

#### 4. Zusammenfassung

Das Verdichten von Stroh zu haltbaren Briketts hoher Dichte ist mit Normaldruckpressen, z.B. Kollergangpressen, durchführbar; die Materialzuführung sollte allerdings dem voluminösen Material durch eine Vorverdichtung oder eine Zwangszufuhr angepaßt werden, um einen ausreichend hohen Durchsatz zu gewährleisten. Eine gleichmäßige Häcksellänge und eine konstante Materialzuführung erhöhen dabei die Betriebssicherheit der Anlage. Weiterhin sollte eine Regelung der Materialzufuhr und der evtl. Zusätze in Abhängigkeit von z.B. der Stromaufnahme des Pressenmotors vorgesehen werden, um Störungen durch Verstopfungen oder Brückenaufbau in der Anlage entgegenwirken zu können.

Zur Erzielung haltbarer Briketts ist ein niedriger Feuchtegehalt von Vorteil, da mit zunehmendem Feuchtegehalt sowohl die erreichbare Dichte abnimmt, wie auch der Leistungsbedarf ansteigt. Eine kurze Häcksellänge (6 mm theoretische Häcksellänge im Vergleich zu 20 mm) ergibt härtere Briketts bei etwa gleichem Leistungsbedarf.

Der Leistungsbedarf zur Hochdruckverdichtung von Stroh ist insgesamt noch relativ hoch. Dieser Aufwand rechtfertigt daher den Einsatz nur dort, wo die Vorteile der hohen Dichte, der Schütffähigkeit und evtl. des Aufschlusses besonders zum Tragen kommen.

#### Schrifttum

- [ 1 ] Orth, H.W., H. Peters u. U. Köhler: Untersuchung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von Getreidestroh. Grndl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 6, S. 230/34.
- [ 2 ] Claus, H.G.: Strohaufschluß in Kolben- und Kollergangpressen. In "Möglichkeiten der Strohverwertung". KTBL-Schrift 220, S. 98/108, Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1977.
- [ 3 ] Orth, H.W.: Herstellung von Preßlingen aus Rau- und Kraftfutterkomponenten. Berichte über Landwirtschaft Sdrh. 191, S. 314/33, Hamburg: Verlag Paul Parey 1975.
- [ 4 ] Kutzbach, H.D.: Die Grundlagen der Halmgutverdichtung. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 16, Düsseldorf VDI-Verlag 1972.
- [ 5 ] Osobov, V.I.: Issledowanie processa briketirovania sewa (Untersuchung des Brikettiervorganges bei Heu). Traktory i Selchoshmachiny Bd. 32 (1962) H. 10, S. 25/27.
- [ 6 ] Busse, W.: Das Verdichten von Halmgütern mit hohen Normaldrücken. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 1, Düsseldorf: VDI-Verlag 1965.
- [ 7 ] Orth, H.W. u. R. Loewe: Influence of temperature on wafering in a continuous extrusion process. J. Agric. Engng. Res. Bd. 22 (1977) S. 283/89.
- [ 8 ] Baader, W., H.-J. Ahlgrimm, W. Dervedde u. H.W. Orth: Untersuchungen des mechanischen Verhaltens von Pflanzen bei Einwirken äußerer Kräfte. DFG-Bericht Ba 292/6; 292/7 (unveröffentlicht), Braunschweig 1976.
- [ 9 ] Dobbie, J.B. u. E.J. Carnegie: Dry versus liquid binders for cubing straw. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) S. 508/509.
- [ 10 ] Waelti, H. u. J.B. Dobbie: Effect of various binders on cubability of straw. ASAE-paper 71-115.
- [ 11 ] Smith, I.E., S.D. Probert, R.E. Stokes u. R.J. Hanusford: The briquetting of wheat straw. J. Agric. Engng. Res. Bd. 22 (1977) S. 105/11.
- [ 12 ] Orth, H.W. u. H. Peters: Festigkeitsuntersuchungen an Alleinfutterpreßlingen. Landbauforschung Völkenrode Bd. 23 (1973) H. 2, S. 111/16.
- [ 13 ] Tesic, M.: Das Verdichten unter Nährstoffaufschluß von Futterpflanzen in Matrizenpressen. Diss. Univ. Göttingen 1977.

## Die Wirkung einiger physiologischer und morphologischer Parameter auf die Halmfestigkeit

Von Heinz-Jürgen Ahlgrimm, Braunschweig-Völkenrode\*)

Mitteilung aus dem Institut für Landmaschinenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode

DK 633.004.12:539.41

In Halmgutverarbeitungsmaschinen sollen durch die Werkzeugwirkung in den Halmen bestimmte Beanspruchungen erzeugt werden, die bis zum Bruch der Halme führen. Die Halmfestigkeit ist jedoch von einer Reihe verschiedener, sich zeitlich ändernder Parameter abhängig, deren Wirkungen nur schwer bestimmbar sind.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem Einfluß des Feuchte-, Zellulose- und Ligningehaltes sowie der Trockenmassebelegung des Halmes auf die Zug- und Scherfestigkeit sowie auf das Biegeverhalten von Halmen im Hinblick auf die Halmgutverarbeitung.

\*) Dr. rer. nat. Heinz-Jürgen Ahlgrimm ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.

### 1. Einleitung

Eine Vielzahl landwirtschaftlicher Produktionsschritte umfaßt das Trennen, Zerkleinern und Verdichten von pflanzlichem Halmgut. Die meisten dieser Prozesse laufen jedoch mangels ausreichender Kenntnisse über die Wechselwirkung Maschine/Werkzeug-Verarbeitungsgut nicht optimal ab.

In Trenn- und Zerkleinerungsprozessen wird das Halmgut durch das Werkzeug entweder durch Scherkräfte (senkrecht zur Halmachse) oder durch Zugkräfte (parallel zur Halmachse) [1, 2] meistens bis zum Halmbruch belastet, Bild 1. Es treten für weite Werkzeugabstände und in Halmgutverdichtungseinrichtungen häufig jedoch auch Biegebeanspruchungen auf.

Eine bessere Beurteilung der Arbeit von Halmgutverarbeitungsanlagen ist deshalb dann möglich, wenn mehr über das Bruchverhalten von Halmen bei Zug-, Scher- und Biegebeanspruchung bekannt ist, das jedoch von dem speziellen Bauprinzip pflanzlicher Halme und ihrem jeweiligen Zustand, d.h. von verschiedenen, sich zeitlich ändernden Halmparametern abhängt.



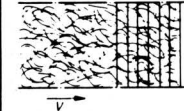


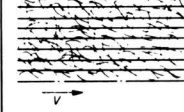


| Hauptbeanspruchung des Gutes   | Abstützung der Werkzeugkraft   | Anord. d. Trennflächen im Gutstrom   |
|--|--|--|
| scheren<br> | durch Massenkräfte<br>                      | quer zur Flußrichtung<br>     |
| ziehen<br>  | durch Auflager mit engem Werkzeugabst.<br>  | parallel zur Flußrichtung<br> |
| drücken<br> | durch Auflager mit weitem Werkzeugabst.<br> |  |

Bild 1. Prinzipielle Funktionsmerkmale von Zerkleinerungseinrichtungen nach [1].

## 2. Grundlegende Zusammenhänge

### 2.1 Aufbau und mechanische Eigenschaften von Halmen

Für das Bauprinzip von Halmen sind die in ihrer natürlichen Umgebung auftretenden Beanspruchungen maßgebend; diese können sich jedoch von den durch eine Maschine verursachten – je nach Verarbeitungsprozeß – teilweise sehr wesentlich unterscheiden. Als natürliche Beanspruchungen treten in einem Halm Druckbelastungen parallel zur Halmachse durch das Eigengewicht, vorwiegend jedoch Biegebeanspruchungen durch Eigengewicht und Windeinwirkung auf. Zur Aufnahme dieser Beanspruchungen ist eine periphere, ringförmige Anordnung von Festigungsgewebe günstig. Die bei einer Biegebeanspruchung wirkenden Zugspannungen werden durch die faserförmige Anlage des Festigungsgewebes parallel zur Halmachse aufgenommen.

Die zum großen Teil aus Zellulose bestehenden Fasern (Aufbau aus Bündeln von Zellulosemikrofibrillen und Fibrillen) [3] weisen in dieser Richtung die höchste Festigkeit (Zugfestigkeit) auf. Durch die gute Orientierung der hochmolekularen Zellulose im Kern der Mikrofibrillen (quasikristalline Bereiche) können sehr hohe Festigkeitswerte erreicht werden. Entscheidend für das mechanische Verhalten und für die reale Festigkeit von Fasern ist jedoch die Art und Ablage der Matrixsubstanzen in Form von niedermolekularen Hemizellulosen, Pektinen usw. in den weniger geordneten Randbereichen der Mikrofibrillen sowie ihre Zugänglichkeit für Wasser, Lignin und andere Substanzen. Durch die Einlagerung von Lignin und Ausbildung von Festigungsgewebe (Sklerenchym) wird zusätzlich eine höhere Druckfestigkeit erreicht, z.B. für Holz, die hohe Dehnbarkeit der Zellulosefasern nimmt jedoch hierdurch ab [3].

Eine weitere Erhöhung der Festigkeit für Halme ergibt sich durch den Einbau von sklerenchymatisierten Leitbündelsystemen in das Speichergewebe (Parenchym) im Innern des Halmes in unregelmäßiger Anordnung, wobei das Parenchymgewebe sehr viel geringere Festigkeitswerte aufweist und – mechanisch betrachtet – nur zu einer Verbindung der Festigungselemente untereinander dient.

Durch die besondere molekulare und übermolekulare Struktur der Gerüstbausteine und ihre Anordnung verfügen pflanzliche Halme in Bezug auf Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul und Dehnbarkeit im Vergleich zu technischen Werkstoffen über hervorragende mechanische Eigenschaften, Tafel 1.

Im Gegensatz zu technischen Werkstoffen sind die mechanischen Eigenschaften pflanzlicher Stoffe jedoch nicht annähernd reproduzierbar. Sie hängen von einer Reihe teils bekannter, teils unbekannter Parameter ab.

| Material                | Zugfestigkeit<br>N/mm <sup>2</sup> | Elastizitätsmodul<br>N/mm <sup>2</sup> | Bruchdehnung<br>% |
|-------------------------|------------------------------------|--|-------------------|
| Flachsfaser trocken     | 1 100                              | 110 000                                | 2–3               |
| Ramiefaser, trocken     | 950                                | 65 000                                 | 3–6               |
| Wiesensieschgrashalme*) | 500                                | 10 000                                 | 5                 |
| Baumwolle               | 800                                | 37 000                                 | 4–10              |
| Buchenholz              | 140                                | 15 000                                 |                   |
| Polyamidfaser           | 80                                 | 1 600                                  |                   |
| Stahl, hochfest         | 1 000–2 500                        | 210 000                                | 10–6              |

\*) eigene Messungen

Tafel 1. Mechanische Eigenschaften verschiedener organischer Stoffe im Vergleich zu Stahl.

### 2.2 Einflußnehmende Parameter

So wird das Verhalten von Pflanzenhalmen bei Lasteinwirkung sehr wesentlich von ihrem Feuchtegehalt bestimmt. Die hierdurch bei der Halmgutverarbeitung auftretenden Schwierigkeiten sind aus der Praxis vielfach bekannt. Trotz zahlreicher Arbeiten über die Feuchtwirkung bei verschiedenen Beanspruchungen [2–17] gibt es bis heute darüber noch keine geschlossene und bewiesene Theorie.

Der Einfluß weiterer Halmparameter ist noch nicht so gut untersucht: Es gibt jedoch erste Hinweise über die Wirkung des Zellulosegehaltes [3, 4, 18, 19, 20] sowie über den Einfluß des physiologischen Alters pflanzlicher Organe auf ihre mechanischen Eigenschaften [21, 22] als Folge zunehmender Sklerenchymatisierung bzw. Lignifizierung [3]. Für das Biegeverhalten eines Halmes sind außer seinem Durchmesser bzw. Radius [10] auch seine Massebelegung [16, 23, 24] verantwortlich.

Die beschriebenen physiologischen (die Inhaltsstoffe charakterisierenden) und morphologischen (die gestaltbildenden geometrischen) Größen eines Halmes werden weitgehend durch innere Faktoren (genetisches Muster in der DNS und RNS, Enzyme, Phytohormone usw.) und durch äußere Einflüsse (Klima, Boden, Dünger usw.) bestimmt. Damit hängen auch die mechanischen Eigenschaften weitgehend von solchen Einflußfaktoren ab. Aus einer Untersuchung [3] über den Einfluß bestimmter Klimaverhältnisse auf die physiologische bzw. morphologische Entwicklung von Grashalmen und deren Festigkeit sollen die wichtigsten Auswirkungen der pflanzlichen Entwicklung dargestellt werden, soweit diese für den Konstrukteur von Halmgutverarbeitungsmaschinen von Bedeutung sind.

### 3. Versuchsmethodik

Die Ergebnisse sind aus mehrjährigen Untersuchungen abgeleitet, die systematisch in großem Umfang als Zeitreihenversuche ausschließlich an Wiesenlieschgras durchgeführt wurden.

#### 3.1 Festigkeitsparameter

Als Kriterien für das mechanische Verhalten und die Festigkeit von Pflanzenhalmen wurden die am häufigsten auch in Halmgutverarbeitungsmaschinen erreichten Grenzwerte bei Zug-, Scher- und Biegebeanspruchung angesehen:

- Trennfestigkeit parallel zur Halmachse:  
Zugfestigkeit
- Trennfestigkeit senkrecht zur Halmachse:  
Scherfestigkeit
- Biegemoment und Biegeweg unter der Werkzeuglast beim Einknicken der Halme bzw. Biegesteifigkeit.

#### 3.2 Einflußgrößen

Folgende morphologische und physiologische Halmparameter wurden als wesentliche Einflußgrößen betrachtet und durch Messungen ermittelt:

- Länge  $l_1$  eines Halminternodiums (Halmbereich von einem Knoten zum nächsthöheren)
- mittlerer Durchmesser  $d$  eines Halminternodiums
- Lage eines Halminternodiums in der Pflanze (z.B. 1., 2., 3. Internodium über dem Boden)
- Feuchtegehalt  $U$  eines Halminternodiums
- Trockenmassebelegung  $m_T'$  (Trockenmasse  $m_T$  auf 100 mm Halmlänge bezogen)
- relativer, d.h. auf die Trockenmasse bezogener Zellulosegehalt  $\chi_Z^*$
- relativer, d.h. auf die Trockenmasse bezogener Ligningehalt  $\chi_L^*$
- relativer, d.h. auf die Trockenmasse bezogener Aschegehalt  $\chi_A^*$ .

#### 3.3 Versuchsmaterial

Für derartige Untersuchungen waren an das Versuchsmaterial verschiedene Anforderungen zu stellen:

Es sollte Ähnlichkeit in seinem Aufbau mit möglichst zahlreichen anderen Gramineen zur Übertragbarkeit von Zusammenhängen auf andere Pflanzen zeigen, genügend lange und möglichst kreisrunde Internodien besitzen, die Möglichkeit zum Ausschluß von störenden Einflußfaktoren und Streuungen durch einheitliche Erbanlagen bieten und für notwendige Wiederholungen in weiteren Jahren zur Verfügung stehen.

Aus diesem Grunde wurden verklontes Wiesenlieschgras (Timothe bzw. Phleum pratense)\*\*) gewählt.

\*) bestimmt im Institut für Grünlandwirtschaft, Futterbau und Futtermittelkonservierung der FAL

\*\*) ausgewählt und bereitgestellt vom Institut für Pflanzenbau und Saatgutforschung der FAL

### 3.4 Meßverfahren

#### 3.4.1 Messung der Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeitsmessungen (Grenzbeanspruchung parallel zur Halmachse) wurden mit einem Gerät, Bild 2, bei achsenparalleler Belastung des Halmes mit konstanter Dehnungsgeschwindigkeit ( $\approx 1$  cm/s) bis zum Halmbruch durchgeführt [25]. Aus dem Höchstwert der Kraft  $F_{Br}$  vor dem Halmbruch ließ sich mit Hilfe des sich aus der Trockenmassebelegung  $m_T' = m_T/l$  bei der konstanten Trockenmassedichte  $\rho_T (= 1,45 \text{ g/cm}^3)$  ergebenden Trockenmassequerschnitts  $q_T$

$$q_T = \frac{m_T}{l \cdot \rho_T} \quad (1)$$

eine Zugbruchspannung (Zugfestigkeit)  $\sigma_{Br}$  ermitteln:

$$\sigma_{Br} = \frac{F_{Br} \cdot \rho_T \cdot l}{m_T} \quad (2)$$

Die Trockenmasse kann dabei für verschiedene Belastungsarten als Bezugsgröße von Bruchkräften dienen, ist leicht und schnell zu bestimmen und enthält auch alle für die Festigkeit verantwortlichen Gewebe.

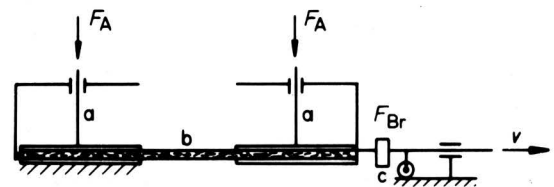


Bild 2. Schema des Zugkraftmeßgerätes.

- Einspannvorrichtung
- Halm
- Kraftmeßvorrichtung

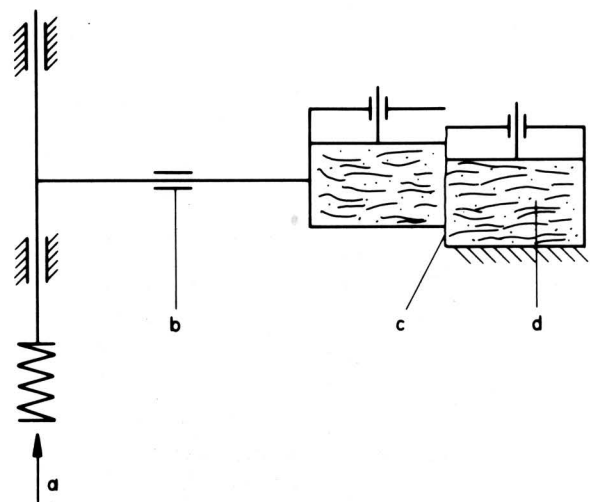


Bild 3. Schema des Scherkraftmeßgerätes.

- Belastung
- Biegebalken mit Dehnungsmessstreifen zur Bestimmung der Trennkraft
- Scherfläche
- vorgepreßtes Halmgut

### 3.4.2 Messung der Scherfestigkeit

Schervorgänge an Halmen (Beanspruchungen senkrecht zur Halmachse), wie sie überwiegend in Exaktschneideeinrichtungen auftreten, lassen sich nur dann ohne das Auftreten nennenswerter anderer Spannungskomponenten (Zugspannungen) realisieren, wenn zunächst eine Vorverdichtung des Meßgutes erfolgt. In Zerkleinerungseinrichtungen mit nicht zu großem Abstand Werkzeug/Gegenwerkzeug übernimmt das Werkzeug selbst die Vorverdichtung. Für die eigenen Untersuchungen wurde ein Meßgerät, **Bild 3**, entwickelt, bei dem mehrere Halme nach Vorverdichtung schlagartig abgesichert werden konnten [25]. Die höchste, unmittelbar vor dem Scheren auftretende Spitzenkraft  $F_{Br}$  wurde zur Ermittlung der Scherbruchspannung (Scherfestigkeit)  $\tau_{Br}$  wiederum auf den Trockenmassequerschnitt bezogen:

$$\tau_{Br} = \frac{F_{Br} \cdot \rho_T \cdot l}{m_T} \quad (3)$$

### 3.4.3 Ermittlung des Biegeverhaltens

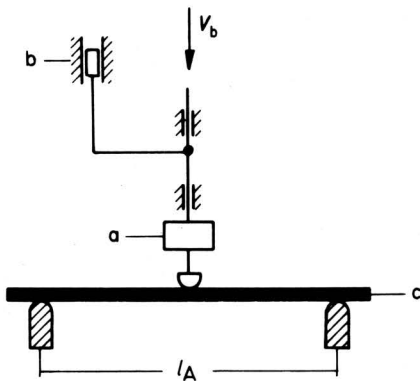
Bei der Ermittlung des Biegeverhaltens wurde nach dem Prinzip des zweiseitig gestützten Biegeträgers gearbeitet, **Bild 4**, wobei die Belastung des Halmes in der Mitte bei zeitlich konstanter Auslenkungsgeschwindigkeit von 0,75 mm/s bis zum Einknicken der Halme (bleibende Deformation des Querschnitts) erfolgte [25]. Der Auflagerabstand  $l_A$  betrug 50 mm. Entsprechend dem Belastungsprinzip ergibt sich aus der höchsten Biegekraft  $F_{bmax}$  das maximale Biegemoment zu

$$M_{bmax} = \frac{F_{bmax} \cdot l_A}{4} \quad (4)$$

das auf den Halmdurchmesser  $d$  bzw. die Trockenmassebelegung  $m_T$  bezogen wurde, aus dem aber auch mit der ebenfalls gemessenen maximalen Halmauslenkung am Knickpunkt (Biegeweg)  $s_{max}$  die Biegesteifigkeit

$$E \cdot I = \frac{M_{bmax}}{s_{max}} \cdot \frac{l_A^2}{12} = \frac{1}{48} \cdot \frac{F_{bmax} \cdot l_A^3}{s_{max}} \quad (5)$$

ermittelt werden konnte.



**Bild 4.** Schema des Biegegerätes.

- a Kraftmessung
- b Wegmessung
- c Halm

### 3.5 Versuchsdurchführung, Auswertung

Nach dem Aufwuchs genügend langer Halminternodien erstreckte sich die Versuchstätigkeit über jeweils ca. 10–12 Wochen einer Vegetationsperiode. Einheitlich wurde jeweils zu Beginn einer Woche frisches Versuchsgut dem Versuchsfeld für alle Festigkeitsuntersuchungen und für alle morphologischen und physiologischen Messungen dieser Zeitspanne entnommen. Hierdurch konnten bestimmten Festigkeitswerten die entsprechenden morphologischen und physiologischen Größen zugeordnet werden.

Die erforderliche Änderung der Halmfeuchtigkeit stellte sich durch langsames Abtrocknen des Meßgutes im Laufe einer Woche ein. Die Feuchteabhängigkeiten für die Zugfestigkeit und für das Biegeverhalten ergaben sich durch Mittelwertbildung in Feuchteintervallen von je 2 % aus insgesamt ca. 60–150 Einzelmessungen pro Internodium und Woche.

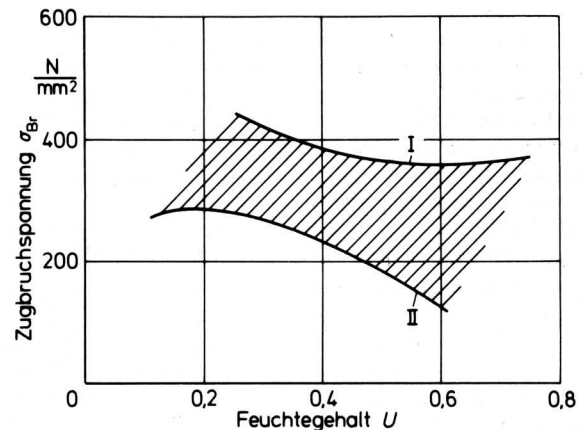
Aus der Ähnlichkeit der Zeitabhängigkeiten der morphologischen bzw. physiologischen Halmparameter und denen der verschiedenen Festigkeitswerte bei bestimmten festen Feuchtegehalten (30, 40, 50, 60 %) konnte mit Hilfe der Korrelationsanalyse aus der Höhe der Korrelationskoeffizienten der Zusammenhang zwischen den Festigkeitsparametern und den Einflußgrößen abgeleitet werden.

### 4. Zusammenhang zwischen den morphologischen und physiologischen Halmparametern und der Festigkeit

Aus diesen Untersuchungen waren deshalb nicht immer klare Aussagen abzuleiten, weil es nicht möglich ist, bei einer Vielzahl miteinander in Wechselwirkung stehender Parameter die Wirkung eines Parameters allein ohne die anderen zu betrachten.

#### 4.1 Zugfestigkeit

Die Halmfeuchtigkeit beeinflusst die Zugfestigkeit besonders stark. Am Beispiel eines mittleren Halminternodiums einer Vegetationsperiode ist in **Bild 5** der typische Streubereich der Zugfestigkeit als Funktion des Feuchtegehalts dargestellt. Den darin mit I und II bezeichneten Grenzkurven sind besonders hohe bzw. niedrige Zellulosegehalte zuzuordnen. Die Breite des Streubereichs wird jedoch nicht nur allein durch die Differenz des Zellulosegehaltes bestimmt, sondern sie hängt auch von der Struktur und Zusammensetzung weiterer Gerüstbausteine und anderer Halmsubstanzen sowie von deren Wechselwirkungen mit Wasser ab [3].

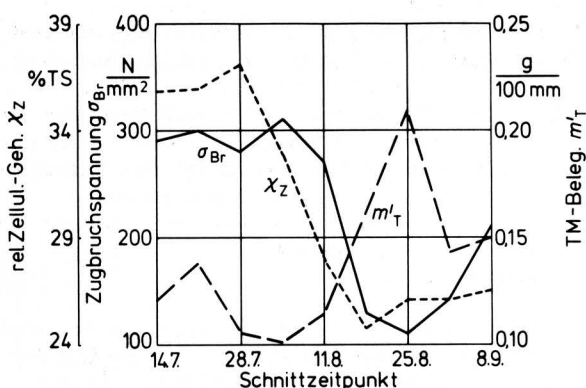


**Bild 5.** Zugbruchspannung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt für ein Internodium.

Zwischen dem Zellulosegehalt und der Zugfestigkeit besteht ein unmittelbarer proportionaler Zusammenhang, Verlauf der Kurven für  $\chi_Z$  und  $\sigma_{Br}$  in Bild 6. Dieser Einfluß des Zellulosegehalts kann sich jedoch auch mit steigendem Halmfeuchtegehalt verringern. Entsprechend der Höhe des Zellulosegehalts treten die höchsten Zugfestigkeitswerte im mittleren Halmbereich mit nahezu  $500 \text{ N/mm}^2$  auf, während die niedrigsten Werte im unteren Halmbereich gemessen wurden. Die Trockenmassebelegung  $m'_T$  beeinflusst die Zugfestigkeit dagegen nicht, wie aus der gegenläufigen Tendenz von Zugfestigkeit und Trockenmassebelegung in Bild 6 hervorgeht. Aus dieser Größe kann somit allgemein nicht auf die Zugfestigkeit geschlossen werden.

Eine Abschätzung von Zugfestigkeitswerten aus den geometrischen Abmessungen (morphologische Parameter) Länge und Durchmesser eines Halminternodiums ist ebenfalls nicht möglich.

Aufgrund seiner molekularen Struktur kann Lignin – im Gegensatz zur hochmolekularen Zellulose – nicht zur Zugfestigkeit beitragen. Hingegen wird durch die Lignineinlagerung die Dehnbarkeit herabgesetzt. In Trockenperioden kann jedoch Lignin auch zur Versteifung von Halminternodien dienen, wenn die Wirkung des Zellurgors nicht mehr dafür ausreicht [3].

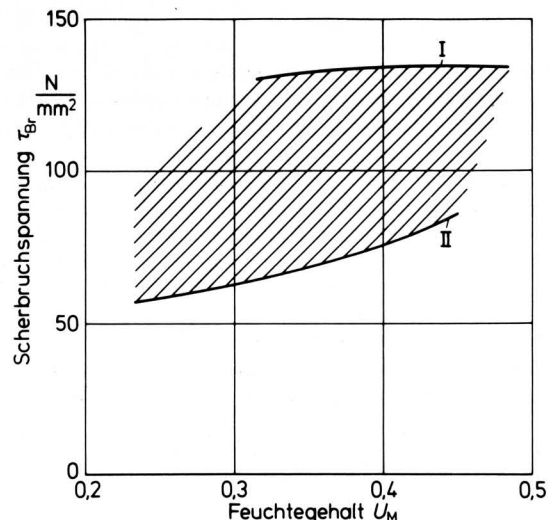


**Bild 6.** Zusammenhang zwischen der Zugbruchspannung, dem Zellulosegehalt und der Trockenmassebelegung für ein Internodium; Feuchtegehalt  $U = 0,5$ .

#### 4.2 Scherfestigkeit

Aufgrund der gleichzeitigen Wirkung verschiedener Halmparameter kann die Feuchteabhängigkeit der Scherfestigkeit wiederum nur durch einen Streubereich dargestellt werden, wie dies für ein Internodium für den Zeitraum einer Vegetationsperiode in Bild 7 gezeigt wird. Die obere Grenzkurve I bezieht sich auf einen hohen, die untere auf einen niederen Zellulosegehalt. Die Scherfestigkeit steigt zumeist leicht mit dem Feuchtegehalt an oder bleibt nahezu konstant. Man beachte jedoch, daß der Feuchtebereich wegen der Auspressung von Flüssigkeit während der Vorverdichtung auf Feuchtegehalte  $U_M \leq 0,5$  eingeschränkt wird, daß aber für die Wirkung auf die Scherfestigkeit im wesentlichen der in den Halmen enthaltene Restfeuchtegehalt verantwortlich ist.

Bild 5 und Bild 7 zeigen die Streubereiche von Zugfestigkeit und Scherfestigkeit des dritten Internodiums (oberer Halmbereich); daher ist ein Vergleich der Werte beider Festigkeitsarten zulässig. Für einen Feuchtegehalt  $U = 0,4$  ergibt sich sowohl an der unteren wie auch an der oberen Grenzkurve, d.h. also bei jeweils festem Zellulosegehalt, ein Verhältnis von etwa 3:1 zwischen den Zug- und Scherfestigkeitswerten. Dieses Verhältnis spricht für die Anwendung des Scherprinzips in Zerkleinerungseinrichtungen, obgleich der Aufwand für die Halmgutvorverdichtung beachtet werden muß.

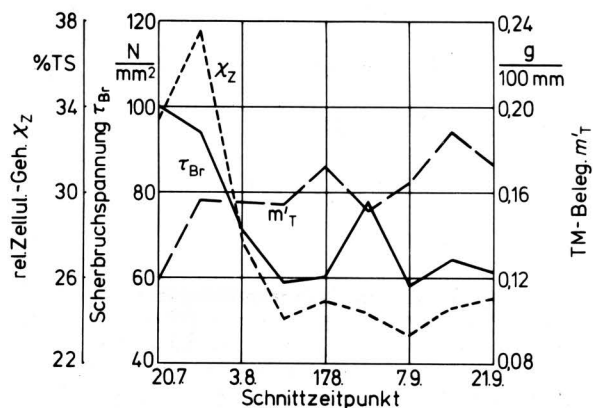


**Bild 7.** Scherbruchspannung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt für ein Internodium.

Die Scherfestigkeit zeigt zumeist ebenfalls eine starke Abhängigkeit vom Zellulosegehalt  $\chi_Z$ , wie aus der großen Ähnlichkeit der Zeitabhängigkeit beider Größen in Bild 8 hervorgeht. Die Scherfestigkeit nimmt somit mit dem Zellulosegehalt zu. Die geringsten Scherfestigkeitswerte wurden an den unteren Halminternodien gemessen, die höchsten Werte (bis zu  $135 \text{ N/mm}^2$ ) traten dagegen auch im mittleren Halmbereich auf.

Nach Bild 8 ist die Trockenmassebelegung  $m'_T$  für die Höhe der Scherfestigkeitswerte zumeist nicht maßgebend (gegenläufige Tendenz zur Scherfestigkeit). Aus dem Halmdurchmesser läßt sich ebenfalls nicht auf die Scherfestigkeit schließen; hingegen steht die Internodienlänge in trockenen Jahren überwiegend in einem engen Zusammenhang mit der Scherfestigkeit: Längere Halme weisen allgemein auch höhere Scherfestigkeitswerte auf. Dies hängt wahrscheinlich mit einer stärkeren Lignineinlagerung in trockenen Perioden zusammen.

Aufgrund einer teilweise beobachteten starken Ähnlichkeit zwischen den Zeitabhängigkeiten von Aschegehalt und Scherfestigkeit kann angenommen werden, daß die Scherfestigkeit mit zunehmender Mineralisierung der Halme ansteigt.



**Bild 8.** Zusammenhang zwischen der Scherbruchspannung, dem Zellulosegehalt und der Trockenmassebelegung für ein Internodium; Feuchtegehalt  $U = 0,3$ .

### 4.3 Das Biegeverhalten

Die Halmfeuchtigkeit beeinflusst das Biegeverhalten – mit Ausnahme der Biegesteifigkeit – ebenfalls sehr stark. Trockene und sehr feuchte Halme (Turgorsteifigkeit) ertragen höhere Biegemomente  $M_{b\max}$ , Bild 9, während das Minimum durch die sehr leichte Verformbarkeit des Querschnitts im Welkezustand zu erklären ist [5].

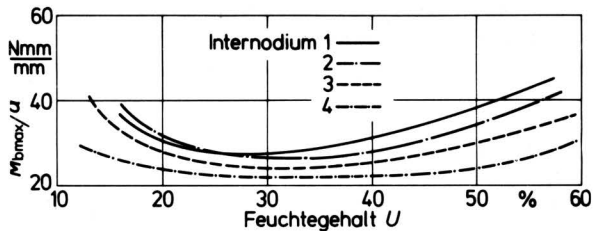


Bild 9. Feuchteabhängigkeit des auf den Durchmesser bezogenen maximalen Biegemomentes.

Eine sehr ähnliche Feuchteabhängigkeit wurde auch für den maximalen Biegeweg  $s_{\max}$  gefunden. Die leichte Verformbarkeit des Halmquerschnitts ist ebenfalls Ursache für das im Welkezustand auftretende Minimum dieser Größe [5].

Gemäß der Definition der Biegesteifigkeit

$$E \cdot I(U) = \text{Konst.} \cdot \frac{M_{b\max}(U)}{s_{\max}(U)} \quad (6)$$

muß sich bei einer gleichartigen bzw. ähnlichen Feuchteabhängigkeit von Biegemoment und Biegeweg eine indifferente bzw. nur wenig ausgeprägte Feuchteabhängigkeit der Biegesteifigkeit wie in Bild 10 einstellen. Nur in wenigen Fällen konnte hierfür ein ausgeprägtes Minimum [17] beobachtet werden.

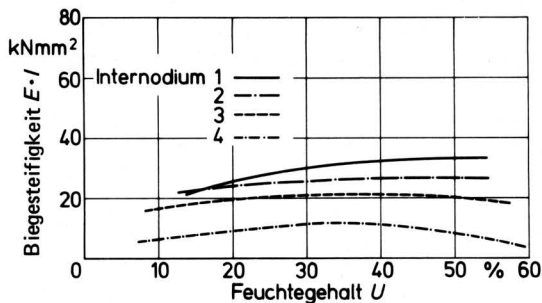


Bild 10. Feuchteabhängigkeit der Biegesteifigkeit.

Mit steigender Trockenmassebelegung, Bild 11 und mit steigendem Halmdurchmesser nehmen die ertragbaren Biegemomente zu. Diese sind somit für die unteren Halminternodien am höchsten. Zwischen dem max. Biegemoment und dem Zellulosegehalt besteht für diesen Halmbereich eine gegenläufige Abhängigkeit. Für die oberen Internodien konnte dagegen kein Zusammenhang mit dem Zellulosegehalt festgestellt werden. Dies trifft auch für den Ligningehalt zu. Aus diesen Parametern wie auch aus der Internodienlänge lassen sich daher keine Aussagen über die Höhe des maximalen Biegemomentes ableiten.

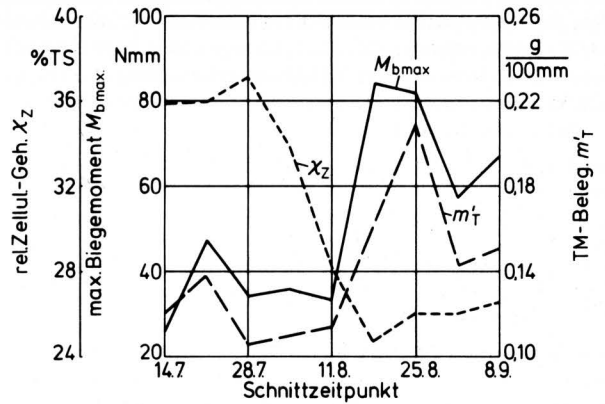


Bild 11. Zusammenhang zwischen dem maximalen Biegemoment, dem Zellulosegehalt und der Trockenmassebelegung für ein Internodium; Feuchtegehalt  $U = 0,5$ .

Der maximale Biegeweg  $s_{\max}$  wird außer von der Halmfeuchtigkeit sehr wesentlich von der Trockenmassebelegung beeinflusst: Halme mit höheren Trockenmassen können von einem Werkzeug weiter ausgelenkt werden, ehe sie an der Lastangriffsstelle einknicken, Bild 12. Ein Zusammenhang mit dem Halmdurchmesser besteht jedoch nicht: Wahrscheinlich ist die Ausbildung des Halmquerschnitts in Bezug auf die Art, Anordnung und Eigenschaften der Matrixsubstanz im Querschnitt entscheidender für seine Deformation als seine geometrischen Abmessungen.

Zellulose-, Lignin- und Aschegehalt wirken sich ebenfalls kaum auf den maximalen Biegeweg aus.

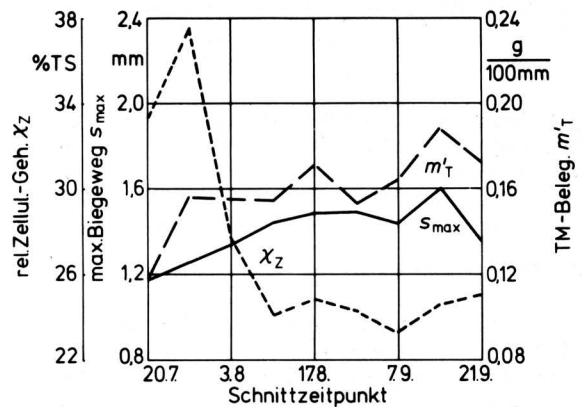


Bild 12. Zusammenhang zwischen dem maximalen Biegeweg, dem Zellulosegehalt und der Trockenmassebelegung für ein Internodium; Feuchtegehalt  $U = 0,3$ .

### 5. Schlußfolgerungen

Aus diesen Untersuchungen lassen sich für die Konzeption und Konstruktion von Halmgutverarbeitungsmaschinen und für deren Einsatz einige wichtige Folgerungen ableiten: Verarbeitungsvorgänge, bei denen im Halmgut Zugkräfte auftreten, sollten aus verschiedenen Gründen vermieden werden:

1. Für einen Trennbruch durch Zugkräfte sind bis zu 3mal so hohe Kräfte notwendig wie für einen Trennvorgang, der vorwiegend durch Scherkräfte abläuft (z.B. in Exaktschneideeinrichtungen, bei geringem Abstand Werkzeug-Gegenwerkzeug).

2. Da das Verhältnis der beobachteten Maximal- und Minimalwerte für Zugbruchkräfte bis zu 4:1, hingegen für Scherbruchkräfte nur bis 2:1 beträgt, sollte in Halmgutzerkleinerungseinrichtungen auf eine Beanspruchung der Halme durch Zugkräfte möglichst verzichtet werden.

Die für einen Trennbruch bei Zug- und Scherbeanspruchung erforderlichen Kräfte hängen sehr wesentlich vom Zellulosegehalt ab. Da jedoch die Zellulosebildung nicht mit der Trockensubstanzbildung synchron läuft, sondern sich mehr nach bestimmten Erfordernissen bei der pflanzlichen Entwicklung richtet [3], können aus der äußeren Entwicklung der Pflanzen keine Schlüsse auf die zu erwartenden Trennkräfte abgeleitet werden. Hinsichtlich des Verhaltens bei Biegebeanspruchung sind hieraus jedoch Aussagen möglich, da Halm-trockenmasse und maximales Biegemoment bzw. Biegezug einander proportional sind, während der Zellulosegehalt für beide keine Rolle spielt.

Für welches Halmgut wurden die geringsten Biegemomente bzw. Halmauslenkungen festgestellt; beide Größen nehmen sowohl bei Abnahme wie auch bei Zunahme des Feuchtegehaltes wieder höhere Werte an. Das Minimum läßt somit für welches Halmgut die geringsten Energiebeträge und Rückdehnungsraten bei der Halmgutverdichtung erwarten.

Aus dem indifferenten Verhalten der Biegesteifigkeit als Funktion des Feuchtegehaltes läßt sich jedoch eine erhöhte Neigung zum Wickeln bei welchem Halmgut nicht sicher ableiten.

## 6. Zusammenfassung

Zug- und Scherfestigkeit sowie das Biegeverhalten von Halmen werden hauptsächlich durch ihren Feuchte- und Zellulosegehalt bzw. durch ihre Trockenmassebelegung bestimmt. Die Feuchtwirkung hat dabei einen viel stärkeren und zumeist unkalkulierbaren Einfluß auf die Höhe der Kräfte bei Zugbeanspruchung als bei Scherbeanspruchung des Halmgutes.

Neben der Halmfeuchtigkeit ist für die Höhe der Kräfte beim Trennen zweier Halmteile durch Zug- und Scherkräfte im wesentlichen der Zellulosegehalt verantwortlich, während der Feuchtegehalt und die Trockenmassebelegung das Biegeverhalten (ohne Trennbruch) bestimmen.

Da die Bildung von Zellulose nicht notwendig mit der äußerlich sichtbaren Entwicklung von Halmen synchron läuft, können aus solchen Beobachtungen aber keine Schlüsse auf die zu erwartenden Trennkräfte gezogen werden. Hingegen lassen sich Aussagen über das Biegeverhalten aus der äußeren Erscheinungsform von Halmen ableiten.

## Schrifttum

- [ 1 ] Baader, W.: Die Beurteilung der Funktion von Zerkleinerungsmaschinen. Landtechn. Forsch. Bd. 18 (1970) Nr. 6, S. 164/69
- [ 2 ] Dervedde, W.: Die technologischen Eigenschaften von Gras und deren Einfluß auf den Schneidvorgang. Landbauforsch. Völknerode Sh. 8 (1970) S. 53/67.
- [ 3 ] Ahlgrimm, H.-J.: Der Einfluß physiologischer und morphologischer Faktoren auf die Festigkeit von Pflanzenhalmen am Beispiel von Wiesenlieschgras. Landbauforsch. Völknerode Sh. 37 (1977) u. Diss. TU Braunschweig, 1977.
- [ 4 ] Ahlgrimm, H.-J.: Der Einfluß der Feuchte auf das Verhalten von Halmgut bei Zug-, Scher- und Biegebeanspruchung. Landbauforsch. Völknerode Sh. 8 (1970) S. 8/31.
- [ 5 ] Ahlgrimm, H.-J. u. K. Krehbiel-Gräther: Untersuchungen zur Deutung des Biegeverhaltens von pflanzlichem Halmgut. Landbauforsch. Völknerode Bd. 22 (1972) H. 2, S. 119/22.
- [ 6 ] Ahlgrimm, H.-J.: Kraft-Dehnungsverhalten von Einzelgrashalmen. Landbauforsch. Völknerode Bd. 24 (1974) H. 2, S. 105/10.
- [ 7 ] Burmistrova, M. F. et al.: Physicomechanical properties of agricultural crops. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem 1963 (Übers. aus dem Russ.).
- [ 8 ] Casada, J.H., J.N. Walker u. E.H. Smith: A method of predicting flexural behaviour of intact tobacco stalks. Transact. ASAE Bd. 12 (1969) Nr. 3, S. 292/94.
- [ 9 ] Chancellor, W. J.: Energy requirements for cutting forage. Agric. Engng. Bd. 39 (1958) Nr. 10, S. 633/36.
- [ 10 ] Curtis, L. M. u. S. G. Hendricks: A study of bending strength properties of cotton stalks. Transact. ASAE Bd. 12 (1969) Nr. 1, S. 39/40 u. 45.
- [ 11 ] Bright, E. E.: Mass shear strength of haylage. Transact. ASAE Bd. 7 (1964) Nr. 2, S. 100/101.
- [ 12 ] Halyk, R. M. u. L. W. Hurlbut: Tensile and shear strength characteristics of alfalfa stems. ASAE-Paper Nr. 64-816 (1964) u. Transact. ASAE Bd. 11 (1968) Nr. 2, S. 256/57.
- [ 13 ] Liljedahl, U.B., G. L. Jackson, R. P. de Graff u. M. F. Schroeder: Measurement of shearing energy. Agric. Engng. Bd. 42 (1961) Nr. 6, S. 298/301.
- [ 14 ] Mohsenin, N. N.: Physical properties of plant and animal materials. Bd. I: Structure, physical characteristics and mechanical properties. New-York-London-Paris: Gordon and Breach — Science Publishers 1970.
- [ 15 ] Prince, R. P.: Measurement of ultimate strength of forage stalks. Transact. ASAE Bd. 4 (1961) Nr. 2, S. 208/209.
- [ 16 ] Prince, R. P., D. B. Wolf u. J. W. Bartock: The physical property measurement of forage stalks. Bulletin 388, Agric. Exper. Stat. Univ. Connecticut, Storre, 1965.
- [ 17 ] Wieneke, F.: Wickel- und Reibungsuntersuchungen an Wellen und umlaufenden Maschinenteilen. VDI-Forschungsheft 463, Düsseldorf: VDI-Verlag 1957.
- [ 18 ] Evans, P. S.: Study of leaf strength in four ryegrass varieties. New Zeal. Journ. Agric. Res. Bd. 7 (1964) S. 508/13.
- [ 19 ] Evans, P. S.: Leaf strength studies of pasture grasses. II: Strength, cellulose content and sclerenchyma tissue proportions of eight grasses grown as single plants. Journ. Agric. Sc. (London) (1967) S. 175/81.
- [ 20 ] Wilson, D.: Nutritive value and the genetic relationship of cellulose content and leaf tensile strength in lolium. Journ. Agric. Sci. (London) (1965) S. 205/92.
- [ 21 ] Prince, R.P., W.C. Wheeler u. D.A. Fisher: Discussion of energy requirements for cutting forage. Agric. Engng. Bd. 39 (1958) Nr. 10, S. 638/39 u. 652.
- [ 22 ] Spiewok, D.: Über die Biegesteifigkeit von Futtergräsern. Deutsche Agrartechnik Bd. 20 (1970) Nr. 10, S. 457/59.
- [ 23 ] Prince, R. P.: Measurement of ultimate strength of forage stalks. Transact. ASAE Bd. 4 (1961) Nr. 2, S. 208/209.
- [ 24 ] Mc Clelland, J. H. u. R. E. Spielrein: An investigation of the ultimate bending strength of some common pasture plants. Journ. Agr. Engng. Res. Bd. 2 (1957) S. 288/92.
- [ 25 ] Ahlgrimm, H.-J.: Meßmethoden zur Ermittlung des Bruch- und Knickverhaltens von pflanzlichem Halmgut. Landbauforsch. Völknerode Sh. 8 (1970) S. 32/52.