

# Ermittlung der Biege- und Schnitteigenschaften von Halmgut mit einem Universalprüfstand

Andrej Batos, Maximilian Ruepp, Andreas Jahr, Burkhard Corves

Für die Messung der Biege- und Schnitteigenschaften halmartiger Güter wurde ein Universalprüfstand entworfen. Die mit ihm ermittelten Messwerte dienen der Erstellung von Simulationsmodellen zur Abbildung landtechnischer Schnittprozesse. In der vorliegenden Studie werden Weizenhalme untersucht. Die Schnittversuche erfolgen mit zwei Geschwindigkeiten und zwei Schnittwinkeln. Die Mittelwerte aus jeweils 50 Messungen werden miteinander verglichen. Der Feuchtigkeitsgehalt der Proben liegt zwischen 5,5 und 7,1 %. Die Biegespannungen betragen für das erste Internodium 1,09 N/mm<sup>2</sup>, für das zweite 0,99 N/mm<sup>2</sup> und für das dritte 1,07 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Schnittversuchen tritt die höchste Spannung (4,44 N/mm<sup>2</sup>) beim Schneiden des zweiten Internodiums auf (50 mm/s, 40°). Die niedrigste Spannung (2,20 N/mm<sup>2</sup>) tritt beim Schneiden des dritten Internodiums auf (150 mm/s, 60°). Bis auf eine Ausnahme ist die auf den Probenquerschnitt bezogene Schnittenergie (12,18–19,85 mJ/mm<sup>2</sup>) bei der Auswahl des größeren Winkels höher. Die mittleren Variationskoeffizienten liegen zwischen 5 und 32 %.

## Schlüsselwörter

Universalprüfstand, Messung, Biegeeigenschaften, Schnitteigenschaften, Halmgut

Eine Statistik der Vereinten Nationen zur Entwicklung der Weltbevölkerung prognostiziert einen Bevölkerungsanstieg auf ca. 10,85 Milliarden Menschen bis zum Jahr 2100 (Statista 2014). Da die Menge an landwirtschaftlichen Anbauflächen begrenzt ist, stellt die Steigerung der Produktion auf den zur Verfügung stehenden Flächen die einzige Lösung dar. Aus diesem Grund ist eine Steigerung der Effizienz von Landmaschinen nötig. Landmaschinenhersteller setzen daher vermehrt auf den Einsatz kommerziell erhältlicher Simulationsprogramme. Diese können dazu beitragen, die Entwicklung neuer Maschinen zu beschleunigen und zugleich die Entwicklungskosten zu verringern. Um Ernteprozesse möglichst realitätsnah mithilfe von Simulationsmodellen abzubilden, ist es erforderlich, die Eigenschaften des Erntegutes genau zu kennen.

Eine Herausforderung stellt in diesem Zusammenhang die Tatsache dar, dass es keine standardisierten Messmethoden zur Erfassung der mechanischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Halmgüter gibt. Die im Rahmen zahlreicher Arbeiten gewonnenen Messwerte lassen sich folglich kaum miteinander vergleichen. Auch aus diesem Grund wird hier ein relativ einfach aufgebauter Universalprüfstand vorgestellt, mit dem u. a. Biege- und Schnittversuche an Getreidehalmen durchgeführt werden können (Abbildung 1).

Weizen spielt für die weltweite Nahrungsmittelproduktion eine entscheidende Rolle. In Deutschland besitzt Weizen mit 51,8 % der Anbaufläche den weitaus größten Anteil aller produzierten Getrei-

dearten (BMELV 2013). Daher wurden in der vorliegenden Studie Weizenhalme als Versuchsproben ausgewählt. Sie stammen von einem Feld, das sich in der Nähe von Düsseldorf (Nordrhein-Westfalen) befindet.

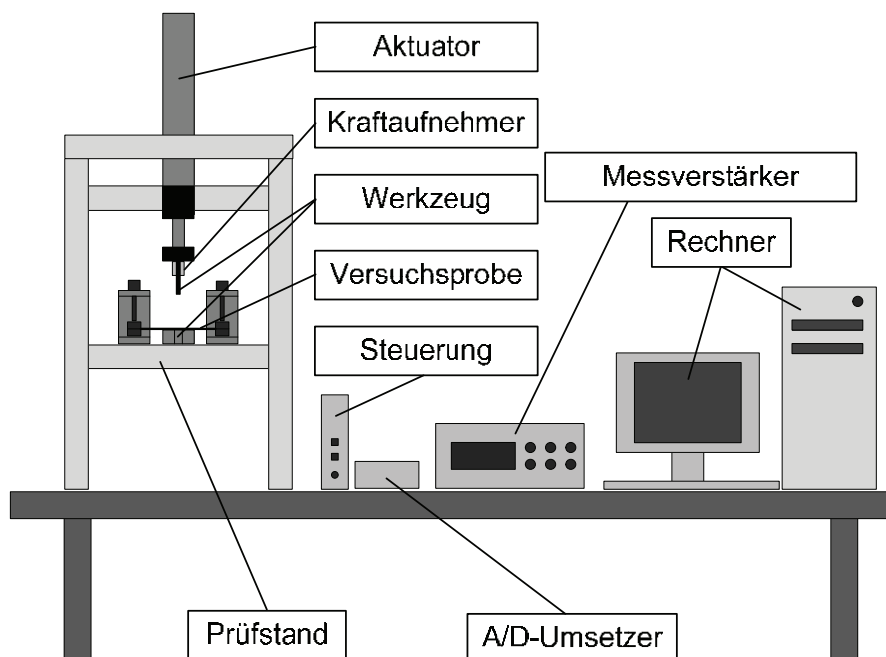


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Universalprüfstandes

## Versuchsproben und Methoden

Zur Versuchsdurchführung kommt der in Abbildung 1 schematisch dargestellte Universalprüfstand zum Einsatz, der von den Autoren zur Vermessung landwirtschaftlicher Güter entwickelt und gefertigt wurde. Er besteht hauptsächlich aus einem Aktuator, an dem ein Kraftsensor und eine schnell austauschbare Vorrichtung zur Belastung der Probe befestigt sind. Durch Auswechseln der Vorrichtung können mithilfe des Prüfstandes aktuell Biege-, Schnitt-, Scher- und Zugversuche durchgeführt werden. Im vorliegenden Fall kommen ein Biegestempel und eine Klinge mit einer untenliegenden Matrize zum Einsatz. Die Klingeabmessungen sind in Abbildung 2 d angegeben. Der von dem Werkzeug zurückgelegte Weg wird mithilfe eines Lasersensors gemessen (micro-epsilon optoNCDT 1300-50). Zur Messung der Kraft kommt ein Sensor zum Einsatz, dessen Nennlast 20 N beträgt (Burster Typ 8523-20). Die Messwertverarbeitung und Auswertung erfolgen mit Matlab.

Um brauchbare Ergebnisse zu erzielen, werden die für Forschungszwecke verwendeten Pflanzen kurz vor der Ernte einzeln und nicht maschinell vom Feld entnommen. So wird die Verwendung beschädigter Proben vermieden. Ferner erscheint es sinnvoll, die geernteten Pflanzen vor den Versuchen auf Beschädigungen (Abbildung 2 c) zu untersuchen und sie zu entblättern. Das Entblättern erleichtert die Handhabung der Proben während der Versuchsvorbereitung. Zudem wird damit verhindert, dass sich Teile der Pflanzen im Prüfstand verfangen und die Messung verfälschen. Da sich die mechanischen Eigenschaften von Pflanzen mit der Zeit ändern, steht für die Durchführung der Versuche in der Regel nur ein sehr begrenzter Zeitraum zur Verfügung. Die Größe dieses Zeitraumes

hängt von der Art der Versuchsprobe und hauptsächlich auch von der Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes ab, die wiederum von den Lagerbedingungen abhängt. Dauert die Versuchsdurchführung zu lange und ändert sich währenddessen der Feuchtigkeitsgehalt signifikant, sind die gewonnenen Ergebnisse nicht mehr miteinander vergleichbar. Aus diesem Grund werden im vorliegenden Fall Proben verwendet, deren Feuchtigkeitsgehalt bereits vor der Versuchsdurchführung infolge einer möglichst trockenen Lagerung auf ein weitgehend stabiles Niveau abgesunken ist. Daher steht für die Durchführung der Versuche ein längerer Zeitraum zur Verfügung. Um den Feuchtigkeitsgehalt abzusinken, wurden die am 9.8.2013 geernteten Proben zunächst für etwa 20 Tage in Form von Bündeln ( $\varnothing$  ca. 15 bis 20 cm) offen bei Raumtemperatur gelagert. Anschließend wurden die Proben lose in Kartonkisten gelagert. Die Biegeversuche fanden zwischen dem 2.12.2013 und dem 6.12.2013 statt. Die Schnittversuche wurden zwischen dem 15.1.2014 und dem 4.2.2014 durchgeführt. Ähnlich wie bei TAVAKOLI et al. (2009) erfolgten die Messungen unter Verwendung des ersten, zweiten und dritten Internodiums (Abbildung 2 a).

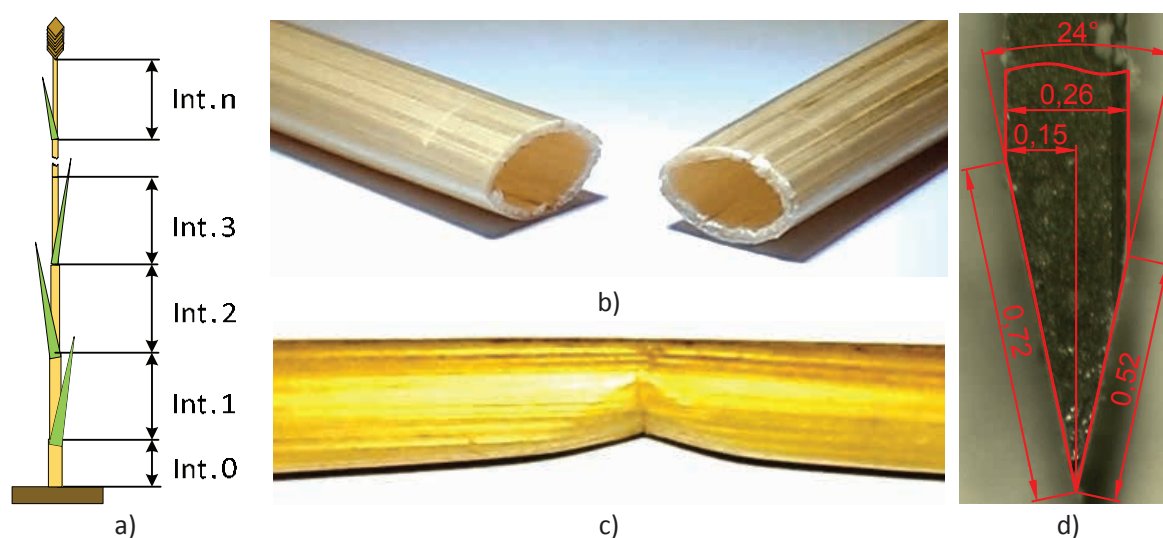


Abbildung 2: Aufbau eines Weizenhalmes

a) Internodien, b) Querschnitt, c) Knickstelle, d) Klingengeometrie (Längenmaße in mm)

Zur Ermittlung des Feuchtigkeitsgehaltes werden die Proben unmittelbar nach der Versuchsdurchführung 24 h in einem Elektroofen bei 105 °C getrocknet. Diese Temperatur und Trocknungsdauer entsprechen den von CHANDIO et al. (2013) und CHATTOPADHYAY et al. (1999) zur Trocknung von Weizen bzw. Stroh verwendeten Werten. Der Feuchtigkeitsgehalt  $f$  errechnet sich gemäß Gleichung 1 aus der Differenz zwischen dem mit einer Analysewaage gemessenen Gewicht der Probe vor ( $m_E$ ) und nach ( $m_S$ ) der Trocknung.

$$f = 100\% - \frac{m_E \cdot 100\%}{m_S} \quad (\text{Gl. 1})$$

Der mittlere Feuchtigkeitsgehalt des ersten Internodiums beträgt 5,5 %. Die zweiten und dritten Internodien der Pflanzen weisen einen mittleren Feuchtigkeitsgehalt von 6,3 % und 7,1 % auf.

Die hier vorgestellten Biege- und Schnittversuche werden mithilfe des in Abbildung 1 dargestellten und eigens für die Untersuchung von halmartigen Gütern entwickelten Universalprüfstandes durchgeführt. Er zeichnet sich im Vergleich zu den meisten aus anderen Studien bekannten Prüfständen durch eine hohe Variabilität aus. So können ohne großen Umrüstungsaufwand zahlreiche Eigenschaften unterschiedlicher, halmartiger Güter sowie verschiedene Klingen untersucht werden. Ferner ist der Aufbau einfach, sodass der Prüfstand ohne großen Aufwand nachgefertigt und kalibriert werden kann.

Der Aufbau des Biegeversuches entspricht dabei dem Prinzip des beidseitig lose gelagerten Balkens mit mittig angreifender Punktlast (Abbildung 3 a). Dieses Prinzip wird auch von CASADA et al. (1969) sowie McCLELLAND und SPIELREIN (1957) verwendet, während CURTIS und HENDRICK (1969) sowie PRINCE et al. (1965) bei ihren Biegeversuchen das Prinzip des einseitig fest eingespannten Balkens einsetzen. Der Biegekörper, mit dem die Querkraft auf den Getreidehalm aufgebracht wird, hat im vorliegenden Fall einen runden Querschnitt mit einem Durchmesser von 12 mm und bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 0,75 mm/s. Ziel ist die Ermittlung einer Spannung. Diese wird hier nicht, wie bei Biegeversuchen üblich, durch Division des Biegedrehmomentes und des Biegeverformungsmomentes bestimmt. Stattdessen wird die Querkraft durch die Querschnittsfläche dividiert. Die Querschnittsfläche  $A$  des Getreidehalmes ergibt sich nach dem Zusammenpressen der Probe durch Berechnung des Produktes aus der Probenbreite  $B$  und der Probendicke  $D$  (Gleichung 2).

$$A = B \cdot D \quad (\text{Gl. 2})$$

So wird das infolge der nicht ideal runden Probenform (Abbildung 2 b) oft fehleranfällige Messen der Probendurchmesser durch eine einfachere Variante ersetzt. Die Probenbreite und -dicke werden dabei stets nach dem Versuch mithilfe eines Messschiebers erfasst. Mit der gemessenen Querkraft  $F_Q$  und der Querschnittsfläche  $A$  ist es möglich, die Spannung  $\sigma_Q$  zu berechnen (Gleichung 3).

$$\sigma_Q = \frac{F_Q}{A} \quad (\text{Gl. 3})$$

Zur Durchführung der Schnittversuche werden die auf einer Matrize aufliegenden Proben an ihren beiden Enden fest eingespannt (Abbildung 3 b). Dabei ist darauf zu achten, dass die Probe keine Vorspannung erfährt. Um zu verhindern, dass die Probe an den Einspannstellen reißt, wird auf jeder Seite ein kurzer Metallstab in die Probe geführt. Der Durchmesser des Metallstabes, der ein Zusammendrücken des Probenendes durch die Einspannvorrichtung verhindert, entspricht dabei etwa dem Probendurchmesser.

Die Matrize verfügt über einen schmalen Spalt, durch den sich das Messer während des Schnittversuches bewegt. Auf die Probe wirkt die Matrize wie ein Gegenhalter, sodass sie mit einer stumpfen Gegenschneide vergleichbar ist. Die Matrize verhindert ein Durchbiegen der Probe. Vorversuche zeigen, dass die Probe auch nicht zur Seite weggedrückt wird.

Es ist davon auszugehen, dass während des Versuches in gewissem Maße Zugkräfte auf die Probe wirken, die durch die Schrägstellung der Klinge verursacht werden. Wird eine geringe Reibung zwischen der Matrize und der Probe angenommen, verhindern nur die Zugkräfte eine seitliche Bewegung des Getreidehalmes. Die Ergebnisse werden durch diese Kräfte jedoch nicht mehr verfälscht

als durch eine Durchbiegung der Probe bei loser Lagerung. Eine lose Lagerung kommt zwar einem Schnitt ohne Gegenschneide näher, jedoch erfordert sie eine hohe Schnittgeschwindigkeit, damit Trägheitskräfte als Gegenkräfte wirken. Bei den hier gewählten niedrigen Schnittgeschwindigkeiten würde die Probe lediglich weggedrückt und nicht geschnitten. Zudem können bei einem Schnitt mit Gegenschneide und einer schnell rotierenden Klinge bei einem entsprechend langen Getreidehalm durch Trägheitskräfte erzeugte Zugkräfte wirken. Ferner treten Zugkräfte auch dann auf, wenn Pflanzen bodennah abgeschnitten werden. Aus diesen Gründen wird angenommen, dass eine beidseitige Einspannung der Probe zulässig ist.

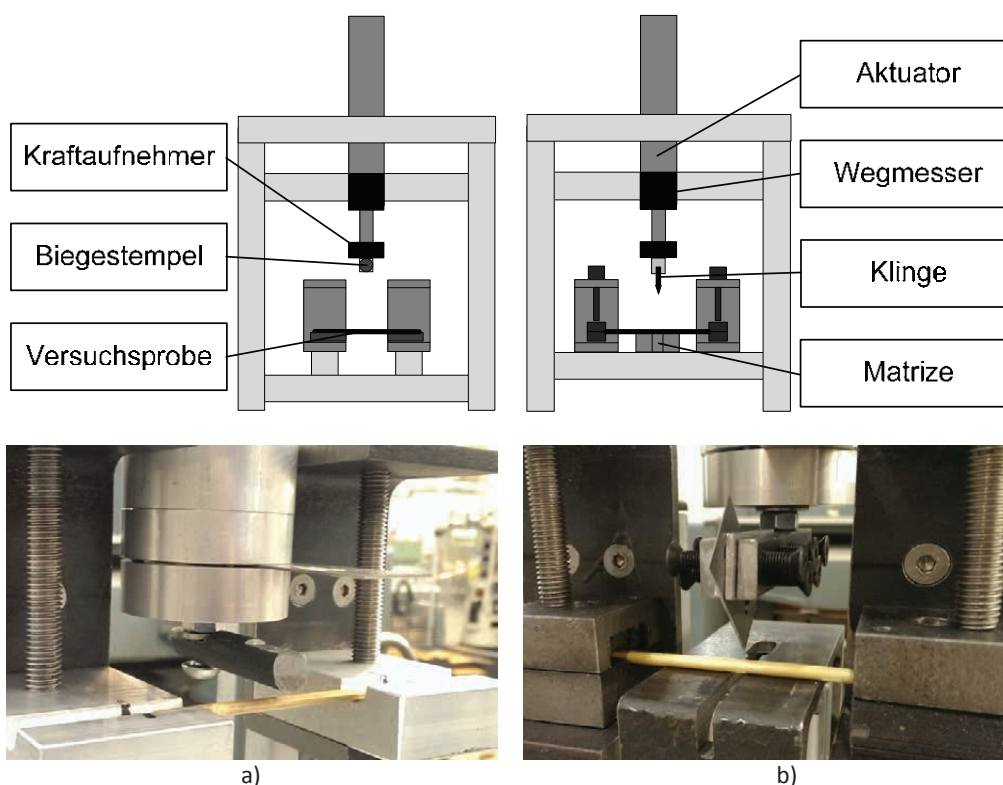


Abbildung 3: Aufbau des Universalprüfstandes a) für Biege- und b) für Schnittversuche

Der Winkel zwischen der Klingenschneide und der horizontalen Ebene, auf welcher der Getreidehalm aufliegt, ist stufenlos verstellbar. Folglich ist auch die Zügigkeit des Schnittes bzw. der Quotient aus den Relativgeschwindigkeiten zwischen der Klinge sowie dem Schnittgut tangential ( $\dot{x}_t$ ) und normal ( $\dot{x}_n$ ) zur Klinge (Gleichung 4) (STROPPEL 1939) frei wählbar.

$$\text{Zügigkeit des Schnittes} = \frac{\dot{x}_t}{\dot{x}_n} \tag{Gl. 4}$$

Die Schnittversuche erfolgen mit zwei Schnittwinkeln (40° und 60°) und zwei Klingengeschwindigkeiten (50 mm/s und 150 mm/s). Durch die Einstellung der Schnittwinkel werden somit ein überwiegend drückender (40°) und ein überwiegend ziehender (60°) Schnitt untersucht. Die Wahl eines Winkels von 40° stellt sicher, dass die drückende Schnittkraftkomponente und damit die Schnittkraft

nicht zu große Werte annimmt. Da die drückende und die ziehende Komponente bei einem Winkel von  $45^\circ$  gleich groß sind, ist die Wahl eines Winkels von  $50^\circ$  für den überwiegend ziehenden Schnitt zwar naheliegend. Der hier gewählte Winkel von  $60^\circ$  gewährleistet jedoch einen signifikanten Unterschied der Schnittkraftverläufe. Im Fall der Schnittgeschwindigkeit beträgt der niedrigere Wert 50 mm/s, da bei zu kleinen Schnittgeschwindigkeiten die Gefahr besteht, dass die Probe eher gedrückt als geschnitten wird. Um den Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auch auf die Schnittenergie eindeutig zu bestimmen, beträgt der obere Wert 150 mm/s.

Das Ziel der Schnittversuche ist die Ermittlung der auftretenden Schubspannung und Schnittenergie. Ähnlich wie die zuvor berechnete aufgrund der Querkraft entstehende Spannung folgt auch die Schubspannung  $\tau_s$  aus der Division der Schnittkraft  $F_C$  und der Querschnittsfläche  $A$  (Gleichung 5,  $A$  gemäß Gleichung 2).

$$\tau_s = \frac{F_C}{A} \quad (\text{Gl. 5})$$

Die Schnittenergie  $E_C$  wird durch Multiplikation der Schnittkraft  $F_C$  mit dem von der Klinge zurückgelegten Weg  $s_C$  berechnet (Gleichung 6).

$$E_C = \int F_C \cdot ds_C \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Bestimmung der von der gemessenen Kraft-Weg-Kurve sowie der Abszisse eingeschlossenen Fläche und damit der Schnittenergie erfolgt mithilfe der numerischen Integration unter Verwendung der Trapezregel. Da die Getreidehalme unterschiedliche Abmessungen aufweisen, wird im Folgenden statt der Schnittenergie der Quotient aus der Schnittenergie und dem Querschnitt des Getreidehalmes betrachtet.

Um eine korrekte Funktionsweise des Universalprüfstandes sicherzustellen, werden vor jeder Versuchsreihe zunächst Vorversuche durchgeführt. Da Weizenhalme natürliche Erzeugnisse sind, deren Eigenschaften von Pflanze zu Pflanze stark schwanken, werden dafür handelsübliche Trinkhalme aus Kunststoff eingesetzt. Diese ähneln in vielerlei Hinsicht Getreidehalmen, werden jedoch in großen Mengen und unter kontrollierten Bedingungen hergestellt, sodass deren Eigenschaften prinzipiell gleich und auch zeitlich konstant sind. Aufgrund fehlender Normung ist es dennoch sinnvoll, Trinkhalme aus derselben Charge zu verwenden. Die Messprozedur selbst ist bei den Vorversuchen und den später durchzuführenden Versuchen bis auf die verwendeten Proben vollkommen identisch. Die Vorversuche ergeben bei der hier eingesetzten Messeinrichtung sehr geringe Variationskoeffizienten von 0,57 % beim Biegeversuch, 0,86 % beim Schnittversuch und 2,6 % bei der auf den Querschnitt bezogenen Schnittenergie. Der höhere Variationskoeffizient bei der auf den Querschnitt bezogenen Schnittenergie ist damit zu erklären, dass hier sowohl die bei der Messung der Kraft als auch die bei der Messung des Weges auftretenden Messfehler zum Tragen kommen. Ferner fließen auch die Ungenauigkeiten ein, die infolge der numerischen Integration der diskreten Messwerte mithilfe der Trapezregel entstehen. Diese Fehlerquelle könnte theoretisch nur dann ausgeschlossen werden, wenn die Abtastrate unendlich hoch wäre. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Messgenauigkeit des Universalprüfstandes für den vorliegenden Zweck völlig ausreichend ist.

Alle Versuche werden an je 50 Proben durchgeführt. Daraus ergeben sich 50 Biegeversuche und 200 Schnittversuche (zwei Schnittwinkel und zwei Klingengeschwindigkeiten). Da jeder Versuch an drei Internodien des Weizenhalmes durchgeführt wird, sind somit insgesamt 750 Versuche erforderlich.

## Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 4 zeigt die im Rahmen von Biegeversuchen aufgenommenen, nicht geglätteten Kraft-Weg-Verläufe für drei Internodien eines Weizenhalmes. Die für die restlichen Proben aufgenommenen Kurven weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Es ist deutlich zu erkennen, dass die in Abbildung 4 dargestellten Biegeverläufe bei allen drei Internodien nahezu identisch sind. Im Fall des ersten Internodiums weist das Maximum der Querkraft einen leicht erhöhten Wert auf. Die zeitliche Verschiebung ist damit zu erklären, dass die Messung und der Aktuator jeweils manuell gestartet werden und somit nicht synchronisiert sind.

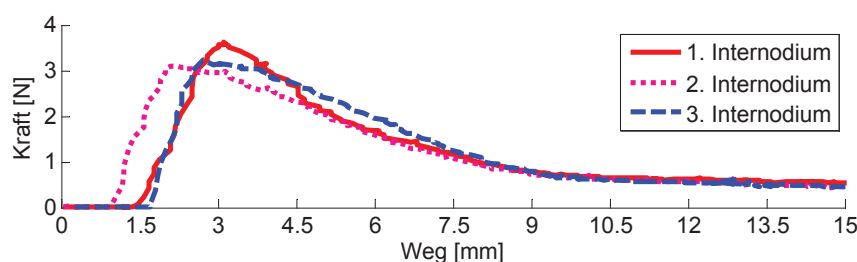


Abbildung 4: Ergebnisse der Biegeversuche für drei Internodien von Probe Nr. 31

( $\dot{x}_B = 0,75$  mm/s, Abtastrate = 10 1/s,  $A_1 = 4,32$  mm<sup>2</sup>,  $F_{B1,max} = 3,63$  N,  $A_2 = 3,21$  mm<sup>2</sup>,  $F_{B2,max} = 3,11$  N,  $A_3 = 3,69$  mm<sup>2</sup>,  $F_{B3,max} = 3,24$  N)

Nach einem raschen Kraftanstieg folgt aufgrund der Querschnittsveränderung ein nur noch unterproportionaler Anstieg der Kraft. Die Veränderung des Querschnittes ergibt sich durch das Zusammendrücken des vormals idealisiert runden, nun annähernd rechteckigen Querschnittes des Weizenhalmes. Zu diesem Zeitpunkt ist der Getreidehalm bereits irreversibel verformt. Nachdem die maximale Querkraft erreicht ist, sinkt die Kraft gegen Null. Eine Restkraft ist dennoch vorhanden, da der geknickte Weizenhalm durch die Halterung gedrückt wird. In Tabelle 1 sind die ermittelten Werte dargestellt.

Tabelle 1: Ergebnisse der Biegeversuche (Mittelwerte aus 50 Versuchen)

Internodium	A [mm <sup>2</sup> ]	$F_{Q,max}$ [N]	$\sigma_Q$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$V_Q$ [%]	m [10 <sup>-6</sup> kg]
1	4,36	4,87	1,09	22	107,2
2	4,04	4,50	0,99	18	87,4
3	3,68	3,90	1,07	15	82,0

$V_Q$  = Variationskoeffizient der Spannung beim Biegeversuch  
m = Masse des Internodiums

Die Mittelwerte zeigen, dass die von der Pflanze ertragbaren Querkräfte mit Abnahme der Querschnittsfläche vom ersten zum dritten Internodium (Abbildung 2 a) ebenfalls abnehmen. Die Querschnittsfläche verhält sich dabei proportional zum Gewicht  $m$  des vermessenen Internodiums. Die höchste mittlere Spannung beträgt  $1,09 \text{ N/mm}^2$  (Gleichung 3). Sie wird beim ersten Internodium erreicht und ist nahezu identisch mit dem beim dritten Internodium erreichten Mittelwert von  $1,07 \text{ N/mm}^2$ . Für das zweite Internodium beträgt die ermittelte mittlere Spannung  $0,99 \text{ N/mm}^2$ . Die auffallend hohen Variationskoeffizienten im Bereich von 15 bis 22 % hängen primär mit den unterschiedlichen Querschnittsformen der Proben zusammen. So fällt bei der Ermittlung der Querschnittsflächen auf, dass vor allem im Bereich des ersten Internodiums die Querschnittsform häufig variiert. Aus diesem Grund liegt der höchste Variationskoeffizient im Bereich des ersten Internodiums. Der geringste Variationskoeffizient ist beim dritten Internodium festzustellen, das stets eine nahezu ideal runde Form aufweist. Ein Vergleich mit anderen Studien erweist sich aufgrund der unterschiedlichen Vorgehensweise bei der Spannungsbestimmung als schwierig. TAVAKOLI et al. (2010) geben für ihre Biegeversuche an Reishalmen Variationskoeffizienten von 18 bis 25 % bzw. 8 bis 17 % an. Diese Werte liegen somit zumindest in einem ähnlichen Bereich wie die hier ermittelten Werte.

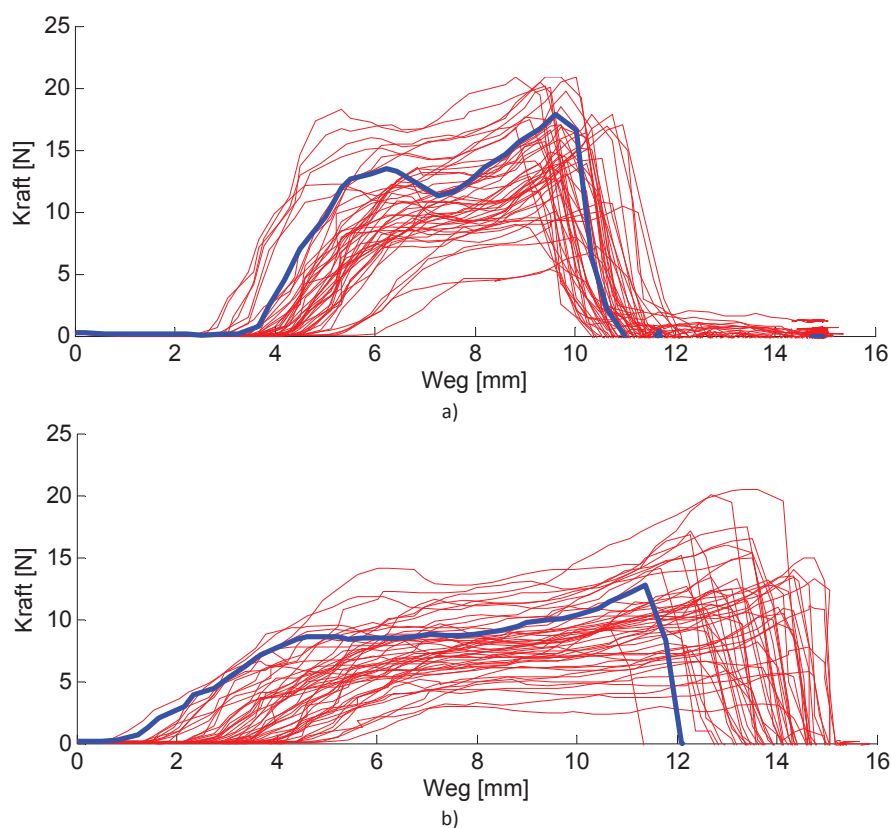


Abbildung 5: Ergebnisse aller Schnittversuche für das erste Internodium mit je einem exemplarisch hervorgehobenen Verlauf (Abtastrate = 250 1/s)

a) Schnittgeschwindigkeit: 50 mm/s, Schnittwinkel:  $40^\circ$  (Probe Nr. 26),

b) Schnittgeschwindigkeit: 50 mm/s, Schnittwinkel:  $60^\circ$  (Probe Nr. 7)

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Schnittversuche für das jeweils erste Internodium aller untersuchten Proben bei einem Schnittwinkel von  $40^\circ$  (Abbildung 5 a) und  $60^\circ$  (Abbildung 5 b). Die



Streuung der Messwerte ist gut zu erkennen. Zur Verdeutlichung ist die Kurve jeweils einer Probe mit charakteristischem Verlauf hervorgehoben. Die Berechnung und Darstellung einer Kurve, die den Mittelwert aller Messungen wiedergibt, ist nicht ohne weiteres möglich. Der Grund hierfür ist, dass die Proben unterschiedliche Durchmesser aufweisen, sodass der Betrag des von der Klinge während des Schnittes zurückgelegten Weges stets anders ist.

Für die unterschiedlichen Schnittwinkel ergeben sich verschiedene Verläufe. So ist der Kraftanstieg bei einem Schnittwinkel von  $40^\circ$  deutlich steiler als bei einem Schnittwinkel von  $60^\circ$  (Abbildung 5). Die höhere Zügigkeit des Schnittes (STROPPEL 1939) ist daran zu erkennen, dass die Klinge bei einem Schnittwinkel von  $40^\circ$  einen deutlich kürzeren Weg zurücklegen muss, bis sie die Probe durchtrennt hat.

Ein weiterer Unterschied wird bei Betrachtung der beiden Kraftspitzen deutlich, die bei einem Schnittwinkel von  $40^\circ$  wesentlich stärker ausgeprägt sind, und ist mit der sich während des Schnittprozesses verändernden Schnittfläche zu erklären. So sinkt die Schnittkraft bei einem Schnittwinkel von  $40^\circ$  nach Erreichen ihres vorläufigen Maximalwertes aufgrund der geringer werdenden Schnittfläche zunächst ab (Abbildung 6). Anschließend steigt sie aufgrund der größer werdenden Reibkraft sowie der erneuten Zunahme der Schnittfläche wieder an. Bei einem Schnittwinkel von  $60^\circ$  ist der Einfluss der beim Gleiten des Messers durch die Probe entstehenden Reibkräfte deutlich größer. Ferner wirken in der Probe höhere Zugkräfte, die der Klingebewegung entgegenwirken. Aus diesen Gründen fällt der Wert der Schnittkraft nach Erreichen ihres ersten Maximalwertes kaum ab.

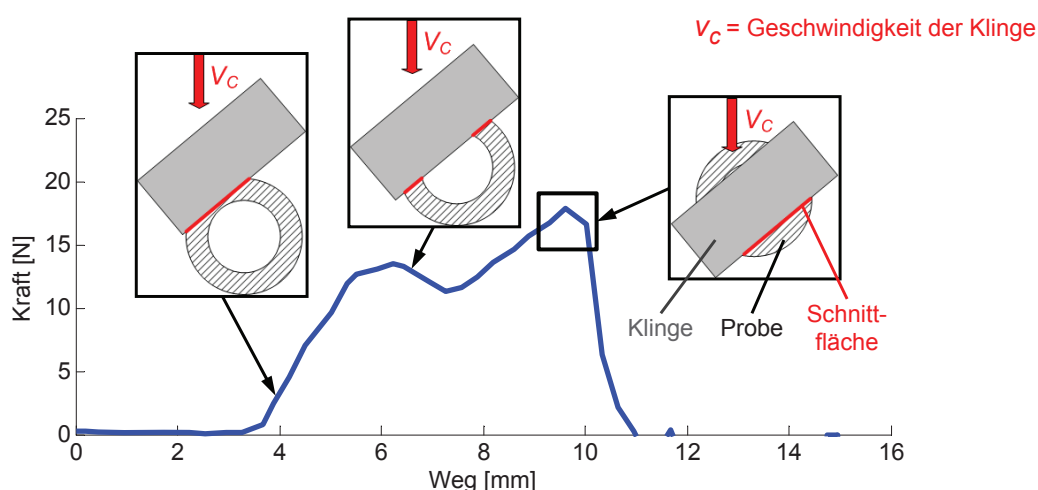


Abbildung 6: Erläuterung der in Abbildung 5 dargestellten Schnittkraft-Weg-Verläufe

Die Mittelwerte aller Ergebnisse der Schnittversuche sind in Tabelle 2 zu finden. Die niedrigsten Werte für die Spannungen sind, bis auf eine Ausnahme beim ersten Internodium, bei einem Schnittwinkel von  $60^\circ$  festzustellen. Im Fall des ersten Internodiums wird die niedrigste Spannung von  $2,79 \text{ N/mm}^2$  mit einer Schnittgeschwindigkeit von  $50 \text{ mm/s}$  erreicht. Beim zweiten und dritten Internodium betragen die niedrigsten Werte  $2,35 \text{ N/mm}^2$  und  $2,20 \text{ N/mm}^2$ . Sie treten bei einer Schnittgeschwindigkeit von  $150 \text{ mm/s}$  auf. Die Variationskoeffizienten betragen zwischen 5 und 15 %. Sie sind, genauso wie im Fall der Biegeversuche, beim ersten Internodium am höchsten und beim dritten

Internodium am geringsten. Auch hier liegen die Werte der Variationskoeffizienten in einem für die Vermessung natürlicher Erzeugnisse üblichen Bereich. So weisen die von AMER EISSA et al. (2008) an Baumwollstielen gemessenen Schubspannungen Variationskoeffizienten zwischen 6 und 13 % auf. Die größten Variationskoeffizienten sind dabei im oberen Bereich der Pflanze zu finden. Bei einigen von TAVAKOLI et al. (2010) vorgestellten Ergebnissen von Scherversuchen an Reishalmen betragen die Variationskoeffizienten zwischen 18 und 25 %.

Tabelle 2: Ergebnisse der Schnittversuche

Int.	$\dot{x}_C$ [mm/s]	$\alpha$ [1°]	$A^{1)}$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_{C,max}^{1)}$ [N]	$\tau_{S,max}^{1)}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$V_C^{1)}$ [%]	$E_C/A^{1)}$ [mJ/mm <sup>2</sup> ]	$V_{CE}^{1)}$ [%]
1	50	40	3,62	14,89	4,17	13	16,68	19
1	150	40	4,13	13,08	3,19	15	14,06	20
1	50	60	4,21	11,91	2,79	14	17,96	18
1	150	60	4,18	13,56	3,25	10	19,85	19
2	50	40	3,63	16,05	4,44	7	13,37	32
2	150	40	3,97	12,30	3,12	6	14,52	14
2	50	60	3,67	10,27	2,81	9	18,60	14
2	150	60	4,17	9,73	2,35	8	15,56	11
3	50	40	3,53	11,84	3,53	7	12,46	26
3	150	40	4,17	12,40	2,98	5	13,24	17
3	50	60	4,27	11,97	2,80	7	16,02	19
3	150	60	3,74	8,19	2,20	5	12,18	13

<sup>1)</sup> Mittelwerte aus 50 Versuchen.

$V_C$  = Variationskoeffizient der Spannung beim Schnittversuch

$V_{CE}$  = Variationskoeffizient der auf den Querschnitt bezogenen Schnittenergie

Die höchsten Spannungen treten ausnahmslos bei einem Winkel von 40° und einer Schnittgeschwindigkeit von 50 mm/s auf. Sie betragen für das erste Internodium 4,17 N/mm<sup>2</sup>, für das zweite 4,44 N/mm<sup>2</sup> und für das dritte 3,53 N/mm<sup>2</sup>. Die von O'DOHERTY et al. (1995) an Weizenhalmen ermittelten Schubspannungen betragen zwischen 4,91 und 7,26 N/mm<sup>2</sup>. KRONBERGS (2000) gibt einen Wert von 8,47 N/mm<sup>2</sup> an und KUSHWAHA et al. (1983) nennen Werte zwischen 7 und 11 N/mm<sup>2</sup>. PRASAD und GUPTA (1975) hingegen erhalten bei ihren Versuchen an Maisstängeln nur Werte im Bereich von 2 bis 3,3 N/mm<sup>2</sup>, das jedoch bei einem Feuchtigkeitsgehalt von etwa 74 %.

Die maximale auf den Querschnitt bezogene Schnittenergie beträgt für das erste Internodium 19,85 mJ/mm<sup>2</sup>, für das zweite 18,60 mJ/mm<sup>2</sup> und das dritte 16,02 mJ/mm<sup>2</sup>. Im Gegensatz zu den Spannungen sinkt die auf den Querschnitt bezogene Schnittenergie vom ersten zum dritten Internodium des Weizenhalmes. Dabei werden die höchsten Werte bei einem Schnittwinkel von 60° erreicht. Eine Ausnahme tritt beim dritten Internodium auf. Diese Höchstwerte treten zudem, außer beim ersten Internodium, bei einer Klingengeschwindigkeit von 50 mm/s auf. Ein völlig anderes Verhalten ist bei einem Schnittwinkel von 40° zu erkennen. Hier ist die auf den Querschnitt bezogene Schnittenergie, außer beim ersten Internodium, bei einer Schnittgeschwindigkeit von 150 mm/s größer. Die Variationskoeffizienten liegen hier zwischen 11 und 32 %. Werte aus anderen Studien für die auf den Querschnitt bezogene Schnittenergie ähnlicher Pflanzen liegen deutlich höher. So geben PRASAD

und GUPTA (1975) für ihre Messungen an Maisstängeln einen Höchstwert von 21 mJ/mm<sup>2</sup> an. Die von McRANDAL und McNULTY (1980) an Weidelgras durchgeführten Untersuchungen ergeben einen Wert von 23 mJ/mm<sup>2</sup>. Der Feuchtigkeitsgehalt ist dabei in beiden Fällen relativ hoch.

### Zusammenfassung der Ergebnisse

- Beim Biegeversuch liegen die mittleren Spannungen zwischen 0,99 und 1,09 N/mm<sup>2</sup>. Die höchsten Werte weisen die ersten Internodien der Pflanzen auf. Die niedrigsten Werte sind bei den zweiten Internodien festzustellen. Der Mittelwert der an den dritten Internodien ermittelten Spannungen liegt dazwischen und beträgt 1,07 N/mm<sup>2</sup>. Die Variationskoeffizienten liegen zwischen 15 % für das dritte und 22 % für das erste Internodium. Der Variationskoeffizient ist beim ersten Internodium am größten, da dieses am meisten von einer ideal runden Form abweicht.
- Die im Rahmen der Schnittversuche ermittelten Spannungen liegen für das erste Internodium zwischen 2,79 N/mm<sup>2</sup> und 4,17 N/mm<sup>2</sup>, für das zweite zwischen 2,35 N/mm<sup>2</sup> und 4,44 N/mm<sup>2</sup> sowie für das dritte zwischen 2,20 N/mm<sup>2</sup> und 3,53 N/mm<sup>2</sup>. Für die Variationskoeffizienten ergeben sich Werte zwischen 5 und 15 %. Dabei treten die höchsten Spannungen bei einem Schnittwinkel von 40° und einer Klingengeschwindigkeit von 50 mm/s auf. Die geringsten Spannungen ergeben sich, bis auf eine Ausnahme beim ersten Internodium, bei einer Klingeneinstellung von 60°. Die Mittelwerte aller gemessenen Spannungen betragen für das erste Internodium 3,35 N/mm<sup>2</sup>, für das zweite 3,18 N/mm<sup>2</sup> und für das dritte 2,88 N/mm<sup>2</sup>. Die Spannung nimmt somit vom unteren zum oberen Bereich des Weizenhalmes ab.
- Eine Veränderung des Schnittwinkels und somit der Zügigkeit des Schnittes hat einen maßgeblichen Einfluss auf den gemessenen Kraft-Weg-Verlauf. So weist der Verlauf bei einem Schnittwinkel von 40° zwei ausgeprägte Spitzen in der Schnittkraft auf, die bei einem Schnittwinkel von 60° weniger ausgeprägt sind. Die Hauptursache hierfür ist eine erhöhte Reibung im Fall des größeren Schnittwinkels. Darüber hinaus ist festzustellen, dass die Klinge bei einem Schnittwinkel von 60° einen längeren Weg zurücklegen muss, um die Probe zu trennen.
- Die auf den Querschnitt bezogenen Schnittenergien betragen für das erste Internodium zwischen 14,06 mJ/mm<sup>2</sup> und 19,85 mJ/mm<sup>2</sup>, für das zweite zwischen 13,37 mJ/mm<sup>2</sup> und 18,60 mJ/mm<sup>2</sup> sowie für das dritte zwischen 12,18 mJ/mm<sup>2</sup> und 16,02 mJ/mm<sup>2</sup>. Bis auf eine Ausnahme beim dritten Internodium erreicht die auf den Querschnitt bezogene Schnittenergie bei einem Schnittwinkel von 60° höhere Werte als bei einem Schnittwinkel von 40°. Die Mittelwerte der einzelnen Werte betragen für das erste Internodium 17,14 mJ/mm<sup>2</sup>, für das zweite 15,51 mJ/mm<sup>2</sup> und für das dritte 13,48 mJ/mm<sup>2</sup>. Folglich nimmt die auf den Querschnitt bezogene Schnittenergie vom unteren zum oberen Teil des Weizenhalmes tendenziell ab. Der Variationskoeffizient beträgt zwischen 11 und 32 %. Für diese hohen Werte sind insbesondere auch die Ungenauigkeiten verantwortlich, die aus der Verwendung des numerischen Integrationsverfahrens resultieren, das zur Berechnung der Schnittenergie anhand der Messwerte erforderlich ist.

### Schlussfolgerungen

Die Standardisierung von Messmethoden zur Ermittlung der Eigenschaften halmartiger Güter ist für die Vergleichbarkeit von Messungen sinnvoll. Der vorgestellte Universalprüfstand ist dafür ein erster Vorschlag. Erst standardisierte Messmethoden können die Grundlage für Datenbanken sein, die Materialparameter enthalten und z. B. für Simulationen verwendet werden können. Alternativ wäre

auch die Vorgabe einer Referenzprobe sinnvoll. Als Basis hierfür bieten sich Kunststoff-Trinkhalme an, da sie in großen Mengen verfügbar, kostengünstig und mit definierten Materialeigenschaften herstellbar sind. In zukünftigen Studien könnten die anhand der Referenzprobe ermittelten Werte im Vergleich zu den erzielten Messergebnissen angegeben werden. Die Messergebnisse wären so besser miteinander vergleichbar.

Die Übertragung der hier ermittelten Messergebnisse in die Praxis wird zunächst indirekt mithilfe von Simulationen erfolgen. So werden die erzielten Messergebnisse zunächst in Simulationsmodelle einfließen, die den Prüfstand virtuell abbilden. Das Ziel ist die Erstellung eines validierten Getreidehalmmodells für die Mehrkörpersimulation. Dieses Modell wird anschließend zur Simulation und Optimierung von Ernteprozessen, wie sie z. B. in Feldhäckslern auftreten, verwendet. Die hier vorgestellten Messergebnisse können ferner bei der Entwicklung von Landmaschinen hilfreich sein.

## Literatur

- Amer Eissa, A. H.; Gomaa, A. H.; Baimoy, M. H.; Ibrahim, A. A. (2008): Physical and mechanical characteristics for some agricultural residues. *Misr J. Ag. Eng.* 25(1), pp. 121–146
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2013): Ernte 2013 – Mengen und Preise. S. 25, <http://berichte.bmelv-statistik.de/EQB-6001012-2013.pdf>, Zugriff am 16.2.2014
- Casada, J. H.; Walker, J. N.; Smith, E. M. (1969): A Method of Predicting Flexural Behavior of Intact Tobacco Stalks. *Transactions of the ASABE* 12(3), pp. 292–294
- Chandio, F. A.; Changying, J.; Tagar, A. A.; Mari, I. A.; Guangzhao, T.; Cuong, D. M. (2013): Comparison of mechanical properties of wheat and rice straw influenced by loading rates. *African Journal of Biotechnology* 12(10), pp. 1068–1077, <http://www.academicjournals.org/journal/AJB/article-full-text-pdf/E9ACFD322463>, Zugriff am 25.7.2013
- Chattopadhyay, P.S.; Pandey, K. P. (1999): Mechanical Properties of Sorghum Stalk in Relation to Quasi-static Deformation. *Journal of Agricultural Engineering Research* 73, pp. 199–206
- Curtis, L. M.; Hendrick, J. G. (1969): A Study of Bending-Strength Properties of Cotton Stalks. *Transactions of the ASABE* 12(1), pp. 39–40
- Kronbergs, E. (2000): Mechanical strength testing of stalk materials and compacting energy evaluation. *Industrial Crops and Products* 11, pp. 211–216
- Kushwaha, R.L.; Vaishnav A.S.; Zoerb, G.C. (1983): Shear strength of wheat straw. *Canadian Agricultural Engineering* 25(2), pp. 163–166
- McClelland, J.H.; Spielrein, R.E. (1957): An Investigation of the Ultimate Bending Strength of some Common Pasture Plants. *Journal of agricultural engineering research* 2, pp. 288–292
- McRandal, D.M.; McNulty, P.B. (1980): Mechanical and Physical Properties of Grasses. *Transactions of the ASABE* 23(4), pp. 816–821
- O'Dogherty, M.J.; Huber, J.A.; Dyson, J.; Marshall, C.J. (1995): A Study of the Physical and Mechanical Properties of Wheat Straw. *Journal of Agricultural Engineering Research* 62, pp. 133–142
- Prasad, J.; Gupta, C.P. (1975): Mechanical Properties of Maize Stalk as Related to Harvesting. *Journal of Agricultural Engineering Research* 20, pp. 79–87
- Prince, R.P.; Wolf, D.D.; Bartok, J.W. (1965): The Physical Property Measurements of Forage Stalks. *Bulletin/Storrs Agricultural Experiment Station, No. 388, University of Connecticut*, pp. 1–27
- Statista (2014): Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1717/umfrage/prognose-zur-entwicklung-der-weltbevoelkerung/>, Zugriff am 12.2.2014
- Stroppel, T. (1939): Was weiß man heute vom Schneiden? In: *RKTL-Schriften* 91, 5. Konstrukteur-Kursus, Berlin, Beuth-Vertrieb GmbH, S. 78–97

Tavakoli, H.; Mohtasebi, S.S.; Jafari, A. (2009): Physical and mechanical properties of wheat straw as influenced by moisture content. *International Agrophysics* 23, pp. 175–181

Tavakoli, M.; Tavakoli, H.; Azizi M.H.; Haghayegh, G.H. (2010): Comparison of Mechanical Properties Between Two Varieties of Rice Straw. *Advance Journal of Food Science and Technology* 2(1), pp. 50–54

## Autoren

**MScEng Andrej Batos** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, **BEng Maximilian Ruepp** ist studentische Hilfskraft und **Prof. Dr.-Ing. Andreas Jahr** ist Geschäftsführender Leiter am FMDauto – Institut für Produktentwicklung und Innovation an der Fachhochschule Düsseldorf, Josef-Gockeln-Str. 9, 40474 Düsseldorf, E-Mail: andrej.batos@fh-duesseldorf.de

**Prof. Dr.-Ing. Burkhard Corves** ist Direktor am IGM – Institut für Getriebetechnik und Maschinendynamik an der RWTH Aachen, Kackertstr. 16–18, 52072 Aachen

## Hinweise

Diese Veröffentlichung beruht auf den Ergebnissen, die im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages geförderten und in Zusammenarbeit mit den Firmen KRONE und RLE durchgeführten FHprofUnt-Projektes sowie eines von der hochschulinternen Forschungsförderung geförderten Projektes entstanden sind. Die Proben wurden von Herrn Huber, einem Landwirt aus Düsseldorf, zur Verfügung gestellt.