- Anpassung bestehender Verarbeitungsverfahren auf Pflanzenfasern,

- Entwicklung neuer Verarbeitungsverfahren.

Nur mit einer engen Zusammenarbeit zwischen Landwirtschaft, Industrie und Forschungsanstalten lassen sich Erfolge beim Beantworten der zahlreichen offenen Fragen erzielen.

Literatur

- [1] Aichholzer W., 5.–6.3.1997. Bioabbaubare Verbundwerkstoffe auf nachwachsender Rohstoffbasis. 15. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium 5.1.
- [2] Azarschab M. und Preininger H., April 1997. Optimierung des Bandherstellungsprozesses zur Erhöhung der Ausspinnmenge bei Garnen aus Flachswerg. Agrarforschung Baden-Württemberg – Forschungsreport VI, 1997.
- [3] Berting J., 19.–20.2.1997. Biologisch abbaubare Copolyester: Verarbeitung und Abbauverhalten. Fachtagung «Biologisch abbaubare Werkstoffe» 19.–20.2.97, Würzburg.
- [4] Biopol Produkteinformation, Monsanto (D) GmbH, 1997.
- [5] Bledzki A. K., Gassan J. und Reihmane S., 1996. Properties and Modification Methods for Vegetable Fibers for Natural Fiber Composites. *Journal of Applied Polymer Science* Vol. 59, 1329–1336.
- [6] Bourban, C., 1997. Processing and Properties of DegraComp, a New Degradable Anisotropic Composite Made of Regenerated Cellulose Fibers and Poly(Hydroxyalkanoate) Matrices. Diss. ETH Nr. 12288. Zürich.
- [7] Dornburg S., 10./11.10.1994. Einsatz von Biopolymeren in Verpackung und Gartenbau – Erfahrungen und Zukunftsperspektiven – Kurzfassung. KTBL Arbeitspapier 220, Kunststoffe und nachwachsende Rohstoffe II, 49–53.
- [8] Fachtagung Biologisch abbaubare Werkstoffe, 19.–20.2.1997, Würzburg. Süddeutsches Kunststoff-Zentrum.
- [9] Fritz H. G. et al., Juni 1994. Use and Modification of Biological Substances. Production of Thermo-Bioplastics and Fibres based mainly on Biological Materials EUR 16102 EN, European Commission, D.X., Editor, 9-61.
- [10] Grigat E., 1997. BAK 1095 – das Jahr danach. Fachtagung «Biologisch abbaubare Werkstoffe» 19.–20.2.97, Würzburg.
- [11] Hague Jamie, 1995. Composites from Non-Wood Materials. *Agricultural Engineer* Nr. 3, 24–28.
- [12] Haudek H. und Viti E. 1980. Textilfasern – Herkunft, Herstellung, Aufbau, Eigenschaften, Verwendung. Verlag Johann I. Bondi & Sohn, Wien.
- [13] Hermann A. S. und Hanselka, 2.3.–5.3.1995. Verbundwerkstoffe aus biologischen Faser- und Matrixkomponenten. Biorohstoff Hanf, Symposium Frankfurt a.M.
- [14] Herrmann A. und Hanselka H., 1997. Automobil-Leichtbau mit Faser-verbundwerkstoffen auf der Basis nachwachsender Rohstoffe. *Werkstoffe im Automobilbau (Sonderausgabe von ATZ und MTZ)* 74–77.
- [15] Karus M. und Leson G., 1995. Hemp research and market development in Germany, a status report for 1994. Biorohstoff Hanf, Symposium Frankfurt a.M. 2.3.1995.
- [16] Keller A. und Wintermantel E., 27.2.–2.3.97. Einflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften von Hanffasern. Biorohstoff Hanf 97 – Technisch-wissenschaftliches Symposium.
- [17] Keller A., 1997. Technische Nutzung von Faserpflanzen. *Agrarforschung* 4 1, 5–8.
- [18] Kessler R. W., Kohler R. und Tubach M., 1996. Perspektiven der Faser-gewinnung und Aufbereitung im Hinblick auf unterschiedliche Nutzungszwecke. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenwissenschaften* 9, 7–14.
- [19] Lee Sang Yup, 1996. Bacterial Polyhydroxyalkanoates. *Biotechnology and Bioengineering* Vol. 49, 1–14.
- [20] Leupin M., 1996. Bakterielle Degummierung von Ramie (*Boehmeria nivea*). Diss. ETH Nr. 11 893. Zürich. 150 S. Dissertation an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich.
- [21] Masterplan, 1994. Masterplan Pflanzenbau, Bericht der Expertenkommission zur Neuorientierung im Pflanzenbau, EMDZ, Bern.
- [22] Menner M. und Luck T., 1997. Biologische Vielfalt bakterieller Kunststoffe. *Bio World* 1/97, 8–13.
- [23] Satlow G., Zaremba S. und Wulfhorst B., 1994. Flachs sowie andere Bast- und Hartfasern. *Chemiefasern/Textilindustrie* 96 44, 765–785.
- [24] Tubach M. und Kessler, R.W., 1995. Neue Aufschlussverfahren – Ein Schlüssel für innovative Anwendungen für Flachs. 1. Hunsrücker Leintage 2.–3.8.1995, Emmelshausen (D).
- [25] Wohlgenannt M., Oktober 1996. Ein höchst ungewöhnlicher Werkstoff. *Schweizer Maschinenmarkt* 40, 20–21.
- [26] Zimmer, H. und Kloss, K. D., 1995. Ultraschallaufschluss von Hanf, Ziele – Technologie – Anwendung – Resultate – Qualitätsmanagement. Biorohstoff Hanf, Symposium Frankfurt a.M., 2.3.1995.