

Vorstellung neuer Einsatzgebiete für SpreuStroh

Maria Schäfer, Martin Sturm, Steffen Exler

Jährlich stehen allein in Deutschland 10 Millionen Tonnen Spreu als Reststoff zur Verwertung zur Verfügung. Auf der Basis eines innovativen Ernteverfahrens, welches die Bergung des ungereinigten Getreidekorns in einem Gemisch aus Spreu und gehäckseltem Stroh ermöglicht, kann das Spreu, in Form der neuartigen Biomasse Mischung SpreuStroh, einer wertschöpfenden Nutzung zugeführt werden. In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Aufbereitungsmöglichkeiten und damit Nutzungsmöglichkeiten des Gemisches SpreuStroh aufgezeigt. Basierend auf einer umfangreichen Charakterisierung des SpreuStrohs werden zunächst Anwendungsmöglichkeiten für den Landwirt aufgezeigt. Herauszuheben ist dabei der Nutzen für den Umweltschutz, ermöglicht durch die systembedingte Entnahme von Unkrautsamen und damit die Verringerung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln. Durch eine weitere Aufbereitung des Gemisches SpreuStroh werden höherwertige Nutzungsmöglichkeiten, wie die Verwendung im 3D-Druck oder als Zuschlagsstoff in Faser-Kunststoff-Verbunden, aufgezeigt.

Schlüsselwörter

SpreuStroh, nachwachsende Rohstoffe, Aufbereitung, 3D-Druck, Spritzguss

Jedes Jahr bleiben allein in Deutschland 10 Millionen Tonnen Spreu als nicht verwendete Biomasse auf den Feldern (RUMPLER 2016). Die Spreuerträge variieren dabei im Bereich von einer bis anderthalb Tonnen pro Hektar (BERGER et al. 2010). Durch ein neu entwickeltes, innovatives Ernteverfahren wird es möglich, diese Mengen an Spreu in einem Gemisch mit Korn und Stroh zu ernten. Damit ist es erstmals möglich, industriell erforderliche Mengen zuverlässig bereitzustellen (RUDOLPH 2020).

Im Zuge der immer intensiveren Suche nach nachwachsenden Rohstoffen und der Reduzierung der Nutzung von nur langsam nachwachsenden Ressourcen, wie Holz, scheint die Nutzung von Spreu als biologischer Reststoff eine interessante Alternative. In den vergangenen Jahren gab es zahlreiche Bestrebungen, den Reststoff Spreu einer Anwendung zuzuführen. Dabei standen vor allem die Nutzung in der Tierhaltung (Mann et al. 1988) und die energetische Nutzung (FICK-HAAS 2015, KHALSA et al. 2016) im Vordergrund.

In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten der zentralen Aufbereitung des mit der Erntemaschine geborgenen Produktes SpreuStroh aufgezeigt. Es gilt, verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für SpreuStroh ins Auge zu fassen und in einer modular aufgebauten Prozesskette anwendungsorientierte Aufbereitungstechnologien zur Verfügung zu stellen. Dabei liegt der Fokus zum einen auf der umfassenden stofflichen und physikalischen Charakterisierung des Ausgangsmaterials SpreuStroh und zum anderen auf den sich daraus ergebenden Möglichkeiten das Material aufzubereiten. Für das neuartige Produkt sollen dabei Optionen für spezielle Anwendungsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden.

Materialien und Methoden

Das verwendete SpreuStroh wurde 2019, 2020 und 2021 geerntet. Es handelt sich um ein Gemisch aus Weizenstroh und Weizenspreu zu gleichen Massenanteilen. Geerntet wird das SpreuStroh zusammen mit den Weizenkörnern. Das Ernteverfahren der Kompakternte ist in der Literatur beschrieben (RUMPLER 2015, RUMPLER 2016, RUDOLPH 2020). In einer Vorreinigung werden die Körner vom SpreuStroh abgetrennt; für die hier vorgestellten Untersuchungen wird das abgetrennte SpreuStroh verwendet.

Methoden der Aufbereitung

Für die Zerkleinerung des Materials wurden verschiedene Zerkleinerungsapparate verwendet. Sie unterscheiden sich vordergründig in ihrer Beanspruchungsart. Aus den fünf möglichen Beanspruchungsarten für eine Zerkleinerung (Prall, Schlag, Druck, Scher und Schneid) kommen die Zerkleinerung durch Prall- und Schneidbeanspruchung für die Aufbereitung von fasrigen Materialien in Frage und werden in dieser Arbeit betrachtet. Zur Realisierung der Schneidbeanspruchung wurde eine Ultrazentrifugalmühle der Firma Retsch GmbH (ZM 200) mit unterschiedlichen Siebeinsätzen von 2 mm bis 250 µm verwendet.

Für die Prallbeanspruchung wurden unterschiedliche Mühlen verwendet. Für die Vorzerkleinerung wurde eine Stiftmühle genutzt (Gebrüder Jehmlich GmbH, REKORD A, mit Stiftkranz). Für die Feinstzerkleinerung durch eine Prallbeanspruchung kam eine Kleinschlagmühle der Firma Gebrüder Jehmlich GmbH mit unterschiedlichen Siebeinsätzen von 1 bis 0,25 mm zum Einsatz.

Methoden der Charakterisierung

Zur Einschätzung der möglichen Anwendungsmöglichkeiten ist eine umfassende Charakterisierung des Ausgangsmaterial, sowie der einzelnen Produkte der unterschiedlichen Aufbereitungsstufen notwendig.

In jeder Aufbereitungsstufe wird die Partikelgröße des Materials durch eine Analysensiebung (bis 100 µm) bestimmt (Plansiebmaschine, Fa. Haver & Boecker). Zur Bestimmung der Partikelgröße nach der Zerkleinerung wird vorrangig die Methode der Laserbeugung (Analysette, Fa. Fritsch) verwendet. Zum Vergleich der einzelnen Partikelgrößenverteilungen werden der Medianwert der Verteilung $x_{3,50}$ sowie die Breite der Verteilung, in Form der Spannweite ($s = (x_{3,90} - x_{3,10})/x_{3,50}$), herangezogen.

Zur Beurteilung der Fließfähigkeit der aufbereiteten Produkte wurden Scherversuche nach Jenike (SCHUBERT 2003) am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg durchgeführt. Dazu wurde das Material in einer Jenike-Scherzelle definiert belastet und geschert und die relevanten Messwerte aufgenommen.

Um die Trockensubstanz und den Mineralgehalt der einzelnen Materialien zu bestimmen, wurde eine thermogravimetrische Analyse (TGA/DSC 1, Fa. Mettler Toledo) durchgeführt. Die einzelnen Stufen des Masseverlustes können anhand der Temperaturverläufe einzelnen Stufen der Zersetzung zugeordnet werden. Von Bedeutung ist dabei zunächst der erste Masseverlust (Stufe 1), welcher auf das verdampfende Wasser zurückzuführen ist. In einem nächsten Masseverlust (Stufe 2) werden alle kohlenstoffhaltige Substanzen zersetzt. Übrig bleibt ein Rest (Stufe 3), welcher mineralischer Natur ist und damit dem Mineralgehalt der Probe gleichgesetzt wird.

In einem Laborextruder (Typ 20/25 D, Fa. Babaender) wird das zerkleinerte SpreuStroh mit Polypropylen vermischt. Der Mischungszustand wird mittels thermogravimetrischer Analyse bewertet. Die extrudierten Verbundmaterialien werden in einer Labor-Spritzgussmaschine (Babyplast 6/10-P, Fa. Christmann) zu Zugprüfstäben verarbeitet. Diese werden hinsichtlich der Zugfestigkeit und der maximalen Dehnung in einer Zugprüfmaschine (Tischprüfmaschine Z 005, Fa. ZwickRoell) untersucht und hinsichtlich des Einflusses von Partikelgröße und Faseranteil im Verbundmaterial untersucht und verglichen.

Die besonderen Eigenschaften von SpreuStroh

Um die optimalen Einsatzgebiete des neuartigen Materialgemisches SpreuStroh zu eruieren, wurden zahlreiche analytische Betrachtungen durchgeführt. Das Erntegut wird als ein Gemisch aus Korn, Stroh und Spreu im Verhältnis gewonnen (Abbildung 1). 25% des Strohs werden geerntet und 75% verbleiben auf dem Feld zur Humusbildung. Hingegen werden 100% des Korns und zusätzlich, zu herkömmlichen Ernteverfahren, 100% des Spreus geerntet. Dieses Gemisch wird vom Feld in einer Überfahrt abgefahren und anschließend erfolgt die Vorreinigung, also die Abtrennung vom Korn. Das übrigbleibende Gemisch aus Spreu und Stroh liegt im Masseverhältnis 1:1 vor und kann weiterverarbeitet und aufbereitet werden.

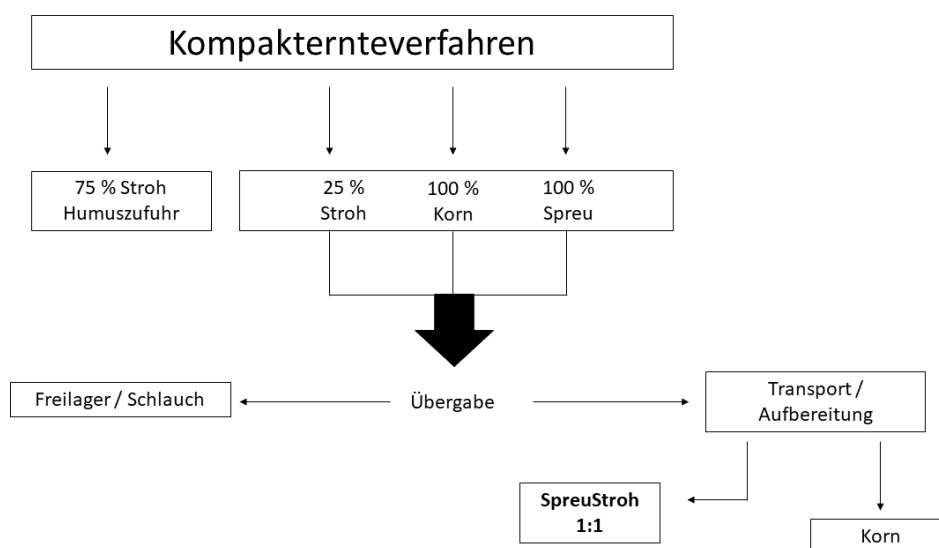


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Kompakternteverfahrens (RUDOLPH 2020)

Das Stroh wurde bereits auf der Erntemaschine durch einen Standardhäcksler vorzerkleinert, wodurch eine gewisse Kontinuität im Ausgangsmaterial garantiert werden kann. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 2 eine Partikelgrößenverteilung des Ausgangsmaterials SpreuStroh aus der Ernte 2019 dargestellt.

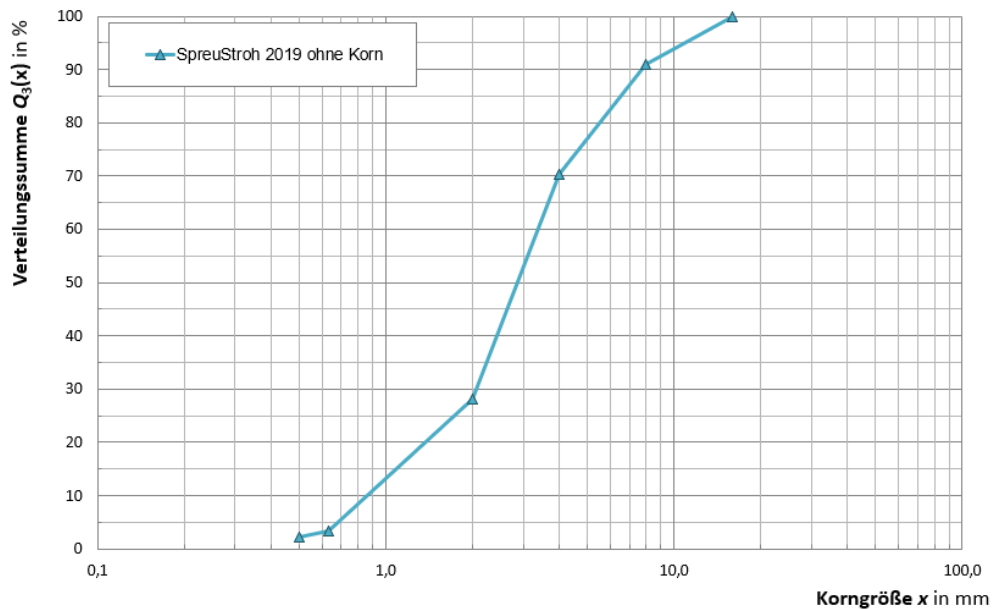


Abbildung 2: Partikelgrößenverteilung des Ausgangsmaterials SpreuStroh aus der Ernte 2019

Aufgrund der Mischung aus Spreu und Stroh kommt es zu einer eher breiten Partikelgrößenverteilung mit einer Spannweite von 2,32 ($x_{3,50} = 2,19$ mm). In Abbildung 3 sind Spreu und Stroh voneinander getrennt dargestellt. Es ist deutlich der optische Unterschied zwischen Spreu und Stroh zu erkennen. Die Mischung aus beiden Materialien führt zu einem eher inhomogenen Gemisch, was bei der Aufbereitung für verschiedene Anwendungen berücksichtigt werden muss. Diese Unterschiede finden sich auch in der stofflichen Zusammensetzung des Spreus und Strohs wieder. Im Folgenden werden die wesentlichen Unterschiede kurz dargestellt. Die Kombination der unterschiedlichen Eigenschaften von Spreu und Stroh bringt zahlreiche Vorteile in verschiedenen Anwendungsgebieten mit sich.



Abbildung 3: Einzelne Fraktionen des SpreuStroh-Gemisches; links Spreu, rechts Kurzstroh

Aus der Thermogravimetrischen Analyse geht die organische Trockensubstanz und der Mineralgehalt des Materials hervor. Für die Analyse wurden Proben aus reinem Stroh und reiner Spreu vorbereitet. Es zeigt sich, dass die organische Trockensubstanz bei Spreu geringer ist (87%), als bei Stroh (90%). Dies liegt darin begründet, dass Spreu einen um 3 Prozentpunkte höheren Mineralgehalt als Stroh aufweist. Mit 8% ist der Mineralgehalt bei Spreu als hoch anzusehen. In einer Mischung aus Spreu und Stroh wird sich also im Vergleich zu reinem Stroh eine geringere organische Trockensubstanz und außerdem ein höherer Mineralgehalt einstellen. Dies hat, je nach späterer Anwendung, des SpreuStroh, Vor- oder Nachteile. Die geringere Menge an organischer Trockensubstanz, führt zum Beispiel zu einer geringeren Methanausbeute in einer Biogasanlage. Für höherwertige Anwendungen, wie die Nutzung von SpreuStroh im Bauwesen als Dämmmaterial, hat SpreuStroh durch den höheren Mineralgehalt als Stroh deutlich Vorteile, da sich z. B. das Brandverhalten verbessert.

Wie schon die Unterschiede im Mineralgehalt zwischen Spreu und Stroh andeuten, unterscheiden sich die Materialien auch hinsichtlich anderer Stoffeigenschaften. Für verschiedene Anwendungen von biogenen Reststoffen ist der Gehalt an Cellulose, Lignin und Hemicellulose von Bedeutung. Vergleichend wird dabei immer Holz, als weitverbreiteter natürlicher Rohstoff, herangezogen. Dazu wird die Methode nach Weender angewendet und in Tabelle 1 sind die Stoffdaten von SpreuStroh und Holz aufgezeigt. Spreu und Stroh haben im Vergleich zu Holz einen deutlich geringeren Anteil an Lignin. Bei Cellulose und Hemicellulose liegen Spreu und Stroh in einem ähnlichen Bereich wie Holz.

Tabelle 1: Gehalt an Cellulose, Lignin und Hemicellulose in Spreu, Stroh und Holz bestimmt nach der Weender-Methode (GELAMIN 2020)

Material	Lignin %	Cellulose %	Hemicellulose %
Holz (PASTUSIAK 2003)	18-30	43-50	22-36
Spreu	6,0	36,8	40,4
Stroh	6,5	41,9	30,7

Um den Einfluss des Spreuanteils im SpreuStroh auf das Brandverhalten zu untersuchen, wurden zwei definierte Mischungen SpreuStroh hergestellt. In der ersten Probe liegt der Spreuanteil bei nur 40%, in der zweiten Probe bei 66%. Das Brandverhalten wurde für beide Mischungen gemäß EN ISO 11925-2:2020 durchgeführt. Im Ergebnis wurden beide Proben in die Brandklasse E eingestuft. Hinsichtlich der Entzündbarkeit bei direkter Flammeinwirkung hat der Spreuanteil also keinen direkten Einfluss und liegt in der gleichen Größenordnung wie reines Stroh. Außerdem wurde auch die Wärmeleitfähigkeit von SpreuStroh, im Hinblick auf die Nutzung als Wärmedämmmaterial ähnlich wie Stroh, ermittelt. Diese Tests erfolgten nach den Prüfnormen EN 1602:2013 und EN 12667:2001 für die Bewertung von Baustoffen. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass ein höherer Spreuanteil dazu führt, dass sich das Material in einer Wärmedämmplatte schlechter verdichten lässt. Dies ist auf die Form des Spreus zurückzuführen. Die Spreupartikel legen sich bei der Verdichtung nicht zwangsläufig in ebenen Schichten übereinander, wie es von Strohhalmen bekannt ist. Erhöht sich der Spreuanteil in der SpreuStroh-Mischung, dann verringert sich auch die Wärmeleitfähigkeit leicht. Auch dies ist darauf zurückzuführen, dass die Form des Spreus zu einer geringen Verdichtung führt und damit mehr wärmedämmende Luft eingeschlossen werden kann. Der Koeffizient der thermischen Leitfähigkeit lag bei den Messungen im Mittel bei 0,043 W/(m · K).

Ergebnisse und Diskussion

Nutzung von SpreuStroh für den Eigenbedarf beim Landwirt

Die einfachste Nutzungsform für das SpreuStroh ist die Verwendung als Einstreu für die Tiere. Kurzes Stroh/Spreu lässt sich besser im Stall verteilen und überdies ist es nach dem Gebrauch leichter wieder aus dem Stall zu entfernen. Das mit dem Kompakternteverfahren geerntete SpreuStroh hat bereits die notwendige Faserlänge und muss nicht zusätzlich zerkleinert werden. Um eine noch leichtere Handhabung vom SpreuStroh als Einstreu zu haben, kann das Material vor der Anwendung jedoch zerkleinert und pelletiert werden (GERIGHAUSEN und HÖNER 2008, SCHOEBEL/KAHL PELLETIERANLAGEN 2010, KHALSA et al. 2016). Weiterer Vorteil, für die Verwendung als Einstreu, ist die hohe Wasseraufnahmefähigkeit von Spreu. Diese variiert bei den unterschiedlichen Getreidesorten stark, liegt aber bei mindestens 500 % des Eigengewichtes (BERGER et al. 2010). Sie liegt damit höher als bei der Verwendung von reinem Stroh als Einstreu, welches mit ca. 300 % des Eigengewichtes eine relativ geringe Menge Wasser binden kann (HÄUSSERMANN et al. 2002).

In einer Biogasanlage kann auch Stroh vergärt werden. Dabei spielen vor allem die möglichst hohen Trockengehalte eine Rolle, denn diese führen zu einer höheren Methanausbeute (REUTERS 2013). Weiterer wichtiger Aspekt in Bezug auf die Verwertung in der Biogasanlage ist der Aufschluss der Fasern. Das Lignin der Fasern muss entweder mechanisch oder chemisch aufgeschlossen werden (KERKERING 2019). Untersuchungen mit Spreu haben ergeben, dass ein Kilogramm Spreu ca. 0,33 m³ Methan in der Biogasanlage liefern können (MARTI et al. 2013). Stroh hat hingegen nur eine mittlere Methanausbeute von ca. 0,16 m³/kg (CHANDRA et al. 2012, KERKERING 2019). Stroh wird derzeit zur Nutzung in einer Biogasanlage vorbehandelt und damit die Methanausbeute deutlich gesteigert (CHANDRA et al. 2012).

Durch das Kompakternteverfahren erhält der Landwirt die Möglichkeit unter Umständen Herbizide einzusparen. Durch das Einsammeln von Spreu werden auch Unkrautsamen zu einem großen Anteil in der Spreufraktion mit aufgenommen und nicht wieder auf das Feld verteilt. Dadurch können gewisse Unkräuter auf dem Feld reduziert werden. Es handelt sich dabei überwiegend um Unkräuter, deren Samen zur gleichen Zeit wie das Getreide reifen. Diese Erkenntnis ist an sich nicht neu, ist aber in den letzten Jahren mit der Entwicklung immer leistungsfähigerer Mährescher in Vergessenheit geraten (GRIEPENTROG und BRANDT 1985, SHIRTLIFFE und ENTZ 2005). Die Unkrautsamen lassen sich in den meisten Fällen durch eine einfache Siebung in der Reinigung am Hof vom SpreuStroh trennen. Laborversuche haben gezeigt, dass sich zum Beispiel Klatschmohn- und Kornblumensamen durch einen Siebschnitt bei 1-2 mm gut vom SpreuStroh abtrennen lassen (Abbildung 4).

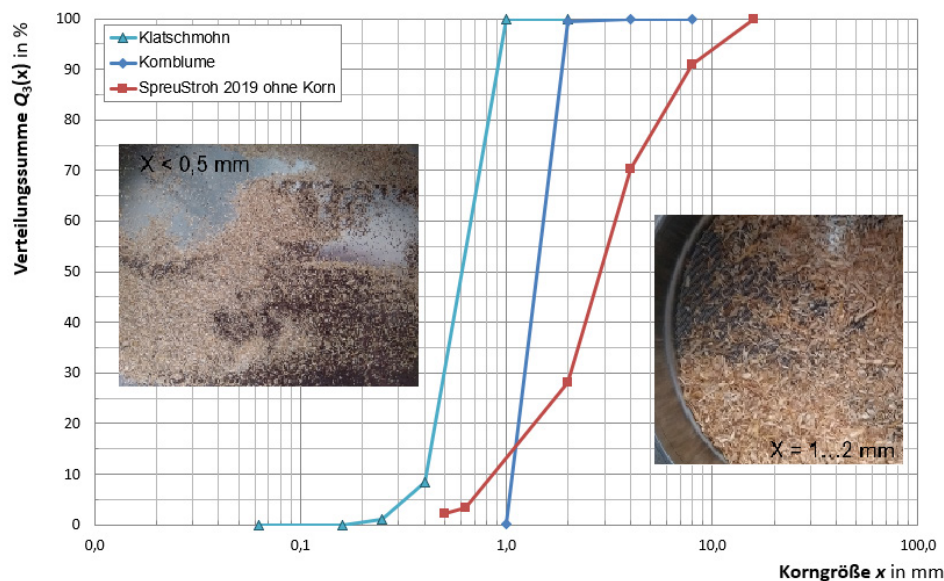


Abbildung 4: Siebanalyse SpreuStroh sowie Klatschmohn und Kornblume

Wenn man zur Abtrennung der Unkrautsamen eine Siebung bei 1 mm durchführt, trennt man nicht nur die Unkrautsamen, sondern auch ca. 10–15 % des SpreuStroh mit ab. Es besteht die Möglichkeit, diese Fraktion weiter von den Unkrautsamen zu trennen, indem man eine Windsichtung nachschaltet. Die Versuche im Labor an einer Steigsichteranlage (Labor-Steigsichteranlage Mini 40-ST, Fa. Samatec GmbH) haben ergeben, dass die Unkrautsamen spezifisch schwerer sind, als die SpreuStroh-Fraktion kleiner 1 mm. Damit wird das SpreuStroh mit dem Luftstrom mitgerissen und die Unkrautsamen fallen dem Erdschwerefeld folgend entgegen des Luftstromes.

Höherwertige Nutzungsmöglichkeiten für SpreuStroh

Neben der Nutzung von SpreuStroh auf dem eigenen Hof kann man SpreuStroh auch einer höherwertigen Anwendung zuführen, wie zum Beispiel als Zuschlagstoff in Kunststoffteilen, welche durch Extrusion oder Spritzguss gefertigt werden. Dazu bedarf es einiger Aufbereitungsschritte, welche im Folgenden vorgestellt und miteinander verglichen werden. Die Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich dann vordergründig aus den, durch die Aufbereitung, resultierenden Materialeigenschaften.

Zunächst wurde das Material SpreuStroh zerkleinert. Dies geschieht in mehreren Stufen mit unterschiedlichen Zerkleinerungsapparaten, die sich in der Beanspruchungsart unterscheiden. In Abbildung 5 sind die Partikelgrößenverteilungen von zerkleinertem SpreuStroh bei einer Partikelgröße unter 1 mm dargestellt. Miteinander verglichen werden die Schneidbeanspruchung in einer Ultrazentrifugalmühle (ZM200, Fa. Retsch) und die Prallbeanspruchung in einer Kleinschlagmühle (Gebrüder Jehlich GmbH). t

Abbildung 5 zeigt, dass mit einer reinen Prallbeanspruchung ein etwas feineres Produkt bei dieser Spezifikation mit $x < 1\text{ mm}$ erreicht werden kann. Dies liegt unter anderem daran, dass Spreu, durch den höheren Mineralgehalt, etwas härter ist und durch die Schneidbeanspruchung nicht optimal zerkleinert werden kann. Im schlechtesten Fall würde es bei der Zerkleinerung von SpreuStroh zu einer stärkeren Abnutzung der Schneidwerkzeuge in der Mühle kommen. Spreu ist kompakter als Stroh und weniger fasrig. Stroh allein lässt sich bekanntlich sehr gut mit einer Schneidbeanspruchung

zerkleinern. Zu beachten ist auch, dass die notwendige Energie zur Zerkleinerung des SpreuStroh bei der Prallbeanspruchung deutlich geringer ist.

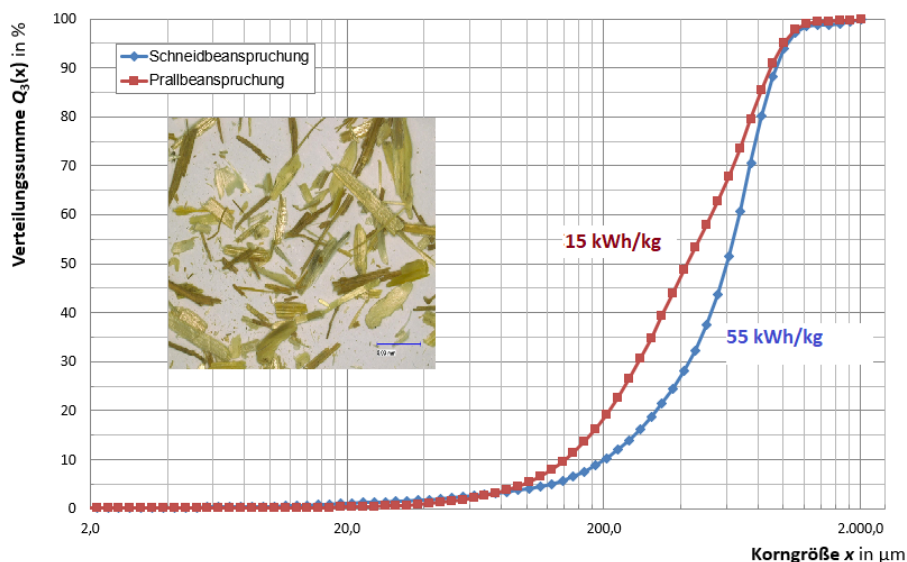


Abbildung 5: Vergleich der Partikelgrößenverteilung von unterschiedlich zerkleinertem SpreuStroh mit $x < 1$ mm, mikroskopische Aufnahme von SpreuStroh $x < 1$ mm prallbeansprucht

Die Partikelgrößenverteilungen in Abbildung 6 zeigen, dass es nur einen geringen Unterschied macht, ob man SpreuStroh mit einer reinen Schneidbeanspruchung auf die Endfeinheit zerkleinert, oder ob man Prall- und Schneidbeanspruchung kombiniert. Ausschlaggebend sollten hier die benötigte Zerkleinerungsenergie und der eventuelle Verschleiß der Mahlwerkzeuge sein. Hierbei wird ersichtlich, dass eine Kombination der Beanspruchungsarten vorzuziehen ist, da hierbei deutlich weniger Energie für eine ähnliche Endfeinheit benötigt wird.

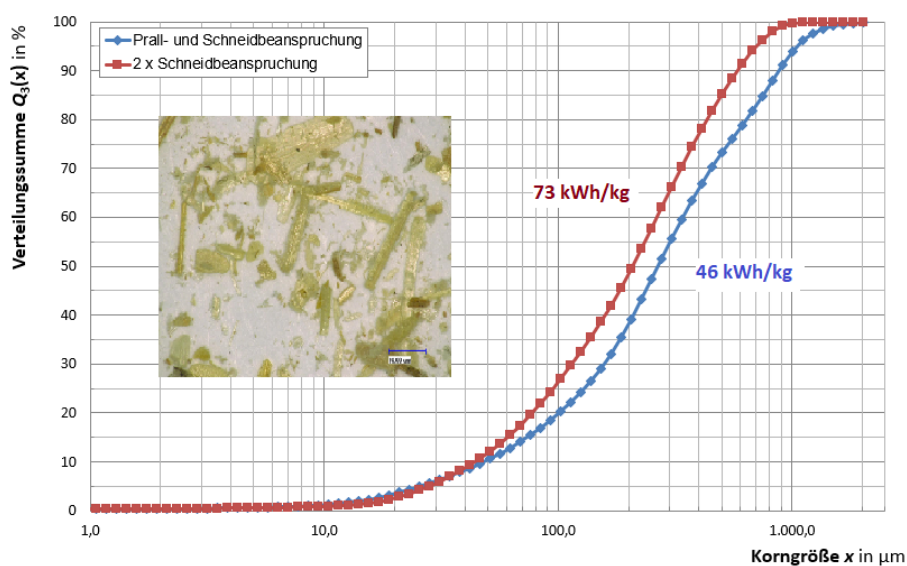


Abbildung 6: Vergleich der Partikelgrößenverteilung durch Kombination von Beanspruchungsarten mit der reinen Schneidbeanspruchung, mikroskopische Aufnahme des zerkleinerten SpreuStrohs

Die Kombination der Beanspruchungsarten hat auch einen Einfluss auf die Weiterverarbeitung des zerkleinerten Materials. Für die Lagerung und Förderung des zerkleinerten SpreuStroh ist die Fließfähigkeit des Materials von großer Bedeutung. Untersuchungen der Fließfähigkeit des zerkleinerten SpreuStroh nach Jenike haben ergeben, dass eine Kombination von Prall- und Schneidbeanspruchung, auch hinsichtlich der Förderfähigkeit des Materials, durchaus sinnvoll ist.

In Tabelle 2 sind die Fließkennwerte aus der Analyse zur Fließfähigkeit nach Jenike für zwei unterschiedlich zerkleinerte SpreuStroh-Proben dargestellt. Für die Probe 1 wurde mittels Prallbeanspruchung vorzerkleinert und dann über die Schneidbeanspruchung die Endfeinheit erreicht. Die Probe 2 wurde in einem zweistufigen Verfahren über eine Schneidbeanspruchung erzeugt. Die Partikelgrößenverteilung beider Proben ist in Abbildung 6 dargestellt.

Tabelle 2: Fließkennwerte aus der Analyse zur Fließfähigkeit von zerkleinerten SpreuStroh nach Jenike

Material	FO	σ_1 kPa	σ_c kPa	ff_c	ϕ_i °	ϕ_e °	τ_c kPa	ρ_b kg/m ³
SpreuStroh Prall + Schneid	0	3,7	0,1	38,5	44,8	45,4	0,02	191,0
	1	6,1	0,2	28,0	40,7	41,6	0,05	200,1
	2	12,1	0,1	132,9	42,6	42,7	0,02	211,1
SpreuStroh Schneid	0	3,0	0,4	7,9	61,0	39,1	0,09	195,1
	1	5,6	0,1	41,1	55,2	42,5	0,03	209,1
	2	12,0	0,6	21,4	34,6	40,3	0,13	203,5

Erläuterung der physikalischen Größen:

σ_1 als die Verfestigungshauptspannung ist maßgebend für die Festigkeitseigenschaften.

Die Schüttgutedichte ρ_b ist die Dichte des Schüttgutes unter einer definierten Verfestigungshauptspannung.

Die Kohäsion τ_c beschreibt die Scherfestigkeit des Schüttgutes.

Der innere Reibungswinkel ϕ_i beschreibt das „beginnende Fließen“ des Schüttgutes.

Die einaxiale Druckfestigkeit σ_c beschreibt die Festigkeit des Schüttgutes bei einer einaxialen Beanspruchung.

Der effektive Reibungswinkel ϕ_e beschreibt die innere Reibung des Schüttgutes beim stationären Fließen.

Für beide untersuchten Materialien gilt, dass es sich um sehr lockere Schüttungen handelt, welche sich durch leichte mechanische Beanspruchung verdichten lassen. Beide Proben sind als leichtfließend, bzw. freifließend einzustufen. Das zeigen die hohen Fließfähigkeitskennwerte ($ff_c = \sigma_1/\sigma_c$) in Tabelle 2 über verschiedene Spannungszustände hinweg. Dies erweist sich für eine spätere Silodimensionierung und die Förderung des Materials als besonders günstig. Auch die Kohäsion steigt mit zunehmender Verfestigung nicht an und ist als sehr gering einzustufen. Aufgrund der fasrigen Struktur des Materials war dies nicht unbedingt zu erwarten. Beim stationären Fließen scheinen die Fasern sich dennoch miteinander zu verhaken, da der effektive Reibungswinkel auch bei geringen Spannungen ungewöhnlich hoch ist und somit auf eine hohe innere Reibung im Schüttgut zu schließen ist. Vergleichend lässt sich für die beiden Proben sagen, dass die Kombination aus Prall- und Schneidbeanspruchung bei der Zerkleinerung ein etwas besser fließfähiges Material zum Vorschein bringt. Somit ist nicht nur aus energetischer Sicht eine Kombination der Beanspruchungsarten für die Zerkleinerung von SpreuStroh sinnvoll.

Das, in unterschiedlichen Stufen zerkleinerte, SpreuStroh kann in verschiedenen Bereichen zur Anwendung kommen und unter Umständen andere Naturstoffe, wie zum Beispiel Holz, ersetzen oder zumindest den Verbrauch an Holz reduzieren. Im Folgenden werden einige Anwendungsmöglichkeiten vorgestellt.

Eine gängige Anwendung von Holzfasern sind die Herstellung von Kunststoffverbundmaterialien, sogenannter Wood-Plastic-Composite (WPC) Produkte. Dabei wird der Kunststoff zu einem gewissen Anteil durch die Holzfaser substituiert. Der Anteil ist abhängig von den geforderten Eigenschaften des Produktes und wird individuell angepasst. Faseranteile bis zu 70 % sind nicht unüblich. Der Holzpreis ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen (MARKMANN 2022) und ist durchaus sinnvoll darüber nachzudenken, die verwendeten Holzfasern teilweise durch andere, schneller nachwachsende, biogene Reststoffe zu ersetzen. Dabei müssen gewisse Anforderungen erfüllt werden. Zum einen sollte das Material sich in die gewünschte Feinheit zerkleinern lassen. Wie in dem vorangegangenen Kapitel beschrieben, ist dies mit SpreuStroh gut möglich. Die mittlere Partikelgröße des Materials sollte zwischen 400 und 800 μm liegen. Des Weiteren sollte die Schüttung freifließend sein, damit sie in den entsprechenden Produktionsanlagen gut gelagert und gefördert werden kann. Die Untersuchungen zur Fließfähigkeit von SpreuStroh haben ergeben, dass das neuartige Material SpreuStroh dahingehend sehr gute Eigenschaften aufweist. Ein weiteres Indiz für eine gute Verarbeitung in Extrusionsprozessen ist die Schüttdichte des zerkleinerten Materials. Untersuchungen am SpreuStroh haben ergeben, dass die Schüttdichte durch die Zerkleinerung deutlich ansteigt (von ursprünglich 25 kg/m^3) und mit ca. 130 kg/m^3 im geforderten Bereich liegt.

Die Verwendung von SpreuStroh-Fasern im Spritzgussverfahren ist ebenso möglich. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Faseranteil bis zu 50 % ohne Zusatzstoffe zur Modifizierung der SpreuStroh-Faser möglich ist (Abbildung 7). Zur besseren Vermischung von Kunststoff und SpreuStroh sollte eine Mischung beider Komponenten vor dem Spritzguss erfolgen. Um den Anteil der Fasern im Bauteil weiter zu erhöhen, sollte die Oberfläche der Faser chemisch modifiziert werden und sogenannte Haftvermittler, wie Silane, zum Einsatz kommen. Die Zugfestigkeit und die Dehnung der Kunststoff-SpreuStroh-Verbunde (Abbildung 7 rechts) verringert sich mit steigendem Faseranteil deutlich. Es konnte in den durchgeführten Untersuchungen keine Abhängigkeit von der Art der Zerkleinerung des SpreuStrohs festgestellt werden.



Material	Zugfestigkeit in N/m^2	max. Dehnung in %
100 % PP	35,5	6,2
Stroh (Schneid) $x < 1 \text{ mm}$ Faseranteil ca. 15%	33,5	4,3
Stroh (Prall) $x < 1 \text{ mm}$ Faseranteil ca. 15%	32,5	4,5
SpreuStroh (Schneid) $x < 1 \text{ mm}$ Faseranteil ca. 15%	33,1	4,3
SpreuStroh (Prall + Schneid) $x < 0,5 \text{ mm}$ Faseranteil 33 %	26,8	1,9
SpreuStroh (Prall + Schneid) $x < 1 \text{ mm}$ Faseranteil 50 %	6,3	2,4

Abbildung 7: Spritzgegossene Zug-Prüfstäbe aus SpreuStroh und PP mit unterschiedlichem Faseranteil (links); Materialkennwerte aus der Zugprüfung (rechts)

Zusammenfassend lässt sich für die Nutzung von SpreuStroh in Extrusions- und Spritzgussverfahren sagen, dass SpreuStroh Holz und andere Fasern (z.B. Glas und Carbon) in vielen Bereichen ersetzen kann. Es gibt jedoch Bereiche, in denen eine Anwendung nicht sinnvoll erscheint. Dies ist zum Beispiel die Nutzung als Verstärkung in faserverstärkten Kunststoffen für stark belastete Bauteile. SpreuStroh kann in naturfaserverstärkten Kunststoffen überall dort zum Einsatz kommen, wo es um die Substituierung des Kunststoffes und damit um die Verringerung des Kunststoffanteils in einem Bauteil geht. Sobald es darum geht, einen Kunststoff zu verstärken und die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes zu verbessern, wird der Einsatz von SpreuStroh, aufgrund z.B. der, von Natur aus, relativ kurzen Faser, nicht möglich sein.

Für die Anwendung im 3D-Druckverfahren ist ein sehr feines Material notwendig, mit einer Partikelgröße kleiner 250 µm. Die Zerkleinerung von SpreuStroh in diesen Größenbereich ist möglich. Dazu ist es empfehlenswert, in einem mindestens dreistufigen Verfahren das Material zu zerkleinern. Dieser Prozess ist energetisch recht aufwendig. Eine günstigere Variante ist die Nutzung von Stäuben aus Entstaubungsanlagen anderer Prozesse zur Aufbereitung von SpreuStroh. Ob dies die Entstaubung von SpreuStroh als Futtermittel, oder das Material aus einer Aufbereitungsanlage von SpreuStroh für die Extrusion oder den Spritzguss ist, ist dabei unerheblich. Die im Zyklon einer Entstaubungsanlage abgeschiedenen SpreuStroh-Partikel haben meist die für den 3D-Druck notwendige Feinheit.

Untersuchungen haben ergeben, dass man SpreuStroh ähnlich gut im 3D-Druck-Verfahren verwenden kann, wie zerkleinertes Miscanthus oder auch zerkleinerte Kaffeeschalen. Damit wird es möglich, Sonderverpackungen herzustellen, welche nach der Verwendung komplett biologisch abbaubar sind. Dazu ist es notwendig als Binder im 3D-Druck biologisch abbaubare Kunststoffe, wie z. B. Polymilchsäure (PLA) oder auch natürlichen Zucker zu verwenden (ZEIDLER et al. 2018). Erste Tests an 3D-gedruckten Prüfkörpern ergaben, dass die Druckfestigkeiten für SpreuStroh-Prüfkörper in der gleichen Größenordnung wie bei Prüfkörpern aus Miscanthus liegen.

Schlussfolgerungen

Die speziellen Eigenschaften des SpreuStrohs wurden analysiert und verschiedenste Anwendungen in unterschiedlichen Stufen der Aufbereitung des Materials konnten gezeigt werden. Besonders erstrebenswert ist dabei die direkte Nutzung des SpreuStrohs durch den Landwirt auf seinem eigenen Hof als Einstreu oder in der Biogasanlage. Aber auch in Bereichen der höherwertigen Anwendungen zeigen sich einige Vorteile für das Material SpreuStroh. Es konnte gezeigt werden, dass sich SpreuStroh als Füllstoff in Kunststoffverbundmaterialien eignet und auch im Bereich des 3D-Drucks von Naturfasern SpreuStroh zu guten Ergebnissen führt.

In den nächsten Schritten werden einzelne Anwendungsmöglichkeiten genauer untersucht und vor allem der energetische und wirtschaftliche Aspekt mehr in den Fokus gerückt. Es stellt sich die Frage, ob eine Nutzung von SpreuStroh für höherwertige Anwendungen eine Alternative zu Holzfasern und anderen nachwachsenden Rohstoffen, wie Miscanthus, Flachs oder Hanf, darstellen kann.

Literatur

- Berger, N.; Marti, F.; Streit, B. (2010): Getreidespreu hat Potential. Schweizer Bauer vom 16.01.2010
- Chandra, R.; Takeuchi, H.; Hasegawa, T.; Kumar, R. (2012): Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. *Energy* 43(1), S. 273–282, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.029>
- Fick-Haas, V. (2015): Nicht nur Stroh aufwerten. Mobile Anlage: Landwirte lassen Pellets als Einstreu und zum Heizen pressen. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 51, S. 52
- Gelamin (2020): Rohfaser ist nicht gleich Rohfaser. Hg: Gesellschaft für Tierernährung mbH
- Gerighausen, H.; Höner, G. (2008): Einstreuen: Stroh schneiden, häckseln oder mahlen? *top agrar* 8(1), S. 124–127
- Griepentrog, H.-W.; Brandt, A. (1985): Mähdrusch und Unkraut. *Bioland* (5), S. 32–33
- Häußermann, A.; Beck, J.; Jungbluth, T. (2002): Einstreumaterialien in der Pferdehaltung. *Landtechnik* 57(1), S. 50–51, <https://doi.org/10.15150/lt.2002.1560>
- Kerkering, M. (2019): Technischer Aufschluss von Substraten. Vortrag, FH Münster, <http://www.biores.info/uploads/pdf/2011-09-23%20technischer%20Aufschluss%20von%20Stroh.pdf>, Zugriff am 25.01.2023
- Khalsa, J.; Matthes, M.; Hartmann, I. (2016): Stroh und Spreu – Herausforderungen beim Pelletieren und Verbrennen landwirtschaftlicher Reststoffe. InnoForum SpreuStroh, Leipzig, <http://www.netzwerk-agrartechnik-sachsen.com/wp-content/uploads/2016/02/dbfz-pelletierung-verbrennung.pdf>, Zugriff am 25.01.2023
- Mann, M.E.; Cohen, R.D.H.; Kernan, J.A.; Nicholson, H.H.; Christensen, D.A.; Smart, M.E. (1988): The feeding value of ammoniated flax straw, wheat straw and wheat chaff for beef cattle. *Animal Feed Science and Technology* 21(1), pp. 57–66, [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0377-8401(88)90019-3)
- Markmann, T. (2022): Der HPE – Holzpreisindex für Schnittholz und Holzwerkstoffe für Holzpackmittel und Paletten. Hg: Bundesverband Holzpackmittel, Paletten, Exportverpackung e.V.
- Marti, F.; Streit, B.; Berger, N.; Froidevaux, N.; Muhr, M.; Thüer, F.; Güller, W. (2013): Sammlung von Spreu und Kurzstroh. Ergebnisse und Erfahrungen aus 3 Jahren Projektarbeit an der HAFEL, Vortrag, Tännikoner Agrartechniktag 20.06.2013
- Pastusiak, R. (2003): Charakterisierung von Zellstoffkomponenten. Analytik, Spektroskopie, Reaktionskinetik und Modellierung. Dissertation, Technische Universität München
- Reuters, A. (2013): Vergleich bekannter Methoden für den Aufschluss von Stroh zum Einsatz in Biogasanlagen. Bachelorarbeit, Hochschule Neubrandenburg, https://digibib.hs-nb.de/file/dbhsnb_derivate_0000001435/bachelorarbeit-reuters-2013.pdf, Zugriff am 25.01.2023
- Rudolph, W. (2020): Dreschen ohne Reinigung. *traction* 7(1), S. 64–69
- Rumpler, Johann (2015): EP2547194A2. Rumpler, J.
- Rumpler, J. (2016): Stand der Technik und Technologie zur Bereitstellung der Ernteprodukte Spreu, Stroh und SpreuStroh zur Nutzung als landwirtschaftliche Reststoff-Biomasse. Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt
- Schoebel (2010): Anlagen zum Pelletieren von Stroh und anderen Rohfaserprodukten. KAHL Pelletieranlagen, https://www.schulefood.com/fileadmin/media/akahl/bilder/anlagen/Biomasseverarbeitungsanlagen/Strohpelletieranlage/PDF/Informationen_zu_KAHL_Strohpelletieranlagen.pdf, Zugriff am 25.01.2023
- Schubert, H. (2003): Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Band 1 und 2. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- Shirtliffe, S.J.; Entz, M.H. (2005): Chaff collection reduces seed dispersal of wild oat (*Avena fatua*) by a combine harvester. *Weed Science* 53(4), pp. 465–470, <https://doi.org/10.1614/WS-03-109R2>
- Zeidler, H.; Klemm, D.; Böttger-Hiller, F.; Fritsch, S.; Le Guen, M.J.; Singamneni, S. (2018): 3D printing of biodegradable parts using renewable biobased materials. *Procedia Manufacturing* 21, pp. 117–124, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.101>

Autoren

Dr.-Ing. Maria Schäfer ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut ZIRKON der Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau, E-Mail: maria.schaefer@hszg.de

Dipl.-Ing. Steffen Exler ist Senior InnoExpert/Prokurist der Firma kluge GmbH, Am Wasserwerk 8-10, 02699 Königswartha

Prof. Dr.-Ing. Martin Sturm ist Direktor des Institutes ZIRKON der Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau

Danksagung

Die Autoren möchten sich beim Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) für die finanzielle Unterstützung des Projektes „Technische und technologische Entwicklung der innovativen Wertschöpfungskette SpreuStroh“ bedanken.