ZERKLEINERUNG VON MAIS IN TROMMELSCHNEIDWERKEN

Habilitationsschrift

zur Erlangung des Grades eines

habilitierten Doktors der Landwirtschaft

(Dr. agr. habil.)

vorgelegt

von

Dr.-Ing. K.-H. Kromer

Gliederung

		Seite
1.	Einführung und Zielsetzung	5
2.	Biotechnische Stoffeigenschaften von Mais	10
2.1	Biologische Stoffeigenschaften	10
2.1.1	Grundsätzliche Betrachtung des Pflanzenaufbaues	11
2.1.2	Morphologie und Reifeverlauf	12
2.1.3	Ertragsstruktur	15
2.1.3.1	Verlauf der Ertragsstruktur	16
2.1.3.2	Spezifischer Reihenertrag	18
2.1.3.3	Energiegehalt	21
2.2	Mechanische Stoffeigenschaften	23
2.2.1	Beanspruchungsmechanismen und abgeleitete mechanische Eigenschaften	23
2.2.1.1	Grenzbruchfestigkeit	25
2.2.1.2	Elastizitätsmodul	26
2.2.1.3	Poisson'sche Zahl	27
2.2.1.4	Gleitmodul	28
2.2.1.5	Formänderungsarbeit	28
2.2.1.6	Reibungsbeiwert	29
2.2.2	Stoffwerte	30
2.2.2.1	Trockenmassegehalt	30
2.2.2.2	Dichte	32
2.2.2.3	Mengenmaße	33
2.2.2.4	Form	35
2.2.2.5	Oberflächenbeschaffenheit	35
2.2.2.6	Schwerpunktlage	36
2.2.2.7	Strömungswiderstand	36
2.2.3	Mechanische Eigenschaften der Pflanzenteile	37
2.2.3.1	Korn	37
2.2.3.2	Spindel	38
2.2.3.3	Halmgutähnliche Pflanzenteile	39
2.2.3.4	Zusammenfassung und Schlußfolgerung	42
2.3	Stoffblätter	43

Seite

3. Definition der Zerkleinerungsziele 51

3.1 Fütterungstechnische Anforderungen 51

3.2 Konservierungstechnische Anforderungen 57

3.3 Zusammenfassung und Schlußfolgerung 61

4. Definition und Darstellung der Zerkleinerung 64

4.1 Zerkleinerungsgesetze 65

4.2 Methodische Studie zur Definition des Zerkleinerungsgrades 67

4.3 Siebverfahren 76

4.4 Siebvorrichtung Weihenstephan 79

5. Methodik der Konstruktion von Trommelschneidwerken zur Maiszerkleinerung 84

5.1 Anforderungsliste für Trommelschneidwerke 85

5.1.1 Funktionsanforderungen 85

5.1.2 Schnittstellenanforderungen 85

5.1.3 Betriebsanforderungen 86

5.2 Theoretische Betrachtung des Materialflusses 88

5.2.1 Primärzerkleinerung 88

5.2.2 Sekundärzerkleinerung 95

5.2.3 Leistungsbedarfs-Bilanz 101

5.3 Konstruktionsparameter 105

5.3.1 Materialfluß in Feldhäckslern 108

5.3.2 Technischer Stand 111

6. Experimentelle Ermittlung der Verknüpfungsfaktoren von Leistungsbedarf und Zerkleinerungsgrad in Trommelschneidwerken 116

6.1 Versuchsumfang 117

6.1.1 Methodik und Aufbau 119

6.1.1.1 Leistungsmessung 119

6.1.1.2 Ermittlung des Zerkleinerungsgrades 120

6.1.1.3 Fehlerbetrachtung 120

6.1.2 Versuchsdurchführung 121

6.1.3 Auswertung der Versuchsergebnisse 123

6.1.4 Diskussion der Versuchsergebnisse 125

6.1.4.1 Zerkleinerungsgrad von Silomais 127

Seite

6.1.4.2 Zerkleinerungsgrad von Maiskolben 135

6.1.4.3 Energiebedarf für die Zerkleinerung von Silomais 137

6.1.4.4 Energiebedarf für die Zerkleinerung von Maiskolben 143

7. Modifizierte Feldhäckslerkonzeptionen 146

7.1 Doppeltrommel-System 146

7.2 Universal-Maisschroter 150

8. Schlußbetrachtung 153

9. Formelzeichen, Begriffe und Definitionen 162

10. Literatur mit Kurzverzeichnis 168

11. Anhang 186

1. Einführung und Zielsetzung

Mais ist mit einem Jahresertrag von 385 000 t nach Weizen die wichtigste Körnerfrucht der Erde (1). Davon werden über 72 % als Futter verwertet, in hochentwickelten Ländern beträgt dieser Anteil über 87 %, RINTELEN 1971 (2). Regional, auch in Deutschland, ist der Silomaisanbau ungleich bedeutender, für den jedoch weltweit keine Ertragsangaben vorliegen. Daher scheint die Annahme berechtigt, daß es sich bei Mais gesamtwirtschaftlich um die wichtigste Kulturpflanze der Erde handelt, ZSCHEISCHLER 1979 (3).

Mais wird in Mittelamerika seit etwa 5 000 v. Ch. angebaut. Aufgrund dieser klimatischen Herkunft und den daraus resultierenden physiologischen Eigenschaften reift Mais in Mitteleuropa auf allen Standorten unterschiedlich aus. In Deutschland wird sein genetisches Ertragspotential nicht annähernd ausgenutzt. Anbauverfahren zur Verbesserung des Boden- und Kleinklimas belegen dies auch für angepaßte Sorten mit niedrigen Reifezahlen, KROMER et al. 1981 (4). Infolge dessen erfolgt die Ernte von Mais in allen Reifestadien und in verschiedenen Verwertungsstufen. Von praktischer Bedeutung sind die sechs Ernteprodukte Grünmais, Silomais, Maiskolbenschrot, Korn-Spindel-Gemisch, Körnermais und Maisstroh,(2), GROSS 1974 (5), ESTLER 1981(6). Gekennzeichnet durch unterschiedliche Energieerträge, Massenerträge Stoffeigenschaften und Struktur sind damit auch die Parameter der zugehörigen landtechnischen Arbeitsverfahren sehr verschieden.

Die verlustarme Nutzung der vorgenannten Maisprodukte als Futter, Nahrungsmittel oder industrieller Rohstoff erfordert zwingend eine Verfeinerung der Materialstruktur durch Z e r k l e i n e r u n g. Erst die Verringerung der Teilchengröße und die damit verbundene Vergrößerung der Oberfläche sichert oder erleichtert wesentlich alle verwertungsrelevanten Vorgänge, wie Förderung, Mischung, Dosierung, Verdichtung und Fermentation. Daher ist die Notwendigkeit der Zerkleinerung von Mais für alle Prozeßphasen der Bergung, Konservierung und Futtervorlage anerkannt, BRENNER et al. 1963 (7),

1967 (8), HILDEBRAND et al. 1969 (9), BAADER 1970 (10), ZIMMER 1976 (11), DERNEDDE et al. 1977 (12), WENNER et al. 1980 (13). Dies gilt auch hinsichtlich der Berücksichtigung zusätzlicher Forderungen der Tierernährung; KIRCHGESSNER 1975 (14), ZIMMER 1978 (15), ROHR 1979 (16), SCHWARZ et al. 1982 (17).

In der BR Deutschland wird praktisch die gesamte Anbaufläche von Silomais - 778 849 ha (1982) und von Körnermais -160 252 ha (1982) als Futter geerntet; die Stärkemittelindustrie deckt ihren Bedarf mit Importware (19). Aufgrund dessen ist für die nachfolgende Betrachtung der Maiszerkleinerung eine Beschränkung auf die Verwendung von Mais als Futter oder Futtermittel zulässig. Da kein ganzjähriger Maisanbau möglich ist, ergibt sich für eine ganzjährige Fütterung die Notwendigkeit der Bevorratung, d.h. der Konservierung und Lagerung, ZIMMER 1974 (20). Deshalb leiten sich die Ziele der Maiszerkleinerung aus den fütterungstechnischen und den konservierungstechnischen Anforderungen ab.

Die verschiedenen Ernteverfahren von Mais sind vielfach und hinreichend beschrieben worden (2 bis 9). Da die Zerkleinerung ein mechanisierungsfreundliches "Schüttgut" schafft, mit Vorteilen bei allen Arbeitsvorgängen, erfolgt sie möglichst zu Beginn des Ernteverfahrens. Tatsächlich wird auch die Silomais-Anbaufläche in Deutschland ausschließlich mit dem Feldhäcksler geerntet.Legt man das Durchsatzvermögen von 48 in der BR Deutschland angebotenen Feldhäckslern zu Grunde,so entfallen davon 68 % auf Feldhäcksler mit einem Trommelschneidwerk. Bei Maschinen hoher technischer Durchsatzleistung wird dieses sogar ausschließlich verwendet. Daraus wird die einschränkende Betrachtung der Maiszerkleinerung für den Einsatz von Trommelschneidwerken, den Häckslertrommeln,abgeleitet. Die Wertung der verschiedenen Häcksler-Bauarten ist aus der Literatur hinreichend bekannt, (6,7,8,13), GLUTH und VOSS (21), GRIMM et al. 1969 (22), KANAFOJSKI 1974 (23), KROMER 1967 (24).

Bei den in Mitteleuropa gebräuchlichen Ernte-, Konservierungs- und Fütterungsverfahren erfolgt die Zerkleinerung des Futters nicht ausschließlich im Häcksler-Aggregat. Vielmehr unterliegen alle Pflanzenteile in allen Prozeßphasen unterschiedlich starken Beanspruchungen, die beim Überschreiten der Materialfestigkeit zu einer Zerkleinerung führen. Im Material- oder Stoff-Flußbild der verschiedenen Ernteprodukte, Abb. 1. sind Ort und Grad der Zerkleinerung in Symbolen ausgewiesen. Daraus wird auch ersichtlich, daß der Einsatz von Trommelschneidwerkes nicht auf den Feldhäcksler begrenzt sein muß und so ein zentrales Maschinenelement in der Mechanisierung des Maisanbaues darstellen kann.

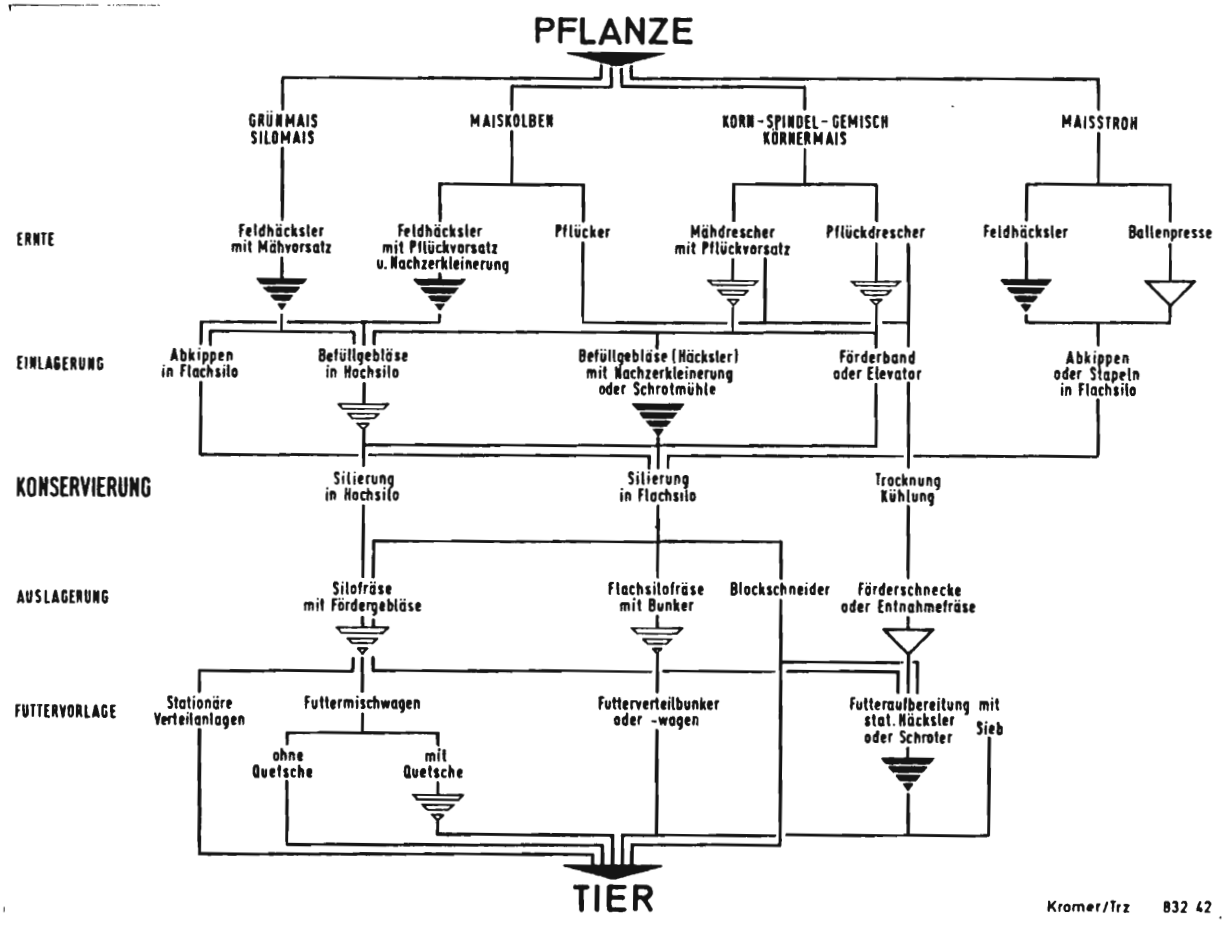


Abb. 1: Maschinentechnik und Grad der Zerkleinerung im Stoff-Fluß der Maispflanze als Tierfutter

Eine ganzheitliche Betrachtung führt dann zur Aufstellung eines polyfaktoriellen, mehrstufigen Modelles, wie es ZIMMER 1974 (20) für das System "Pflanze - Konservierung - Tier" erarbeitet hat. In der Praxis sind es technologische Vorgänge, die die einzelnen Glieder miteinander verbinden, dokumentiert durch die landtechnischen Arbeitsverfahren der Futterbergung und der Futterbereitstellung. Da deren Ergebnis an biologischen Leistungsparametern gemessen wird, handelt es sich um ein biologisches Modell. Dieses kann nur in Kenntnis der biologischen Randbedingung und der biotechnischen Eigenschaften des Ernteproduktes, auch deren Änderung in den verschiedenen Prozeßphasen, bearbeitet werden. Dafür genügt die Produktbeschreibung über Energieinhalt, Futterwert, Nährstoffgehalt, Verdaulichkeit u.ä. der Pflanzenteile und deren Gemische vor und nach der Konservierung nicht. Für den Prozeßablauf, das Ergebnis und die ökonomische Wertung stellen vielmehr auch die physikalischen Stoffeigenschaften unerlässliche Parameter dar, da von ihnen der Stoff- und vor allem der Energiefluß des Verfahrens abhängt.

Insofern ist auch die Auslegung, die Konstruktion und die Auswahl von Zerkleinerungsgeräten auf die Kenntnisse aller Stoffkenngrößen angewiesen. Im Gegensatz zur industriellen Produktion existieren jedoch für die "Werkstoffe" der landwirtschaftlichen Produktion keine zusammenfassenden Tabellen der relevanten physikalischen Stoffeigenschaften. Vielmehr handelt es sich hier um einen sehr jungen Zweig der landtechnischen Wissenschaft, BURMISTROWA 1963 (25), MOHSENIN 1970 (26). Daher waren der Geräteentwicklung in einer ganzheitlichen Betrachtung Grenzen gesetzt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die physikalischen, verfahrens- und maschinentechnischen Voraussetzungen der Maiszerkleinerung zusammenzufassen und sofern möglich, zu tabellisieren. Dies geschieht unter Berücksichtigung der einschlägigen Literatur, eigener Forschungsergebnisse und Erfahrungen mit der Konstruktion von Feldhäcksler-Trommeln.

Im einzelnen gliedert sich die Arbeit in die

- zusammenfassende Darstellung der für die Zerkleinerungsrelevanten Stoffeigenschaften von Mais in Stoffblättern
- Definition der Ziele der Maiszerkleinerung und Aufstellung einer Anforderungsliste für Trommelschneidwerke
- theoretische Betrachtung der Zerkleinerung in Trommelschneidwerken und deren konstruktive Auslegung.
- experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung von Verknüpfungsfaktoren zwischen Energiebedarf und dem Zerkleinerungsergebnis.

Als Ordnungsprinzipien dienen angepasste Konstruktionsmethodiken des allgemeinen Maschinenbaues, SEGLER 1955 (27), PAHL et al. 1977 (28), EHRENSPIEL 1979 (29). Hierdurch soll sichergestellt werden, daß die fachübergreifenden Kausalschleifen bei Konstruktion und Auswahl der Häckslertrommel- ausführung angemessen berücksichtigt werden.

Zweifellos müssen alle technisch-physikalischen Maßnahmen zur Zerkleinerung auch einer ökonomischen Überprüfung Stand halten und alle Gesichtspunkte der Kostensenkung in den verschiedenen Prozeßphasen berücksichtigt werden. In Einschränkung auf die maschinentechnische Problematik wird auf die Vorkalkulation der Herstellerkosten, die Ermittlung der Maschinenkosten und eine vergleichende Kostenrechnung der Arbeitserledigung verzichtet.

2. Biotechnische Stoffeigenschaften von Mais

Die Verringerung der Teilchengröße erfordert die Zerstörung der pflanzlichen Struktur und die Lösung der inneren Bindungskräfte. Dieser Vorgang wird als Zerkleinerung bezeichnet und in Trommelschneidwerken mechanisch verwirklicht. Daher sind die "pflanzlichen" oder biologischen Stoffeigenschaften mit den biophysikalischen, speziell den mechanischen Stoffeigenschaften von Mais verknüpft. Dieser Verknüpfung wegen, werden sie den biotechnischen Eigenschaften zugeordnet. Definitionsgemäß beschreibt oder untersucht die Biotechnik biologische Erscheinungen mit technischen Methoden, z.B. den Widerstand gegen Abscherung mit der Scherbruchspannung.
Hinzu kommen noch kennzeichnende Stoffwerte zur Beschreibung der Gesamtpflanze, einzelner Pflanzenteile oder deren Gemische. Sie sind zur Kennzeichnung des Stoffverhaltens bei allen Verfahrensabläufen notwendig, z.B. bei der Förderung und Lagerung.

Die biologischen -, die mechanischen Eigenschaften und die Stoffwerte werden nachfolgend getrennt behandelt. Funktionale Abhängigkeiten, auch untereinander, sind als Größengleichungen angegeben.

2.1 Biologische Stoffeigenschaften

Zu den zerkleinerungsrelevanten biologischen Eigenschaften von Mais gehören seine Morphologie und damit die genetische Herkunft, der Reifeverlauf und damit der Sorteneinfluß und die Ertragsstruktur, u.a. der Masse, der Nährstoffe und der Rohfaser.
Von den Einflußgrößen auf die biotechnischen Eigenschaften, nimmt der Trockenmasse - Gehalt eine Sonderstellung ein, da er in hohem Maße an allen physiologisch relevanten Wirkschemen beteiligt ist.

Zum Verständnis dieser Wirkschemen wird eingangs auf den mikro- und makrostrukturellen Aufbau biologischer Materialien, hier des Maises, eingegangen. Daraus lassen sich später pflanzen-

spezifische Zusammenhänge, z.B. beim Schnittvorgang und bei der Ermittlung eines spezifischen Energiebedarfes ableiten.

2.1.1 Grundsätzliche Betrachtung des Pflanzenaufbaues

Die Festigkeit der verschiedenen Zellgewebe beruht auf dem Anteil und der Orientierung fadenförmiger Zellulosemoleküle (Mikrofibrillen). Infolgedessen besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit von Zellgeweben und deren Zellulosegehalt, EVANS 1964 in (31), und damit auch mit dem Trockenmasse - Gehalt.
Das Wasserabsorptionsvermögen und das Quellvermögen hängt von den amorphen Zellwandteilen ab. Der daraus resultierende Zelldruck (Turgordruck) ist unmittelbar für rheologische Eigenschaften wie Elastizität, Schrumpfung u.a. verantwortlich, FREY-WYSSLING 1959 (32).
Beim Übergang zu Makrostrukturen wird der Trockenmassegehalt durch die molekulare Adsorption und die kapillare Absorption bestimmt. Bei der Adsorption handelt es sich um eine Art "Wasserbrücken" zwischen den Molekülen, womit sich die Zunahme der Plastizität mit der Feuchte erklären läßt. Die kapillare Absorption beruht bekanntlich auf der Oberflächenspannung und ist damit abhängig vom Radius der Kapillaren, der Gaskonstanten, der Dichte der Flüssigkeit, der Temperatur und den relativen Dampfdrücken. Hiernach lassen sich Probleme bei der Trocknung von Häckselgut, bestehend aus verschiedenen Pflanzenteilen und Teilchengrößen erwarten, da deren Sorptions-Absorptions-Isothermen verschieden sind. Es wurde dies auch für die einzelnen Bestandteile eines Maiskornes nachgewiesen, SHELEF und MOHSENIN 1966 (33).

2.1.2 Morphologie und Reifeverlauf

Der Mais gehört, wie Getreide, zur Familie der Gräser, er ist formenreich und daher sind seine kennzeichnenden Stoffwerte und Stoffeigenschaften sortenabhängig. Der morphologische Aufbau geht aus Abb. 2 hervor und erlaubt den Schluß, daß die Stengel- und Blatteile bei Berücksichtigung der Ähnlichkeitsgesetze in ihren Eigenschaften denen von Gräsern, Leguminosen und Getreide vergleichbar sind. Die Pflanzenstengellänge L_P schwankt zwischen 0,5 und 7 m, in Deutschland beträgt deren Spannweite 1,7 - 2,68 m, BRANDOLINI 1972 (37). Eigene Messungen bei der Feldhäckslererprobung in Südafrika und Mittelamerika erweitern die für Feldhäcksler zu beachtende Spannweite der Pflanzenlänge auf 4,2 m (38). Die Spannweite des Stengeldurchmessers beträgt 8 - 28 mm (37). Die Internodien sind im oberen Teil nahezu kreisförmig, das Innere des Stengels ist mit Mark gefüllt. Anzahl und Abreife der Blätter sind sortenabhängig, die Spannweite der Blattzahl beträgt in Deutschland und Südeuropa 8 - 16 (2, 37). Wichtig ist jedoch auch die Anzahl der Blätter über dem Kolben, die sortenabhängig 3 - 7 beträgt. Der Aufbau des Maiskolbens ist ebenfalls aus Abb. 2 ersichtlich, ergänzt durch die Darstellung der Ertragsstruktur in Abb. 3. Die Körner sind an der Spindel in der Regel paarweise um einen verholzten vieleckigen Zylinder mit weichem, parenchymatischem Kern angeordnet. Dabei sind die Körner in ein degeneriertes, vegetatives Material eingebettet. Es betragen die Spannweiten der Kolbenlänge L_{Ko} 110 - 250 mm, des oberen Kolbendurchmessers D_{Koo} 21 - 45 mm und des unteren Kolbendurchmesser D_{Kou} 23 - 57 mm. Sie beträgt für den mittleren Spindeldurchmesser D_{Sp} 31 - 52 mm. Die vorgenannten geometrischen Kennwerte sind Bestandteil der Stoffblätter in Kap. 2.3, wobei die Gültigkeit für den jeweiligen Maisstandort zu prüfen ist.

Bei den Körnern werden fünf Grundtypen unterschieden. Es sind dies in der Reihenfolge ihrer Verbreitung: Dent (Zahnmais) 73 %, Flint (Hartmais) 14 %, Flour 12 %, Sweet (Zuckermais) 1 % und Pop unter 1 % (36). Bereits die beiden Haupttypen unterscheiden sich gemäß Abb. 2 wesentlich im Aufbau, so daß der

Maistyp ein wichtiger Parameter für den Umfang der Kornbeschädigung und die Zerkleinerung darstellt. Der Gewichtsanteil des Endosperms (Mehlkörper) am Gesamtkorn beträgt 84 - 85 %, der Keimling hat eine blattähnliche Struktur.

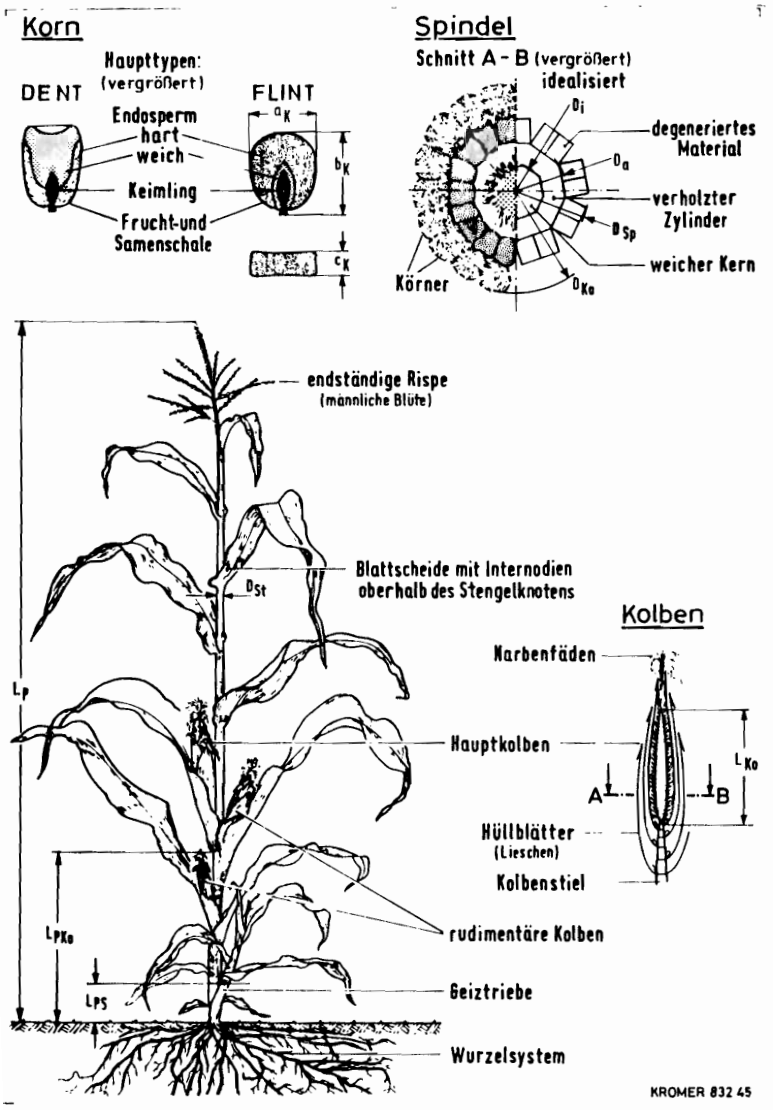


Abb. 2: Morphologie von Mais, Ouellen: (2, 3, 36, 37)

Das Pflanzenwachstum und der Reifeverlauf sind durch die Bildung von Trockensubstanz und damit den Trockenmassegehalt Z in den einzelnen Pflanzenteilen gekennzeichnet, Abb. 3. Daher werden die einzelnen Pflanzenbestandteile über der Vegetationszeit einen unterschiedlichen, morphologisch bedingten Trockenmassegehalt aufweisen. Rohnährstoffgehalt und Verdaulichkeit von Rohprotein und Rohfaser hängen zusätzlich signifikant vom Trockenmassegehalt im Kolben ab. ZSCHEICHLER 1979 (3), und GROSS 1982 (39). Auf die energetische Bewertung der Ernteprodukte wird noch in Kap. 2.3 eingegangen. Im Kolben besteht zusätzlich eine physiologische Abhängigkeit von Korn- und Spindel-Trockenmassegehalt. Der Trockensubstanzzuwachs endet bei ca. 40 % TM in der Gesamtpflanze ($Z_P \approx 40$ %), ca. 50 % TM im Kolben ($Z_{Ko} \approx 50$ %) und ca. 60 % TM im Korn ($Z_K \approx 60$ %). KRAXNER 1979 (40) hat jedoch auf die in der Fachliteratur sehr unterschiedlichen Angaben des Trockenmassegehaltes im Korn zum Zeitpunkt der physiologischen Reife hingewiesen. Aufgrund dessen ist als optischer Indikator die Ausbildung eines schwarzen Punktes, der Trennschicht an der Kornwurzel, zur Reifekennzeichnung heranzuziehen. Der damit verbundene Abfall der erforderlichen Trennkraft Korn-Spindel ist nicht nur für den Korndrusch, sondern auch für das Häckseln von Mais, speziell für die Größe der Kolbenstücke, von Einfluß.

Infolge der signifkanten Abhängigkeit der Trockensubstanzbildung bei Mais (C 4-Pflanze) von der Temperatur und dem Licht läßt sich die Abreife-Rate für einzelne Reifeabschnitte als Schätzfunktion darstellen (40). Bei Kenntnis aller Wachstumsparameter ist auch die empirische Bestimmung von standortgebundenen Schätzfunktionen des Ertrages möglich (2). Maisanbauversuche mit Mulchfolie, KROMER et al. 1980 (41, 42), 1981 (4) und 1982 (43) haben aber gezeigt, daß eine Tagestemperatur-Summenformel GDD (Growing Degree Days) Gl. (1), VIS 1981 (44), keine gesicherte Aussage über die Ertragsstruktur und damit den Pflanzenaufbau erlaubt:

$$GDD = \frac{(t_{Lmax} + t_{Lmin})}{2} - t_{Lsch} \qquad (1)$$

Dieses Ergebnis deckt sich mit Untersuchungen von STIEGER 1982 (45). GUZMAN-LOPEZ 1974 (46) beschränkte die Anwendung auf den Reifeabschnitt Z_K = 30 - 50 %. Der Grund liegt vor allem in der unzulässigen Vernachlässigung des Mikroklimas während der Keim-, Auflauf- und frühen Wachtsumphase, u.a. der Bodentemperatur und der bodennahen Lufttemperaturen. In vierjährigen Versuchen des Maisanbaues mit transparenter Mulchfolie wurde nicht nur eine statistisch gesicherte Steigerung des Trockenmasseertrages aller Ernteprodukte nachgewiesen, sondern auch eine signifikante Erhöhung des Trockenmassegehaltes und die Erhöhung des Korn-Spindel-Anteiles an der Pflanzen-Gesamttrockenmasse.

Zum Zeitpunkt der physiologischen Reife des Kornes beträgt der Trockenmassegehalt in der Gesamtpflanze Z_P = 30,8 - 39 % (9, 39). Es ist dies der optimale Zeitpunkt für die Silomaisernte, da anschließend eine passive Trocknung einsetzt. Hierbei trocknen die Pflanzenteile unterschiedlich und sortentypisch ab. Infolge dessen handelt es sich bei den Ernteprodukten aller Verwertungsstufen um ein Gemisch von Pflanzenteilen unterschiedlicher Struktur, Massenanteile und Feuchte. Im logischen Schluß sind auch unterschiedliche Stoffwerte und Festigkeitseigenschaften zu erwarten, mit den daraus resultierenden Konsequenzen für die Maschinenkonstruktion und den Energiebedarf.

2.1.3 Ertragsstruktur

Technische Zerkleinerungssysteme sind durch den Stoff- oder Massenumsatz und den Energieumsatz gekennzeichnet, die durch quantitative und qualitative Parameter präzisiert werden müssen.

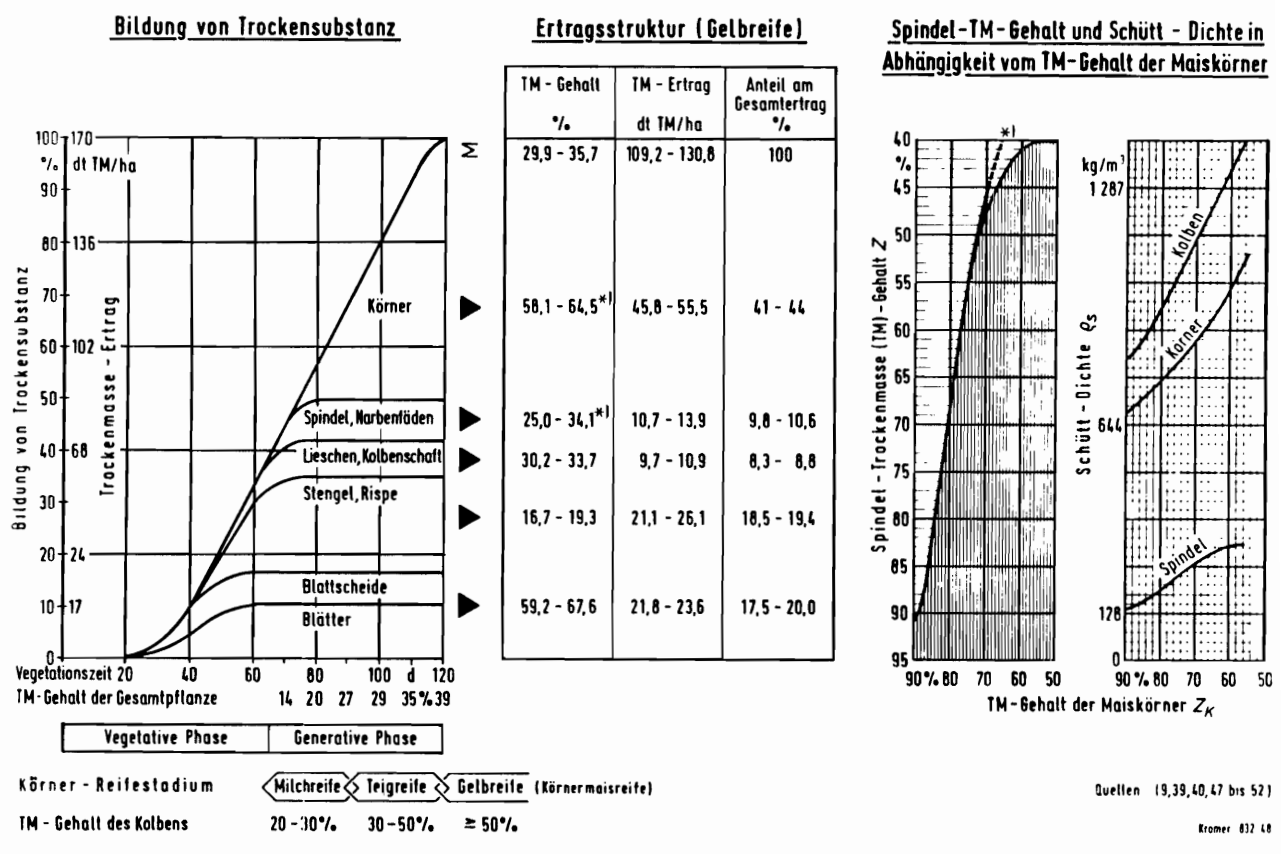
Für den Feldhäcksler erfolgt dies durch Angabe des Schlepper-Leistungsbedarfes für eine bestimmte Flächen- und/oder technische Durchsatzleistung bei vorgegebenen Zerkleinerungsgrad. Die Durchsatzleistung, allgemein verkürzt Durchsatz genannt, errechnet sich aus der geernteten Reihenzahl, der Arbeitsgeschwindigkeit und dem spezifischen Reihenertrag m_{sR} (Tab. 1), siehe auch Gl. (111).

Für die unterschiedlichen Mais-Ernteprodukte hängt der spezifische Reihenertrag von der Ertragsstruktur bzw. deren TM-Gehalt

ab. Bei den Ertragsangaben sind in der Regel die Ernteverluste bereits abgezogen. Die ertragsrelevanten Größen Ertragsstruktur, spezifischer Reihenertrag und Erntewirkungsgrad werden nachfolgend im einzelnen behandelt.

2.1.3.1 Verlauf der Ertragsstruktur

Die Reifeentwicklung (als Trockensubstanz-Bildung), die Ertragsstruktur für süddeutsche Anbauverhältnisse und die Trockenmasse-Verhältnisse im Kolben sind exemplarisch in Abb. 3 zusammengefaßt, ASAE 1978 (47), GRIMM 1979 (48), ROLLWAGEN et al. 1980 (49) und 1981 (50), KROMER et al. 1979 (51) und 1981 (52) sowie (3, 9, 39, 40). Die bekannte Abhängigkeit der Trockensubstanzbildung von der Vegetationszeit veranschaulicht die unterschiedliche Zusammensetzung des Erntegutes in Abhängigkeit vom Ernteverlauf. Der gleichermaßen angegebene Verlauf des TM-Ertrages weist darauf hin, daß in Deutschland das Ertragspotential von Mais nicht ausgeschöpft wird. Mit zunehmender Abreife erhöht sich neben dem Trockenmassegehalt der Körner auch ihr Anteil an der Gesamttrokkenmasse der Maispflanze.



TM-Gehalt %	TM-Ertrag dt TM/ha	Anteil am Gesamtertrag %
29,9 - 35,7	109,2 - 130,8	100
58,1 - 64,5*)	45,8 - 55,5	41 - 44
25,0 - 34,1*)	10,7 - 13,9	9,8 - 10,6
30,2 - 33,7	9,7 - 10,9	8,3 - 8,8
16,7 - 19,3	21,1 - 26,1	18,5 - 19,4
59,2 - 67,6	21,8 - 23,6	17,5 - 20,0

Abb. 3: Exemplarische Darstellung der Ertragsentwicklung und der Ertragsstruktur der Maispflanze in Süddeutschland, Verknüpfung der TM-Gehalte und Schüttdichten der Kolbenbestandteile mit dem TM-Gehalt der Körner (nordamerikanische Anbauverhältnisse). *korr. f.dt. Anbauverhältnisse

Die Massenstruktur, somit die Anteile der einzelnen Ernteprodukte und deren Trockenmassegehalte sind auf Grund der vorbeschriebenen Zusammenhänge auch vom Maistyp, Sorte und den Wachstumsfaktoren abhängig. Daher mußte in Abb. 3 die Abhängigkeit der TM-Gehalte von Korn und Spindeln für die angegebene süddeutsche Ertragsstruktur korrigiert werden. Der Anteil der Einzelkomponenten wird zusätzlich durch die Erntebedingungen, die Erntemaschine und deren Einstellung beeinflußt.

Der Anteil des Korn-TM-Ertrages kann bis 51 % betragen (53). In Korn-Spindel-Gemischen beträgt der Anteil der Spindeln bis 19,4 % der Gesamttrockenmasse, was sich mit Untersuchungen von ESTLER 1981 (6) (19,6 % und 26,4 % des Frischkolbens) und SCHNEIDER 1972 (53) (bis 14,4 % bzw. 21,95 %)deckt, infolge der unterschiedlichen Gutdichten (siehe Kap. 2.5) ist deren Volumenanteil doppelt so hoch.

In Maiskolbenschrot machen hingegen die Spindeln nur bis 17,3 %, die Lieschen und sonstigen Kolbenanteile bis 13,6 % und nach KRAXNER 1979 (40) die Blätter und Stengelanteile 1,5 bis 8,1 % der Gesamttrockenmasse aus. Weitere Angaben der Massenstruktur finden sich bei GRIMM 1976 (66).

Für Silomais gelten die in Abb. 3 angegebenen Anteile am TM-Gesamtertrag. Die Spannweiten der Erträge sind vielfach veröffentlicht (2, 3, 5, 36). In Tab. 1 sind die Durchschnittserträge in Deutschland von 1978 - 81 und 1981 angegeben (18).

Die Maisstroh-Ernte erfolgt nach der Körner- oder Maiskolbenernte, der Restpflanzenanteil ist abhängig vom Ernteverfahren. Ende der 60iger Jahre finden wir sowohl in Osteuropa als in den USA eine maschinentechnische Entwicklung für die Ernte der Restpflanze nach der Körnermaisernte, KROMER 1971 (54). In Osteuropa wurde dabei der Weg der Firma Case aus den Jahren 1945/46 beschritten und der Mähdrescher mit einem Trommelfeldhäcksler versehen oder mit Querförderschnecken ausgerüstet. Für das so gewonnene Erntegut wurde in den USA der Begriff "Stalklage" eingeführt. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei "Husklage" um das Schüttlerüberlaufgut eines Mähdreschers mit Pflückvorsatz.

Diese setzt sich also nur aus Spindeln, Lieschen und einem gewissen Kornanteil zusammen. Neue technische Lösungen erlauben die gezielte Ernte unterschiedlicher Anteile von Spindeln und Lieschen, CHUNG et al. 1981 (63), BARGIEL et al. 1982 (64). Die Ernte-TM-Gehalte betragen je nach Standort für Stalklage 44,0 bis 48,0 % und für Husklage 52,0 - 61,2 %. In den 60iger Jahren waren auch bereits Vollernter auf Häckslerbasis im Einsatz, die eine parallele Ernte der verschiedenen Maisbestandteile erlaubten (56). Für das Erntegut nach dem Mähdrescher wurden Hammermühlen mit einem rotierenden Vorratsbehälter entwickelt, die inzwischen auch in Europa als "Tube Grinder" zu einem Standardgerät der Strohzerkleinerung geworden sind. In eigene Untersuchungen der Feinzerkleinerung in Feldhäckslern war seit 1971 auch die Maisstrohernte einbezogen, die Forschungsergebnisse sind die Grundlage der Bewertung dieses Verfahrens in der BR Deutschland, KROMER 1971 (55), 1972 (57), 1977 (58), 1978 (59), 1979 (60) und 1981 (58). Dabei wurde auch die derzeit aktuellere Energienutzung der Abfallprodukte nach der Körnermaisernte berücksichtigt, KROMER und MARTINOV 1981 (62), (62, 64), siehe Stoffblatt Maisstroh, S. 47.

2.1.3.2 Spezifischer Reihenertrag

Der Ermittlung des spezifischen Reihenertrages (Tab. 1) sind die Mittelwerte der statistischen Ertragsangaben der BR Deutschland für die Jahre 1975 bis 1981 sowie das Jahr 1981 zu Grunde gelegt (18). Sofern die Maisernteprodukte in den statistischen Unterlagen nicht geführt werden, sind die aus der Literatur bekannten Spannweiten der Flächenerträge eingesetzt (40, 50 - 52, 66).

Tabelle 1: Erträge der verschiedenen Maisernteprodukte in der BR Deutschland (Reihenabstand 0,75 m)

Ernteprodukt	Massenertrag M_E 1975 - 81 dt/ha	Massenertrag M_E 1981 dt/ha	spez. Reihenertrag m_{sR} 1975 - 81 kg/m	spez. Reihenertrag m_{sR} 1981 kg/m	Quelle
Körnermais	57,3	64,8	0,86	0,97	64
Maiskolben	69,6	78,7	1,04	1,18	64
Maiskolbenschrot	110 - 150		1,65 - 2,25		40,48,65
Grünmais (Silomais)	445,8	485,2	6,69	7,28	64
Maisstroh	66,5 - 150		1,00 - 2,25		50,51,52

Silomais ist das vorrangige Erntegut, so daß der Feldhäcksler für den Silomais-Massedurchsatz dimensioniert ist. Zur Ausnutzung des Durchsatzvermögens ist dann gemäß Tab. 1 für die anderen Ernteprodukte ein Mehrfaches der Reihenzahl für Silomais erforderlich, sofern nicht Einbauten eine Verringerung des maximalen Durchsatzes bewirken. Voraussetzung eines bestmöglichen Feldhäckslereinsatzes für alle Ernteprodukte ist demnach die Verfügbarkeit geeigneter Anbauvorsätze (54, 55), siehe auch Abb. 1.

Die Ertragsangaben machen keine Aussage über die tatsächlich aufgewachsenen Pflanzenmassen, da die Ernteverluste nicht enthalten sind. Zur Abschätzung der möglichen Spannweite des spezifischen Reihenertrages sind daher in Tab. 2 die derzeit gültigen Bereiche der Erntewirkungsgrade angegeben.

Für die Errechnung der Futtermassen sind zusätzlich die Konservierungsverluste (TM- und Sickersaftverluste) zu berücksichtigen. Bei Beurteilung des Energie-Gesamtumsatzes kommen auch die Nährstoffverluste hinzu, siehe auch Kap. 2.4 (3, 5, 9, 11, 15, 40, 50, 68).

Für den Massenertrag (Flächenertrag) gilt dann:

$$M_E = M_A \cdot \eta_E \qquad (2)$$

und den spezifischen Reihenertrag

$$m_{sR} = M_A \cdot \eta_E \cdot RA^{-1} \qquad (3)$$

sowie die geerntete Futtermasse

$$M_{Futter} = M_A \cdot \eta_E \cdot \eta_K \qquad (4)$$

Tabelle 2: Bereiche des TM-Gehaltes bei der Ernte und der Erntewirkungsgrade ausgewählter Erntetechniken von Mais (unterer TM-Gehalt = Einsatzgrenze)

Ernteprodukt	TM-Gehalt bei d.Ernte Z_E %	Ernte-wirkungs-grad η_E %	Erntetechnik	Quelle
Körner	≥ 50 55 - 60	85 - 90 94 - 96	Mähdrescher (MD)	6,13,40,67
Korn-Spindel-Gemisch	50 - 60 ≥ 60	95 - 97 97 - 98,1	Mähdrescher (MD)	6,13,40,67
Maiskolben und -schrot	43,9 - 50,9	87,4 - 99,5 ≥ 96,6	Feldhäcksler (FH) mit Pflückvorsatz	40,66 6
Grünmais (Silomais)	20 - 30	≥ 98	Feldhäcksler (FH) mit Mähvorsatz	geschätzt
Maisstroh	25,9 - 28,4	35 - 44	Feldhäcksler (FH) mit Schlegel- od. Reihen-Mähvorsatz	51,52

Die Auflistung der Erntewirkungsgrade in Abhängigkeit von dem Trockenmassegehalt des Erntegutes veranschaulicht die bekannte Tatsache, daß dem Mähdrescher verwandte Erntetechniken, z.B. dem Pflückdrescher, engere Einsatzgrenzen gesetzt sind als dem Feldhäcksler; die unteren TM-Gehalte stellen in der Regel die

Einsatzgrenze dar. Auf Grenzstandorten, d.h. dort, wo der Mais nicht sicher die Gelbreife erreicht, scheiden die MD-Verfahren weitgehend aus, da gemäß Abb. 3 Teile des Kolbens noch einen wesentlich geringeren TM-Gehalt aufweisen. Demgegenüber ist der Feldhäcksler für alle Ernteprodukte geeignet, einschließlich dem Schroten von Körnermais, so daß in der Anforderungsliste für Feldhäckslertrommeln alle Ernteprodukte aufgenommen werden müssen. Für die Ernte von Maisstroh muß gemäß Tab. 2 die Aufnahmetechnik weiterentwickelt werden, um so den Erntewirkungsgrad und damit den Massenertrag zu steigern. Dies ist bereits bei der Feldhäckslerkonstruktion zu berücksichtigen,da Maisstroh siliert, konkurrieren kann (49, 50).

2.1.3.2 Energiegehalt

Das eingangs erläuterte biotechnische Modell bedarf zur Ermittlung des energetischen Wirkungsgrades noch der Angaben über den Brutto- oder Nettoenergiegehalt des Erntegutes und deren Verwertung im Tier. Der Energiegehalt wird vielfältig und in Abhängigkeit von der Tierart als Rohnährstoffgehalt (% der TS), Gesamtnährstoffe (GN/kg oder kg/TS), total digestible nutrience (% TDN), Rohproteingehalt (%), Futterwert (FE), Stärkewert (StE/kg) oder als Nettoenergie-Laktation NEL (J/kg TS) angegeben. Diese Stoffkennwerte machen entweder nur eine Aussage über die enthaltenen Nährstoffe, die Nährstoffkonzentration,oder enthalten bereits eine Aussage über die Verdaulichkeit, wie z.B. NEL. Derzeit ist in Deutschland die Angabe des Nettoenergiegehaltes in StE/kg TM, StE/kg oder StE/ha am verbreitetsten (3, 4, 14, 16, 17, 39, 40, 57). Nach GROSS 1982 (39) kann der Nettoenergiegehalt von Maiskolben unabhängig vom TM-Gehalt als Mittelwert mit 768 StE pro kg TM angegeben werden. Demgegenüber nimmt er in der Restpflanze (Stengel, Blätter, Lieschen) mit der Reife und damit zunehmendem TM-Gehalt im Kolben ab. Er fällt von 576 StE/kg TM (Z_{Ko} = 10 %) auf 375 StE/kg TM (Z_{Ko} = 60 %). Durch die zuwachsende Energie im Kolben erhöht sich für die vorgenannten TM-Gehalte der Energieinhalt in der Gesamtpflanze von 585 auf 611 StE/kg TM. Mit diesen Werten, den Angaben in Abb. 3 und Tab. 1 kann der flächenbezogene Energieertrag berechnet werden. In Kap. 3 wird auf die aus der Literatur bekannten Zusammenhänge zwischen Futterstruktur, -zusammensetzung und der Verwertbar-

keit der aufgewachsenen Energie durch das Tier und den sich daraus abgeleiteten Verwertungsstufen hingewiesen. Hierbei ist das von ZIMMER 1974 (20) entwickelte Modell zu berücksichtigen, da die Verknüpfung von technologischer Aufbereitung und Konservierung den energetischen Wirkungsgrad verbessern kann.

Die Nutzung des Pflanzenbestandes zur Wärmeerzeugung ist nicht Thema der vorliegenden Areit, der Vollständigkeit halber sei auf die einschlägige Literatur und die darin enthaltenen Forderungen an Häckslertrommeln verwiesen (52, 62 bis 64). Relevante Stoffkennwerte sind in den Stoffblättern enthalten, für Maisstroh und Spindeln auch der untere Heizwert.

2.2 Mechanische Stoffeigenschaften

Die mechanischen Stoffeigenschaften gehören zu den physikalischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Produkte, die sich grundsätzlich in mechanische, thermische, elektrische und optische Eigenschaften unterteilen lassen, MOHSENIN 1970 (26). Die mechanische Zerkleinerung erfolgt durch die Einleitung äußerer Kräfte in Form von Zug-, Druck-, Biege-, Scher-, Reibungs- und Massenkräften in das Pflanzengewebe.

Daher sind die mechanischen Eigenschaften sowohl mit den zuvor behandelten biologischen Stoffeigenschaften und damit dem Trockenmassegehalt, als auch dem Beanspruchungsmechanismus und der Zustandsform, bzw. den kennzeichnenden Stoffwerten verknüpft.

Aufgrund dessen ist dieses Kapitel unterteilt in die Behandlung der

- wirkenden Beanspruchungsmechanismen und den daraus abgeleiteten relevanten mechanischen Eigenschaften
- Stoffwerte
- mechanische Eigenschaften von Mais-Pflanzenteilen oder -Ernteprodukten.

2.2.1 Beanspruchungsmechanismen und abgeleitete mechanische Eigenschaften

Die Zerkleinerung von Mais beginnt beim Trenn-Schnitt der Pflanze zur anschließenden Ernte. Bereits dieser Schnittvorgang ist, abhängig von der verwendeten Gerätetechnik, primär eine Scherbeanspruchung, oder setzt sich aus einer Kombination z.B. mit Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung zusammen. Infolge dessen bietet sich der in der Maschine wirkende Beansprechungsmechanismus und die erzeugende Werkzeugform zur Systematisierung von Halmgutzerkleinerungsmaschinen an, STROPPEL 1952 (34), BAADER 1970 (10), KANAFOJSKI 1974 (23).

Auf Grund der thematischen Beschränkung wird nachfolgend nur die Beanspruchung in Trommelschneidwerken behandelt, wobei Bezüge zu anderen Rauhfutter-Schneidwerken exisitieren, siehe u.a. O'DOGHERTY 1982 (35).

Grundsätzlich ist in zwei vorherrschende Beanspruchungsmechanismen zu unterscheiden (Abb. 4):

- Beanspruchung zwischen zwei Festkörperflächen
- Beanspruchung an einer Festkörperfläche.

Die Beanspruchung einzelner Pflanzenteile oder deren Haufwerken setzt sich in der Praxis aus einer Mischung von Zug-, Druck-, Biege-, Scher- und Reibungskräften zusammen (Mechanismus I). Bei der Materialübernahme in Häckslertrommeln tritt gleichzeitig eine Prallbeanspruchung, eventuell auch ausschließlich durch gegenseitigen Teilchenstoß, auf (Mechanismus II). Dieser als Schnitt-Stoß bezeichnete Vorgang wurde vom Verfasser erstmals 1967 beschrieben (24) und war Grundlage weiterführender Betrachtungen im In- und Ausland, VRANY 1971 (71), ORTH 1975 (72), IGE und FINNER 1975 (73). Alle weiteren Beanspruchungsmechanismen, z.B. die nicht von einer Festkörperfläche ausgehende mechanische und nicht-mechanische Einleitung von Zerkleinerungsenergie, können bei der Zerkleinerung in Häckslertrommeln vernachlässigt werden.

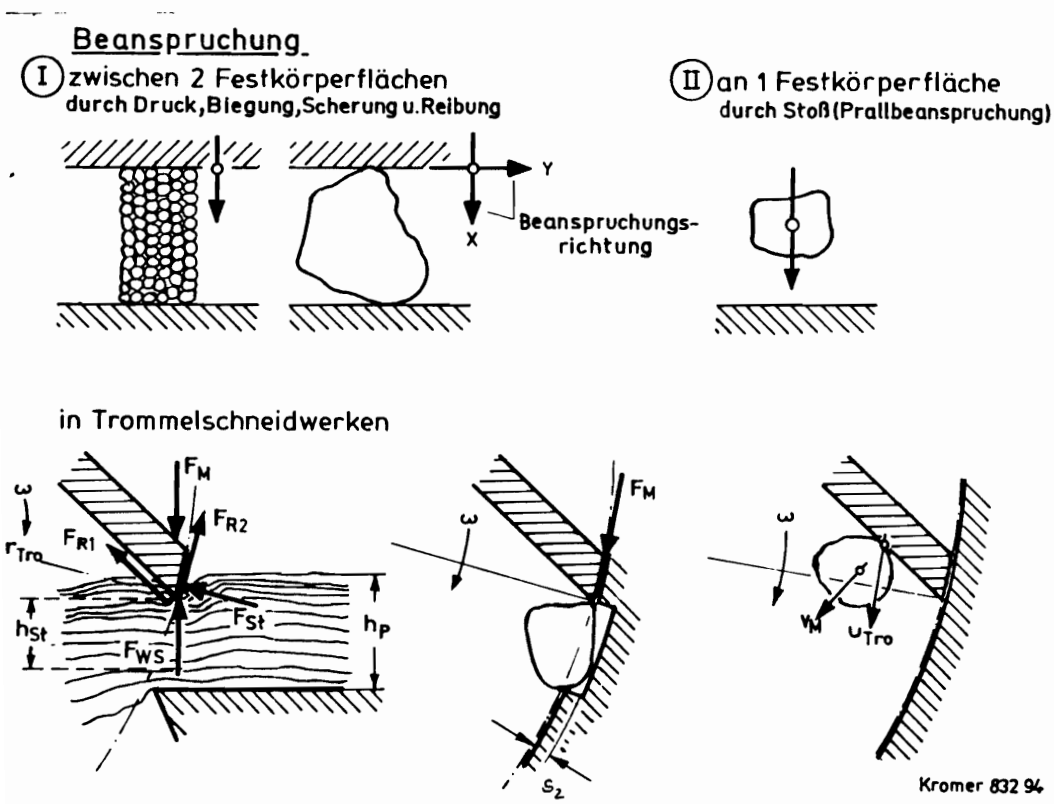


Abb. 4: Beanspruchungsmechanismen bei der Zerkleinerung von Mais in Häckslertrommeln

Damit läßt sich die Zerkleinerung auf die Bruchhypothesen der größten Normalspannung, der Formänderungs- oder der Gestaltänderungsarbeit zurückführen. Die sich daraus ableitenden Zerkleinerungsgesetze führen zu widersprüchlichen Aussagen (70), was aufgrund der unterschiedlichen Morphologie der einzelnen Pflanzenteile zu erwarten war. Da die Zerkleinerung das Überschreiten einer Grenzbruchfestigkeit voraussetzt, die empirisch ermittelt wird, soll vereinfachend die Annahme eines ebenen, elastischen Spannungszustandes zulässig sein. Das quasi-elastische und quasi-plastische Verhalten landwirtschaftlicher Stoffe ist vor allem für die Betrachtung der Materialbeschädigung angebracht. Damit verdichten sich die relevanten mechanischen Eigenschaften auf die nachfolgend diskutierten Eigenschaften:

2.2.1.1 Grenzbruchfestigkeit

Normal- und Schubspannungen sind die Anteile äußerer Kräfte, die auf die Flächeneinheit des noch nicht verformten Querschnittes entfallen (74). Normalspannungen wirken senkrecht zur Schnittfläche, Schubspannungen in der Schnittfläche. Diskutierbar ist die Ermittlung dieser Flächen, da für die elastische Formänderung nur die trockene Substanz in Frage kommt. Die Querschnittsmessung des Pflanzenteiles macht darüber keine Aussage, nach BURMISTROVA 1963 (25) kann diese das 5 bis 10 fache des Querschnittes der Trockenmasse ergeben. Eine Umrechnung ist durch die vergleichende Betrachtung der effektiven Dichte des biologischen Materiales ρ und der Zellulosedichte $\rho_T = 1570$ kg/m³ möglich (siehe auch Kap. 4). AHLGRIMM 1970 (31) wählte das indirekte Verfahren über die Materialmasse und die Trockenmassedichte nach

$$m_T = \rho \cdot V = \rho_T \cdot A_q \cdot l \qquad (5)$$

so daß für die Grenzbruchspannung (Zug oder Druck) gilt:

$$\sigma_B = F_B \cdot A_q^{-1} \qquad (6)$$

bezogen auf die Trockenmasse nach Gl. (5) gilt

$$\sigma_{BT} = \rho_T \cdot F_B \cdot l \cdot m_T^{-1} \qquad (7)$$

In der Praxis wird zur Umgehung dieser Problematik oft nur die Grenzbruchkraft F_B für einen definierten Querschnitt angegeben, siehe Abb. 5.
Analog gilt dann für die Scherbruchspannung

$$\tau_B = F_B \cdot A_q^{-1} \qquad (8)$$

$$\tau_{BT} = \rho_T \cdot F_B \cdot l \cdot m_T^{-1} \qquad (9)$$

Die Einordnung von Gl (4) - (9) hat nach der Beanspruchungsart zu erfolgen, da z.B. die Gutfeuchte die Schnittpolster- (Preßstrang-) höhe h_p und somit auch ΣF_{St} und ΣF_R bestimmt, siehe Abb.4.

2.2.1.2 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul ist bei biologischen Materialien nur ein dominanter Anstieg im quasi-elastischen Bereich. Seine Größe ist abhängig vom Schraubenwinkel der Mikrofibrillen (siehe Kap. 2.1) und dem aufgenommenen Wasser, PRESTON 1974 (75). Unter Last kann es zu einer Ausrichtung der Mikrofibrillen oder Gleiten ihrer Ketten kommen. Dieser Kriechvorgang führt allgemein zu einer Verfestigung und demzufolge einem höherem E-Modul. Dieser Vorgang tritt auch ohne weiteren Lastanstieg auf. Aus der amorphen Anordnung der Fibrillen wird u.U. eine isometrische Anordnung.

Für die vereinfachende Annahme der Pflanzengewebe als elastische Membrane, MOHSENIN 1970 (26) gilt $E=f(p_{Turgor})$ Andererseits ist die Zellwandspannung (= Vorspannung für äußerliche Belastung) ebenfalls proportional p_{Turgor} (= Turgordruck in der Zelle).

Zusammenfassend handelt es sich bei $E' = E$ ($\theta = \theta'$) gem. Abb.5 nur um den Anstieg der idealisierten HOOK'schen Geraden, der aber eine kennzeichnende Stoffeigenschaft darstellt. E ist abhängig von der Gutfeuchte bzw. dem TM-Gehalt, der Zeit (Geschwindigkeit der

Belastung) und der Belastungsart (Zug E_z, Druck E_d, Biegung E_b).

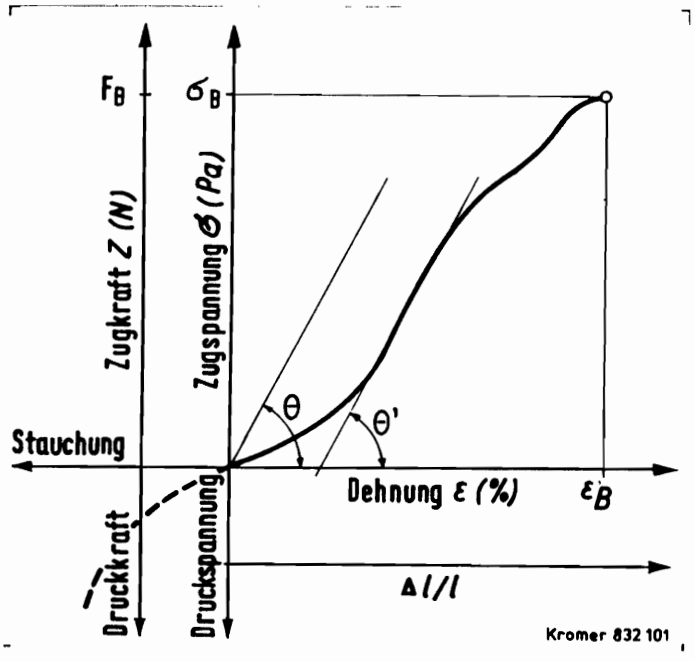


Abb. 5: Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm biologischer Materialien, nach (26)

$$E \mathrel{\hat{=}} E' = \tan \theta' = \Delta F \cdot \Delta\varepsilon^{-1} \qquad (10)$$

Die Bruchlängenänderung Δl_B wird für den Zugversuch als Bruchdehnung ε_B und für den Druckversuch als Bruchstauchung bezeichnet.

2.2.1.3 Poisson'sche Zahl (Poissonzahl)

Neben der Längenänderung in Belastungsrichtung, z.B. Dehnung ε, tritt in der rechtwinkeligen Ebene ebenfalls eine Längenänderung auf, z.B. eine Querkürzung ε_q. Das Verhältnis von Dehnung zu Querkürzung ist materialabhängig und daher eine kennzeichnende Stoffeigenschaft, die Poisson'sche Zahl ν, (Gl. 11)
Für eine Größenabschätzung beträgt ν für Metalle 0,3 , für Gußeisen ν = 5 - 9 (74).

$$\nu = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_q} \qquad (11)$$

2.2.1.4 Gleitmodul

Scherspannungen (gleichförmige Verteilung der Schubspannungen τ), bewirken Winkeländerungen (Schiebung γ) durch Verschiebung einer Begrenzungsfläche. Im elastischen Bereich sind τ und γ durch eine konstante Verhältniszahl, den Gleitmodul G verknüpft.

$$G = \tau_a \cdot \gamma^{-1} \tag{12}$$

Für die zuvor getroffenen Annahmen gilt auch (74)

$$G = E\,[2\,(1 - \nu)]^{-1} \tag{13}$$

so daß auch eine rechnerische Ermittlung mit Gl. (10) und (11) möglich wird.

2.2.1.5 Formänderungsarbeit

Wie eingangs erwähnt, gibt es keine gesicherten Zerkleinerungsgesetze. Für den ebenen Spannungszustand errechnet sich die spezifische Formänderungsarbeit A (zur Verformung notwendige mechanische Arbeit je cm^3)

$$A = A_v + A_g$$

$$= \frac{1 - 2\nu}{6\,E}\,(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + \frac{1 + \nu}{3\,E}\,(\sigma_1^{\,2} + \sigma_2^{\,2} - \sigma_1\sigma_2) \tag{14}$$

mit den Hauptspannungen σ_1 und σ_2 (74).

Die Zerkleinerung bewirkt in der Regel nur eine Gestaltänderung, d.h. $A_V \rightarrow 0$. Die kausale Abhängigkeit von σ_B und E läßt sich mit einem Korrekturfaktor k_A darstellen, so daß gilt

$$A = k_A \cdot \sigma^2 \cdot E^{-1} \qquad (15)$$

In der Praxis wird die erforderliche, mechanische Zerkleinerungsarbeit experimentell bestimmt, z.B. in Mahlbarkeits-Prüfern (70). Für Schneidtrommeln wird allgemein ein spezifischer Energiebedarf bezogen auf die Querschnittsfläche (35) oder auf die Masse ermittelt. Letzterer wird oft auch als spezifischer Arbeitsenergiebedarf bezeichnet und kann durch Einzelschnittauswertung des Drehmomentverlaufes (76, 77, 78) gemessen oder integrierend über den Leistungsbedarf für einen stündlichen Durchsatz von 1 t oder 1 tTM errechnet werden.

2.2.1.6 Reibungsbeiwert

Für die Relativbewegung zweier Körper gegeneinander und unter Einwirkung einer Normalkraft muß ein Reibungswiderstand überwunden werden. Dessen Größe wird durch den Reibungsbeiwert μ bestimmt, der im Ruhezustand (Haftreibung μ_H) größer ist als für den bewegten Fall (Gleitreibung μ). Dabei gilt allgemein $\mu \leq \mu_H \leq 1$. μ_H ist also für quasi-statische Belastungszustände, z.B. die Silolagerung, μ für die dynamischen Lastfälle, z.B. die Schlepp-Phase in der Häckslertrommel zu berücksichtigen. Beide sind abhängig von der Materialpaarung. Einflußgrößen sind demnach die Oberfläche (Rauhigkeit, Schmierung etc.), die Gleitfläche sowie der Zustand, die Form und die Größe der Maisbestandteile (TM-Gehalt, Haftwasser). Vor allem für Halmgut liegen umfangreiche Messungen vor, RICHTER 1954 (79), BLEVINS und HANSEN 1956 (80), WIENEKE 1956 (81), SACHT 1966 (82) und DERNEDDE 1970 (83).

2.2.2 Stoffwerte

Zur Charakterisierung der einzelnen Pflanzenteile oder deren Haufwerke sind kennzeichnende Stoffwerte erforderlich. Diese sind die Randbedingungen aller Prozessvorgänge der Futterernte und -bereitstellung, wobei vorwiegend die folgenden Werte von Bedeutung sind:

- Feuchtegehalt U oder Trockenmassegehalt Z
- Dichte ρ (Roh-, Trockenmasse-, Schütt-, Lagerdichte)
- Mengenmaße (Abmessungen, Oberfläche, Volumen, Masse, Anzahl)
- Form
- Oberflächeneigenschaften
- Schwerpunktlage

2.2.2.1 Trockenmassegehalt

Der Trockenmasse(TM)-Gehalt Z ist eine Basiszahl für die Bemessung der Futterration. Er gibt den Anteil der trockenen Substanz an der Gesamtmasse , sodaß auch die Bezeichnung Trockensubstanz (TS)-Gehalt gebräuchlich ist.
Die Gutfeuchte wird als Feuchtegehalt U oder als Feuchtegrad X angegeben. Der Feuchtegehalt ist der Quotient aus der Gewichtsdifferenz einer Probe nach einem Trocknungsvorgang und dem Ausgangsmaterial, Gl.(16a) (= moisture content wet basis). Bei der Errechnung des Feuchtegrades wird die Gewichtsdifferenz auf die trockene Probe bezogen, Gl.(16b) (= moisture content dry basis). In der englischsprachigen Literatur herrscht die Angabe des Feuchtegehaltes vor. Der TM-Gehalt in % errechnet sich als Differenzwert des Feuchtegehalte U in % zu 100, Gl.(17).

$$U = \frac{m - m_T}{m} \, 100 \qquad (16a)$$

$$X = \frac{m - m_T}{m_T} \, 100 \qquad (16b)$$

$$Z = \frac{m_T}{m} \, 100 = 100 - U \qquad (17)$$

Wie in Kap. 2 angeführt, sind die Desorptionsisothermen abhängig vom Pflanzenaufbau und unterschiedlich, daher gelten für die verschiedenen Gutarten und Futterkonserven unterschiedliche Kenngrößen der Trockenschrank-Methode (Tab. 5).

Tabelle 5: Kenngrößen der Trockenschrank-Methode zur Feuchte- bzw. Trockenmassegehaltsbestimmung, * bevorzugte Größen für Maishäcksel

Gutart	Trocknungs-temperatur °C	Verweil-dauer h	Proben-größe g	Quelle
Grünfutter (Grünmais)	103	20	≥ 25	88
Maiskörner	103	72	100	89
Silagen, Heu	105	24*	44 - 62	84
Gras, Luzerne, Mais	105*	20	100*	85

Daraus lassen sich die methodischen Probleme bei der Trockenmassebestimmung von Maisernteprodukten in der Gelbreife, also einem Gemisch von halmgutähnlichen Pflanzenteilen und ausgereiften Körnern, erkennen. Im Gegensatz zu den USA gibt es in Deutschland keine landtechnischen Normblätter, was die Vergleichbarkeit von Meßergebnissen einschränkt. Diese Tatsache ist zumindest bei der Deutung von Versuchsergebnissen anderer Verfasser zu berücksichtigen. Eine Heißluft-Schnelltrocknung mit Trockenzeiten von nur 10 bis 15 min kann mit hinreichender Genauigkeit zu dem vorbeschriebenen Trockenschrankverfahren korrigiert werden (84, 85, 86). Soll die Probe für spätere Anlysen verwendet werden, so ist bei Grünfutter die Trocknungstemperatur auf 63 °C und die Verweildauer auf 72 Stunden zu erhöhen. Für Nährstoffanalysen muß der Erhalt der flüchtigen Inhaltsstoffe sichergestellt werden, so daß hierfür nur die Toluol-Destillation oder die Gefriertrocknung in Frage kommt, mit geringer Einschränkung ist auch die Mirkowellentrocknung (Trocknungsdauer 8 - 30 min) geeignet (84, 87, 90). Zusammenfassend wird für die Ermittlung des Feuchtegehaltes von Maishäckselgut die Trockenschrankmethode mit der in Tab. 5 mit * gekennzeichneten Kenngrößen empfohlen, wie bei eigenen Versuchen (Kap. 6) angewendet. Für Maiskörner beträgt die Verweildauer 72 Stunden.

2.2.2.2 Dichte

Die Dichte eines Körpers ist nach DIN 1306 der Quotient aus Masse und Volumen, wobei die Poren nicht Teil des Volumens sind. Bei biologischen Materialien ist die Dichte vom Trockenmassegehalt abhängig und so auch eine TM-Dichte errechenbar, gekennzeichnet durch den Index T. Bei undurchlässigen Proben erfolgt die Dichtemessung gravimetrisch unter Verwendung einer Verdränger-Flüssigkeit bekannter Dichte ρ_F gemäß Gl. (21) mit $\rho \hat{=} \rho_R$.
Bei kleinen Poren, z.B. in verdichtetem Maisschrot und quasi undurchlässigen Einzelproben wird aber häufig die Rohdichte ρ_R bestimmt, d.h. die Poren sind Teil des Volumens V_R, Gl. (20), so daß dann $\rho \hat{=} \rho_R$.

$$\rho = m \cdot V^{-1} \tag{18}$$

$$\rho_T = m_T \cdot V^{-1} \tag{19}$$

$$\rho_R = m \cdot V_R^{-1} \tag{20}$$

$$\rho_R = m \cdot V_R^{-1} = m \cdot \rho_F \cdot m_F^{-1} \tag{21}$$

Für die Praxis ungleich bedeutender ist die Kenntnis der Schütt- und der Lagerdichte. Die Schüttdichte ist der Quotient aus dem Probengewicht m und dem Volumen V_S, das die Materialprobe bei loser Schüttung einnimmt (lose Schüttdichte ρ_S). In Anlehnung an DIN 52 110 wird die Schüttdichte in Meßgefäßen von 10 dm^3 Inhalt ermittelt (91).

$$\rho_S = m \cdot V_S^{-1} \tag{22}$$

Der Einfluß der Normalspannung auf die Schüttung wird bei Angabe der Lagerdichte ρ_L berücksichtigt. Hierfür müssen Randbedingungen (Lagerhöhe, Silostockhöhe, o.ä.) angegeben werden. Die Lagerdichte ist außerdem zeit- und strukturabhängig, worauf in Kap. 2.4 eingegangen wird. Die mittlere Lagerdichte $\overline{\rho}_L$ wird in der Praxis

a) über Registrierung der Einfüllmenge und Lagerhöhe ermittelt (ohne Zeiteinfluß und ohne Dichteverteilung)
b) über repräsentative Proben, z.B. die Dichte von Bohrkernen bestimmt (begrenzte Lagerhöhen oder bei Entleerung) (92) oder
c) mit Hilfe empirisch ermittelter Regressionsgleichungen, 'T HART et al. 1979 (94) errechnet.

Als Kenngröße der Lagerdichte findet sich in der Literatur auch die Angabe des Hohlraumanteiles H, der Porosität ψ_P (in Festkörpern), des Hohlraumes ΔV und des Porenvolumens, (90, 91).

$$H = \psi_P = (1 - \rho_S \cdot \rho_R^{-1}) \qquad (23)$$

$$\Delta V = V \cdot \psi \cdot \rho_H \qquad (24)$$

Diese Kennwerte können zur Strukturkennzeichnung dienen.
Bei Akzeptanz eines Fehlers von $\leq$ 2 % kann zur Dichtemessung auch ein Luft-Pycnometer oder Porosimeter verwendet werden, MESTER 1981 (93). Hierbei wird das BOYLE-MARIOTT'sche Gesetz für vergleichende Lufträume genützt. Nach dem Druckausgleich kann für gegebenen Eichfaktor, das Behälter- und Einfüllvolumen ermittelt werden. Bei einer beschränkten Aussagefähigkeit der repräsentativen Partikel- und Körperachse bezüglich der Oberfläche stellt dieses Verfahren eine geeignete Ergänzung der Definition des Zerkleinerungsgrades dar.

2.2.2.3 Mengenmaße

Bei der Bestimmung der Größe und Verteilung von Einzelpartikeln oder Partikelkollektiven sind Mengenmaße und Form miteinander verknüpft. Dabei kann als Mengenmaß die Anzahl, die Fläche (allgemein die Oberfläche), das Volumen oder die Masse gewählt werden. Nach MOHSENIN 1970 (26) kann das Volumen in guter Näherung über die Körperachsen ermittelt werden:

$$\log V_e = b_i \, \Sigma \log a_i \qquad (25)$$

Wobei i = 1 ... n die Anzahl der Körperachsen sind. Bei biologischen Stoffteilchen gilt i $\geq$ 3. In Kenntnis der Streuung von a_i können die Teilchen zur Vereinfachung der Betrachtung auf geometrisch einheitliche Körper, z.B. Kugeln, zurückgeführt und so über Anzahldurchmesser, Flächendurchmesser, Volumendurchmesser oder Massendurchmesser gekennzeichnet werden. Für die Errechnung der Masse mit dem Antilogarithmus von Gl. (25) gilt

$$m = \rho \cdot V_e \qquad (26)$$

so daß umgekehrt das Volumen oder repräsentative Achsen auch über die Einzelmasse oder die Verteilungsfunktion von Massenkollektiven ermittelt werden können.

Die Kenntnis des Volumens ist vor allem zur Berechnung der Zerkleinerungsarbeit für die vereinfachende Annahme der Raumtheorie erforderlich, SMIRNOW 1958 (95). Für die Flächentheorie (Ermittlung der Zerkleinerungskraft) und die Beschreibung der Wirkmechanismen bei Konservierung und tierischer Verwertung durch Wärme- und Stoffübergang ist das Mengenmaß Oberfläche ungleich wichtiger. Dessen Bestimmung über Körperachsen beinhaltet neben den vorgenannten Einschränkungen auch den Nachteil, daß die Struktur der Oberfläche und die molekulare Rauhigkeit nicht erfaßt wird. Dies ist nur durch Ausnutzung physikalischer Effekte möglich, die zugleich signifikant von der Oberfläche abhängen, RUMPF 1964 (96), BATEL 1971 (97).

Somit können grundsätzlich zwei Bestimmungsverfahren unterschieden werden:

- D i r e k t e Verfahren durch Messung einer Dispersitätsgröße (z.B. Raumachse, Projektionsfläche) mit integrierender Rechnung der Oberfläche als Summe der Teiloberflächen der Größenintervalle einer Größensortierung (z.B. Siebanalyse) oder einer Einzelteilvermessung und -zählung (z.B. optisch-elektronische Längenmessung) (97 - 100).
- I n d i r e k t e oder i n t e g r i e r e n d e Verfahren mit Bestimmung der Oberfläche des Teilchenkollektives über physikalische Effekte (z.B. Absorptionsverhalten, Sedimentation) (53, 101, 102).

Die Anwendbarkeit beider Verfahren ist mehrfaktoriell eingeschränkt. So ist bei der Siebanalyse die Teilchen- (Korn-, Partikel-) Größe nach unten begrenzt ($\geq$ 0,1 mm) (96). Die Berechnung der Oberfläche basiert außerdem auf der Ermittlung äquivalenter Raumachsen und damit geometrisch einheitlicher Körper, z.B. Kugel, Quader, Ellipsoid. Optisch-elektronische Verfahren sind für schwierige Probenteilung und geringe Probenzahlen zu arbeits-, geräte- und kostenaufwendig.

Integrierende Verfahren wie die Messung des Absorptionsverhaltens erfordern etwa gleiche Randbedingungen des Kollektives, z.B. Quellfähigkeit und Dichte. Da es sich bei Maishäckselgut stets um ein Mischkollektiv mit Teilchengrößen > 0,1 mm handelt, hat sich die Siebanalyse als Standardverfahren eingeführt und ist für körniges Gut genormt. Deren Anwendung ist jedoch für nicht geometrische Formen und Oberflächen grob gemahlener Körner, Flocken, Häckselteile und deren Gemische nur bedingt geeignet.

2.2.2.4 Form

Die Formabweichung von geometrisch einheitlichen Körpern wird durch einen flächen-, volumen- und formbezogenen Faktor (Kugelwert, roundness, sphericity etc.) berücksichtigt (26, 96). Auf deren Größe und die Ermittlung einer geeigneten Maßzahl mit Hilfe der deskriptiven Statistik wird in Kap. 4.1 eingegangen.

Für TM-Gehalte unter 83 % besteht für bestimmte Futtermittel bei einer Klassierung durch Siebe die Gefahr der Klumpenbildung und Verstopfung. Eine Trocknung bewirkt jedoch schon eine Pseudozerkleinerung durch Oberflächenspannungen und Kornschrumpfung. Aufgrund dessen kann der Zerkleinerungsgrad ohne Vortrocknung nur über ein integrierendes Verfahren, das Absorptionsverhalten, bestimmt werden, BERNHARD 1967 (101). Da die Sauggeschwindigkeit eines quellfähigen Stoffes eine Funktion seiner Oberfläche ist, kann die gesamte Oberfläche durch die absorbierte Wassermenge ermittelt werden. Die so gewonnene Absorptionszahl ist ein Maß für den Zerkleinerungsgrad und gemäß Kap. 3 auch für die Verdaulichkeit. Da es sich jedoch bis auf das Ernteprodukt Maiskörner stets um ein Stoffgemisch unterschiedlicher Einzelquellfähigkeiten handelt, hat sich das Verfahren in der Praxis nicht eingeführt.

2.2.2.5 Oberflächenbeschaffenheit

Auf den Einfluß der Oberflächenstruktur hinsichtlich der Trocknungskinetik war bereits hingewiesen worden. Für den Zerkleinerungsvorgang ist vor allem der Einfluß der Mengenmaße auf die Reibungsbeiwerte und die Verdichtbarkeit relevant. Auf diese

Weise werden die Stoffwerte; Lager- und Schüttdichte, Form und Oberflächenbeschaffenheit verknüpft. Die Reibungsbeiwerte für Häckselgut gegenüber Metallflächen sind aus der Literatur bekannt und werden in den Stoffblättern Mais berücksichtigt (79, 81, 102).

2.2.2.6 Schwerpunktlage

Bei der Klassierung nach repräsentativen Körperachsen bestimmt die Schwerpunktlage die rechnerische Abhängigkeit von Siebdistanz, z.B. Lochdurchmesser und Teilchengröße. Hierauf wird vertieft in Kap. 4.1 eingegangen.

Die für die Trocknung relevanten Kennwerte des Strömungswiderstandes und deren Beeinflussung durch die Raumdichte und die Feinanteile in den Schüttungen werden in der vorliegenden Arbeit nur in Literaturhinweisen berücksichtigt (103, 104, 105).

2.2.2.7 Strömungswiderstand

Die für die Trocknung relevanten Kennwerte des Strömungswiderstandes und deren Beeinflussung durch die Raumdichte und die Feinanteile in den Schüttungen werden in der vorliegenden Arbeit nur in Literaturhinweisen berücksichtigt (103, 104).

2.2.3 Mechanische Eigenschaften der Pflanzenteile

Die relevanten mechanischen Eigenschaften sind nach den in Kap. 2.2.1 dargestellten Beanspruchungsmechanismen für Maiskörner und -spindeln die Grenzbruchfestigkeiten für Druck und Biegung, der Elastizitätsmodul, die Poisson'sche Zahl und der Reibungsbeiwert. Für halmgutähnliche Pflanzenteile, wie Stengel, Blätter und Lieschen ist zusätzlich die Grenzbruchfestigkeit für Zug zu berücksichtigen. Die Festigkeitskennwerte sind anisotropisch, sodaß die Belastungsrichtung durch einen Index berücksichtigt werden muß.

2.2.3.1 Korn

Die Eigenschaftswerte für das Maiskorn stammen vorwiegend aus Untersuchungen der Kornbeschädigung beim Druschvorgang u.a. (13,26, 30, 105, 109). ESTLER 1981 (6) hat die Anforderungen hinsichtlich Dreschtrommelumfangsgeschwindigkeit, -gestaltung und Durchsatz zusammengefasst, EIMER 1977 (106) die komplexen Einflüsse auf die Arbeitsqualität dargestellt. Die Kornbeschädigung ist vom Ort der Beanspruchung - Seite, Spitze oder Kante des Kornes - abhängig. Sie ist proportional der Stoßgeschwindigkeit und dem TM-Gehalt. Für die in Frage kommenden TM-Gehalte um 70 % und einer Stoßgeschwindigkeit v_{St} = 18 m/s ermittelten MOREIRA et al. 1980 (111) die folgenden Kornanteile mit äußerlichen Rissen: 60,5 % bei seitlicher Belastung, 44 % bei Belastung der Kornkante und 6,5 % bei Belastung der Kornoberseite. Bei einem TM-Gehalt von 80 % betrug der Maximalwert 78 %. In gleicher Größenordnung wurden innere Kornbeschädigungen nachgewiesen. PAULSEN und NAVE 1980 (113) ermittelten für drei verschiedene Dreschtrommelbauarten 11,0 bis 12,1 % schwere Kornbeschädigungen (Bruch, fehlende Teile, Risse) unabhängig von der Trommelumfangsgeschwindigkeit im Bereich 11,2 bis 18,3 m/s (TM-Gehalt 71,2 %). Somit ist der Schluß zulässig, daß bei Stoßgeschwindigkeiten > 18 m/s und einmaligem Kontakt die Samenschale in der Regel beschädigt ist. Die erforderliche Bruchkraft steigt mit dem TM-Gehalt und der Korngröße (Formänderung der Trockenmasse), CHOWDHURY et al. 1978 (107), , BALLASTRAIRE et al. 1982 (114). In Tab. 6 sind daher die mechanischen Eigenschaften für verschiedene Trockenmassegehalte angegeben. Die Spannweiten veranschaulichen die Anisotropie der Kennwerte für das Maiskorn, die "zufällige" Verknüpfung mit den Randbedingungen und die Forschungslücken.

Tabelle 6: Mechanische Eigenschaften von Maiskörnern; *, **, 1) zugehörige Werte

Eigenschaft		Trockenmassegehalt Z (%) 72*/82**	88[1)]/91,9	Quellen
E_d vertikal	MPa		399 - 507	103
horizontal	MPa		1157 - 1441	103
E_b	MPa	143**	183[1)]	114
τ_B vertikal	MPa	84* - 169*	14 - 33	103
horizontal	MPa		17 - 304	103
ν			0,32	103

2.2.3.2 Spindel

Die relevanten mechanischen Eigenschaften für die Spindeln sind die Biegefestigkeit, die Bruchfestigkeit, der E-Modul und die Poissonzahl. ANAZODO und NORRIS 1975 (103) haben diese für geometrische Proben der Spindelteile gemäß Abb. 2 in Kap. 2.1.2 ermittelt - Tab. 7.

Trotz einer quasi-statischen Belastung mit 1 - 5 cm/min steigt τ_B mit der Belastungsgeschwindkgiet für Z_{Sp} = 90 %. In Bestätigung der Betrachtungen in Kap. 2.1.1 steigen σ_B und E proportional dem TM-Gehalt. $\overline{\sigma}_B$ verdoppelt sich von 3,1 (Z_{Sp} = 45 % TM) auf 6,2 x 10^6 MPa (Z_{Sp} = 89,7 % TM), analog $\overline{E}_d$ von 1,6 auf 3,2. E_d erreicht in der Spindelmitte etwa den 10 fachen Wert des Wertes der Spindespitze. Damit "härten" die Spindeln beimTrocknen aus.

In weiterführenden Versuchen haben ANAZODO et al. 1981 (115) den signifikanten Einfluß der Sorte auf σ_B und des Erntezeitpunktes auf E_d nachgewiesen. Sortenabhängig war der Einfluß des Düngerniveaus auf σ_B und E_d, die Tendenz jedoch nicht eindeutig. Signifikant nahmen σ_B und E_d von der Variante leichter Boden zur Variante schwerer Boden zu. Im TM-Gehalts-Bereich von 35,6 bis 48,9 % änderten sich σ_B und E nicht. Daher ist für die Ergebnisse von ESTLER 1981 (6) anzunehmen, daß die Spindeln in diesem Bereich der Stoff-Feuchte lagen.

Im Vergleich zu Maiskörnern erreicht der E-Modul nur 1/10 des Wertes der Körner. Daraus ist auf ein plastisches Verhalten bei Druckbeanspruchung zu schließen und eine Prallzerkleinerung von Spindeln

z.B. in Korn-Spindel-Gemischen, ist dann nicht zu erwarten.

Tabelle 7: Mechanische Eigenschaften von Maisspindel

Eigenschaft		Trockenmassegehalt $Z_{Spindel}$ (%)			Quellen
		42,6 - 59,7	85	89,7 - 92,3	
E_d	MPa	18 - 24,4	29	38 - 47	103, 115
E_b	MPa	24,3	55	98,9	103, 115
σ_B	MPa	2,9 - 3,9	5,7	8,0 - 11,1	103, 115
ν			0,32		
Z_K	%	67,4 - 77,6	u.b.	86,3 - 91,2	103, 115

2.2.3.3 Halmgutähnliche Pflanzenteile

Für Mais-Stengel, -Blätter und -Lieschen ist infolge des den Halmgütern ähnlichen, morphologischen Aufbaues eine analoge Betrachtung der mechanischen Eigenschaften zulässig. Die Festigkeit und die Bruchspannung sind gemäß Kap. 2.1.2 vom Zellulosegehalt abhängig und nehmen deshalb für die verschiedenen Stengel- und Blattzonen unterschiedliche Werte an. Die physiologische Abreife wirkt sich durch einen steigenden Trockenmassegehalt aus. AHLGRIMM 1970 (31) ermittelte für Wiesenlieschgras eine uneinheitliche Abhängigkeit der Festigkeitswerte mit dem TM-Gehalt. Nur für TM-Gehalte Z > 40 % und ein spätes Wachstumstadium war σ_B etwa linear mit Z verknüpft, was demnach nur eingeschränkt für Maisstroh zutrifft.

Die Scherbruchspannung τ_B erreicht nach Untersuchungen von DERNEDDE 1970 (83) für Weidegras das Maximum von 100 - 130 MPa bei ca. 65 % TM. Sowohl für Z = 80 % wie Z = 40 % fällt τ_B auf 60 - 90 MPa ab. PRASAD und GUPTA 1975 (118) ermittelten für den Maisstengel geringere Werte. τ_B fiel von 3,6 MPa bei einer Schnittgeschwindigkeit von 12 m/s auf 2,1 MPa bei 60 m/s. Die spezifische Schnittkraft verhält sich ähnlich wie τ_B mit einem Maximum von 8 - 10 N/mm² (Z = 65 %) und einen Abfall auf 4 N/mm² (Z = 80 %, = 40 %). PRASAD und GUPTA 1975 (118) ermittelten für Maisstengel 6,3 N/mm² (Z = 26,4 %) und wiesen auch eine gesicherte Abhängigkeit der Schnittkraft und der Schnittenergie vom Stengelquerschnitt und dem TM-Gehalt nach. Danach ist die

analoge Betrachtung von Halmgut und Maisstengeln zulässig und es werden die biophysikalischen Zusammenhänge von Kap. 2.1.1 bestätigt.

Die spezifische Scherenergie für Einzelstengel beträgt nach BRIGHT und KLEIS 1980 (119) 5,3 bis 22,8 mJ/mm² für Gras und Luzerne bei linearer Zunahme mit dem TM-Gehalt. So ist nach einer zusammenfassenden Untersuchung von O'DOGHERTY 1982 (35) auch die spezifische Schnitternergie für den TM-Querschnittsanteil zu errechnen. Gemäß Kap. 2.2 kann eine derartige Querschnittsermittlung 5 bis 10 mal kleinere Werte als eine geometrische Vermessung liefern. HALL et al. 1970 (120), Mc RANDAL und Mc NULTY 1980 (121) haben für Halmgut den TM-Querschnittsanteil zu 20 (Z = 30 % TM) bis 36 % ermittelt. Danach errechnet sich der spezifische Arbeitsbedarf aus den Werten für den Einzelstengel für das Häckseln für Mais zu 90 mJ/mm² TM. BERENTSEN 1973 (77) ermittelte für Timothy-Gras 98 bis 181 mJ/mm² TM.

Untersuchungen von GRIMM 1965 (76), KANAFOJSKI 1975 (35), IGE und FINNER 1976 (73) wiesen für den Schnitt von Haufwerken mit Schnittgeschwindigkeiten > 10 m/s nach, daß die spezifische Schneidenergie über einen begrenzten Geschwindigkeits- und Durchsatzbereich abnimmt. Der Grund ist das schnelle Absinken des zur Verdichtung notwendigen Energieaufwandes, da diese praktisch nicht mehr stattfindet. Somit ist die Umrechnung der Werte für den Einzelstengel auf den Gutstrang im Schnittkasten zulässig.

Tabelle 8: Mechanische Eigenschaften von Maisstengeln

Eigenschaft		TM-Gehalt Z = 14 - 26,4 %	Quelle
E_d	MPa	2309 - 2861	103, 117
E_b	MPa	4723 - 6805	103, 117
σ_B	MPa	6,9	103, 122
τ_B	MPa	2,1	103, 118
ν		0,23	

Der R e i b u n g s b e i w e r t μ schwankt bei landwirtschaftlichen Gütern zwischen 0,3 und 0,9, KAMPF 1958 (124), und ist nicht unmittelbar vom TM-Gehalt abhängig. So fällt $\mu_{Weidegras}$ von 0,4 (90 % TM) auf 0,3 (80 % TM) und steigt dann bis auf rund 0,6 (20 % TM). WIENEKE 1956 (81) ermittelte für Gras einen Bereich von 0,1 bis 0,5. Untersuchungen von RICHTER 1954 (79) sind Bestandteil des ASAE-Datenblattes D 251.1 und berücksichtigen die Reibungsgeschwindigkeit. Für Silomais (27 % TM) gilt auf poliertem Zinkblech bis 1,6 m/s ein Mittelwert von 0,68 und 0,49 für den Geschwindigkeitsbereich 5,1 bis 30,5 m/s. Der Normaldruck zwischen 0,2 und 2,73 kPa war ohne signifikanten Einfluß.

Die B i e g e f e s t i g k e i t (Steifigkeit, Stiffness) des Stengels, verantwortlich für die Standfestigkeit der Maispflanze, ist in einem festen Verhältnis mit der Druckfestigkeit verknüpft. Daher ist eine Ermittlung der Standfestigkeit ("stiffness") s_F über Penetrometermessungen (Eindringwiderstand RP) der äußeren Stengellagen möglich, PICKETT et al. 1968 (117). Hierzu gilt

$$s_F = 247{,}88 + 7{,}7656\ RP - 0{,}0259\ RP^2 \qquad (27)$$

2.2.3.4 Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Die mechanischen Eigenschaften weisen für die Gesamtpflanze, d.h. alle morphologisch verschiedenen Pflanzenteile sehr große Spannweiten auf. So schwanken die Literaturangaben in Abhängigkeit vom TM-Gehalt der Probe, dem Beanspruchungsmechanismus und der Versuchsanstellung für den E-Modul zwischen 18 und 6805 MPa, für die Biegebruchfestigkeit zwischen 2,9 und 11,1 MPa, für die Scherbruchfestigkeit zwischen 2,1 und 304 MPa und die Poissonzahl zwischen 0,23 und 0,32.

Die Abhängigkeit vom TM-Gehalt ist uneinheitlich. Während beim Maiskorn die Scherbruchspannung mit steigendem TM-Gehalt abnimmt, sind der E-Modul und die Grenzbruchfestigkeiten der Spindel und Stengel in umgekehrter Richtung mit dem TM-Gehalt verknüpft. Für die abgeleitete spezifische Scherenergie wurde mehrfach eine lineare allgemein proportionale Zunahme mit dem TM-Gehalt nachgewiesen.

Aufgrund dessen ist bei der Zerkleinerung der Maisgesamtpflanze oder des Gemisches einzelner Pflanzenteile in Trommelschneidwerken keine einheitliche Energiegleichung zu erwarten. Für halmgutähnliche Pflanzenteile kann ein spezifischer Energiebedarf, bezogen auf die Trockenmasse, errechnet werden.

Für eine definierte Zerkleinerung müssen für die verschiedenen Pflanzenteile, auch aufgrund ihres morphologischen Aufbaues, verschiedene Beanspruchungsmechanismen in Betracht gezogen werden. Dabei ist eine Prallzerkleinerung nur für Körner zu erwarten.

Sofern keine getrennte Zerkleinerung der einzelnen Pflanzenteile erfolgt, handelt es sich bei dem erzeugten Häcksel oder Schrot stets auch um ein Mischkollektiv von mechanischen Eigenschaften mit unterschiedlicher Verknüpfung mit dem TM-Gehalt.

2.3 Stoffblätter

Ziel der Arbeit ist es, die Stoffwerte und im möglichen Umfang die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Ernteprodukte von Mais zu tabellisieren, d.h. Stoffblätter anzulegen. Die einzelnen Werte stammen jedoch aus insgesamt 25 Veröffentlichungen und zwar für Mais von sehr unterschiedlichen klimatischen Standorten, überwiegend Nordamerika. Daraus erklären sich eventuelle Abweichungen zu deutschen Anbauverhältnissen, so daß die Größenordnung stets standortspezifisch zu überprüfen ist.

Für die Konstruktion von Feldhäckslern für den in- und ausländischen Markt sind große Spannweiten der Stoffeigenschaften von Vorteil, da sie eine Abschätzung aller Einsatzbedingungen und eine entsprechende Erweiterung der Anforderungsliste erlauben.

Forschungslücken bzw. das Fehlen gesicherter Angaben sind durch ein "?" gekennzeichnet.

Verfahrenstechnisch sind die Stoffeigenschaften des Häckselgutes oft bedeutender. Die Stoffblätter enthalten deshalb auch Angaben für die zerkleinerte Form, vor allem hinsichtlich der lagerungstechnischen Kennwerte. Es existieren aber nur wenige Angaben über einzelne Pflanzenteile oder deren Gemische, sofern es sich nicht um eine Ernteprodukt, wie z.B. Silomais, handelt. Diese Forschungslücke macht vorerst eine Darstellung gewogener mittlerer Eigenschaften unmöglich.

Aufgrund der Verknüpfung Pflanze - Konservierung - Tier werden insbesondere die Kennwerte der Lagerung, vor allem der Dichte, berücksichtigt. Die für eine verlustarme und kostengünstige Dichtlagerung wichtigen Größen sind nach VOSS 1970 (125) die Anfangs-Dichtlagerung ρ_{La}, die Verdichtungsfunktion p_N (ρ) und die Druckverhältnisfunktion λ (p_N). Für Maishäcksel (l_{th} = 5 - 40 mm, Z = 23 - 35 %) gilt:

$$\rho_a = \frac{1}{\bar{l} + 12} + 0{,}23 \qquad (28)$$

$$p_{No} = (1 + 0{,}32\ \bar{l})\ \bar{\rho}^{\,4{,}2} \qquad p_n > 0{,}1 \qquad (29)$$

$$p_{Nu} = ((\bar{l}^{2{,}5}/20) + 5)\ \bar{\rho}^{\,5{,}4\ +0{,}076\ \bar{l}} \qquad p_n < 0{,}5 \qquad (30)$$

$$\bar{\lambda}_o = 0{,}42 + 0{,}11 \log p_N \qquad (31)$$

$$\bar{\lambda}_u = 0{,}36 \qquad (32)$$

für $\lambda = p_S/p_N$ mit p_S = Seitendruck, p_N = Verdichtungsdruck und den Indizes o = oben, u = unten, $\bar{\rho} \mathrel{\hat{=}} \bar{\rho}_R$, ρ_a = Anfangsdichte

Damit ist der Einfluß der Dichte und der Häcksellängen beschrieben. Die Gl. (28 - 32) berücksichtigen aber nicht die Zeitabhängigkeit von ρ_L und enthalten keine Aussagen über die TM-Lagermenge. Deshalb ist die Gl. (33) aussagekräftiger, worin die Trockenmassedichte und damit Dichtlagerung allgemein als eine Funktion von Normaldruck ($\hat{=}$ Lagerhöhe) und Zeit ausgedrückt wird (94) .

$$\rho_T = A_t + B_t\ (\log p_N)^2 \qquad (33)$$

Darin bedeuten $A_t = a_1 + a_2 \log t$ und $B_t = a_3 + a_4 \log t$, mit den Verknüpfungsfaktoren a_1 bis a_4 für die Art des Materiales, die Häcksellänge und den Reifegrad; t die Lagerdauer und p_N den senkrechten Druck. Die Regressionsgleichungen für die Dichte sind bei den Stoffwerten der Ernteprodukte angegeben.

Stoffblatt Maiskörner Teil I

Kennwert	Einheit	$\bar{x}$ oder Spannweite	S	Quelle
Größe				
Kornbreite a_K	mm	16,26*	0,91*	26
		7,9 - 14,4		37
		7 - 12 HM		126
		6 - 10 ZM		126
Kornlänge b_K	mm	20,26*	1,07*	26
		7,0 - 11,6 HM		37
		5,6 - 11,5 ZM		37
		8 - 13HM/ZM		126
Korndicke c_K	mm	12,80*	0,71*	26
		4,2 - 5,9		37
		4 - 7*		126
b_k/a_k	mm	1,05 - 1,31		220
$a_{e1} = \sqrt[3]{a_K b_K c_K}$	mm	16,1*		26
	mm	7,3 - 8,0		220
$a_{e2} = (a_K + b_K + c_K)/3$	mm	16,4		26
Kugelwert	%	99,4		
Schwerpunktlage		zentrisch		127
Volumen	mm^3	267*	7,52*	
Mehlkörperanteil	%	84 - 85		36
Gewicht	g	0,347	0,009	
TKG, m_{TK}	g	190 -400*		3
	g	230 -410		126
TM-Gehalt Z_{Ernte}	%	66 - 77,7		37
	%	55,8 - 64,5		40,50
$Z_{Saatgut}$	%	93,3		126
Rohdichte ρ (Z)				
75 %	kg/m^3	1270		104
85 %	kg/m^3	1300		104
93,3 %	kg/m^3	1291*		26
	kg/m^3	1266 - 1371		220
$\rho = f(X)$	kg/m^3			220
TM-Dichte ρ_T	$kgTM/m^3$	1450		35
Schüttdichte ρ_S (Z)	$\rho_S = f(X)$			220
75 %	kg/m^3	656		26
80,5 %	kg/m^3	688		26
83,8 %	kg/m^3	720		26
84 %	kg/m^3	716,8		47
87 %	kg/m^3	736		26
92,7 %	kg/m^3	752		26
100 %	kg/m^3	757,1		26

*), **): Zusammengehörende Werte, gleiche Quelle; HM = Hartmais, ZM = Zahnmais

Stoffblatt Maiskörner Teil II

Kennwert		Einheit	$\bar{x}$ S oder Spannweite	Quelle
Hohlraumanteil		%	44	104
Hohlraumvolumen		m^3/m^3	$.513-.56X^3+.48X^2-11X$	220
Spez. Druckverlust $\Delta p/L$ $Q_L = 0{,}01-0{,}2 m^3/s \cdot m^2$		Pa/m	$\frac{2{,}06 \; 10^4 \; Q_L^2}{\ln(1+30{,}7\,Q_L)}$	104
Reibungsbeiwerte	(Z)			
μ_H Stahl	76,9 %		0,53	102
	80,5 %		0,47	
	83,8 %		0,48	
	87 %		0,59	
	92,7 %		0,76	
μ Blech				102
roh	86,1 %		0,34	
	87,8 %		0,25	
	92,5 %		0,20	
μ Blech				26
roh	10 - 17,5 %		0,27	
	22 - 22 %		0,29 - 0,3	
verzinkt	86,1 - 92,5 %		0,20 - 0,34	
teflonbesch.	86,1 - 92,5 %		0,12 - 0,18	
Mechanische Eigenschaften				
Trennkraft Korn-Spindel		N	15,3	104
Grenzbruchkraft F_B	(Z)			
	83 %	N	54,4 - 145,3	26
	92 %	N	195,2 - 408,6	26
	99 %	N	99,9 - 322,3	26
E-Modul	(Z)			
E_b	82 %	MPa	143	114
	88 %	MPa	183	114
E_d vertikal	91,9 %	MPa	399 - 507	103
E_d horizontal	91,9 %	MPa	1157 - 1441	103
Scherbruchspannung				103
τ_B vertikal		MPa	14 - 33	103
τ_B horizontal		MPa	17 - 304	103
Poissonzahl ν	(Z)			
	82 - 91,9 %		0,32	103

Stoffblatt Maiskolben

Kennwert		Einheit	$\bar{\bar{x}}$ S oder Spannweite	Quelle
Größe	D_{Ko} oben	mm	21 - 45	37
	mitte	mm	31 - 52	37
	unten	mm	33 - 57	37
	L_{Ko}	mm	110 - 210	37
		mm	90 - 240	37
Volumen		mm^3	?	
Gewicht		g	?	
Zylindrigkeit			?	
Rohdichte ρ		kg/m^3	?	
Schüttdichte ρ_S		kg/m^3	448	47
Ernte-TM-Gehalt Z_E		%	69	47
Spez. Druckverlust $\Delta p/L$ (Z = 80 % lose Schüttung bis 2,3 m v_L = 15 m/min)		Pa/m	18	60
S c h r o t s i l a g e				
Lagerdichte ρ_L		kg/m^3	$470,57+57,170\ h_s +4,070\ h_s^2 +0,106\ h_s^3$	40
TM-Lagerdichte ρ_{LT}		$kgTM/m^3$	$304,43+9,520\ h_s +0,202\ h_s^2$	40

Stoffblatt Maisspindeln

Kennwert	Einheit	$\bar{x}$ S oder Spannweite	Quelle
Größe D_{Sp}	mm	?	
Volumen	mm^3	?	
Gewicht	g	?	
Zylindrigkeit		?	
Rohdichte ρ (Z)			52
85 %	kg/m^3	165 - 205	
70 %	kg/m^3	200 - 250	
50 %	kg/m^3	280 - 350	
Schüttdichte ρ_S/Lagerdichte ρ_L			64
ρ_S	kg/m^3	140 - 180	
Lagerhöhe 6 m ρ_L	kg/m^3	155 - 190	
Lieschenanteil 5 % :			
ρ_S	kg/m^3	110 - 140	
Lagerhöhe 6 m ρ_L	kg/m^3	130 - 145	
Lieschenanteil 33 %:			
ρ_S	kg/m^3	40	
Lagerhöhe 6 m ρ_L	kg/m^3	80	
Ernte-TM-Gehalt Z_E	%	25 - 34,1	40,50
Spez. Druckverlust			64
Spindelanteil 95 %			
Z $\geq$ 89 %			
Schütthöhe 2,3 m	Pa/m	18	
(Luftgeschw. $\leq$ 25 m/min)			
lose Schüttung	Pa/m	18	
(Luftgeschw. $\leq$ 35 m/min)			
Heizwert H_u (Z)			52
85 %	kJ/kg	14600	
70 %	kJ/kg	11600	
50 %	kJ/kg	7500	
35 %	kJ/kg	5250	
Aschegehalt	%	5	
Mechanische Eigenschaften			
Z_{Sp} =42,6 - 92,3 %			
Elastizitätsmodul E_d	MPa	18 - 47	103,115
E_b	MPa	24,3 - 98,9	103,115
Grenzbruchspannung σ_B	MPa	2,9 - 11,1	103,115
Poissonzahl ν		0,32	103,115

Stoffblatt Mais-Gesamtpflanze

Kennwert	Einheit	$\bar{x}$ S oder Spannweite	Quelle
Größe L_P	mm	1700 - 2500	2
	mm	1620 - 3200	37
		- 4200	38
D_{St}	mm	8 - 50	2
	mm	16 - 28	37
oben	mm	238 - ,082	117
unten	mm	28,8- ,094	117
Höhe des Hauptkolbenansatzes L_{PKo}	mm	330 - 1670	37
Mechanische Eigenschaften (Vegetationszeit ca. 70 Tage, Z≙14%)			
E-Modul			
E_d	MPa	2309 - 2861	103,117,122
E_b	MPa	4723 - 6805	103,117,122
Grenzbruchspannung σ_B	MPa	6,9	103,122
Scherbruchspannung (Vegetationszeit ca. 81 Tage, Z≙26,4%) τ_B	MPa	2,1	118
Poissonzahl ν	-	0,23	103,122
Stiffness s_F			
(Vegetationszeit ca. 80 Tage	N/mm	12,69	117
ca. 90 Tage)	N/mm	36,75	117
M a i s h ä c k s e l			
Größe l_{50}	mm	4,1 - 19,5	
DG3		1,6 - 3,4	
Schwebegeschwindigkeit v_S	m/s	6-7	128
Z=25%, l_{th}=10mm	m/s	2 - 14	128
Schüttdichte ρ_S			
Z=25%, l_{th}=10mm	kg/m³	220 - 280	128
=35,1% =10mm	kg/m³	209	166
= 5mm +Nachzerklg.	kg/m³	234	166
Lagerdichte ρ_L			
Z=32%, 535m³ Silo, 18,3m hoch	kg/m³	905	9
1180m³ Silo, 18,3m hoch	kg/m³	925	9
Z=25-35%, l_{th}= 5mm, 10,0m hoch	kg/m³	700	125
=20mm, 10,0m hoch	kg/m³	510	125
TM-Dichte ρ_T	kgTM/m³	133 - 152	154
Z=28-48%, l_{th}=6,3-9,5mm	kgTM/m³	192 - 214	9
=15,9-19,1mm	kgTM/m³	160 - 194	9
TM-Lagerdichte ρ_{LT}			
Z=30%	kgTM/m³	$145+9,22h_S-0,15h_S^2$	94
(± 5 kgTM/m³ pro 1m ≷ 7m Silo ø -15 kgTM/m³ pro Z=+5%)			

Stoffblatt Maisstroh

Kennwert		Einheit	$\bar{x}$ S oder Spannweite	Quelle
Schüttdichte ρ_S	(Z)			52
	85 %	kg/m^3	105 - 140	
	50 %	kg/m^3	178 - 238	
	30 %	kg/m^3	300 - 350	
Heizwert H_u	(Z)			52
	85 %	kJ/kg	14000	
	50 %	kJ/kg	7200	
	30 %	kJ/kg	5600	
Aschegehalt		%	5,8 - 9	52

3. Definition der Zerkleinerungsziele

Die Definition der Zerkleinerungsziele erfolgt in Beschränkung auf die Nutzung von Mais als Futtermittel für die Tierarten Schwein und Rind. In Nutzungsanwendung des biologischen Modells Pflanze - Konservierung - Tier (Abb.1), sind die Ziele aus der Verknüpfung der biotechnischen Stoffeigenschaften mit den konservierungs- und fütterungstechnischen Anforderungen abzuleiten. Die biotechnischen Eigenschaften sind bereits im vorhergehenden Kapitel behandelt worden. Da sich das Modell an biologischen Leistungsparametern orientiert, ist mit den fütterungstechnischen Anforderungen zu beginnen.

3.1 Fütterungstechnische Anforderungen

Ein Futteraufschluß durch mechanische Zerkleinerung erhöht die Verdaulichkeit des Futters, indem die Oberfläche vergrößert und die morphologisch bedingt schwer aufschließbaren Pflanzenteile, wie Knoten und Mehlkörper, für den Verdauungsvorgang zugänglich gemacht werden. Als verdaulich wird bezeichnet, was nach gleichmäßiger Fütterung über genügend lange Zeit nicht wieder im Kot erscheint, siehe u.a. KELLNER und BECKER 1962 (130). Allgemein wird als geeigneter Futteraufschluß angesehen, wenn die folgenden vier Forderungen erfüllt sind:

- Enzymatischer Abbau und Mikroorganismenflora optimiert
- Zugänglichkeit aller Nährstoffe gesichert
- Kauenenergie minimiert
- Tiergesundheit nicht beeinträchtigt.

Insofern beeinflußt die Zerkleinerung die Futteraufnahme und Futterverwertung. Der unterschiedliche Aufbau und Wirkmechanismus des Verdauungstraktes von Schwein und Rind (Wiederkäuer) bewirkt eine unterschiedliche Rohfaserverdaulichkeit. Daraus ergeben sich unterschiedliche Ansprüche an den Rohfasergehalt und die Nährstoffkonzentration in der Futterration, siehe u.a. KIRCHGESSNER 1975 (14). Aus diesen Ansprüchen leiten sich für die Maispflanze unterschiedliche Verwertungsformen ab, die

durch die verschiedenen Maisernteprodukte repräsentiert werden. In Abb. 5 sind Rohfasergehalte der Maisernteprodukte und die zulässigen Werte in der Futterration vergleichend dargestellt. Danach wird die Verfütterung von Silomais und Maiskolben an Schweine nur in Mischung mit anderen Futtermitteln empfohlen. Eine ähnliche Aussage gilt für die Verfütterung von Maiskörnern und Korn-Spindel-Gemische an Rinder.
Die Verwendung als Allein- oder als Mischfutter stellt unterschiedliche Ansprüche an die Zerkleinerung.

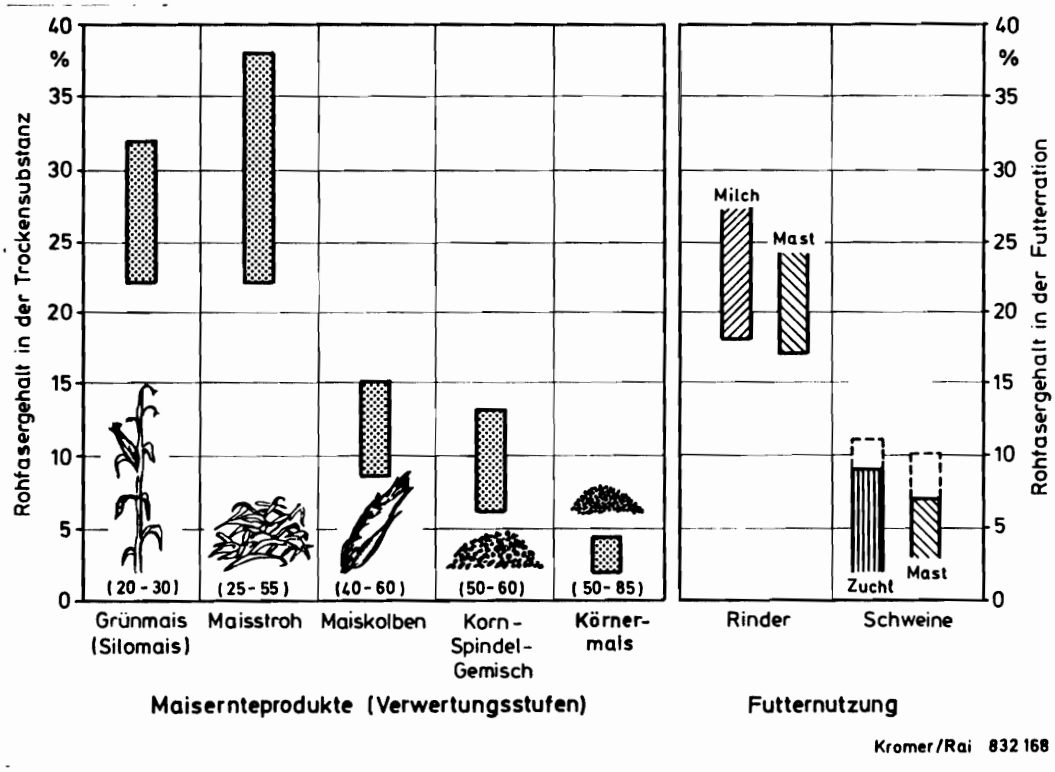


Abb.5: Rohfasergehalte wesentlicher Maisernteprodukte bzw. Verwertungsstufen von Mais
in ( ) Spannweite des TM-Gehalt Z; Quellen: (14, 48, 114, 133 - 135)

Für die Futterration von S c h w e i n e n wird eine mittelfeine Schrotung oder ein sogenannter Mittelschrot gefordert (siehe auch S. 161), die Kornschale soll sicher gebrochen sein. Die zusätzliche Forderung einer Zerkleinerung $\leqq$ 5 mm der Spindeln in Korn-Spindel-Gemischen wird den praktischen Erfahrungen nicht gerecht (136, 137). Vielmehr erfordert die Scharfkantigkeit der Spindeln eine Feinzerkleinerung (Kantenlänge der

Spindelstücke $\leqq$ 2 mm), da sonst die Gefahr der Verletzung im Kau- und Darmbereich besteht (136). Dies hängt mit der "Aushärtung" der Spindel, den steigenden Festigkeitskennwerten bei der Zunahme von Z, z.B. während der Lagerung zusammen. Eine, im Vergleich zum Korn sehr unterschiedliche Zerkleinerung kann außerdem zu ungleichmäßiger Passagegeschwindigkeit und verminderter Nährstoffausnutzung führen. Daher muß die Zerkleinerung von Korn-Spindel-Gemischen an der zulässigen Spindel-Teilchengröße und so am TM-Ertragsanteil von maximal 26 % orientiert werden (siehe Kap. 2.1). Für den Fall der Flüssigfütterung und ausreichender Verweildauer im Mischbehälter ist die Spindelgröße unkritischer, so daß eine Grobschrotung ausreichend erscheint. Die restlichen Kolbenanteile fordern eine dem Halmgut vergleichbare Zerkleinerung (69, 135).

Der Eiweiß-, Mineralstoff- und Vitaminbedarf der Schweine macht für optimale tier. Leistung eine Futteraufbereitung und damit -mischung notwendig. Die Mischqualität ist abhängig von der Teilchengröße der Einzelkomponenten und dem Trockenmassegehalt. Die Abweichung der einzelnen Gewichtsanteile einer Vielzahl von Futterkomponenten darf nur $\pm$ 5 % betragen; für Mineral- und Wirkstoffe unter 1 % Gewichtsanteil ist eine Vormischung erforderlich. Daraus ist die Forderung nach einer minimierten Schwankung der Teilchengröße abzuleiten (95, 101).

Die Bedeutung der Häckslertrommel für die Schrotung erklärt sich vor allem aus den Einsatzgrenzen der Schrotmühlen (114) und deren vergleichsweise hohem spezifischen Energiebedarf (101, 138) KROMER et al. 1981 (139).

Für die Futterration von R i n d e r n wird davon ausgegangen, daß ein tierischer Aufschluß des unverletzten Kornes in der Gelbreife nicht erfolgt. Die theoretische Häcksellänge sollte dann weniger als die kürzeste unter den Kornachsen betragen. *sofern die Beschädigung aller Körner nicht durch andere Beanspruchungsmechanismen* gewährleistet ist. Analog zur Schweinefütterung muß die Zerkleinerung die Nährstoffzugänglichkeit

und eine ausreichende Futteraufnahme sichern. Beides wird sowohl von der Teilchengröße als auch von der Futterstruktur durch deren Rückwirkung auf pansenphysiologische Parameter beeinflußt (17). Wirkmechanismen sind nach KAUFFMANN 1973 (144) und JORGENSEN et al. 1978 (140) die Beeinflussung der Kauzeit (Einspeichelung des Futters) und der Passagegeschwindigkeit. Eine Verringerung der Teilchengröße verkürzt zwar die Gesamtkauzeit, was aber ohne Einfluß ist, sofern diese nicht unter 9,7 h/24 h absinkt. Eine Verringerung der theoretischen Häcksellänge von 6,4 auf 4,6 mm mit zusätzlicher Nachzerkleinerung durch Recuttersiebe verringert u.U. die Kauzeit auf 7,4 h/24 h und verkürzt gleichzeitig die Verweilzeit im Pansen von 30,4 auf 23,7 h. Diese erhöhte Passagegeschwindigkeit kann durch ein "mechanisches" Hungergefühl die Pansenphysiologie ändern und den Milchfettgehalt senken, WARNER 1965 (142), sie muß jedoch nicht zur Verschlechterung der Energiebilanz führen. Futtermittel mit einem hohen Feinanteil, z.B. einem erhöhten Schrotanteil in der Futterration haben einen ähnlichen Effekt. Demnach ist bei solchen Futterzusammensetzungen, wie dies z.B. bei Maiskolbenschrot der Fall sein kann, auf eine geeignete "verzögernde" Struktur zu achten. Untersuchungen an Ganzpflanzensilagen bestätigten die Forderung nach einer fasrigen Struktur der Blätter und Längsschnitt der Internodien bei Ganzpflanzensilage. Daher ist bei Fütterungsversuchen eine Definition der Futterstruktur und die Angabe, welche Bestandteile der Maispflanze wie fein zerkleinert sind, wichtig. Die einschlägige Literatur enthält jedoch hierüber keine Aussagen (17, 140 bis 142). Vielmehr wird versucht, den Ganzkornanteil im Kot als Indikator der Feinzerkleinerung zu verwenden, zumal das Korn den energiereichsten Rationsanteil darstellt, u.a. (17, 145, 146, 147). Die Qualität der Kornbeschädigung wird dabei nur sensorisch beurteilt. Zur Bestimmung von Ort, Umfang und Tiefe der Kornbeschädigung eignet sich jedoch nur der Titrazolium (TZ)-Test, DELOUCHE et al. 1962 in (148).

Der Ganzkornanteil nimmt mit dem TM-Gehalt des Futters und der theoretischen Häcksellänge zu (141, 146). Literaturangaben weisen für praxisübliche Maissilagen einen Anteil von 0,3 bis 7,2 % der Körner-TM (bei Z_K= 25 %) und einen Anteil von 2,5 bis 8 % der Körner-TM oder bis zu 14 % der Gesamt-TM (bei Z_K= 55 %) aus (140 - 143). Ein verringerter Ganzkornanteil kann aber die Verdaulichkeit erhöhen und den negativen Effekt einer zu feinen Struktur z.T. kompensieren. Für theoretische Häcksellängen $l_{th} \geqq 4$ mm und Nachzerkleinerung mittels Reibboden, nicht jedoch mit Nachschneidesieben (siehe Kap. 5.2) hat die größere Feinzerkleinerung stets einen positiven Effekt und verbessert damit die Nettoenergie-Ausnutzung (17). Die theoretische Häcksellänge im Bereich von 4 bis 15 mm hat keinen Einfluß auf die Höhe der Futteraufnahme (149). Die Beschränkung der theoretischen Häcksellänge nach unten auf 4 bis 8 mm erscheint aus energetischer Sicht nicht zulässig, da die Zerkleinerungsarbeit weniger als 2 % des Energieinhaltes (NEL) der Maissilage ausmacht. Auch PIRKELMANN 1981 (147) hat auf die ökonomische Berechtigung einer angepaßten Nachzerkleinerung hinsichtlich der Futterverwertung hingewiesen, was z.B. in sogenannten Körnerprozessoren verwirklicht wurde (150).

Die unterschiedlichen Beanspruchungsmechanismen in Trommelschneidwerken erlauben auch die gezieltere Zerkleinerung einzelner Pflanzenteile. Infolgedessen ist für die Konstruktion von Häckselaggregaten und die Auswahl geeigneter Nachzerkleinerungseinrichtungen eine möglichst umfassende Definition der Teilchengröße und des Feinheitgrades der Einzelfraktionen und/oder repräsentativer Pflanzenteile durch die Tierernährung erforderlich. Die bisher gebräuchliche Angabe der erforderlichen Zerkleinerung über Faustzahlen gemäß Tab. 9 erlaubt keine Optimierung der mechanischen Zerkleinerung und damit die Erzeugung einer bestimmten Struktur.

Tab. 9: Faustzahlen der geforderten theoretischen Häcksellänge für Mais

Ernteprodukt	theoretische Häcksellänge mm	Quelle
Silomais	≥ 4	12
	4 - 6	119,145
	6 - 8	10
	≥ 6,3	141
	6 - 8	10
	7	17
Maiskolben Korn-Spindel-Gemisch Maiskörner	3 - 7 und Nachzerkleinerung	123,139

Eine zusätzliche Einschränkung der zulässigen Häcksellänge ergibt sich aus der Beeinträchtigung der Fließeigenschaften von Flüssigmist durch Futterreste, BOXBERGER 1981 (151). Danach soll der Gewichtsanteil einer Siebfraktion > 3 mm 15 - 20 % nicht übersteigen (Schweinekot bei hohem Anteil von Maiskolbenschrot in der Futterration). Der Einfluß ist jedoch statistisch nicht gesichert.

Infolge der problematischen Definition der erforderlichen Zerkleinerung über eine theoretische Häcksellänge wird häufig ergänzend noch der zulässige Überlängenanteil angegeben, wie dies auch bei Definition der Schrote üblich ist (siehe S.161). Danach soll bei Silomais der Gewichtsanteil > 25 mm unter 5 % betragen (11, 152). Untersuchungen von Maiskolbenschrot bestätigen diese Forderung für den Halmgutanteil so nicht (48, 60), da bei dieser Angabe der Massenanteil der "langen" Pflanzenteile am Ausgangsmaterial und die Struktur des Überlängenanteiles nicht berücksichtigt sind.

WEIDINGER 1967 (153) hat die zunehmende Entmischung in Schnecken und Schubstangen-Fütterungsanlagen für abnehmenden "Zerkleinerungsgrad" und TM-Gehalt nachgewiesen. Die Definition des Zerkleinerungsgrades beruht auf der hohen Korrelation der Gewichtsanteile >50 mm und >9,6 mm. Danach gilt für die geforderte "gute" Zerkleinerung von Silomais bzw. Maissilagen beim Einsatz von Fütterungsanlagen, daß der Anteil >9,6 mm unter 20 % betragen soll.

Nachdem der Siebvorgang für die unterschiedlichen Stoffwerte nicht nur eine Klassierung, sondern auch eine Sortierung darstellt (100), kann die Angabe der erforderlichen Zerkleinerung einer Siebklasse oder Siebrückstandssumme signifikant für Futteraufnahme und -verwertung sein. Wird z.B. eine sichere Kornzerkleinerung gefordert, dürfen in der Rückstandssumme eines Siebdurchmessers $D_i > b_K \geq a_K$ keine Maiskörner zu finden sein.

3.2 Konservierungstechnische Anforderungen

Die Konservierung von Mais kann durch Trocknung, Kühlung, Milchsäurevergärung (Silierung) oder chemische Zusätze (NH_3, Propionsäure u.ä.) erfolgen. Aus energetischen und mikrobiologischen Gründen ist unter unseren klimatischen Bedingungen die Milchsäurevergärung zur Haltbarmachung besonders geeignet. Hierfür sind im wesentlichen die folgenden drei Gründe verantwortlich:

- Nährstoffzusammensetzung von Mais (Pflanzenzucker) schafft günstige Lebensbedingungen für die anaeroben Milchsäurebakterien (20 bis 30°C)
- Milchsäurebakterien haben ein hohes Säurebildungsvermögen bei geringem Energieverlust
- Milchsäure ist mikrobizid.

Ziel der Silierung ist demnach die Sicherung einer schnellen Säurebildung (kalte Milchsäurevergärung), um so günstige Lebensbedingungen für Coli-, Buttersäure- und Fäulnisbakterien

sowie Hefen und Schimmelpilze zu vermeiden (11, 13, 15). Das Verhältnis der Milchsäure zu unerwünschten Säuren wird in Fliegpunkten angegeben und erreicht maximal 100.

Gefördert wird dieses Ziel durch eine ausreichende Nährstoffkonzentration (TM-Gehalt), Nährstoffzugänglichkeit (Aufschluß, Mischung) und Luftabschluß (Dichtlage, schnelle Silobefüllung). Verluste ergeben sich aus Sickersaftabfluß (mit Gehalt an organischer Trockenmasse), Restatmung, Gärgasbildung (Maß der Verlustentwicklung), Rand- und Dichteverlusten.

Bei Silomais steigt nach MESSER und HAWKINS 1977 (154) für TM-Gehalte um 20 % der Sickersaftabfluß von 25 l/t Grünmais bei l_{th}= 32 mm auf 52 l/t bei l_{th}= 6 mm, er nimmt also bei abnehmender Häcksellänge zu. Der Sickersaftabfluß kann fütterungstechnisch erwünscht sein. Unter dem Gesichtspunkt möglichst geringer Konservierungsverluste ist der Nährstoff"abfluß" mit dem Sickersaft negativ zu bewerten. Dem gegenüber werden alle Einflußgrößen auf die Silierqualität durch eine zunehmende Zerkleinerung positiv beeinflußt. Die Zusammenhänge sind aus der Literatur hinreichend bekannt, HONIG und ROHR 1982 (149), ZIMMER 1978 (11), HANF et.al. 1970 (132), (9, 12, 13). Danach verringert sich das spezifische Porenvolumen mit abnehmender Häcksellänge, abnehmendem TM-Gehalt, zunehmender Lagerhöhe und -dauer. Außerdem verringert eine intensive Feinzerkleinerung mit Nachschneideeinrichtungen und eine "luftdichte" Abdeckung die CO_2-Bildung (Maß für die Verlustentwicklung) für eine prasixnahe Lagerdauer um 4 - 5 % (12). Als Folge dessen nimmt die Streuung des Gärablaufes mit der Feinzerkleinerung ab, die Fliegpunkte steigen an, so daß die Gesamtverluste unter 10 % sinken.

Auf die Größenordnung der Verdichtbarkeit bzw. der Lagerdichte wurde in Kap. 2.2.2 eingegangen, entsprechende Regressionsgleichungen sind in den Stoffblättern, S. 45 - 50, enthalten. Verfahrenstechnisch erhöht eine geringere theoretische Häcksellänge neben der Dichte aber auch den Leistungs- und Energiebedarf für die Zerkleinerung. Bei vorhandener Erntekette

(Eigenmechanisierung) ist der höhere Leistungsbedarf für eine stärkere Zerkleinerung oft nur durch eine Verringerung des Durchsatzes auszugleichen. Dies widerspricht u.U. der Forderung nach einer schnellen Silobefüllung. Der Einfluß von l_{th} auf den Scherwiderstand des Häckselgutes (von Einfluß auf den Energiebedarf der mechanischen Siloentnahme) ist nicht eindeutig. Zur Veranschaulichung der Zusammenhänge, ist in Abb. 6 der qualitative Einfluß der Häcksellänge von Silomais auf die vorgenannten Größen dargestellt.

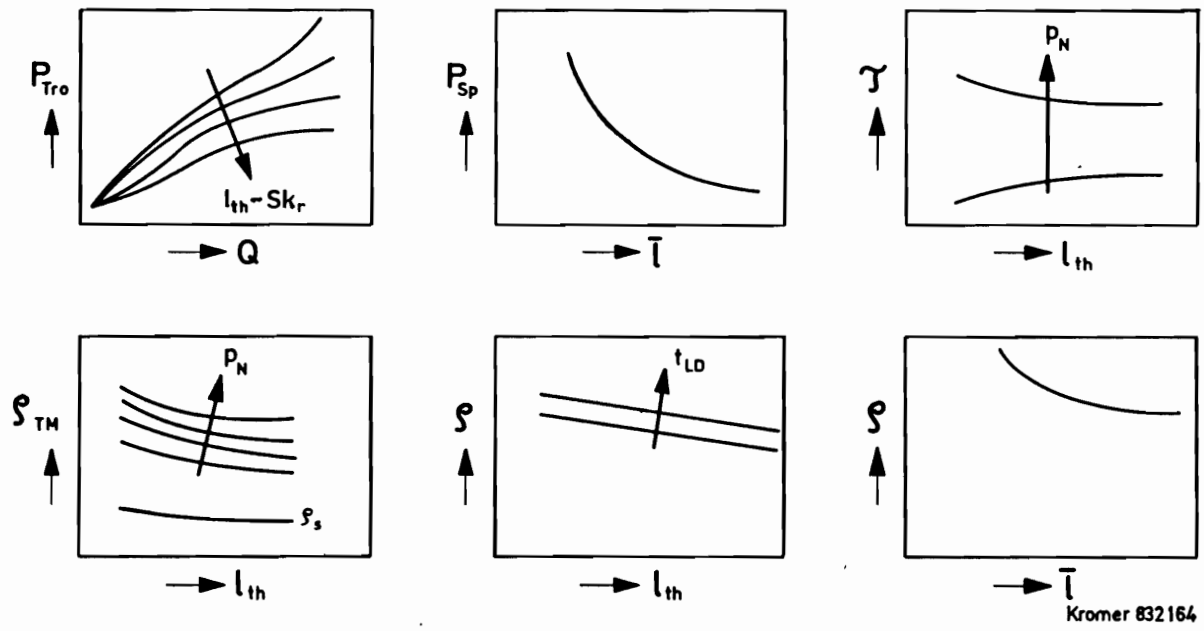


Abb.6: Qualitativer Einfluß der Häcksellänge auf den Leistungs-, Arbeitsbedarf, die Scherspannung und die Dichte
Quelle: (12, 154, 166)

Für die anderen Maisernteprodukte bzw. deren Schrote liegen keine vergleichbar umfangreichen Angaben vor. Nachdem die dann gültigen Anforderungen an Gasdichtigkeit und Mechanisierungsgrad bei Ein- und Auslagerung sehr unterschiedlich sind, lassen sich keine verallgemeinernden Aussagen machen.

Eine Begrenzung der Überlängenanteile ist auch zur Verringerung der Entmischung bei der gebräuchlichen Wurf- und pneumatischen Förderung in Transportfahrzeuge und in Hochsilos notwendig. Dies gilt auch zur Vermeidung der Entmischung für bestimmte Entnahme- und Mischtechniken.

Für die mechanische Siloentnahme bestehen zusätzliche Forderungen bei Untenentnahme aus Hochsilos. So muß bei Silountenentnahmefräsen die Längenfraktion > 10 mm unterhalb 5 Gew. % betragen.

Die vergleichende Wertung einer umfangreichen Literatur über die Verfahrenstechnik der Maisernte begrenzt die theoretische Häcksellänge nach oben auf 20 mm oder 3/4 inch, (5, 9,11, 19, 49). Andernfalls müssen die Nachteile einer ungenügenden Dichtlagerung durch zusätzliche Verdichtung, luftdichten Abschluß oder chemische Silierhilfsmittel kompensiert werden. Hierzu gehören neben Tauchdeckel und mechanischem Druckverteiler auch die Hochdruckverdichtung (HD-Ballen oder Großballen) und die Konservierung in Folie als Ballensilage oder unter Verwendung von NH_3 (u.a. 11, 144, 158).

Bei einer einwandfreien Futterkonserve können die fütterungstechnischen Anforderungen an die Zerkleinerung eventuell erst nach der Auslagerung erfüllt werden. Dies führt aber bei ungünstiger Entwicklung der Festigkeitswerte, z.B. durch Nachtrocknung der Spindeln in CCM zu einer dann notwendigen stärkeren Feinzerkleinerung und so zu einem höheren spezifischen Arbeitsbedarf, siehe auch Kap. 4. Maschinentechnisch knüpft sich daran die Forderung nach einstellbarem Zerkleinerungsgrad der unterschiedlichen Pflanzenteile, wobei ein geringeres Durchsatzvermögen als vor der Einlagerung akzeptiert wird.

Die in der Systematik Abb. 1 aufgeführte Nachzerkleinerung durch Siloentnahmegeräte drückt sich in einer Senkung der Gewichtsanteile der Größenklasse $\geq$10 mm von 9,8 auf 7,9 % bei Maiskolbenschrot aus (216). Bei Silomais verringert sich der

Gewichtsanteil bei Z = 24 - 25 % um rund 9 %, bei Z = 28 - 31 % jedoch nur um rund 2 % (155), was auf eine Zunahme der Festigkeitswerte der Maisteile schließen läßt. Diese Nachzerkleinerung wirkt sich vorwiegend durch Erhöhung des Gewichtsanteiles in der Größenklasse < 2 mm aus, betrifft also überwiegend den Körneranteil. Die Entmischung bei der Futtervorlage mit Fütterungsanlagen, WEIDINGER 1967 (153), (159) engt die zulässige Schwankung der Teilchengröße weiter ein.

3.3 Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Zusammenfassend lassen sich die folgenden 4 Ziele der Zerkleinerung angeben:

- Verringerung der Teilchengröße
- Vergrößerung der Oberfläche
- Verringerung der form- und größegebundenen
- Festigkeitseigenschaften
- Schaffung einer konservierungs- und verwertungsgerechten Struktur des Häckselgutes.

Hierdurch werden alle technologischen Vorgänge, die tierische Verwertung und die Konservierung positiv beeinflußt. Die Zusammenhänge lassen sich vereinfacht in einem Verknüpfungsschema, Abb. 7 darstellen. Werden alle Forderungen angemessen berücksichtigt, kann hierfür der Begriff der i n t e g r i e r t e n Z e r k l e i n e r u n g eingeführt werden. Es handelt sich dabei um ein Verfahren, bei dem alle pflanzenphysiologischen, technischen und wirtschaftlichen Methoden verwendet werden, um die geeignete Teilchengröße und Struktur einzelner Bestandteile oder der Gesamtmasse von Futtermitteln zu erreichen.

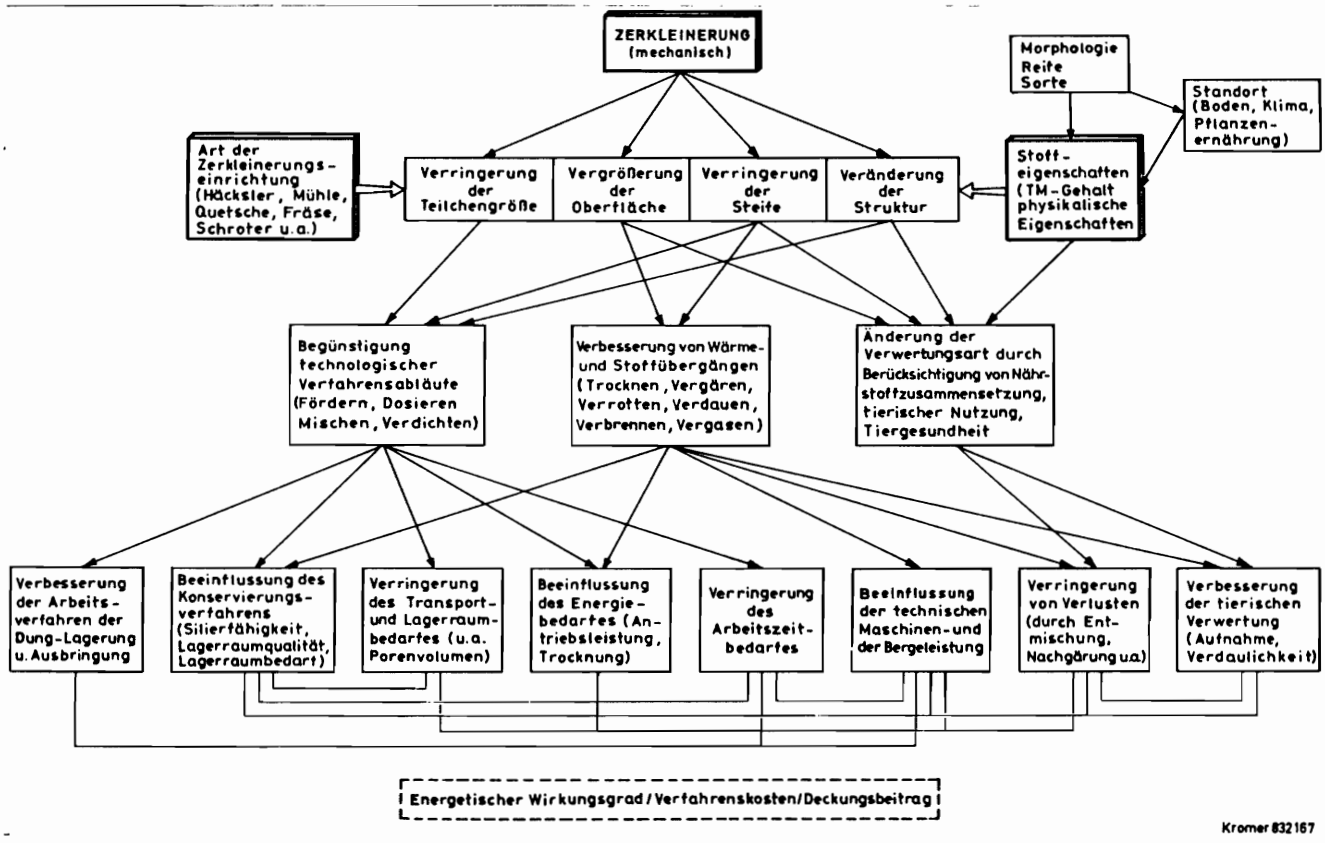


Abb. 7: Verknüpfungsschema von der Futterzerkleinerung, den landtechnischen Verfahrensabläufen bei Ernte, Transport, Lagerung, Konservierung, Entnahme und der tierischen Verwertung

"Geeignete" Größe und Struktur bedeutet in der Regel gleichmäßig. Es ist dies auch Voraussetzung der Erzeugung von homogenem Mischfutter oder wirtschaftseigenen Kraftfuttermischungen. "Homogen" ist aber nicht im physikalischen Sinn zu verstehen, da es sich eben immer um eine Mischung von Komponenten sehr unterschiedlicher Stoffeigenschaften handeln wird.

Aus fütterungstechnischer Sicht sind die Einzelforderungen für:

Futterration von Schweinen

1) Mittelschrot von Körnern und Korn-Spindel-Gemischen
   Rückstandssumme auf einem Sieb mit 1,1 mm Ø: 5-40% Gew.anteil

2) Kantenlänge der Spindelteile < 2 mm

3) empfohlener Rohfasergehalt < 12 %

Futterration von Rindern

1) alle Kornschalen bei Ernte in der Gelbreife zerschlagen

2) theoretische Häcksellänge 4 - 15 mm

3) Silomaishäcksel $\bar{l}$ > 25 mm: < 5 % Gew.-Anteil
bei mechanischen Fütterungsanlagen $\bar{l}$ > 9,6 mm: < 20 %.Gew.-Anteil

Um die Vorteile der Feinzerkleinerung nützen zu können, ist diese möglichst vor der Einlagerung sicher zu stellen, also beim Häckseln auf dem Feld oder bei der Einlagerung. Die kritisch zu beurteilende Entmischung bei der Wagen- oder Silobefüllung infolge der unterschiedlichen Schwebegeschwindigkeit der einzelnen Pflanzenteile kann durch die Verwendung von Häckselgut-Verteilern oder mechanischer Fördereinrichtungen gemindert werden.

Aus konservierungstechnischer Sicht sind die Einzelforderungen:

1) theoretische Häcksellänge < 20 mm

2) "gleichmäßig" (ohne Kennzeichnung durch einen Ausbreitungsparameter des Häckselkollektives)
für Silo-Untenentnahme $\bar{l}$ > 10 mm: < 5 % Gew.-Anteil

Ohne die Probleme bei der Definition der Feinheit natürlicher Stoffgemische zu verkennen, sind alle publizierten Forderungen als Bereichsangaben wenig präzis. Vor allem fehlen differenzierte Angaben über den erforderlichen Zerkleinerungsgrad der verschiedenen Pflanzenteile. Daher werden im folgenden Kapitel in einer methodischen Studie zur Definition des Zerkleinerungsgrades Beschreibungsparameter für Häckselgut vorgeschlagen.

4. Definition und Darstellung der Zerkleinerung

Bei den technischen Methoden der Zerkleinerung, also den Zerkleinerungseinrichtungen innerhalb der landtechnischen Verfahrenstechnik, ist grundsätzlich in Schneiden, Spalten und Mahlen zu unterscheiden, wobei die beschriebenen Beanspruchungsmechanismen (Kap. 2.2) einzeln oder in Kombination wirksam werden.

Für die Zerkleinerung in Häckslertrommeln dominieren das Schneiden (Scherenschnitt) und das Mahlen. Daher sind vorab diese beiden Zerkleinerungsvorgänge daraufhin zu überprüfen, ob und welche Gesetzmäßigkeiten zwischen den technischen Einsatzparametern und der erzeugten Teilchengröße bestehen.

Eine Zerkleinerung von Mais ergibt aufgrund des morphologischen Aufbaues sowohl Schrot aus den Körnern als auch Häckselgut aus den Stengeln, den Spindeln, den Blättern und den Lieschen. Somit stellt das zu beurteilende Gut ein Mischkollektiv unterschiedlicher Stoffeigenschaften, Form und Anzahl dar. Zur Definition einer charakteristischen Maßzahl dient in der Praxis die Siebanalyse (96 bis 100, 159). Hierfür wurde eine Häckselgut-Siebvorrichtung entwickelt. Sie wird in Kap. 4.4 beschrieben und deren Absiebergebnis gewertet.

Über Anwendung der deskriptiven Statistik ist eine für das Mischkollektiv gültige numerische Eigenschaft zu ermitteln, so daß die Teilchengröße mit einer Maßzahl (Feinheitsmerkmal) angegeben werden kann (98, 160). Im Vergleich mit den Zielen der Zerkleinerung ist zusätzlich die daraus mögliche Errechnung der Teilchenoberfläche zu prüfen. Zusätzlich sind Maßzahlen zur Definition der Steife und der Struktur zu ermitteln. Insbesondere ist deren schlüssige Beschreibung durch Kennzeichen des erzeugten Teilchenkollektives, z.B. den Ausbreitungsparameter (Feinheitsgrad) zu überprüfen.
Dazu werden in Kap. 4.2 die möglichen statistischen Verfahren behandelt und gewertet.

4.1 Zerkleinerungsgesetze

Unter S c h n e i d e n wird die definierte Verringerung einer Körperachse verstanden. Das Ergebnis des (Scheren-)Schnittes ist Häcksel- oder Schnittgut, d.h. zerkleinertes Halmgut aus tafeligen und nadeligen Partikeln.
Dabei ist die Schnittlänge gesetzmäßig mit der Schnitthäufigkeit und der Vorschub- oder Einzugsgeschwindigkeit verknüpft (Zerkleinerungsgesetz).
Zusätzliche Einflußgrößen sind der morphologische Aufbau und die Lage (Anordnung) des Gutes beim Schnitt. Die Bezeichnung der Einflußgrößen und die Schnittverhältnisse der Zerkleinerung in Häckslern mit zwangsweiser Gutzuführung sind in Abb.8 dargestellt. Für die theoretische Schnitt- oder Häcksellänge l_{th} gilt vereinfacht, s.u.a. (24, 161, 162):

$$l_{th} = \frac{v_Z \; 60}{Z_M \; n_{Tro}} \geq l_{max} \qquad \text{für } l_{th} > D_{Ko,St} \tag{34}$$

wobei sich die effektive Einzugsgeschwindigkeit errechnet nach

$$v_{Z_{eff}} = \frac{D_{PW} \; u_{PW}}{60} \; (1 - s_E) \tag{35}$$

Der Einzugsschlupf beträgt bis 0,1 (10 %), er bleibt aber wegen der anderen Störfaktoren auf l_{th} allgemein unberücksichtigt (13, 22, 24, 95).

Die eindimensionale Betrachtung in Abb. 8 muß noch durch Berücksichtigung des Querschnittes der Pflanzenteile ergänzt werden. Die tatsächliche Häcksellänge ist nur dann durch l_{th} bestimmt, wenn die Körperachsen $\leq l_{th}$, Gl. (34).

BERENTSEN 1973 (77) hat hierfür bei Gras eine sogenannte "Hit"-Länge l_{thH} eingeführt, die das geometrische Mittel aus Stoffdurchmesser und l_{th} darstellt:

$$l_{thH} = \sqrt{l_{th} \; D_{Ko,St}} \tag{36}$$

Für Mais ist Gl. (36) aufgrund des morphologischen Aufbaues nicht geeignet.

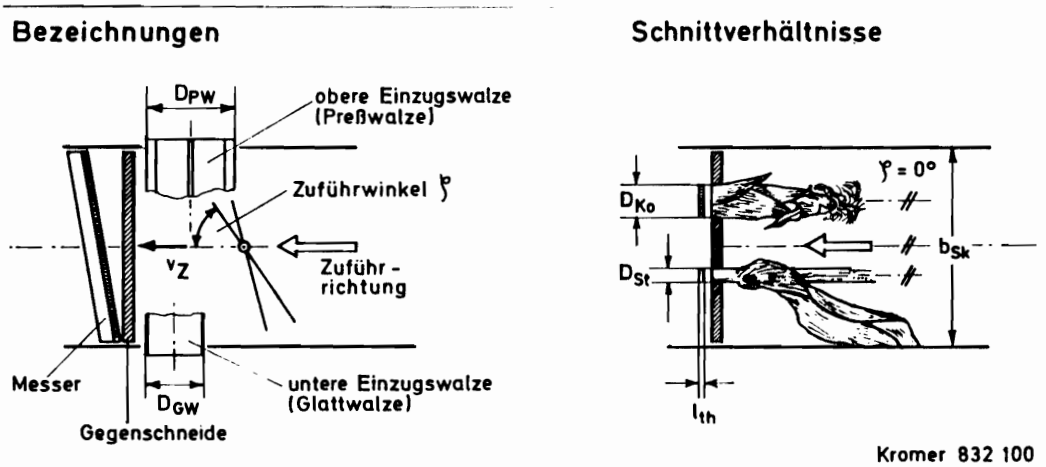


Abb. 8: Schema der Schnittzerkleinerung bei zwangsweiser Zuführung, nach (24, 161, 162)

Unter M a h l e n wird die Zerkleinerung durch Druck, Schlag, Stoß, Knicken, Abscheren und Reibung infolge von Massenkräften sowie durch Schnitt und Spalten des Gutes nach Festhalten auf der Mahlbahn verstanden. Es wird angewendet für Materialien geringerer Biegefestigkeit und begrenzter Ausgangsgröße. Das Ergebnis ist Mahlgut, Mehl oder Schrot. Unter Schrot, nur der ist hier von Bedeutung, versteht man ungeschälte oder geschälte gröbere, kantige Bruchstücke von Körnerfrüchten.
Es handelt sich hierbei in der Regel um isometrische Partikel, bei denen die Körperachsen in allen drei Dimensionen etwa gleich sind, so daß Gl. (25) gilt. Sie haben also keine unterschiedlichen geometrischen Formfaktoren, wie Häcksel- oder Schnittgut. Allgemeine Mahlgesetze existieren nicht (70, 95).

4.2 Methodische Studie zur Definition des Zerkleinerungsgrades

In Kenntnis der Stoffwerte ist grundsätzlich die rechnerische Ermittlung der Gesamtoberfläche eines Teilchenkollektives oder einer spezifischen Oberfläche möglich. Für Teilchenmischkollektive wie Maishäckselgut müssen aber in der Praxis eine Reihe vereinfachender Annahmen getroffen werden, die einleitend zu behandeln sind. Dabei kann bereits die Aussagekraft der theoretischen Häcksellänge für die erreichbare Teilchengröße abgeschätzt werden.

Für einen isometrischen Körper mit der äquivalenten Achsenlänge (Häcksellänge) l errechnen sich die spezifischen Oberflächen mit dem Formfaktor k nach (96) volumenbezogen zu

$$O_{sv} = \frac{k_o}{k_v} \cdot \frac{l^2}{l^3} = \frac{k_o}{k_v} \cdot \frac{1}{l} \qquad (37)$$

massebezogen zu

$$O_{sm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{k_o}{k_v} \cdot \frac{1}{l} \qquad (38)$$

Nachdem die Siebanalyse den Gewichtsanteil der einzelnen Größenfraktionen ermittelt, wird für die nachfolgende Betrachtung die spezifische Oberfläche O_s als massebezogen definiert (Oberfläche aller Teilchen/Masse aller Teilchen m_a). Aus den zuvor erläuterten Zusammenhängen sind die Formfaktoren agrarischer Produkte sehr unterschiedlich und auch für körnige Stoffe nicht konstant. Daher muß für ein Teilchenkollektiv ein mittlerer Formfaktor ermittelt oder errechnet werden:

$$\bar{k} = \frac{k_o}{k_v} \qquad (39)$$

Nachdem es sich aber sowohl um isometrische als auch tafelige und nadelige Teilchen handelt, und deren Verteilung in den einzelnen Größenklassen unterschiedlich ist, ist der Formfaktor zu wichten, was in der Regel als gewogenes arithmetisches Mittel (n-Klassen)erfolgt :

$$\bar{k} = \frac{1}{m_a} \sum_{1}^{n} m_i \, k_i \tag{40}$$

Dies berücksichtigt auch die Abhängigkeit des Formfaktors von der Teilchengröße, BATEL 1971 (97). Die kausale Verknüpfung von Form und Dichte macht es erforderlich, analog zu Gl.(40) für O_m auch die mittlere Dichte des Teilchenkollektives zu errechnen

$$\bar{\rho} = \frac{1}{m_a} \sum_{1}^{n} m_i \, \rho_i \tag{41}$$

Für Mahlgut kann in der Regel vereinfacht eine kugelige Teilchenform angenommen werden, so daß für den Formfaktor (Kugelwert) $f \hat{=} k$ gilt. Die "wirkliche" (96) bzw. "wahre" (97) Oberfläche errechnet sich nach Gl. (38 und 39) zu

$$\bar{O}_m = \frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{f_o \pi \, \bar{l}^2}{f_v \pi \, \bar{l}^3} = \frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{6 \, \bar{f}}{\bar{l}} \tag{42}$$

wonach $\bar{k} = 6 \, \bar{f}$. Mit $\bar{f} = 1$ für den idealisierten Fall der Kugel und des Würfels gilt

$$\bar{O}_{mk} = \frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{6}{\bar{l}} \tag{43}$$

Die Gesamtoberfläche eines Kollektives mit n-Klassen und mit dem Gewichtsanteil m_{ig} in der Klasse i

$$m_{ig} \, (\%) = \frac{m_i}{m_a} \cdot 100 \tag{44}$$

errechnet sich die spezifische Gesamtoberfläche des Teilchenkollektives in n-Klassen zu

$$\bar{O}_{mi} = m_a \cdot \frac{m_{ig}}{100} \sum_{1}^{n} \frac{\bar{k}_i \, 1}{\bar{\rho}_i \, \bar{l}_i} \tag{45}$$

Die Berechnung wird vereinfacht, wenn die Verteilungsfunktion $f_1 - f_3$ von k, p und l bekannt sind:

$$\bar{O}_{mf} = \iiint_{min}^{max} (k\ f(k)dk)\ (\frac{1}{\rho}\ f(\rho)d\rho)\ (\frac{1}{l}\ f(l)dl) \qquad (46)$$

Infolge der problematischen Bestimmung des Formfaktors wird allgemein bereits zu Beginn einer mathematischen Betrachtung von Korngrößenverteilungen von k = 6 f oder k = 1 als konstant ausgegangen, RUMPF 1964 (96), BATEL 1971 (97), BOLÖNI 1980 (163). Die idealisierte Oberfläche O_{mk} kann dann als Maßzahl benutzt werden. Gleichzeitig wird $\bar{\rho}$ für das Mischkollektiv als konstant angenommen, so daß sich Gl. (46) wie folgt vereinfacht:

$$\bar{O}_{mk} = 6 \cdot \frac{1}{\bar{\rho}} \int_{l_{min}}^{l_{max}} l^{-1} \cdot f\ (l)\ dl \qquad (47)$$

Tatsächlich läßt sich die Oberfläche durch charakteristische Eigenschaften der Verteilung f (l) der Zufallsvariablen l beschreiben. Gl. (47) ist Grundlage der mathematischen Behandlung von Korngrößenverteilungen mit Hilfe von Momenten durch eindimensionale Massenverteilung (96, 160). Danach gilt für die Längenverteilung:

$$M_{1,0} = \int_{l_{min}}^{l_{max}} l \cdot f_o\ (l)\ d\ l \qquad (48)$$

Für eine in etwa symetrische Verteilung, was für Form und Größe natürlicher Produkte zu erwarten ist (97, 159, 164), ist die Verteilung hinreichend durch die charakteristischen Eigenschaften Mittelwert und Ausbreitungsparameter beschrieben.

In der Literatur wird das Häckselgut häufig durch eine mittlere Häcksellänge als gewogenes arithmetisches Mittel charakterisiert (24, 76, 95, 161), mit der Annahme, daß die Teilchenlängen in den Klassen analog dem Gesamtkollektiv verteilt sind. Hierbei kann die Berechnung sowohl für die Anzahlverteilung der

Häckselstücke l_{zi} oder die Massenverteilung l_{mi} in den einzelnen Klassen i erfolgen. Es gelten die folgenden Beziehungen:

$$\bar{l}_z = \frac{1}{z_a} \sum_i^n z_i \cdot l_i \tag{49}$$

$$\bar{l}_m = \frac{1}{m_a} \sum_i^n m_i \cdot l_i \tag{50}$$

Eigene Untersuchungen der Ergebnisabweichung zwischen den Gl. (46) und (50), ausgedrückt durch $\bar{l}_m/\bar{l}_z$, haben ergeben, daß dieses Verhältnis mit l_{th} abnimmt und für bestimmte Gutarten und Trockenmasse - Gehalte konstant ist, z.B. in der Größenordnung von 1,23 - 1,5 (8, 24).

Eine Verringerung der theoretischen Häcksellänge von Exaktfeldhäckslern (mit und ohne Nachzerkleinerungseinrichtung) ändert jedoch auch die Symmetrie der Verteilungskurve zugunsten kürzerer Häcksellängen (linksseitige Asymetrie). Dies gilt sowohl für handausgezählte Teilchen-Längenverteilung (24,76, 161), als auch für Siebanalysen (139, 163, 164). Die Tatsache kann durch das gewogene geometrische Mittel $\bar{l}_g$ berücksichtigt werden und es gilt $\bar{l}_g \leq \bar{l}_m$. Für den direkten Schluß, daß die Verteilung in den Klassen der Gesamtverteilung entspricht, gilt für die Klassenmitte analog zu Gl. (36)

$$l_{gi} = \sqrt{\bar{l}_i \cdot \bar{l}_{i+1}} \tag{51}$$

und für das gewogene geometrische Mittel

$$\log \bar{l}_g = m_a^{-1} \sum_i^n m_i \cdot \log l_{gi} \tag{52}$$

Die Ausbreitung wird über die Standardabweichung σ_g angegeben:

$$\sigma_g = \sqrt{\Sigma_i (\log l_{gi} - \log \bar{l}_g)^2 \cdot m_a^{-1}} \tag{53}$$

Eine vergleichende Mittelwertsrechnung wird in Kap. 4.2 kommentiert. Grundsätzlich wird die Eignung des geometrischen Mittels zur Errechnung einer äquivalenten Häcksellänge durch die Tatsache unterstrichen, daß es im ASAE-Standard S 319 verwendet wird (98).

Der direkte Schluß einer der Gesamtverteilung entsprechenden Verteilung in den einzelnen Klassen ist nach GALE et al. 1982 (165) nicht für alle Klassen zulässig. Somit ist die Bestimmung der Klassenmitte als arithmetisches oder geometrisches Mittel nur unter vereinfachenden Annahmen möglich. Problematisch bleibt auch die Definition der untersten und obersten Klasse (Durchgangsmasse bzw. -anteil durch Sieb i=1 ; Rückstandsmasse bzw. -anteil auf Sieb i= n). Bei Siebanalysen gilt für Rückstands- bzw. Durchgangsmassen:

$$R_i = 1 - D_i \qquad (54)$$

Eine Lösung stellt die grafische Darstellung in einer Rückstands- oder Verteilungssumme über einer charakteristischen Körperachse dar. Als Abszisse wird zweckmäßigerweise der Sieblochdurchmesser gewählt und eventuell notwendige Korrekturen werden faktoriell berücksichtigt. Es ist dies heute das gebräuchlichste Verfahren der Dokumentation der Teilchengrößenstrukturen von Häckselgut, DERNEDDE und PETERS 1976 (166), KROMER 1979 (139), SCHMID 1979 (167), (12). Infolge der fütterungs- und siliertechnischen Anforderungen an eine möglichst gleichmäßige Futterstruktur, findet man in der Literatur als Maßzahl auch die Über- oder Unterlängenanteile, BARRINGTON et al. 1969 (142), SCHURIG et al. 1972 (152), SCHWARZ und KIRCHGESSNER 1983 (17) u.a..

Mit Hilfe der Rückstandssummenkurve ist auch eine Aussage über die Verteilung der einzelnen Pflanzenteile in den Klassen möglich. Beim Ernten in der Gelbreife sind z.B. keine Körner auf einem Sieb mit l_i = Ø 15 mm zu erwarten, siehe Stoffblatt Maiskörner. Weiterhin ist von Vorteil, daß sich der Anteil in der Endklasse sicher einordnen läßt und die Anzahl der Klassen

im interessanten Teilchengrößenbereich erhöht werden kann. Für diese Fälle scheiden dann die gewogenen arithmetischen und geometrischen Mittel aus. Eine schiefe Verteilung kann aber ebenfalls durch eine zwei-parametrische logarithmische Normalverteilung beschrieben werden. Eigene Siebanalysen bestätigen die Untersuchungen von AAS 1970 (169), BOLÖNI 1979 (163) u.a., wonach die gewogene Teilchengröße, z.B. die Häcksellänge, logarithmisch normal verteilt ist, d.h. die Verteilung im logarithmischen Wahrscheinlichkeitsnetz durch eine Gerade repräsentiert wird. Die logarithmische Normalverteilung ist durch den Medianwert l_{50n} und die Standardabweichung σ_n gekennzeichnet. Es gilt:

$$f(l) = \frac{dR}{dx} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\, x^2} \qquad (55)$$

und mit $x = \frac{1}{\sigma} \ln(l/l_{50n})$, wobei l_{50n} der Rückstandssumme 50 % zugeordnet ist:

$$f(l) = \frac{100}{\sigma \cdot l \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln l - \ln l_{50n})^2}{2\sigma^2}} \qquad (56)$$

Demnach ist die Standardabweichung σ_n ein Maß für die Steigung der Geraden. Die Koordinaten sind im log-normalen Netz so eingeteilt, daß die Gerade für $\sigma_n = 1$ durch ($R = 16\ \% / l_{16} = e \cdot l_{50n}$) und ($R = 84\ \% / l_{84} = l_{50n} \cdot e^{-1}$) geht, so daß gilt (96, 164):

$$\sigma_n = \frac{1}{2} \log \frac{l_{16}}{l_{84}} \qquad (57)$$

Mischkollektive mit sehr unterschiedlicher Teilchengröße bereiten für große Klassenbreiten auch hier Schwierigkeiten bei der Einordnung der oberen und unteren Restsumme. Eine Approximation durch einen Polygonzug ist aber nur bei ständiger Änderung der Steigung, also von σ_n, sinnvoll. Nach BOLÖNI 1979 (163) ist für Mahlgut so eine verbesserte Anpassung durch Renormalisierung der Log-normalen-Verteilung möglich.

Der Antilogarithmus der Standardabweichung wird auch als geometrische Standardabweichung bezeichnet. Zur Beschreibung der Ausbreitung kann analog zu Gl. (57) der Dispersionsgrad der

log-normalen Verteilung, DG 3 errechnet werden (98):

$$DG\ 3 = (l_{84}/l_{16})^{1/2} \qquad (58)$$

Für die ausgewerteten Maishäckselproben, Kap. 5, wird sich zeigen, daß DG in der Regel über 1,5 beträgt, das Teilchenkollektiv also erwartungsgemäß polydispers ist.

Als charakteristisches Feinheitsmerkmal (Ausbreitungsparameter) kann auch die Quartile, d.h. l_{25} oder l_{75}, der Anteil im interquartilen Bereich oder die 90 % Percentile angegeben werden (165, 169).

In Kenntnis von f(l) und σ muß dann gemäß Gl. (47) angenähert die Oberfläche des Teilchenkollektives zu berechnen sein. Für den idealisierten Fall der kugeligen Teilchen (k = 6 f und f = 1)lautet die Gleichung unter Verwendung eines Streufaktors $\varepsilon = 10^{\sigma}$

$$O_{mk} = \frac{6}{\rho\ l_{50n}}\ e^{\sigma_n^2/2} \qquad (59)$$

Das log-normale Wahrscheinlichkeitsnetz enthält daher als Randmaßstäbe σ, n und 6 $e^{\sigma_n^2/2}$ mit dem Netzpunkt als Pol, so daß sich die Oberfläche für $\rho = 1$ ablesen läßt.

Für die Ermittlung der gegebenen Oberfläche von Häckselgut ist die Anwendung der Gl. (59) aus mehreren Gründen nur eingeschränkt geeignet. Gemäß Kap. 2.1 und 3.1 ist das Mischkollektiv durch sehr unterschiedliche Formen und damit Formfaktoren, TM-Gehalte und Dichten gekennzeichnet. Daher ist für Exakthäcksel von Grünmais, Silomais, Maiskolben und Maisstroh kein praxisgerechtes Ergebnis zu erwarten. Die Ausnahmen hiervon sind Schrote von Korn-Spindel-Gemischen und Körnermais. Wegen des hohen Feinkornanteiles auch bei Silomais-Häckselgut war für die Auswertung der vorliegenden Versuche auch die Verteilungsfunktion von Mahlgut (Getreide, Futtermittel, Kohle, u.a.) zu überprüfen. Für die hierbei erwarteten isometrischen Körper wird eine gute Annäherung durch die Verteilungsfunktion von Rosin, Rammler und Sperling

(RRS-Verteilungsfunktion) erreicht (96), mit DIN 66145 (1976) in RRSB-Verteilungsfunktion umbenannt (171). Ihr folgen die Kornverteilung von Mahlgütern etwa gleicher geometrischer Form und ähnlicher Randbedingungen. Sie war daher auch Grundlage des Körnungsnetzes nach DIN 4190, das ebenfalls durch das RRSB-Netz nach DIN 66145 ersetzt worden ist. Erforderlich ist auch hier die Definition einer unteren und oberen Korngrößengrenze, die in der Regel durch 0,1 % < R < 99,9 % vorgegeben wird. Die Funktion lautet in der von BENNET in (96) gefundenen Form

$$R = e^{-(d/d')^n} \tag{60}$$

und bei Angabe des Siebrückstandes in % mit d ≙ l und d' ≙ l'

$$R = 100\ e^{-(l/l')^n} \tag{61}$$

und nach Umformung durch zweimaliges Logarithmieren wird Gl. (61)

$$\lg\lg \frac{100}{R} = n \lg l - n \cdot \lg l' + \lg \lg e \tag{62}$$

oder als Funktion der Netzkoordinaten

$$\lg\lg \frac{100}{R} = n \cdot \lg l + \text{const.} \tag{63}$$

Die Eignung dieser Verteilungsfunktion auch für Halmgut hatte bereits AAS 1972 (169) nachgewiesen. Im Vorgriff auf die Diskussion der Versuchsergebnisse ist anzumerken, daß eine Überprüfung der Linearität n von 295 Datensätzen ein $\bar{r}$ = 0,97 91 (VK =1,6%) ergab, wobei n ≙ DG 3, Gl. (58).

Die mögliche Berechnung der spezifischen Oberfläche analog dem log -normalen-Verteilungsnetz ist gleichermaßen einzuschränken.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Verwendung des RRSB-Netzes die grafische Ermittlung einer äquivalenten Körperachse und eines zusätzlichen Feinheitsgrades (Ausbreitungsparameters)

zuläßt. Da keine gleichen Klassenbreiten notwendig sind, können die pflanzenmorphologisch und energetisch wichtigen Teilchengrößen gezielt erfasst werden. Die Datenverrechnung ist jedoch eingeschränkt, so daß im Einzelfall die Anwendbarkeit einer lognormalen Verteilungsfunktion zu überprüfen ist.

Problematisch bleibt, daß in der praktischen Versuchsdurchführung oft die Anforderungen an repräsentative und ausreichende Probenzahl für einen direkten Schluß vom Mittelwert der Stichprobe auf das Gesamthäckselgut nicht zu erfüllen sind.

4.3 Siebverfahren

Häckselproben enthalten ca. 500.000 Teilchen/kg (35) und Maisschrote 226.000 Teilchen/g (164). Wie in Kap. 4.1 behandelt, stellt das Siebklassieren die geeignete Trennmethode nach dem Merkmal Stoffgröße dar. Diese wiederum ist unter Berücksichtigung von Formzahlen eine äquivalente Maßzahl für die Oberfläche.

Die Teilchen-Massenkollektive von Maishäcksel zeichnen sich jedoch auch durch die zusätzlichen Variablen - Dichte und Reibungsbeiwert - aus. BRÜGGEMANN und NISAR 1962 (164) belegen, daß bei $\rho_{S1}/\rho_{Sn} \neq 1$ oder $\rho_{Sn}/\rho_{S1} \gg 1$ eine Entmischung eintritt, was für verschiedene Maishäcksel zu erwarten ist. Daher wird es sich neben der Klassierung auch stets um eine Sortierung handeln **Da auf Grund der Stoffeigenschaften** allg. ρ_{S1} auf $R_{i=1} \gg \rho_{Sn}$ auf $R_{i=n}$ gilt , ist der mögliche Fehler bei gleichmäßiger Größenstruktur vernachlässigbar, der Siebvorgang wird vielmehr günstig beeinflusst.

Aufgabe einer Siebvorrichtung ist es, nach einer repräsentativen Körperachse als dominantes Merkmal zu klassieren.
Die Voraussetzungen hierfür sind nach BATEL 1960 (159):

- Die dominierende Körperachse ist einer Sieböffnung (z.B. Maschenweite) zugeordnet (Durchgangs- oder Rückstandssumme)
- Die Häckselteile sind über den vorgenannten freien Öffnungen angeordnet
- Es ist eine nach Zeit und Größe ausreichende Kraft vorhanden, um diese Teile durch das Sieb fallen zu lassen
- Die Haftkräfte in Massenverbänden sind sicher kleiner als die Siebkräfte

Um nun diese Voraussetzungen zu erfüllen, sind Relativbewegungen Sieb-Siebgut und innerhalb des Siebgutes erforderlich. Diese werden durch Siebbewegungen in waagerechter Richtung (Plansiebmaschinen) und senkrechter Richtung (Wurfsiebmaschinen) erzeugt. Beim Plansieben überwindet in der Regel die Siebbeschleunigung

die einwirkenden Trägheitskräfte, das Teilchen wird über die Sieböffnung bewegt und fällt dann unter der Eigengewichtskraft durch. Beim Wurfsieben hebt das Siebgut ab und es ist dann die Auftreffgeschwindigkeit (inklusive der Eigengewichtskraft) des Teilchens nach Größe und Richtung für den Siebdurchgang verantwortlich.

In der Praxis finden wir zur Erhöhung der Durchsatzleistung sowohl einen zwangsweisen Transport des Siebgutes zur Sieböffnung (mechanisch oder pneumatisch), als auch kombinierte Wirkmechanismen von Plan- und Wurfsieben, GÖRLITZ 1982 (172). Von den stetigen, quantitativen Merkmalen des Schüttgutverhaltens unter Einwirkung mechanischer Schwingungen sind bei Maishäcksel vor allem zu berücksichtigen:

- Oberflächengestalt (Form) und -verteilung (Struktur) - isotrop und tafelig -
- Teilchengrößenverteilung
- Schüttdichte
- Trockenmassegehalt
- Neigung zum Verfilzen

Die Wahl der Siebvorrichtung berücksichtigt die Stoffwerte und -merkmale durch die Wahl der Schwingungswerte, der Neigung der Siebebene, den zeitlichen Bewegungsablauf und die Siebform. Jedes Abheben des Siebgutes erhöht die Gefahr der Fehlorientierung. Diese ist auch durch die Schwerpunktlage des Einzelteilchens bei der Bewegung über die Sieböffnung gegeben, ORTH 1975 (168). Für isometrische Teilchen sind diese Tatbestände von untergeordneter Bedeutung und damit auch die Siebform. Daher werden Siebe, auch Prüfsiebe, mit großer freier Lochfläche - Maschensiebe - und unterschiedliche Schwingungswerte gewählt (159, 172, 173, 174, 175, 176), auch ASAE-Norm S 319 (99). Siebgut mit tafeligen Teilchen (Blätter, Lieschen, etc.) oder nadeligen Teilchen (Halmen) erfordern eine Orientierung vor der Sieböffnung. Dies ist mit Maschensieben nicht möglich, vielmehr sind Stützflächen um die Sieböffnung erforderlich, wie z.B. bei Lochsieben. Ist die Materialbewegung zu der Öffnung gerichtet, kann

dessen Form der des Teilchens angepasst werden. In der Praxis werden Schlitzlöcher nach der Teilchenorientierung in Wellblechen gewählt, MØLLER 1975 (177), ORTH et al. 1975 (168) und FINNER et al. 1978 (178). MØLLER verwendet für die Überlängen bereits Klassentore am Ende des Schwingsiebes mit dem akzeptierten Nachteil, daß diese Absiebfolge die kurzen Teilchen benachteiligt. ORTH wählt daher eine Kaskadenanordnung und definiert für Halmgut die Körperachse als 2 x Lochgröße des Siebes, d.h. $l_i = 2\ l_{Loch}$. Für Maishäcksel trifft diese Annahme nicht zu. Nachteile der Systeme mit gelochten Rinnen sind eine vergleichsweise lange Absiebzeit und die Verstopfungsgefahr. Daher kombinierten GALE und O'DOGHERTY 1981 (165) die Sortierung von orientiert geförderten Teilen über Querschlitzen (Klassentoren) mit der Kaskadenanordnung. Bei Halmgut beträgt dann die Abweichung von der Handauszählung für $\bar{l}$ und 90 % Percentile $\leq$ 5 % und für den interquartilen Bereich 7,5 %.

Alle verwendeten Siebvorrichtungen sind Plansiebmaschinen oder haben quasi horizontale Siebbewegungen, d.h. eine Wurfkennziffer (= senkrechte Normalbeschleunigung/Erdbeschleunigung) $\leq$ 1. Alle Verfahren schreiben keine oder unterschiedliche Vorgehensweisen der Guttrocknung bzw. -vortrocknung vor. Diese Vortrocknung beinhaltet zwar die Gefahr einer Nachzerkleinerung bei dem Absiebvorgang, sie mindert aber den Reibungsbeiwert und erhöht so die Schüttfähigkeit. Der Trockenmassegehalt der Siebprobe sollte in der Größenordnung von 90 % liegen.

4.4 Siebvorrichtung Weihenstephan

Für die Untersuchungen an Feldhäckslern, Silofräsen, Maisschrotern und -quetschen war eine bis dahin verwendete Plansiebvorrichtung mit Maschensieben, WEIDINGER 1967 (153) zu ersetzen; dabei war besonders auf eine kostengünstige Schnellbestimmung der Häcksellängenverteilung zu achten, KROMER und DALLINGER 1972 (179). Hierfür wurde ein Plansiebsystem ausgewählt. Dessen Aufbau und die Abmessung sind aus Abb. 9 ersichtlich.

Für den praktischen Einsatz wurde eine Antriebsdrehzahl des Exzenter n_e = 350 min^{-1}, ein Hub h = 9 mm und eine Beschleunigungsziffer z_w = 1,23 gewählt.

Nach BATEL 1960 (159) und ZABELTITZ 1960 (174) hat der Siebgütegrad etwa η_{Sieb} sein Maximum bei z_w = 1,06 bis 2,5 und ist abhängig von der Sieblochung. Zur Abstützung der tafligen Teile wurde ein Rundlochsieb gemäß DIN 24041 verwendet.

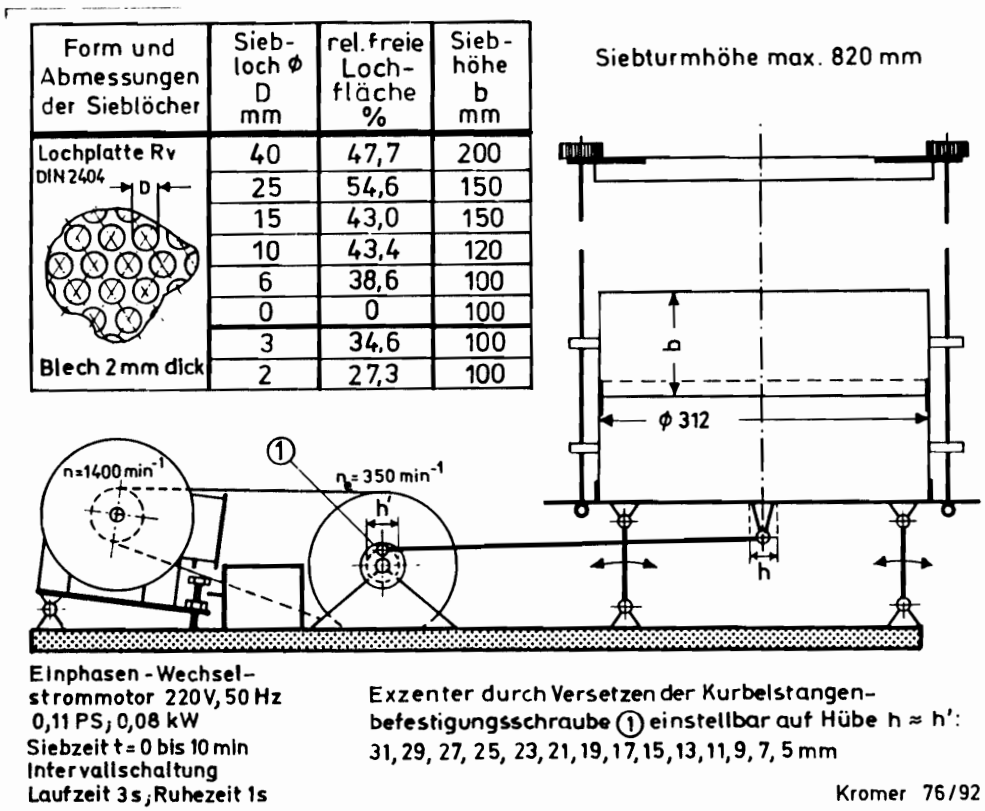


Abb. 9: Plansiebmaschine zur Schnellbestimmung der Häcksellängenverteilung

Das Maximum von η_{Sieb} wird dann im Bereich der Beschleunigungsziffer $z_w = 1{,}0$ bis 1,5 erreicht. In diesem Bereich verdichten sich auch die Maxima für verschiedene Siebdauern bei geringster Nachzerkleinerung (Abrieb). Die errechnete Wurfkennziffer von 0,21 und die Materialgeschwindigkeit von 105 mm/s weisen einen schleppenden Transport aus (168, 173). Die Wahl der Siebdauer war in mehrfacher Hinsicht schwierig, da für Reihenversuche eine "Schnell"-Siebung gefordert war und die Bewegung der Teilchen über die Sieböffnung durch den Häckselverband behindert sein kann. Aus diesem Grunde wurde zur Ausnutzung der Stoßkräfte zu Beginn des Siebvorganges eine Intervallschaltung eingebaut, wie sie von Laborsiebmaschinen bekannt ist (175), Verhältnis Laufzeit zu Ruhezeit 3 s zu 1 s. Das Volumen (Fassungsvermögen) über den Sieben wurde so gewählt, daß sicher Häckselproben von 100 ± 1 g abgesiebt werden können.

Zur Klärung der Genauigkeit des Absiebverfahrens gegenüber der Handklassierung und der Klassierung in Kaskaden-Plansiebmaschinen (168) sowie der Auswahl des statistischen Verfahrens wurden:

1. Strohäckselproben vergleichsweise von Hand ausgezählt und mit der Plansiebmaschine gemäß Abb. 9 klassiert;
2. Maishäckselproben auf zwei verschiedenen Siebmaschinen klassiert und unterschiedlich statistisch ausgewertet.

Das Ergebnis ist in Abb. 10 und Tab. 10 dargestellt. Es weist auf die abnehmende Übereinstimmung für den Anteil langer Pflanzenteile (Überlängen) hin. Dies gilt für alle zuvor diskutierten Siebvorrichtungen. Ungelöst ist stets die Anzahl der Klassen an den Enden der Verteilung, insbesondere bei den Überlängen, weshalb der statistischen Auswertung besondere Bedeutung zukommt. Das Ergebnis von 2. geht aus der folgenden Tabelle hervor. Umfangreiche Absiebergebnisse, vor allem für Strohhäcksel, sind bei KROMER 1979 (139) kommentiert. Kritisch ist danach die zum Teil sehr große Spannweite der Rückstandssummen für die Auswahl repräsentativer Klassen.

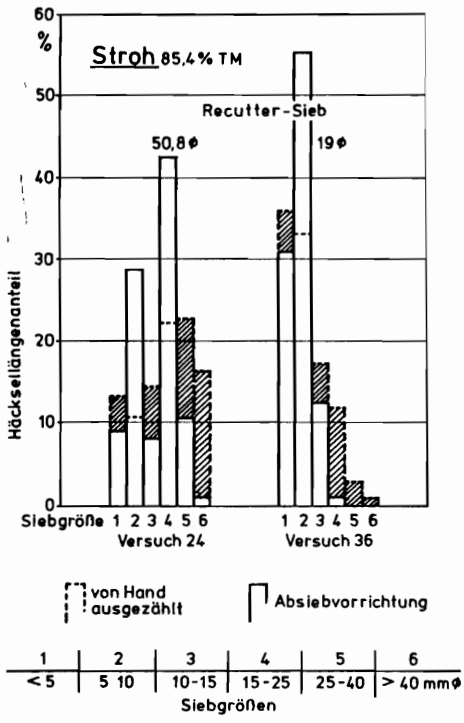


Abb. 10:
Häcksellängenverteilung von Strohhäckselproben unterschiedlicher Feinheit nach einer Handauszählung (gestrichelte Linien) und einer Siebanalyse mit der Siebvorrichtung Weihenstephan (durchgehende Linien). Abweichung ist durch Schraffur gekennzeichnet.
Material: Stroh (Z = 85,4 %)
theor.Häcksellänge 5,2 mm,
Nachzerkleinerung mit Recuttersieben mit 19 und 50,8 mm Ø

Tab. 10: Statistische Auswertung der Absiebergebnisse von zwei Siebvorrichtungen, sechs repräsentative Häckselproben, Untergrenze für geometrisches Mittel 0,1 mm, Siebvorrichtungen (Plansiebmaschinen) nach (168, 179)

lfd. Nr.	Proben-Nummer	Siebvorr. ORTH et al. Klassenmitte arithmetisch $\bar{l}_m$ (mm)	$\bar{l}_{mg}$ (mm)	geom. l_{gg} (mm)	RRSB l_{50} (mm)	Siebvorr. KROMER et al. Klassenmitte arithmetisch $\bar{l}_m$ (mm)	$\bar{l}_{mg}$ (mm)	geom. l_{gg} (mm)	RRSB l_{50} (mm)
1	25	5,2	4,0	3,7	4,4	4,6	3,3	2,5	3,5
2	8	5,0	3,9	3,6	4,2	5,2	4,1	3,4	4,5
3	27	5,0	4,1	3,7	4,5	4,7	3,8	3,1	4,1
4	24	4,8	3,7	3,4	4,1	4,9	3,6	2,8	3,9
5	6	5,1	4,0	3,7	4,4	5,4	4,2	3,6	4,6
6	5	4,6	3,6	3,2	3,9	5,1	4,1	3,5	4,3
	$Ø_6$	4,95	3,88	3,55	4,25	4,98	3,85	3,15	4,15
Streuung mm		0,22	0,19	0,21	0,23	0,31	0,35	0,43	0,41
Var.Koeff. %		4,4	4,9	5,9	5,4	6,2	9,09	13,7	9,9
Prob.Menge g		25				100			
Sieb Ø mm		1, 2, 4, 8, 16, 30				2, 3, 6, 10, 15, 25, 40			

Zusammenfassend ergibt sich eine hinreichende Übereinstimmung der beiden Siebvorrichtungen für arithmetische Klassenmitten sowohl für das arithmetische Mittel (Spannweite $\bar{l}_m$= 0,1 bis 0,6 mm), als auch für das geometrische Mittel (Spannweite $\bar{l}_{mg}$ = 0,1 bis 0,7 mm). Die unterschiedlichen Klassenbreiten wirken sich insbesonders für geometrische Klassenmitten und Mittelwertbildung $\bar{l}_{gg}$ aus, deren Gültigkeit gemäß Kap. 4.1.1 nicht gesichert ist. Die Mittelwertbildung aller sechs Proben gilt für ein zusammengesetztes Mischkollektiv und ist statistisch besser gesichert. Beide Siebvorrichtungen arbeiten mit ausreichender Genauigkeit bei Vorteilen für die Kaskadenausführung.

Für die Turm-Plansiebvorrichtung Weihenstephan spricht der einfache Aufbau, der störungsfreie Betrieb, der geringe Platzbedarf und das niedrige Eigengewicht. Die größeren Probenmengen erübrigen unter Umständen die Probenteilung, zumal für einen Sieblochdurchmesser von 1,2 mm bereits > 60 - 150 g gefordert werden (97). Bei einer statistischen Auswertung im RRSB-Netz - l_{50} - werden die Nachteile der ungleichen Klassenbreiten und ungenügender Abdeckung der Unter- und Obergrenze vernachlässigbar. Für Absiebproben ergab sich eine durchschnittliche Linearität der Kollektive von $\bar{r}$ =.9791. Somit lassen sich für eine grobe Beurteilung des Teilchenkollektives im Vergleich zur eingestellten theoretischen Häcksellänge Korrekturfaktoren k_l angeben:

$$k_l = l_{50}/l_{th} \qquad (64)$$

BEHRENTSEN 1973 (77) hat für das Häckseln von Gras k_l = 1,45 ermittelt, GRIMM 1964 (76) berücksichtigte auch den Durchsatz und errechnete für Luzerne in Abhängigkeit von Durchsatz und der theoretischen Häcksellänge die in der Anhang-Tab.S. angegebenen Korrekturfaktoren. Danach ist k_l proportional Q und l_{th}^{-1}, mit einer Spannweite von $0,79 \leq k_l < 2,43$. Eigene Untersuchungen (24) ergaben für l_{th} = 15,2 mm bei Mais (46 % TM) k_l = 1,07, Luzerne (30 % TM) k_l = 1,27 und bei Stroh (85 % TM) k_l = 1,42. Diese k_l-Werte waren über gewogene arithmetische Mittel ermittelt worden, die Zuführwinkel betrugen bei Mais ς= 0°, bei Halmgut ς = 0 - 90°.

SAQIB und FINNER 1982 (162) errechneten über eine faktorielle Simulation für Zuführwinkel ζ = 0 - 90° eine idealisierte Häcksellänge l_{ILC} (Ideal Lenght of Cut) in Abhängigkeit von l_{th}. Für eine log normale Verteilung von l_i war $l_i = l_{50n} = l_{ILC}$ signifikant von l_{th} abhängig, so daß für $6{,}4 \leq l_{th} \leq 9{,}5$ gilt:

$$l_{ILC} = 0{,}40 + 1{,}26\ l_{th} \qquad (65)$$

Als zweite Variable war die Schnittkastenbreite b_{Sk} enthalten, für die kein signifikanter Einfluß nachzuweisen war. Dies ist aber in Abhängigkeit von der Gutart, dem TM-Gehalt und dem Durchsatz der Fall, so daß Gl. (65) nicht allgemein gültig ist. Grundsätzlich gelten solche lineare Abhängigkeiten nur für Zerkleinerungsgesetze gemäß Gl. (34), also nicht bei einer Nachzerkleinerung. Hierauf wird noch in Kap. 5 eingegangen und dort werden auch k_l-Werte für die verschiedenen Maisernteprodukte angegeben.

Die empirische Ermittlung der Abhängigkeit von l_{th} und dem tatsächlichen Zerkleinerungsgrad ist ein Ziel der vorliegenden Arbeit.

5. Methodik der Konstruktion von Trommelschneidwerken zur Maiszerkleinerung

Die Anwendung der Konstruktionsmethodik ist ein Ordnungsmittel zur Berücksichtigung aller Funktions-, Schnittstellen- und Betriebsforderungen. Übergeordnet sind Gestaltungsprinzipien, die sich am Primat eines der drei Grundumsätze -Stoff, Energie, Signal - orientieren werden.

Nach PAHL und BEITZ 1976 (28) und EHRENSPIEL 1979 (29) setzt sich der Konstruktionsablauf aus vier Arbeitsschritten zusammen:

- Klären der Aufgabenstellung
- Konzipieren unter Berücksichtigung der Funktionsstrukturen
- Entwerfen
- Ausarbeiten und Ausführen des/der Muster

Der Arbeitsschritt - K l ä r e n der Aufgabenstellung- ist für die Zerkleinerung von Mais in Häckslertrommeln als ursächliche Entscheidung einer Produktentwicklung bereits erfolgt. In Kenntnis der biotechnischen Anforderungen wird jedoch offensichtlich, daß eine Verfeinerung durch Aufstellen einer Anforderungsliste unerlässlich ist. Diese muß also auch Hauptmerkmale hinsichtlich Funktion, Wirkprinzip und Gestaltung enthalten. Zweifellos können nie alle Forderungen erfüllt werden, so daß die Einzelmerkmale mit einem Prioritätshinweis zu versehen sind. Dies erfolgt sowohl als P-Wert (P1 absolute Forderung, P2 falls nicht lösbar, weitere Teilfunktion erforderlich, P3 Wunsch, ...) oder als Kennzeichnung mit F (Forderung) oder W (Wunsch).

Der Arbeitsschritt - K o n z i p i e r e n - beinhaltet bekanntlich eine Analyse von Analogien, bekannter technischer Lösungen und der technisch-physikalischen Zusammenhänge. Definitionsgemäß soll die vorliegende Arbeit hierfür die Voraussetzungen schaffen. Die Analogien und technischen Lösungen werden durch Darstellung des Wissensstandes unter Berücksichtigung eigener Beiträge abgedeckt. Die Wissenslücke der Stoff- und Energieumsätze bei der Nachzerkleinerung wird durch originäre Auswertung umfangreicher Leistungsmessungen in Abhängigkeit von der erzielten Zerkleinerung verengt.

Die Arbeitsschritte - E n t w e r f e n und A u s a r b e i - t e n - werden nur exemplarisch an einer eigenen Konstruktion dargestellt.

5.1 Anforderungsliste (vereinfacht)

Der Aufbau der Anforderungslisten ist betriebsspezifisch. Daher wird auch auf die fiktive Übernahme eines Musterblattes verzichtet und nurmehr die allgemein übliche Gliederung gewählt. Die Funktionsforderungen wurde in Kap. 2.1, 3.1 und 3.2 erarbeitet.
(F = Forderung, W = Wunsch)

5.1.1 Funktionsanforderungen

1. Schnitt der halmgutähnlichen Pflanzenteile
   $4\ mm < l_{th} < 20\ mm$
   Siebrückstandsanteil $R_{25\ mm} \leqq 5\ \%$ F
2. Zerstören der Kornsamenschale F
   $c_K < l_{th,NS,RB} < 4{,}2\ mm$ W
3. Zerkleinerung der Spindelteile
   als Rinderfutter wie Halmgut
   als Schweinefutter Kantenlänge $\leqq 2\ mm$ F
4. Zerkleinerung von Maiskolben F
   bei Flüssigmistverfahren $R_{3\ mm} \leq 20\ \%$ W
5. Eignung für alle Maisernteprodukte
   (ausgenommen Körner) F
6. Durchsatzvermögen $Q \leqq 18\ kg/s$ W
   für Reihenzahl: 4
   für Arbeitsgeschwindigkeit $3{,}6 \leq v_F \leq 7{,}2\ km/h$ F
7. Schneid-Trommel mit ausreichender Wurfwirkung
   (Schneid-Wurf-Trommel) W

5.1.2 Schnittstellenanforderungen

1. Sichere Befüllung von Transportgeräten
   Trommel-Abwurfgeschwindigkeit $\leqq 28\ m/s$ W

2. Antrieb durch Ackerschlepper F
   Antriebsdrehzahl 540/1000 min^{-1}

3. Antrieb durch einen Aufbaumotor W
   Selbstfahrer W

4. Wahlweiser Feld- oder stationärer Einsatz W

5. Beschickung von Hochsilos (Förderhöhe 12 - 22 m) W
   Materialgeschwindigkeit ≥ 40 m/s

5.1.3 Betriebsforderungen

1. Einfache Verstellung der Zerkleinerungsintensität F
   (l_{th} und Mahleffekt)

2. Hohe Betriebssicherheit,
   Schutz gegen Fremdkörper F

3. Unempfindlich gegen Durchsatzschwankungen W

4. Sicherer Stofffluß, einfache Beseitigung von Verstopfungen F

5. Hohe Standzeiten der Zerkleinerungselemente und/oder einfache Instandhaltung (Wartung, Austausch) F

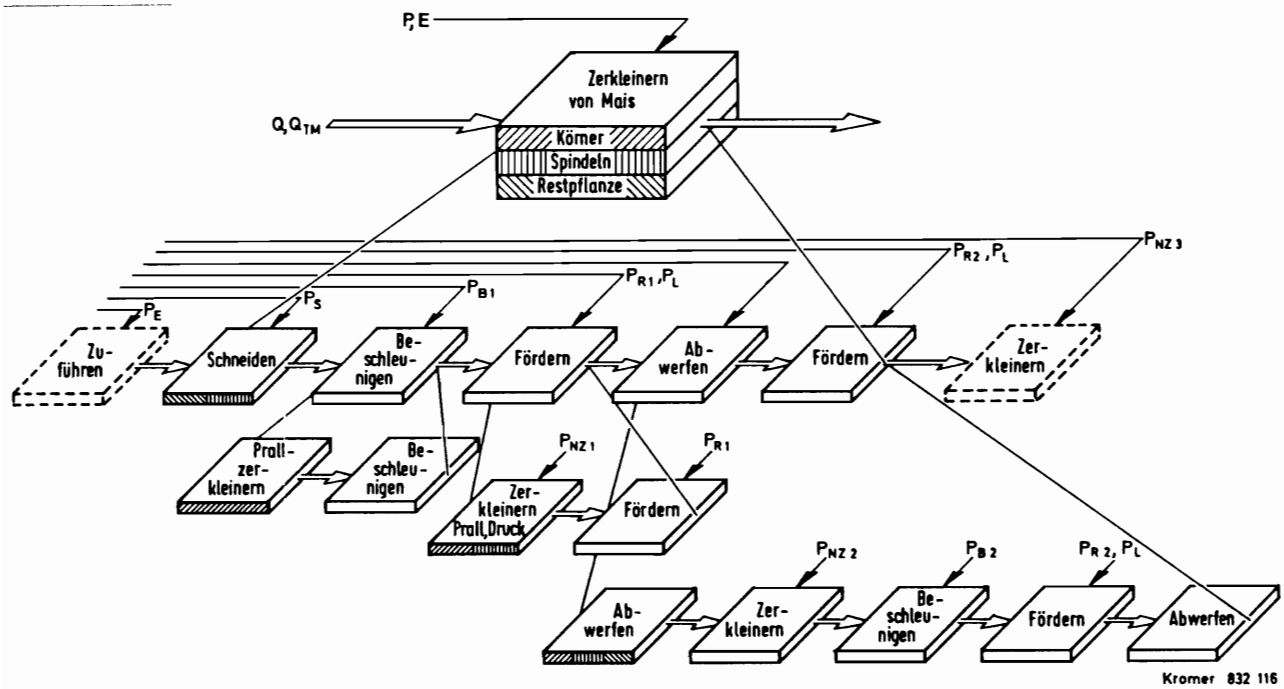


Abb. 11: Funktionsstruktur der Zerkleinerung in Trommelschneidwerken

Da die Zerkleinerung ein technologischer Basisvorgang im Gesamtprozeß der tierischen Produktion ist, müssen vor allem die Funktionsforderungen erfüllt sein. Damit werden auch die Forderungen nach minimalen Verlusten und minimalen Lagerkosten (Lagerraumbedarf) erfüllt (s. Kap. 2.2 und 3).

Das verbreitete Gestaltungsprinzip der minimalen Herstellkosten wird vor allem in den Arbeitsschritten Entwerfen und Ausarbeiten verfolgt.

Für die Beschreibung des Stoff-Flusses und die Minimierung des Energiebedarfes bewährt sich die Bildung einer Funktionsstruktur (Abb. 11). Darin sind die Pflanzenbestandteile - Körner, Spindel, Restpflanze - durch unterschiedliche Schraffuren gekennzeichnet, so daß auch die Ebene (Ort) der Zerkleinerung abgelesen werden kann. Die Struktur der Funktion verfeinert sich von oben nach unten. Die untere Ebene ist dann zur Gliederung einer theoretischen Betrachtung des Materialflusses geeignet. Das gleiche gilt für die Aufstellung einer Leistungsbilanz.

Zu deren Verständnis wird im folgenden Kapitel eine zusammenfassende theoretische Betrachtung des "Stoff"flusses, also der Materialförderung, eingefügt.

5.2 Theoretische Betrachtung des Materialflusses

Der Betrachtung liegen die kinematischen Verhältnisse gemäß Abb. 12 zu Grunde. Bezeichnungen und Formelzeichen sind im Anhang S. zusammengefasst. Grundsätzlich ist in fünf, gleitend miteinander verbundene Phasen des Materialflusses bzw. Einzelfunktionen der Schneidtrommel zu unterscheiden, siehe auch Abb. 11:

1. Materialübernahme (Schnitt-Phase)
2. Materialbeschleunigung (Beschleunigungs-Phase)
3. Materialförderung (Schlepp- oder Förder-Phase 1)
4. Materialabgabe (Abwurf-Phase)
5. Materialförderung (Förder-Phase 2)

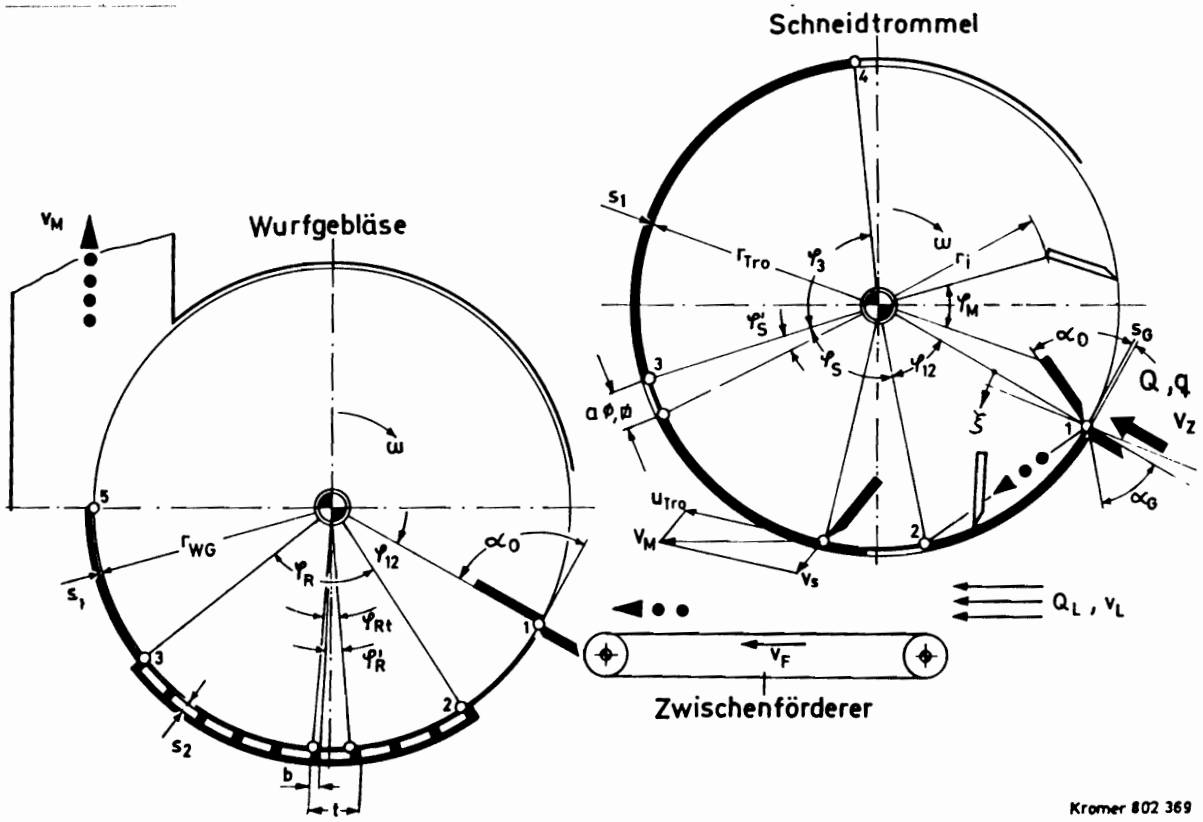


Abb. 12: Schematische Darstellung des Materialflusses in Trommelschneidwerken mit Nachzerkleinerung

5.2.1 Primärzerkleinerung

Die M a t e r i a l ü b e r n a h m e durch das Messer wird als Aufnahmephase (φ_{12}) bezeichnet. Die Anfangsbedingungen für die dabei stattfindende und als Schnittstoß definierte

PRIMÄRZERKLEINERUNG sind die Zufuhr- (Einzugs-) Geschwindigkeit v_z, die Orientierung des Erntegutes (siehe Abb. 8), die Massenverteilung im Schnittkasten und der Grad der Vorpressung. Eine definierte Zerkleinerung durch eine vorgegebene theoretische Häcksellänge (Zerkleinerungsgesetz) kann nur verwirklicht werden, wenn das Material mit konstanter Zuführgeschwindigkeit (Einzugsgeschwindigkeit v_z) der Schnittebene zugeführt wird. Hierzu dient die Einzugsvorrichtung, so daß deren Aufgaben sind BOOKHOLDT 1980 (182),(8):

- Erntegut zu beschleunigen, möglichst schlupffrei und mit konstanter Einzugsgeschwindigkeit fördern
- Erntegut zu verdichten, so daß die Verlustenergie beim Schnitt minimiert wird
- alle Teile im Verband (Preßstrang) zu halten
- ungleichmäßige Längs- und Querverteilung auszugleichen.

Die hierfür notwendigen Anfangsbedingungen sind für die verschiedenen Maisernteprodukte unterschiedlich und nur bei einer halmgutähnlichen Struktur gegeben, also bei Grünmais, Maisstroh und in begrenztem Maße auch für Maiskolben. Nachdem diese Erntegüter beim Feldhäckslereinsatz überwiegen, sind die Einzugsvorrichtungen dafür ausgelegt. Für schüttgutähnliche Strukturen wie Körner und Korn-Spindel-Gemische existiert keine definierte Zerkleinerung (Schrotgesetz). Die Aufgabe der Einzugsvorrichtung besteht vor allem darin, konstante Randbedingungen für die Beanspruchungsmechanismen (Druck und Prall) gemäß Abb. 4 zu schaffen. Leistungsmessungen an einer sog. Vielmessertrommel haben nachgewiesen, daß dann die Veränderung der theoretischen Häcksellänge zwischen 1,95 und 4,32 mm ohne Einfluß auf den Grad der Zerkleinerung und den Energiebedarf war (67). In Analogie zu Holzhackmaschinen kann die Hacklänge auch durch eine Begrenzung des Vorschubes in der Trommel durch geeignete Messerformen erreicht werden, KROMER 1982 (183). Voraussetzung ist eine ausreichende Steife, so daß dieser Effekt z.B. bei Maiskolben ausgenützt werden kann, GEHL 1978 (184).

Die Massenverteilung im Schnittkasten ist neben den biotechnischen Eigenschaften und Stoffwerten auch durch die Art und Qualität der Gutaufnahme bestimmt. Eine Vorzerkleinerung z.B.

durch Schlegelmähvorsätze, Schneckenquerförderung u.a. verbessert bei richtiger Auslegung die Querverteilung, verschlechtert i.d.R. aber die Längsverteilung und vergrößert k_1. Jede erforderliche Änderung des Breiten- und Höhenverhältnisses z.B. von senkrechten Einzugswalzen zu querliegendem Schnittkasten verschlechtert die Querverteilung. In der Praxis ist der F ü l l u n g s g r a d f_s des Schnittkasten stets $\hat{=}$ 1. Eigene Messungen, KROMER 1967 (24) ermittelten f_s für verschiedene Gutarten zu 0,34 - 0,75. Der Füllungsgrad verbessert sich mit steigendem Durchsatz, weshalb die Preßstranghöhe h_P nur für einen bestimmten Bereich eine Kenngröße des Durchsatzes ist. Er ist auch abhängig von der Verteilungsfunktion der Vorpresseinrichtung und damit eine kennzeichnende Maschinengleichung. Seine Ermittlung wird zukünftig sowohl für eine rechnergestützte Konstruktion (CAD) als auch die Einsatzoptimierung durch Verwendung der Agrarelektronik wünschenswert.

Bei den bisherigen theoretischen Betrachtungen wird stets von einer gleichmäßigen Massenverteilung und einem homogenen Gut ausgegangen, was eine vereinfachende Annahme darstellt. Die Aufnahmephase ist dann durch den über der Schnittkastenbreite b_{sk} gleichmäßigen Schnitt- und Beschleunigungsvorgang des Materials gekennzeichnet. Die erforderliche Messer-Umfangskraft (Schneidendruckkraft) F_M für Stauchen und Schneiden errechnet sich nach (29), Abb. 4:

$$F_M = F_{WS} + F'_{St} + F'_R \qquad (66)$$

wobei F' die Kraftvektoren in Umfangrichtung darstellen. Nach Kap. 2.2 und (23, 35, 186) können F'_{St} und F'_R für $u_{tro} \hat{=} 20$ m/s $\gg v_z$ und ausreichender Vorpressung vernachlässigt werden ($h_{St} \hat{=} h_P$, $F_{St} \to 0$, $F_R \to 0$). Somit vereinfacht sich Gl. (66) zu:

$$F_M = s_S \cdot b_{Sk} \cdot \tau_s \qquad (67)$$

Demnach ist die Schnittkraft proportional der Schnittkastenbreite b_{Sk}, der Schneidenbreite s_S ($\hat{=}$ Messerschärfe) und dem Scherwiderstand τ_s.

Für konstante geometrische Abmessungen ist die Scherenergie dem TM-Gehalt proportional und daher auch die Errechnung einer spezifischen Schneidenergie, bezogen auf den TM-Querschnitt (mm^2 TM) oder die Masse (t TM) zulässig. Die Schneidenergie errechnet sich dann mit Gl. (67) zu

$$E_S = F_M \cdot h_P \tag{68}$$

und die erforderliche Schneidleistung nach

$$P_S = k_D \cdot F_M \cdot r_{Tro} \cdot Z_M \cdot n_{Tro} \tag{69}$$

mit Gleichung Gl. (67)

$$= k_D \cdot b_{Sk} \cdot r_{Tro} \cdot s_S \cdot \tau \cdot Z_M \cdot n_{Tro} \tag{70}$$

Gemäß Kap. 2.2 kann die Schneidenergie auf die Trockenmasse und daher P_S auf den Trockenmassedurchsatz Q_{TM} bezogen werden, so daß sich ein spezifischer Schneidenergiebedarf errechnen läßt:

$$E_{STM} = k_D \cdot s_S \cdot \tau \cdot b_{Sk} \cdot r_{Tro} \cdot Z_M \cdot n_{Tro} \, (h_P \cdot b_{Sk} \cdot \rho_{TM} \cdot v_z)^{-1} \tag{71}$$

$$= k_D \cdot s_S \cdot \tau \cdot Z_M \cdot r_{Tro} \cdot n_{Tro} (\rho_{TM} \cdot v_Z \cdot h_p)^{-1} \tag{72}$$

Mit Gleichung Gl. (34) und den Einschränkungen gemäß Kap. 2.2.2 gilt dann (für den Halmgutanteil):

$$E_{STM} = k_D \cdot \frac{s_S \cdot \tau}{h_p} \; \frac{r_{Tro}}{\rho_{TM} \cdot l_{th}} \tag{73}$$

$$P_{STM} = k_D \cdot Q_{TM} \cdot E_{STM} \tag{74}$$

Die spezifische Schneidenergie und damit P_S ist demnach für konstante Randbedingungen (Schnitt und Materialzufuhr) der theoretischen Häcksellänge und der TM-Dichte umgekehrt proportional.

Sie ist hingegen τ_B und damit gemäß Gl. (12) und (13) auch G und E sowie Z direkt proportional, die zusätzlich miteinander verknüpft sind. Unter Berücksichtigung der Stoffeigenschaften in Kap. 2.2 lassen sich Rückschlüsse auf den Einfluß des TM-Gehaltes und den geeigneten verfahrenstechnischen Zeitpunkt der Zerkleinerung schließen.

Wird der Scherwiderstand durch den Flächendruck des Messers p_m ersetzt und F_M als Resultierende der Normalkraft errechnet, läßt sich der Einfluß des Schnittwinkels λ veranschaulichen, KANAFOJSKI 1973 (23):

$$F_M = p_M \cdot s_S \cdot b_{Sk} \; (\cos\lambda + \mu \cdot \sin\lambda) \qquad (75)$$

Für Schnittgeschwindigkeiten < 10 m/s, wie dies in der Abwurfphase und damit beim Nachschneiden an Siebkanten der Fall ist (139), senkt ein zunehmender Schnittwinkel λ die Messerkraft F_M und so den Energiebedarf. Diese in der Praxis konstruktiv genutzten Zusammenhänge wurden durch Messungen von DERNEDDE et al. 1975 (185) und eigene Untersuchungen bestätigt.

Demgegenüber errechnet sich die Zerkleinerungsenergie E_Z für den Kornanteil gemäß Gl. (15) und SMIRNOW 1958 (192) nach

$$E_Z = A_v = k_D \frac{\sigma_D^2 \cdot V_K}{\text{E-Modul}} \qquad (76)$$

$$P_Z = E_Z \cdot Q \cdot \rho_K^{-1} \qquad (77)$$

Es existiert demnach für die meisten Maisernteprodukte keine einheitliche Energiegleichung.

Zusammenfassend läßt sich schlußfolgern, daß die relevanten Konstruktionsparameter der Primärzerkleinerung sind:

- Lage und Ausbildung der Gegenschneide (u.a. ξ, α_G, s_G)
- Schnittkastenabmessung (u.a. b_{Sk}, h_p)
- Messerform (Messerwinkel, u.a. α_0, λ)
- Gestaltung der Einzugsvorrichtung (u.a. f_s).

Die Materialbeschleunigung beruht auf dem mehrfach genannten und in der Literatur hinreichend beschriebenem Schnittstoß, KROMER 1967 (24), VRANY 1971 (71), ORTH 1975 (72), und IGE 1975 (73). In die Betrachtung sind gleichermaßen Untersuchungen über Wurfgebläse von KAMPF 1958 (124), CHANCELLOR 1960 (186) und GLUTH 1971 (128) einzubeziehen. Der anteilige spezifische Energiebedarf für die Materialbeschleunigung ist nur rechnerisch auszuweisen und es gilt:

$$E_B = v_M^2 \, (2\,g)^{-1} \qquad (78)$$

Für die vereinfachende Annahme des Geschwindigkeitsvektors in der Messernormalen und $v_Z \ll v_M$ (24) (siehe Anhang, S.) wird Gl. (78):

$$E_B = (2\pi \cdot \omega(1 + k) \sin \alpha)^2 \, (2\,g)^{-1} \qquad (79)$$

Die Stoßzahlen betragen nach (24) für Grüngut k = 0,1 und für Stroh k = 0,4; für die einzelnen Pflanzenteile von Mais sind sie nicht bekannt. In der Praxis wird es sich stets um ein Mischkolletiv handeln. E_B beträgt dann nach (35) stets über 0,45 MJ/t. Der Leistungsanteil zur Materialbeschleunigung errechnet sich nach

$$P_B = k_P \cdot Q \cdot E_B \qquad (80)$$

Nach Gl. (80) geht die Gesamtmasse ein (auch die Masse des Wassers muß beschleunigt werden), so daß im Unterschied zur Schneidenergie ein spezifischer Energiebedarf bezogen auf die TM nicht ermittelt werden kann. Vielmehr sinkt der Anteil der Schneidenergie an der Gesamtenergie für die Materialübernahme mit steigender Trommelumfangsgeschwindigkeit und abnehmendem TM-Gehalt. Dies bedeutet u.U. auch eine Änderung des Beanspruchungsmechanismus. Schlußfolgernd sind die relevanten Konstruktionsparameter für den Beschleunigungsvorgang:

- Messergeschwindigkeit (u.a. u_{Tro}, $u = f(r)$)
- Messerform (u.a. $\alpha = f(r)$)
- Messerrauhigkeit (u.a. μ , Schlagleisten)

Empirische Untersuchungen der Leistungsverzweigung in P_S und P_B (Abb. 11) von MOUSTAFA et.al. 1977 (78)ergaben für die Materialbeschleunigung die Anteile von 14 % bei Z = 95% TM gegenüber 64,5 % bei Z = 50 % TM, u_{Tro} = 32,3 m/s. Bei u_{Tro} = 45,9 m/s erhöhte sich erwartungsgemäß der Anteil auf 31,4 % bei Z = 95 % TM und 69,6 % bei Z = 50 % TM.

Bei getrennten Schneid-Wurforganen, wie dies bei Trommel-Feldhäckslern großer Leistung üblich ist (siehe Kap. 5.3.2), wird E_B bzw. P_B mehrfach erforderlich, sofern die Abwurfgeschwindigkeit in Richtung und Größe von der folgenden Fördergeschwindigkeit verschieden ist.

$$P_B = P_{B1} + P_{B2} \qquad (81)$$

Die Materialförderung bis zum Erreichen des Trommelgehäuses nach φ_{12} ist umfangreich beschrieben (24,72,73) und endet nicht notwendigerweise am Trommelumfang. Bei ausreichend großem k_S, geringem Messerabstand $r\hat{\varphi}_M$ und geringer Massenbelegung des Messers m_M ist ein Auftreffen im Trommelbereich $r < r_{Tro}$ und eine Sekundär-Prallzerkleinerung möglich. Eine Materialbewegung entlang dem Messer oder der Wurfschaufel ist ohne Bedeutung für die Energiestruktur, sie beeinflußt aber die Wahl der Messerwinkel (24).

Für die Schlepp-Phase wird ein Energiebedarf zur Überwindung der Reibung erforderlich. Die hierbei geltenden Zusammenhänge sind ebenfalls umfangreich für Wurffördergebläse untersucht (24,71,80,124,128,188,189) und es gilt in grober Näherung $E_R = E_B$. Für Häckslertrommeln mit $\alpha_o < 90^o$ gilt

$$E_R = E_B\ (1 + k_a) \qquad (82)$$

wobei $k_a < 1$, so daß E_R = 0,45 - 0,9 MJ/t (35).

Dieser Energieanteil ist bei einer Sekundärzerkleinerung über φ_3 (NZ 1) in dem hierfür erforderlichen Energiebedarf enthalten.

Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Die Einheit von Material-Schnitt und -Beschleunigung und die mangelnde Kenntnis der relevanten Stoffkennwerte erschwert eine rechnerische Erfassung der funktionalen Verknüpfung von Energiebedarf, Umfang der Zerkleinerung (siehe Kap. 3) mit dem Konstruktionsparameter. Vereinfachende Annahmen und darauf basierende Gleichungsvereinfachungen des Schneidenergiebedarfes Gl. (73) nach (35)

$$E_S = \frac{\varepsilon_S}{\rho_{TM} \cdot l_{50}} \cdot k_D \qquad (83)$$

führen zu großen Spannweiten entsprechender Forschungsergebnisse. Für sogenannte spezielle Scherenergie ε_S beträgt sie 1,0 - 5,5 MJ/tTM, ohne Berücksichtigung des tatsächlich erzeugten Teilchenkollektives. Daher erscheinen empirisch ermittelte Kenndaten für definierte technische Randbedingungen aussagekräftiger. Einzelne Konstruktionsparameter können mittels Varianzanalyse auf ihre Signifikanz untersucht werden (73). Zur Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse sind die Meßverfahren zu standardisieren (78, 209).

5.2.2 Sekundärzerkleinerung

Eine definierte SEKUNDÄRZERKLEINERUNG (Nachzerkleinerung) ist erst möglich, wenn das Häckselgut den Trommelumfang erreicht hat, also nach φ_{12} . Gemäß der in Abb. 11 angegebenen Funktionsstruktur ist eine Zerkleinerung sowohl in der Förder-Phase 1 (in der Trommel), in der Abwurf-Phase und der Förder-Phase 2 (in Förder- oder Zerkleinerungseinrichtungen) möglich. Als integrierte Systeme sind nur die beiden ersten Fälle zu bezeichnen; eine Systematik der gebräuchlichen Ausführungen ist in Abb. 12 dargestellt. Die verbreitetsten Lösungen sind Reibböden und Nachschneidesiebe.

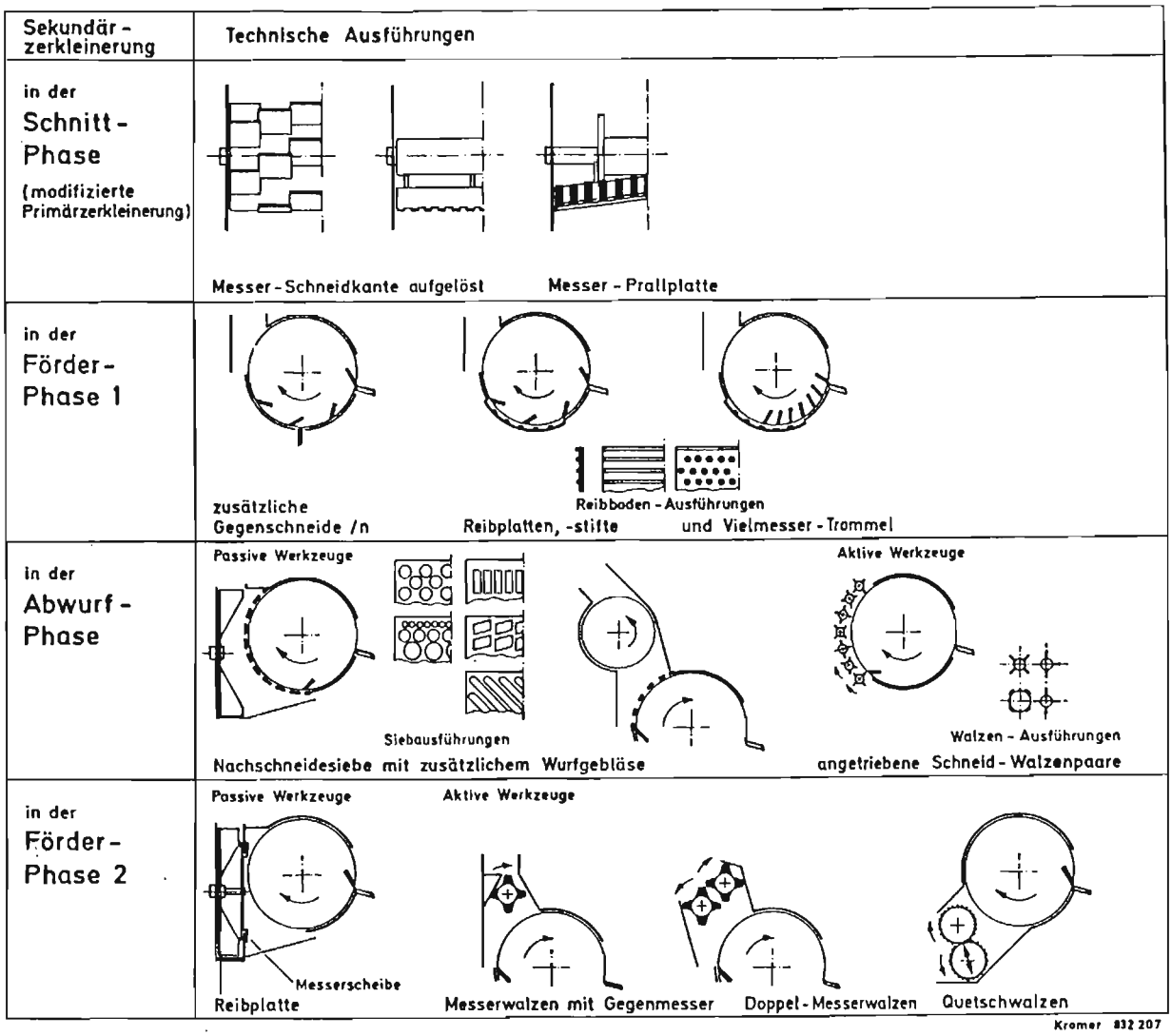


Abb. 13: Systematik von Nachzerkleinerungssystemen

Bei R e i b b ö d e n erfolgt die Nachzerkleinerung durch Anschlagen und Quetschen der auf dem Reibboden (Mahlbahn) gehaltenen Teilchen. Hierfür gelten die in Abb. 4 dargestellten Beanspruchungsmechanismen und analoge Verhältnisse in Mühlen (95). Nachdem für den Freischnitt von Halmgut eine Schnittgeschwindigkeit von ≥ 60 m/s erforderlich ist (35) und gemäß Kap. 5.3.2 $u_{T.ro} \leq 36$ m/s, überwiegt die Prallzerkleinerung des Körneranteiles. Zur Übertragung der Stützkräfte am Reibboden gilt $s_2 >$ max. Kornachse/2 , siehe Kap. 2.2.2. Zusätzlich sollte das spez. Volumen/Messer (aus der Massenbelegung des Messers m_M) in der Größenordnung von $(t - b)s_2$ liegen. Die wirksame Öffnungsbreite $(t - b)_{eff}$ wird durch den Abwurfwinkel ß verringert, siehe Anhang S.187. Umfang der Zerkleinerung und der

Energiebedarf hängen dann von der Deckungshäufigkeit Messer-Reibkante und dem Grad der Verzögerung ($v_M \to 0$) ab. Die Deckungshäufigkeit kann durch Anzahl, Form und Anordnung der Einbauten (Reibleisten,-stifte u.ä.) oder der Messerausführung (Hammerelemente, Messerform u.a.) beeinflußt werden (139,142,158,191).

Demnach muß eine dimensionslose Kennzahl der Deckungshäufigkeit ein Maß für die Intensität der Nachzerkleinerung sein. Hierfür wird eine relative Reibkantenlänge Rk_r als Summe der projizierten Kantenlängen in Richtung u_{Tro} bezogen auf die Gegenschneidenbreite ($\hat{=}\ b_{Sk}$, Initialstoßkante) gewählt. Die sich daraus ableitende Verringerung der Teilchengröße basiert auf der Primärzerkleinerung, gekennzeichnet durch l_{th} gemäß Gl. (34) oder l_{50}, so daß gilt

$$l_{RB} = \frac{v_Z}{Z_M \cdot \omega + Z_M \cdot \omega \cdot Rk_r} \qquad (84)$$

oder mit l_{th} und a zur faktoriellen Berücksichtigung der Einflußgrößen

$$l_{RB} = k_L \cdot l_{th} \, (1 + aRk_r)^{-1} \qquad (85)$$

Hierbei muß für a aufgrund der zuvor diskutierten Zusammenhänge gelten:

$$a \hat{=} s_2 / \sqrt{m_M \, (\rho \cdot b_{sk})^{-1}} \qquad (86)$$

Der Energiebedarfsanteil errechnet sich analog zu Gl. (75) und (78). Die relevanten Konstruktionsparameter der Reibboden-Sekundärzerkleinerung sind schlußfolgernd:

- Messerzahl bzw. Materialvolumen/Messer
- wirksamer Reibbodenwinkel φ_R
- Leistenform (u.a. s_2, t, b)
- Messerform (u.a. α_o, λ)
- Messergeschwindigkeit (u_{Tro})

Bei N a c h s c h n e i d e s i e b e n erfolgt die Nachzerkleinerung als freier Schnitt an der Siebkante (≙ Gegenschneide). Die theoretische Nachschneidelänge l_{thn} errechnet sich dann analog zu Gl. (34) nach

$$l_{thn} = v_M \cdot \sin\beta_a \, (\omega \cdot \varphi_S / \varphi'_S)^{-1} \qquad (87)$$

wobei v_M nach (24), siehe auch Anhang, S. 184:

$$v_M = \sqrt{(v_s \cdot \sin\alpha_o)^2 + (u_{Tro} + v_s \cdot \cos\alpha_o)^2} \qquad (88)$$

Für den Siebdurchsatz (Abscheidung) gilt

$$Q_{Sieb} = k_D \cdot a^2 \cdot v_M \cdot \sin\beta_o \qquad (89)$$

Hierbei bleibt aber die Beeinflussung von v_M durch Ausbildung des Messers bzw. der Wurfschaufel, deren Massenbelegung, Ausbildung der Siebe, die Entmischung, die Teilchenlänge und die Sieböffnungsfläche = f (φ) unberücksichtigt. Daher ist die Erweiterung der theoretischen Betrachtung über das eingeschränkte Analogon des Dreschvorganges sinnvoll. Nach u.a. BRENNER 1934 (192) und CASPERS 1973 (193) gelten Abscheidefunktionen für den Siebdurchsatz Q^*_{Sieb}:

$$Q^*_{Sieb} = f\,(m_M \text{ und } v_s \mathrel{\hat{=}} u_{Tro}) \qquad (90)$$

$$Q^*_{Sieb} = 100\,(e^{a m_M^b}) - 1 \qquad (91)$$

$$Q^*_{Sieb} = 100 - 100\,(e^{a \cdot v_s^b}) - 1 \qquad (92)$$

Außerdem gilt, daß die Abscheidung umgekehrt proportional der Halmlänge ist. Der wirksame Siebwinkel φ_{Sw} muß demnach umso größer sein, je kleiner v_M, u_{Tro}, β_o, φ'_s, a_y, l_{th} und m_M sind. Da die Verteilung der einzelnen Pflanzenteile am Umfang durch die wirkende Zentrifugalkraft und somit deren Rohdichte bestimmt ist, kann durch geeignete Wahl von φ_{Sw} und a = f (φ_{Sw}) auch die Struktur des Häckselgutes beeinflusst werden. Infolgedessen ist die Ermittlung

einer projizierten Schnittkantenlänge, KROMER 1982 (194) analog zu Rk_r nur sehr eingeschränkt aussagekräftig. Tatsächlich läßt sich eine Abhängigkeit einer repräsentativen Körperachse eines Häckselgutes mit der dimensionslosen Schnittkantenlänge nur für die Rückstandssummen auf Sieben großer Lochung, z.B. R_{40} nachweisen (139, 158). Zur Beurteilung der Senkung des Überlängenanteiles R_{40} gilt dann

$$R_{40} = \frac{a}{Sk_r} \qquad (93)$$

mit $Sk_r = a_y \cdot Z_{\varphi s} \cdot b_{Sk}^{-1}$ und a = Korrekturkonstante zur Berücksichtigung der Gutart und der Primärzerkleinerung. Die theoretische Betrachtung läßt demgegenüber als allgemein gültigen Zusammenhang für die Errechnung der Häcksellänge einer Sekundärzerkleinerung mit Nachschneidsieben erwarten:

$$l_{NS} = k_L \cdot l_{th} \left(1 + be^{(1 - l_s/l_{th})}\right) - 1 \qquad (94)$$

mit l_s als geometrischem Mittel der Sieblochkantenlängen. Es existieren keine definierten Nachschneideverhältnisse, wenn das Masseteilchen das Trommelgehäuse ohne weiteren Kontakt mit dem Gehäuse verläßt (Sonderfall für $k > 1$, $\alpha_o \geq 90°$).

Der Energiebedarf der Sekundärzerkleinerung wurde bislang nur als spezifischer Arbeitsbedarf in (kWh/t) für verschiedene Siebvarianten ermittelt (39,142,158). Aufgrund der Zusammenhänge gem. Kap. 2.2 und 5.2.1 ist jedoch eine Abhängigkeit von Q_{TM}(kWh/tTM) zu erwarten. Es existiert kein Berechnungsverfahren des wirksamen Siebwinkels. Bei Nachschneidesieben in Feldhäckslern wird immer E_{B2} erforderlich, so daß sich gegenüber Reibböden ein energetischer Nachteil ergibt. Die relevanten Konstruktionsparameter sind schlußfolgernd:

- Ausgangslänge des Materiales (u.a. l_{th}, l_{50})
- Massenbelegung des Messers (m_M)
- Materialgeschwindigkeit (u_{Tro}, ω, μ, Messerform)
- Sieblochgestaltung (u.a. φ'_s, a)
- Sieblänge (u.a. φ_S, φ_{Sw})

Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Die Sekundärzerkleinerung ist wegen der problematischen Beschreibung des Fördervorganges von Häcksel-Misch-Kollektiven rechnerisch nicht zu erfassen. Daher ist eine faktorielle Verknüpfung der empirisch ermittelten Zerkleinerungs- und Leistungskenndaten anzustreben. Dies wird für Versuchsergebnisse mit Serienmaschinen nur beschränkt möglich sein. Ein Vergleich der Energieverzweigung in Abb. 11 mit den technischen Lösungen gem. Abb. 12 veranschaulicht die Problematik.

Reibböden sind bevorzugt zur Prallzerkleinerung, Nachschneidesiebe zur Schnittzerkleinerung geeignet. Infolge der vergleichsweise geringen Umfangsgeschwindigkeit von Feldhäckslertrommeln ($\leq$ 36 m/s) gegenüber Hammermühlen ($\geq$ 64 m/s, CROSSBY et.al. 1973 (195)) und der messerförmigen Rotorausbildung stellen Nachschneidesiebe nicht die geeignete Einrichtung dar, das Material zur Prallzerkleinerung im Trommelbereich zu halten.

Die diskutierten Beanspruchungsmechanismen bei der Nachzerkleinerung bewirken neben der Verringerung der Teilchengröße auch eine Veränderung der Futterstruktur. Gemäß Kap. 2.3 beeinflussen aufgeschlossene wollige Futterstrukturen die Passagegeschwindigkeit, das Wohlbefinden der Tiere (animal welfare)und die tierische Energieverwertung positiv, so daß dies eine Funktionsforderung für die Sekundärzerkleinerung sein kann.

5.2.3 Leistungsbedarfs-Bilanz

Die Struktur des Leistungsbedarfes lautet gem. der Funktionsstruktur Abb. 11 in mathematischer Form für Feldhäcksler mit Schneid-Wurf-Trommeln

$$P = P_E + P_S + P_{B1} + P_{R1} + P_L \qquad (95a)$$

wobei die Lagerreibung in P_E enthalten ist. Nach GLUTH und VOSS 1966 (196), BRENNER und KROMER 1967 (8) u.a. benötigt die Trommel ($P_S + P_{B1} + P_{R1} + P_L$) 77 bis 90 % des FH-Gesamtleistungsbedarfes. Die Spannweite des Schneidleistungsanteiles am Trommel-Leistungsgesamtbedarf (siehe S.87) beträgt nach REZNIK 1964 (78) 43 - 47 %, nach VRANY 1971 (71) und nach MOUSTAFA 1977 (78) 30 bis 86,6 %. Diese Angaben gelten für den Bereich der theoretischen Häcksellänge von 12,7 bis 15,2 mm. Bei gleichem Durchsatz und vergrößerter Häcksellänge auf über 50 mm beträgt der Anteil des Trommelleistungsbedarfes nur noch 73 % (24). Daher decken sich diese Ergebnisse auch gut mit älteren Untersuchungen, SEGLER 1951 (197).

Für die in Frage kommenden Materialfeuchten errechnet sich unter Berücksichtigung der Randbedingungen der Forschungsergebnisse bei Silomais für P_S nur ein Anteil von 27 bis 35 %, so daß sich das Leistungsflußdiagramm Abb. 14 ergibt. Bei einer Verringerung der theoretischen Häcksellänge auf $\leq$ 6mm steigt der Anteil von P_S auf $\geq$ 60 %.

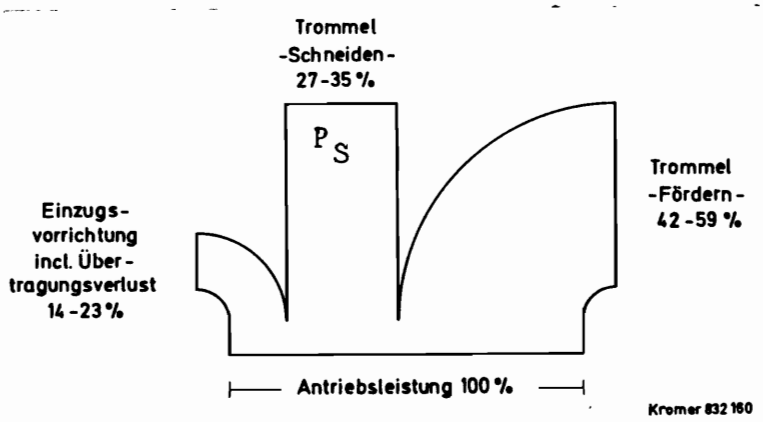


Abb. 14: Leistungsfluß - Diagramm von Trommelfeldhäckslern (Schneid-Wurf-Trommel) beim Häckseln von Silomais (l_{th} = 12,7 - 15,2 mm, Z = 30 - 35 %, Q_{TM} bis 12 t TM/h)

Die Errechnung einer Maschinenkennziffer als Produkt des spezifischen Leistungsbedarfes P_{Sp} und einer repräsentativen Häcksellänge ist demnach nicht sinnvoll.

Aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit von $P_S = f\ (Z)$ und $P_{B+R} = f\ (1/Z)$ kann der Energie- und Leistungsbedarf für eine gegebene theoretische Häcksellänge in Abhängigkeit vom Trockenmassedurchsatz Q_{TM} angegeben werden (23, 24, 35):

$$M_{d_{Tro}} = 2{,}65\ Q_{TM}^{1{,}13} + M_{d_{Leerlauf}} \tag{96}$$

Infolge des vergleichsweise geringen Leistungsanteiles von P_E (inklusive $P_{Leerlauf}$) ist der spezifische Arbeitsbedarf E_{SpTM} (ohne $M_{d_{Leerlauf}}$) eine geeignete Maßzahl zur Beurteilung der Konstruktionsparameter. Es gilt also

$$E_{SpTM} = \frac{M_{d_{Tro}} - M_{d_{Leerlauf}}}{k_D \cdot m_T} \tag{97}$$

$$E_{Tro} = k_D \cdot 2{,}65 \cdot Q_{TM}^{1{,}13} \tag{98}$$

und in der allgemeinen Form

$$E_{SpTM} = a_1\ Q_{TM}^{b_1} + c \tag{99}$$

$$= a_1\ (Q \cdot Z/1oo)^{b_1} + c \tag{100}$$

Gesicherte Angaben über den Energie- und Leistungsbedarf in Abhängigkeit des erzeugten Häckselteilchenkollektives existieren nicht. O' DOGHERTY 1982 (35) hat die Verteilung für konstante, spezifische Energiebedarf- und Umrechnungswerte ermittelt, was gemäß Kap. 4.2.1 und 4.3 keine praxisnahen Ergebnisse erwarten läßt.

Für den Einfluß der theoretischen Häcksellänge oder einer repräsentativen Körperachse auf P sind vielmehr die Gl. (74) und (79)

heranzuziehen, mit $l = l_{th}$, $\bar{l}$, l_{50}, l_{RB} und l_{MS}:

$$E_{SpTM} = a_2 \, (Q \cdot Z/1oo) \, (\rho_{TM} \cdot l)^{-b_2} \qquad (101)$$

Zur Vereinfachung der Betrachtung kann für die verschiedenen Maisernteprodukte ρ_{ST} = const. angenommen werden. Für die Maisernteprodukte ist ρ_{ST} gemäß den Stoffblättern, S. 42 - 46,

$\bar{\rho}_{ST\text{-}Silomais}$ = 165 kg TM/m³
$\bar{\rho}_{ST\text{-}Maisstroh}$ = 119 kg TM/m³
$\bar{\rho}_{ST\text{-}Maiskolben}$ = 659,3 kg TM/m³
$\bar{\rho}_{ST\text{-}Maiskörner}$ = 757,1 kg TM/m³

Die bereinigte Gl. (106) lautet dann mit V_{ST}= const. in a_3:

$$E_{SpTM} = a_3 \, (Q \cdot Z/1oo) \, l^{-b_2} + c \qquad (102)$$

Die anteilige Zunahme von P_S gemäß Kap. 4.2.1 läßt aber in Übereinstimmung mit der Literatur (76,) eine expontielle Abhängigkeit erwarten:

$$E_{SpTM} = a_4 \, (Q \cdot Z/100) \, e^{-b_3 \cdot l} + c \qquad (103)$$

wobei l_{th} gemäß Kap. 4 durch eine äquivalente Körpergröße des Teilchenkollektives ersetzt werden kann.

DERNEDDE und PETERS 1976 (166) haben für die vergleichende Wertung von Nachzerkleinerungsvarianten einen Recutter-Wirkungsgrad η_{Rec} eingeführt:

$$\eta_{Rec} = \bar{l} \cdot P_{Sp} \, (\bar{l}_{Rec} \cdot P_{SpRec})^{-1} \qquad (104)$$

Es ist dies eine für konstante maschinentechnische Randbedingungen zulässige Vergleichszahl. Die Strukturen des Futters und des Energieflusses (Abb. 11) ergeben jedoch keine praxisgerechten Werte.

Da die Dimensionsgleichung den durchsatzbezogenen Leistungsbedarf als spezifischen Arbeitsbedarf ausweist, ist der so ermittelte Wert dem Energiebedarf äquivalent.

Bei Sekundärzerkleinerung und/oder getrennter Materialförderung lautet die Leistungsgleichung

$$P = P_E + P_S + P_{B1+2} + P_{Lges} + P_{NZ1+2+3} \qquad (95\ b)$$

wobei $P_{NZ1} = P_{Reibboden}$, $P_{NZ2} = P_{Nachschneidesieb}$ und P_{NZ3} die Antriebsleistung von Nachzerkleinerungseinrichtungn im Auswurf darstellen. Wird auf Grund der Verwendung eine getrennte Fördereinrichtung und damit P_B erforderlich, ist diese energetisch der Nachzerkleinerung zuzuordnen. Die Dominanz des Beschleunigungsvorgangs bei der Sekundärzerkleinerung läßt eine Verknüpfung von P und Q_{TM} nicht zu. Auf Grund der abnehmenden Wirkung der Nachzerkleinerungseinrichtungen mit steigendem Durchsatz ergeben sich vielmehr lineare Regressionsgleichungen für den Zapfwellenleistungsbedarf $P_{ZW} = f\ (Q)$.

Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Aus einer theoretischen Betrachtung der Zerkleinerung in Trommelschneidwerken läßt sich die mathematische Beschreibung der funktionellen Abhängigkeit des Energie-oder spezifischen Arbeitsbedarfes bzw. Leistungsbedarfes von kennzeichnenden Parametern des Häckselkollektivs ableiten. Die schwierige Definition aller Randbedingungen macht jedoch für die Nutzung der Gleichung vereinfachende Annahmen notwendig. Die Einflußgrößen werden dann faktoriell berücksichtigt, indem mit Hilfe experimenteller Versuchsergebnisse die Faktoren bestimmt und deren Gültigkeit und Signifikanz für die entsprechenden Gleichungen überprüft wird. Zur Auswahl repräsentativer maschinen- und einsatztechnischer Versuchsbedingungen ist die Kenntnis der energierelevanten Konstruktionsparameter und des technischen Standes im Feldhäcksler-bau notwendig. Beides wird im folgenden Kap. 5.3.2 einer Diskussion der Versuchsmethodik,-durchführung und -ergebnisse vorangestellt.

5.3 Konstruktionsparameter

Die Funktionen und der Energiebedarf werden für ein Erntegut mit bekannten Stoffeigenschaften primär durch die in Tab. 11 angegebenen Konstruktionsparameter bestimmt. Es handelt sich dabei um die in Kap. 4.2 theoretisch abgeleiteten Einflußgrößen. Diese sind z.T. umfangreich untersucht worden, so daß es sich bei diesem Kapitel auch um einen Quellennachweise handelt, der zugleich auf Forschungslücken hinweist. Einleitend werden kurz die derzeit gültigen Zahlenwerte oder deren Spannen angegeben, siehe hierzu Abb. 12.

Lage und Winkel der Gegenschneide sind von LILJEDAHL et al. 1961 (198), GRIMM 1965 (76), KLIMANOV 1964 (199), BERENTSEN 1973 (77), TRIBELHORN und SMITH 1975 (190) untersucht worden. Liegt die Schneidebene über der Trommelachse (ξ negativ), sinkt k_1, aber auch das Durchsatzvermögen. Daher ist eine zentrische Anordnung (ξ = o) vorzuziehen. Ein Schneidenwinkel α_G = 45° bewirkt eine signifikante Senkung des Energiebedarfes gegenüber α_G = 90°; ein Freiwinkel im Zuführkanal von 20° bewirkt eine ähnliche Verbesserung der Schnittverhältnisse. Für den Schneidenradius gilt $s_s \hat{=} r_G \leq 0{,}6$ mm.

Die Schnittkastenbreite b_{Sk} hat nach SAQUIB et al. 1982 (200) keine Auswirkungen auf k_1. Der Energiebedarf und die Guthöhe (h_P) sind nach ALICHASCHKIN und CHOMENKO 1965 (189) und (200) umgekehrt proportional, der Einfluß nimmt mit zunehmender Verdichtung ab. Daher werdeneine geometrisch bedingte h_{Pmin}, eine Mindestverdichtung und für große Durchsätze eine $B_{Tro}/D_{Tro} > 1$ erforderlich.

Der Messer-Watenwinkel α_o wurde hinsichtlich Schneidhaltigkeit und Energiebedarf von CHANCELLOR 1958 (185), ALICHASCHKIN und CHOMENKO 1965 (189), BRENNER und GRIMM 1965 (7, 76), BERENTSEN 1973 (77) u.a. untersucht. Danach sollte $30 \leq \alpha_o < 40$ und wegen der Schneidhaltigkeit sicher über 24° betragen, FISCHER-SCHLEMM 1955 (201). Eine zusätzliche Eingrenzung ergibt sich für einen sicheren Abwurf, KROMER 1967 (24).

Für den Messer-Schnittwinkel gilt $10° < \lambda < 18°$. Das Vorzeichen ist für Messer über die gesamte Trommelbreite oder geteilte Messer (aufgelöste Trommelbauweise) unterschiedlich, da auch der Einfluß auf die Sekundärzerkleinerung und die Abwurfrichtung genutzt werden kann, GRIMM 1965(67), KROMER 1967 (24), DERNEDDE et.al. 1976 (166), KUPR et.al. 1982 (191).

Der Abstand Messer-Gegenschneide wird von der Messerschärfe und dem Stengeldurchmesser mitbestimmt. Praxisnah, also auch für Lieschen und Blätter gilt $0,3 < s_G < 0,5$ mm (71,76,77,185).

Für die Messerschärfe werden gefordert $0,03 < s_s < 0,07$ mm. Dadurch wird der Schnittenergiebedarf gegenüber stumpfen Messer s_S=0,5 - 0,7mm) etwa halbiert (35,71,77,185,199,202).

Die Messergeschwindigkeit hat im Bereich von 19-30 m/s nur geringen Einfluß auf die Schneidenergie, TRIEBELHORN und SMITH 1975 (190), andere Untersuchungen weisen einen signifikanten Einfluß im Bereich bis 51 m/s nach (35). Daher sei nochmals auf die problematische Trennung der Energieanteile gem. Kap. 4.2 hingewiesen. Für Schneid-Wurftrommeln gilt $28,5 \leq u_{Tro} \leq 33$ m/s (7,24,35). Für Schneid-Trommeln ist die Umfangsgeschwindigkeit durch die erforderliche Schnittfrequenz bestimmt, und sie ist stets $< u_{Tro}$ der Schneid-Wurf-Trommel. Ein Vergleich der Zahlenwerte mit der Anforderungsliste Kap. 4.1 zeigt bereits die Grenzen kombinierter Schneid-Wurf-Organe.

Die ganzheitliche Betrachtung der Zerkleinerung, also aller Pflanzenbestandteile gemäß ihrem morphologischen Aufbau hat erst in den letzten Jahren verstärkt Eingang in die Forschungsplanung gefunden. Daher liegen vergleichsweise wenig Untersuchungsergebnisse über die Sekundärzerkleinerung vor. Die dominanten Einflußgrößen sind Konstruktionsparameter der Primärzerkleinerung -theoretische Häcksellänge, Messerwerte und Massenbelegung bzw. Materialvolumen pro Messer (Messerzahl, Tab. 11). Daher wird vor der Diskussion des technischen Standes nach der theoretischen Betrachtung in Kap. 4.2 eine zahlwertmäßige Betrachtung des Stoff-Flusses vorangestellt.

Tab. 11: Wesentliche Konstruktionsparameter von Häckslertrommeln und zugehörige wissenschaftliche Veröffentlichungen

Konstruktionsparameter	Quellen
ZUFÜHRUNG	
Gestaltung des FH-Vorsatzes und der Einzugsvorrichtung	8,13,22,30,48,51,52,54-61,66,67,95,182
PRIMÄRZERKLEINERUNG	
Trommelgeschwindigkeiten	7,8,23,30,35,73,77,80,95,185,187
Trommeldurchmesser	23,30,95
Trommelbreite	7,23,30,73,95,189,200
Messerzahl	7,23,30,48,67,73,76,80,95,167
Messeranordnung	7,23,48,67,72,73,76,77,80,167,185
Messerform	7,23,48,67,72,73,76,77,80,124,128,167,185,187
Messerwinkel	7,23,35,48,72,73,76,77,80,117,185,187,189,191,201
Lage der Gegenschneide	7,35,72,73,76,80,185,190,199
Abstand	
Messer - Gegenschneide	7,23,76,185
Messer - Gehäuse	8,124,128,194
SEKUNDÄRZERKLEINERUNG	
Massenbelegung des Messers	23,200
Reibboden	48,67,95,139,166,167,194
Nachschneidesiebe	139,141,142,166,167,191, 194
Nachschneidewalzen	166,191
Häcksler im Auswurf	191
Quetschen	147, 150

Angaben über den Zapfwellenleistungsbedarf als lineare Funktion des Durchsatzes und ohne Berücksichtigung des TM-Gehaltes und des erzielten Zerkleinerungsgrades sind nur als Planungsdaten geeignet, ASAE D230.3, 1979 (212).

4.3.1 Materialfluß in Feldhäckslern

Kennzeichnende Größe des Materialflusses ist der Durchsatz. Aus deren Verknüpfung mit der Dichte und der Durchsatzgeschwindigkeit errechnet sich das Durchsatzvolumen, womit der Bezug von den geometrischen Feldhäckslerquerschnitten hergestellt ist. Für das Gestaltungsprinzip des minimalen Energiebedarfes sind gemäß Gl. (67) und (68) vorrangig die Schnittkastenabmessungen b_{Sk} und h_P von Bedeutung und damit der Grad der Vorpressung und der Füllung. Ungenügende Vorverdichtung in Vorpress- und Preßwalzen führt zur Einleitung von Zugkräften, so daß F_{St} und $F_R \neq 0$ werden. Die Massenverteilung im Schnittkasten bestimmt die Vorverdichtung über b_{Sk} und damit die effektive Dichte. Auf die Definition eines Füllungsgrades f_s war in Kap. 4.2.1 eingegangen worden, der aber nur eine vereinfachende Beschreibung des Verdichtungsverhältnisses darstellt. Der Einfluß auf die Häckselqualität (z.B. k_1) ist bekannt (24, 146, 152), hingegen ungenügend untersucht. Daher wird nachfolgend $\bar{f}_s$ in Ansatz bebracht. Beim Einfluß der Preßwalzenhöhe h_p ist auf den Scheineffekt der Feuchte zu achten, da $\rho = f(h_P)$ und somit $h_P = f(U)$. Infolgedessen ist die deduktive Methode der Dichtebestimmung über h_P zu empfehlen, siehe Gl.(108). Der mathematischen Verknüpfung liegen die Gl (2, 3, 40, 77 - 80) und ergänzend die Zusammenhänge in Abb. 15 zu Grunde.

Der Massen-Durchsatz Q errechnet sich aus dem spezifischen Reihenertrag gemäß Tab 1, der Anzahl der geernteten Reihen z_R und der Fahrzeuggeschwindigkeit zu

$$Q = m_{sR} \cdot z_R \cdot v_F \tag{105}$$

somit beträgt der Querschnitt unter der Preßwalze:

$$A_P = K_D \cdot Q \cdot f_s \, (\rho_P \cdot v_z)^{-1} \tag{106}$$

$$= b_{Sk} \cdot h_P \tag{107}$$

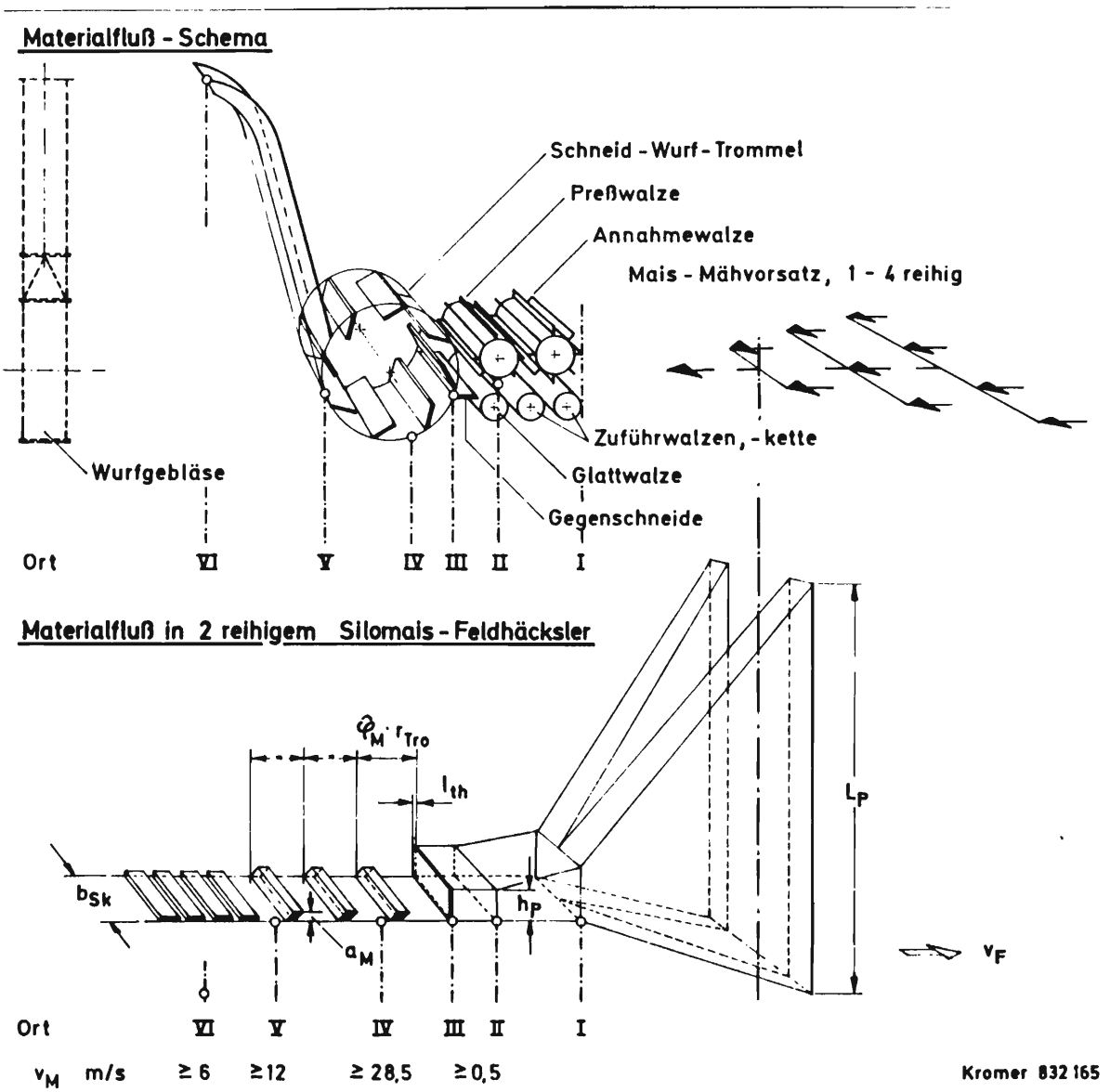


Abb. 15: Schematische Darstellung des Materialflusses am Beispiel eines zweireihigen Maisfeldhäckslers

Die effektive mittlere Dichte unter der Preßwalze kann dann aus Gl. (106) = Gl. (107) errechnet werden

$$\bar{\rho}_{Pe} = \rho_P \cdot f_s^{-1} = K_D \cdot Q \, (v_z \cdot b_{Sk} \cdot h_P)^{-1} \qquad (108)$$

Die Massen-Belegung des Einzelmessers m_M beträgt mit Gl. (105)

$$m_M = K_D \cdot Q \cdot (Z_M \cdot n_{Tro})^{-1} \qquad (109)$$

Eine Aussage über die Veränderungen der Schnittbedingungen macht erst die spezifische Massenbelegung m_{SpM} nach

$$m_{SpM} = m_M \cdot b_{Sk}^{-1} \tag{110}$$

Für die Materialförderung in der Trommel kann die Schüttdichte für die entsprechende Gutfeuchte unterstellt werden, siehe Stofftafeln, so daß sich ein Gutvolumen des Einzelmessers V_M errechnet nach

$$V_M = m_M \cdot \rho_s^{-1} = Q\ (Z_M \cdot m_{Tro} \cdot \rho_s)^{-1} \tag{111}$$

Für die vereinfachende Annahme, daß die Messerlänge = b_{Sk} (Abweichung 10 - 25 mm gemäß Kap. 4.3.2) und der idealisierte Querschnitt des Gutvolumens einem Quadrat oder Trapez entspricht, gilt:

$$V_M = a_M^2 \cdot b_{Sk} \tag{112}$$

und somit ist nach Gl. (111) und (112) und analog zu Gl. (86)

$$a_M = \sqrt{V_M \cdot b_{Sk}^{-1}} = \sqrt{m_M\ (\rho_S \cdot b_{Sk})^{-1}} \tag{113}$$

Nach Gl. (32) ist aber a_M für gegebene geometrische Abmessungen eines Reibbodens ein Maß für den möglichen Umfang der Sekundärzerkleinerung. Werden die Gl. (109) und (112) in die Betrachtung einbezogen, so nimmt die Wirkung von Reibböden mit steigendem Durchsatz ($\hat{=}$ h_P) und fallender Dichte ab, sie wird verbessert durch steigende Messerzahl, Trommeldrehzahl (= abnehmende l_{th}) und Trommelbreite. Dies ist eine Erklärung für die gute Nachzerkleinerung mittels Reibböden von Maiskörnern in Vielmessertrommeln und die geringe Wirkung solcher Einrichtungen in Silomaishäckslern hohen Durchsatzes, sofern dabei m_M steigt. Somit ist auch die Größe in der Beschreibung des technischen Standes einzubeziehen.

5.3.2 Technischer Stand

Eine Beschreibung des technischen Standes der Schneidwerke von Feldhäckslern ist auf die fachkritische Sammlung der technischen Angaben in Firmenporspekten, Typentabellen und Prüfberichten angewiesen, siehe auch Anhang, S. . Da es keine genormte Dateninformation gibt, ist die Anzahl der Einzelwertbildung nicht konstant. In der BR Deutschland werden derzeit 48 Feldhäckslertypen angeboten. Die Sammlung und Auswertung der technischen Daten erfolgt nach

1. Bauart des Häcksel-Schneidwerkes
2. Reihenzahl
3. Verteilung der FH-Typen
4. Durchsatzvermögen (Silomais)
5. Mindest-Antriebsleistung
6. Schneidwerke
   - Abmessungen
   - theoretische Häcksellänge
   - Messerzahl
   - Messergeschwindigkeit (in r_a)
7. Gerätegewicht
8. Massenbelegung des Einzelmessers oder der Wurfschaufel

Ein Vergleich des technischen Durchsatzvermögens aller Feldhäcksler belegt die einleitend gemachte Feststellung, wonach mit rund 68 % die Trommelbauart überwiegt.

Die einzelnen Daten sind in Abhängigkeit von der Reihenzahl in Tab. 12 zusammengefasst. Der Ermittlung der Massenbelegung der Messer liegen die Gl.(105, 109 -113) zugrunde,Tab. 13. Für die geometrischen Daten und den Durchsatz oder das Gewicht lassen sich keine linearen Vergrößerungsfunktionen ableiten. Daher werden die Verteilungskurven der vier wesentlichen Trommelparameter zur Beschreibung des technischen Standes herangezogen. Aus der Verteilung der Trommel-Breiten und -Durchmesser in Abb. 16 ist nur eine deutliche Abgrenzung der einreihigen Geräte bei der Breite möglich. 53 % aller Trommel-Feldhäcksler bzw. 82 % dieser Häcksler

Tab. 12: Verteilung der technischen Daten von Trommel- und Scheibenrad-Feldhäcksler in Abhängigkeit vom Durchsatzvermögen (≙ Reihenzahl des Silomaisvorsatzes); Gesamtzahl einer Bauart = 100 %; WG = Wurfgebläse; [2]) mit Maisschneidvorsatz; n = Anzahl der Variablen; [3]) = Selbstfahrer

lfd. Nr.	Kennzeichen		technische Daten							n
1	Bauart		Trommel-Bauart				Scheibenrad-Bauart			2
2	Reihenzahl		1	2	3	4	1	2	3	4
3	Verteilung	Stck.	6	7	8	6	11	6	4	48
		%	22	26	30	22	52	29	19	
4	Durchsatz v. Silomais									
	Q insges.	t/h	22700				10600			48
	$\bar{Q}$	t/h	33	69	96	120		68	93	45
	max min	t/h	25-40	65-75	70-125	100-135	30-45	60-70	90-100	45
5	Antriebsleistung									
	$\bar{P}_A$	kW	27,8	64,4	130,4	191,3	25,9	54,6	82	46
6	Schneidwerk									
	$\bar{D}_{Tro/s}$	mm	483,4	574,8	580,7	535,3	703	850	1215	27
	ohne WG	mm		594	580					
	mit WG	mm		527	581					
	$\bar{B}_{Tro}$ ($\hat{=}b_{Sk}$)	mm	253	467,8	549,7	567,0	-	-	-	26
	$\bar{l}_{th\ min}$	mm	4,08	4,03	3,96	3,98	4,16	4,2	4,0	43
	$l_{th\ Spannw.}$	mm	3,5-21	3,2-54	3-64	3-48	3,5-10	4-40	4-24	32
	$\bar{Z}_M$	Stck.	8,7	8,7	9,1	8,3	9,9	10	10	47
	$\bar{n}_{Tro/S}$	1/min	1396	980	1036	1135	1429	1196	760	27
	$\bar{u}_{Tro/G}$	m/s	35,3	29,5	31,5		52,6	53,2	48,3	27
	ohne WG	m/s		31,9	35,3					
	mit WG	m/s		23,5	29,96	31,8				
7	Gerätegewicht [2])	kg	522	1452/4779[3]	5845[3]	6800[3]	537	1229	2680	36

mit ≧ 2 Reihen werden mit zusätzlichem Gebläse gebaut, siehe auch Tab.12. Dies ist ohne Einfluß auf die Trommelbreite, erlaubt aber bei zweireihigen Geräten und entsprechend niedrigerem Durchsatz eine Verringerung des Trommeldurchmessers.

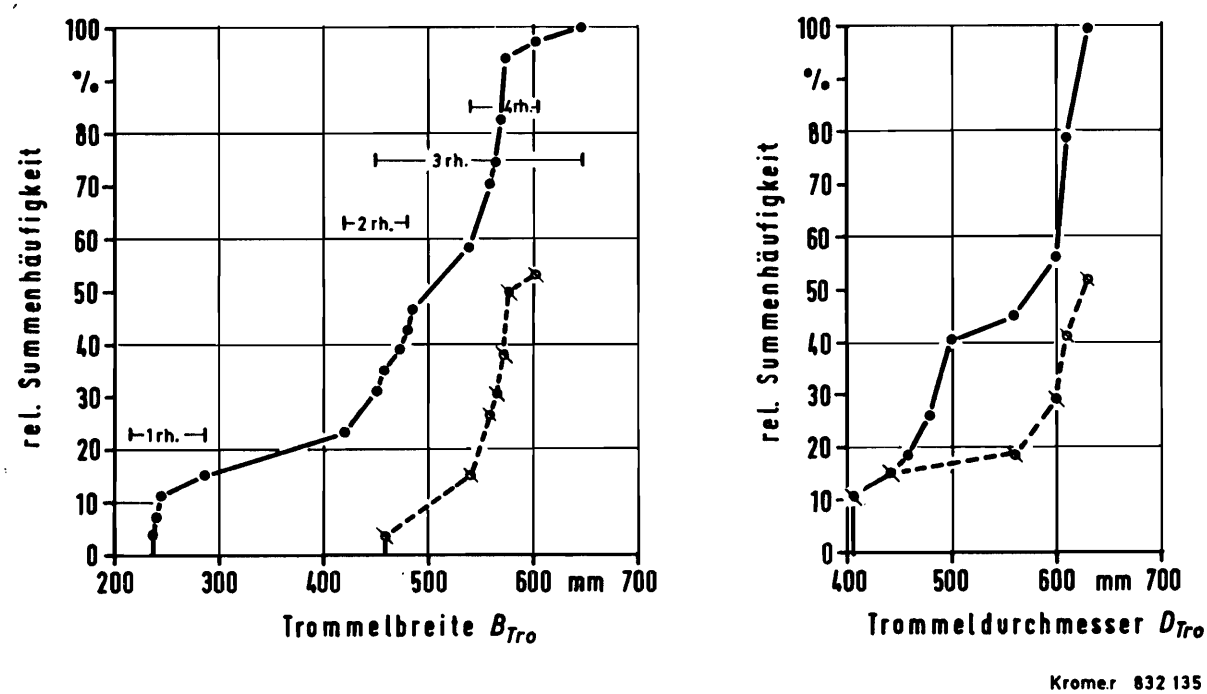


Abb. 16: Verteilungskurven der Trommelbreite und des Trommeldurchmessers
-●- insgesamt; ----⊘---- Trommel-FH mit Wurfgebläse

Abgesehen von einem Feldhäckslertyp ist die Trommelbreite dem Durchsatzvermögen proportional. Die Schnittgeschwindigkeiten (u in $r_a = u_{Tro}$) sind als Mittelwerte in Tab. 12, deren Verteilung und die der Winkelgeschwindigkeit in Abb. 17 angegeben.

Bei Trennung von Schneiden und Fördern beträgt die Umfangsgeschwindigkeit 19,7 - 35 m/s, bei Schneid-Wurf-Trommeln bis 37,5 m/s. Deutlicher ist der Unterschied bei der Winkelgeschwindigkeit mit 85,5 - 119 rad/s für Schneidtrommeln und bis 154,5 rad/s bei Schneid-Wurf-Trommeln. Demnach ist die Schnittgeschwindigkeit den durchsatzrelevanten Konstruktionsgrößen B_{Tro}

und $Z_M n_{Tro}$, bei stationären Häckslern zusätzlich den Forderungen der sicheren Silobefüllung untergeordnet. Dies bedeutet, daß für die in Kap. 4.2 diskutierte Energieverzweigung der Anteil für das Schneiden geringer und damit der Gesamtwirkungsgrad der mechanische Zerklerinerung schlechter wird. Dieser Nachteil kann nur durch eine möglichst geringe Geschwindigkeitsänderung in der Richtung und der Größe gemindert werden.

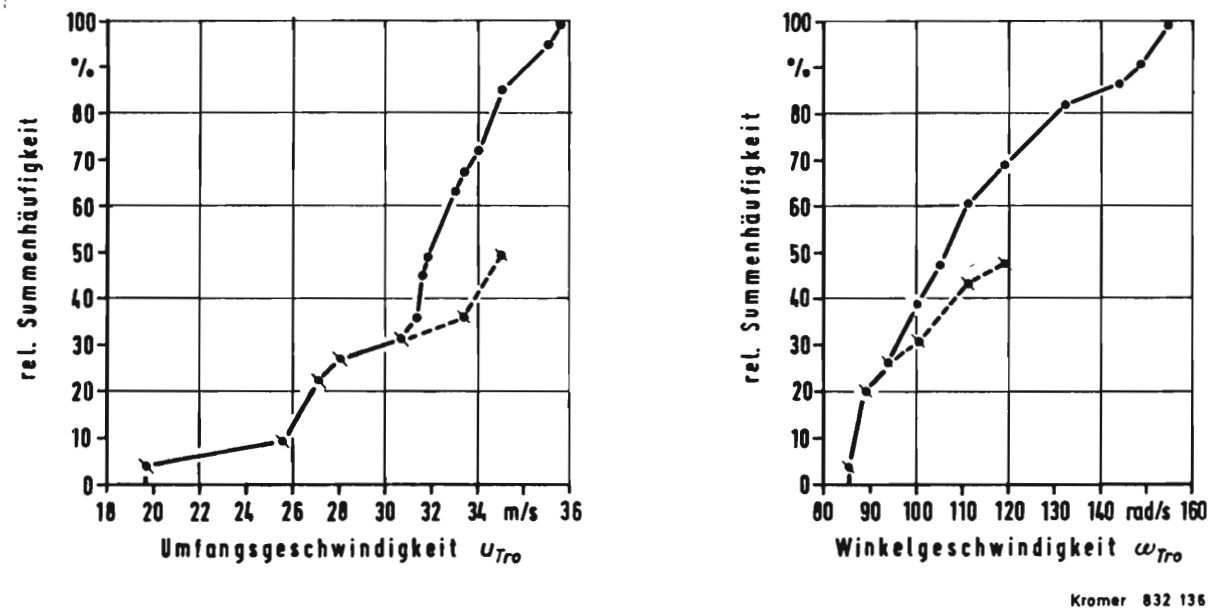


Abb. 17: Verteilung der Umfangs- und Winkelgeschwindigkeit
-●- insgesamt; --⊘-- Trommel-Feldhäcksler mit Wurfgebläse

Die Zunahme der Massenbelegung des Messers m_M mit der Reihenzahl und dem Durchsatzvermögen allein macht noch keine Aussage über eine Änderung der Schnittbedingungen gemäß Kap. 4.1. Erst die spezifische Belegung pro mm Schnittkastenbreite gemäß Gl. (116) erlaubt einen Rückschluß auf h_P und die Errechnung der repräsentativen Querschnittachse a_M nach Gl. (119), Tab. 13. Die Ermittlung von a_M ist für die Sekundärzerkleinerung von Bedeutung, für die Scheibenrad-Bauart geht anstelle B_{Tro} die Schaufelradbreite in die Rechnung ein. Es ist dies nicht Bestandteil der vorliegenden Untersuchung.

Die Zunahme von m_{SpM} gemäß Tab. 13 weist die generelle Zunahme der Preßstranghöhe und der Massenbelegung mit steigender Maschinengröße aus. Demnach verschlechtern sich bei mehrreihigen Häckslern im Vollastbereich die Schnittverhältnisse und die Häckselqualität. Die Gutpolsterhöhe a_M auf dem Messer (trapezförmiger Querschnitt von V_{SpM}) veranschaulicht für praxisübliche Erntefeuchten und Schüttdichten die Abhängigkeit der Gutverteilung vom Maisernteprodukt. Mit steigendem a_M sinkt die Wirkung nicht angetriebener Nachzerkleinerungseinrichtungen. Beim Reibboden sinkt der Massenanteil im Reibkantenbereich, beim Nachschneidesieb steigt der Siebdurchsatz. Tatsächlich nimmt auch der spezifische Arbeitsbedarf bei Häckslern mit Nachzerkleinerung bei steigendem Durchsatz (159) ab.

Tab. 13: Spezifische Massenbelegung und Gutpolsterhöhe auf einem Häckselmesser Körnermais (Z = 75 %, ρ_S = 656 kg/m³); Silomais (Z = 25 %, ρ_S = 250 kg/m³); Maisstroh (Z = 50 %, ρ_S = 208 kg/m³); Maiskolbenschrot (Z = 50 %, ρ_S = 470 kg/m³)

z_R	Stck.	1-reihig	2-reihig	3-reihig	4-reihig
m_{SpM}	g/mm	0,18	0,29	0,32	0,42
a_M Silomais	mm	26,18	34,1	35,8	41
a_M Maisstroh	mm	29,4	37,3	39,2	44,9
a_M Maiskolben	mm	19,6	24,8	26,1	29,9
a_M Körnermais	mm	16,6	21	22,1	25,3

Über die Messerform und -winkel liegen keine Firmenangaben vor, was die Qualität einer Beschreibung des technischen Standes vermindert. Gleiches gilt aufgrund der theoretischen Betrachtung für fehlende Angaben der Gutdichte und -verteilung im Schnittkasten.

6. Experimentelle Ermittlung der Verknüpfungsfaktoren von Häcksler-Leistungsbedarf und Zerkleinerungsgrad in Trommelschneidwerken

Die Ziele der experimentellen Untersuchungen leiten sich aus der methodischen Studie zur Definition des Zerkleinerungsgrades und der theoretischen Betrachtung des Materialflusses in Trommelschneidwerken ab.

Danach war die Definition des Zerkleinerungsgrades durch die Beschreibung des erzeugten Teilchenkollektives über den Median und den Dispersionsgrad möglich. Die Einstellung des Zerkleinerungsgrades erfolgt jedoch über Einsatzparameter wie z.B. die theoretische Häcksellänge und Konstruktionsparameter wie z.B. der Wahl der Lochdurchmesser eines Nachschneidesiebes.
Durch praktische Versuche mit verschiedenen Gutarten war die Verknüpfung der Beschreibungsparameter mit den Einsatz- und Konstruktionsparametern zu überprüfen. Dabei waren zugleich die Verknüpfungsfaktoren der Modellbetrachtung für ausgeführte Konstruktionen zu ermitteln.

Daran anschließend waren die ermittelten Kenngrößen des Zerkleinerungsgrades mit dem Ergebnis der Leistungsmessung zu verbinden, um eine empirische Energiegleichung zu erhalten. Dabei war zu überprüfen, welche der diskutierten Zielfunktionen E = f (Zerkleinerungsgrad) am besten gesichert ist.

Letztlich sollte mit der Versuchsauswertung und Ergebnisdokumentation ein Beitrag zur Standardisierung der Prüfverfahren von Feldhäckslern geleistet werden. Analoge Bestrebungen sind aus den USA (209) und Großbritannien (78) bekannt.

Die Versuche wurden in den Jahren 1971 - 1981 am Institut für Landtechnik der TU München-Weihenstephan durchgeführt*.

---

* Der Verfasser dankt den Herren Ing. grad. J. Dallinger und Dipl.Ing.agr. W. Böhm für die Mithilfe bei der Durchführung und Auswertung der Versuche.

6.1 Versuchsumfang

Mit 7 Exakthäckslern wurden insgesamt 372 Messungen durchgeführt und für 295 Datensätze liegt eine Siebanalyse vor. Die Ergebnisse sind in einer Datei "KROGES" im Anhang, S.196 zusammengefaßt.

Die untersuchten Häcksler und deren charakteristische Parameter max. Messerzahl Z_{Mmax}, Bereich der theoretischen Häckselllänge l_{th} und Umfangsgeschwindigkeit U_{Tro} bzw. $u_{Wurfgebläse}$ sind in der Tab. 14 enthalten. Die Verteilung der Bauarten entspricht dem Typenangebot im deutschen Landmaschinenhandel.
Die detaillierte Maschinenbeschreibung ist ebenfalls Bestandteil der Zerkleinerungsgeräte-Datei "KROGES", die festgehaltenen technischen Kennwerte gehen aus der Ablochliste, S.193 hervor.

Die Materialarten waren Maiskörner, Korn-Spindelgemisch, Maiskolben und Silomais. Wegen des morphologisch ähnlichen Aufbaues von Maisstengeln, -blättern und -lieschen wie Halmgut, wurde die Datei um die Ergebnisse von Häckslerversuchen mit Stroh, Luzerne und Anwelkgut erweitert. Die Materialbeschreibung ist ebenfalls in der Datei "KROGES" enthalten.

Tab. 14: Exakt-Trommelhäcksler des Versuchsprogrammes; Maschinenbauart und -ausrüstung, max. Messerzahl Z_{Mmax}, Bereich der theoretischen Häcksellänge l_{th} und Umfangsgeschwindigkeit u_{Tro} und u_{WG} **)

lfd. Nr.	Maschinen-Ausführung	Z_{Mmax} Stck.	l_{th} mm	u_{Tro} m/s
1	einreihiger Anbau-Maishäcksler ohne Nachzerkleinerung	8	4	34,5
2	einreihiger Anbau-Maishäcksler ohne Nachzerkleinerung	8	4 - 12	36,0
3	Einreihiger Anbau-Pflückhäcksler mit Reibboden	12	3	34,0
4	Exaktfeldhäcksler mit 2reihigem Pflückvorsatz, Nachschneidesiebe	6	7,2	24,1
5	Exaktfeldhäcksler mit 2reihigem Pflückvorsatz, Nachschneidesiebe	6	9,5	23,5
6	Exaktfeldhäcksler ohne Nachzerkleinerung, versch. Vorsätze	9	4 - 12	32,2
7	Stationärer Häcksler mit Nachschneidesieben*)	9 3	3,4 - 5,2 10,2 - 15,6	31,9 36,7**)

*) Nachzerkleinerungsvarianten gemäß Anhang, S.

**) $u_{Wurfgebläse}$

6.1.1 Methodik und Aufbau

Die Ermittlung des Leistungsbedarfes erfolgte durch die Messung des Häcksler-Antriebsmomentes und der -Antriebsdrehzahl für einen mittleren Durchsatz des Versuchslaufes. Für jeden Versuchslauf war der Zerkleinerungsgrad des Häckselgutes zu bestimmen.

Die Ermittlung des Zerkleinerungsgrades erfolgte nach Kap. 4.2 über die Bestimmung kennzeichnender Parameter des erzeugten Teilchenkollektives.

Auf die Versuchsmethotik und den Versuchsablauf wird nachfolgend getrennt für die Leistungsmessung und die Ermittlung des Zerkleinerungsgrades eingegangen.

6.1.1.1 Leistungsmessung

Die Leistungsmessung mittels Drehmoment- und Drehzahlmessung ist hinreichend bekannt und es wurden die bereits mehrfach beschriebenen Meßeinrichtungen am Institut für Landtechnik der TU München-Weihenstephan verwendet. KROMER 1967 (24), HERPPICH und KROMER 1968 (20), KROMER 1979 (139), SCHMID 1979 (167). Auf deren Beschreibung kann verzichtet werden, da sie in ähnlicher Ausführung zum Meßstandard vergleichbarer Versuchsanstellungen gehören,u.a. (142, 166, 209).

Die verwendeten Blockschaltpläne sind im Anhang, S. 190, beigefügt. Alle Mittelwerte von M_d und n wurden mit der Integratorvariante Abb. 40 ermittelt.

Da in Feldversuchen die Durchführung von Doppelbestimmungen selten möglich ist, wurden die Versuche zur Sekundärzerkleinerung überwiegend mit dem stationären Häcksler Nr. 7 (Tab.14) durchgeführt und es liegen hierfür die meisten Datensätze vor. Als Antriebsquelle dienten leistungsstarke Ackerschlepper, der Antrieb erfolgte von der Schlepperzapfwelle mit geringstmöglicher Gelenkwellen-Abwinkelung. Die Motorleistung des Acker-

schleppers wurde stets so groß gewählt, daß kein Abfall der Zapfwellen-Nenndrehzahl zu erwarten war. Im Interesse praxisnaher Leistungswerte wurde der Gesamtleistungsbedarf gemessen und für die Beschreibung der Leistungsverzweigung in Schneid- und Beschleunigungsleistung das Leerlaufdrehmoment gemäß Gl. (103) in Abzug gebracht. Dabei wird der methodische Nachteil in Kauf genommen, daß der Leistungsanteil der zu untersuchenden Schneidtrommel gering und in Abhängigkeit von den Versuchsparametern unterschiedlich hoch sein kann.

Der Versuchsaufbau entsprach insgesamt dem, in der Literatur vielfach beschriebenen Aufbau von Feldhäckslerversuchen (24, 76, 146).

6.1.1.2 Ermittlung des Zerkleinerungsgrades

Die Bestimmung des Zerkleinerungsgrades erfolgte über eine Siebanalyse, die mit Hilfe der in Kap. 4.4 beschriebenen Siebvorrichtung erstellt wurde.
In der Datei sind die Rückstandsmengen als Gewichtsanteil, der Medianwert l_{50}, der Korrelationskoeffizient der Regressionsgeraden im RRSB-Netz und der Dispersionsgrad enthalten. Damit können die Verknüpfungsfaktoren in Gl. (64), (85), (93) und (94) ermittelt werden.

6.1.1.3 Fehlerbetrachtung

Für Feldhäckslermessungen sind die Wiederholbedingungen eingeschränkt, Vergleichsbedingungen existieren noch nicht (78), KLINNER 1983 (210).

Die systematischen Fehler werden als relative Fehler der Messung berücksichtigt. Der relative Fehler der Drehmoment-Messung betrug zwischen ± 0,5 % (Bockschaltbildvariante Abb. 40) und ± 6,75 % (Blockschaltbildvariante Abb. 39), (24), STANZEL 1983 (210). Dem vorliegenden Datensatz liegt die Meßvariante Blockschaltbild Abb. 40 zugrunde, so daß ein relativer Fehler von ± 0,5 % gilt.

Der relative Fehler der Drehzahlmessung beträgt ± 0,5 %
Für diese genügend kleinen Fehler der einzelnen Meßgrößen ist die Addition der in gleicher Richtung wirkenden relativen Fehler zulässig. Somit beträgt der Fehler der Leistungsmessung ± 1 %.
Der relative Fehler der Durchsatzmessung beträgt ± 3 % (24).
Zur Trockenmasse-Gehalt-Bestimmung wurde die Trockenschrank-Methode mit den Kenngrößen: 105°C, 24 h, 100 g, 1 Wiederholung angewandt. Die Parallelenstreuung liegt sicher unter 1 % (85).
Für die Absiebung beträgt die Streuung von l_{50} 0,41 mm.

6.1.2 Versuchsdurchführung

Die Aufteilung in Prüfstands- und Feldversuche richtet sich nach der Bauart der Häcksler, der Gutart und der Aufgabenstellung.

Zur Ermittlung der Verknüpfungsfaktoren Gl. (99) - (103) erfolgte die Leistungsmessung in Abhängigkeit von den folgenden Einflußgrößen

- Massedurchsatz
- Gutart und TM-Gehalt
- Zerkleinerungsgrad durch
  - Primärzerkleinerung (theoretische Häcksellänge)
  - Sekundärzerkleinerung (Nachzerkleinerungsvarianten).

Bei den Prüfstandversuchen erfolgte die Materialzufuhr mittels Förderband oder Bandstraße. Bei konstanter Zuführgeschwindigkeit ($\hat{=}$ v_F) wurde der Durchsatz über Änderung der Belegungsmenge je Meter Förderband ($\hat{=}$ z_R) variiert.

Bei den Feldversuchen wurde der Durchsatz über Änderung der Fahrgeschwindigkeit variiert, die Meßstrecke betrug mindestens 70 m. Dessen Ermittlung erfolgte über den Gewichtszuwachs des Transportwagens in der Häckselzeit.

Für die Zuordnung Gutart - Häcksler (gem. Tab.14) galt die folgende Aufteilung:

Körner, Korn-Spindel-Gemisch, Maiskolben, Stroh und

Luzerne	-	Häcksler Nr. 7
Maiskolben	-	Häcksler Nr. 3, 4, 5
Silomais	-	Häcksler Nr. 1, 2
Gras	-	Häcksler Nr. 6

Die Zapfwellen-Antriebsdrehzahl betrug maschinenbedingt 540 oder 1000 min^{-1}. Damit die Häckselproben nach dem Auswurfkrümmer gezogen werden konnten, wurde ein Zylinder aus Maschendraht oder ein PE-Behälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 10 dm^3 an einem rund 2 m langen Stiel befestigt. So konnte eine Verfälschung infolge Entmischung bei der Förderung vermieden werden. Bei Feldversuchen wurden 5 Proben zur Vermischung von Hand genommen. Von der Gesamtprobe wurden in der Regel 2 x 1 kg für die Siebanalyse vorgetrocknet und für die Bestimmung 2 x 100 g entnommen. In der Datei sind die Mittelwerte der beiden Messungen aufgenommen, eine reale statistische Aussage der Vertrauensgrenzen dieser Mittelwerte kann nicht gemacht werden.

Bei Prüfstandsversuchen wurden nur 2 Proben gezogen und diese einzeln behandelt, die statistische Sicherung verbessert sich dadurch nicht.

Der TM-Gehalt wurde nach der Trockenschrank-Methode bestimmt, die Kennwerte waren: Probengewicht 100 g; Verweildauer 24 h, bei Körnern 72 h; Temperatur 105°C.
Wegen der Problematik einer repräsentativen Probennahme (siehe Kap. 4.2),wurde der TM-Gehalt auf ganzzahlige Werte auf- oder abgerundet. Bei den Prüfstandsversuchen mit Stroh wurde Z nur täglich auf Konstanz geprüft.

Die Absiebung der Häckselproben erfolgte mit der Siebvorrichtung Weihenstephan. Der Ablauf ist umfassend in Kap. 4.3,4.4 beschrieben.

Die Rückstandssummen-Gewichtsanteile R_i sind in die Datei aufgenommen. Der aufwendigste Versuchsteil war jedoch die manuelle Datenaufbereitung. Gemäß Kap. 4.2 war der Medianwert l_{50} graphisch zu ermitteln. Dieser Vorgang wird durch die in der Analyse beigefügten 85 RRSB-Netze mit den Regressionsgeraden aller Datensätze dokumentiert, S. 203 bis 288 .

6.1.3 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die notwendige Zusammensetzung des Datensatzes war in den Kap. 4.2 und 5.2 erarbeitet worden, zur Vermeidung wiederholter Ergebnisnennung wird auf eine Auflistung verzichtet. Die Struktur der Einzeldaten geht aus der Beschreibung der Ablochliste S. hervor. Für eine vielseitige Nutzung der Datei wurden auch Konstruktionsparameter, eine funktionale Verknüpfung mit dem Leistungsbedarf und/oder dem Zerkleinerungsgrad in die Datei aufgenommen. In der Zerkleinerungsgeräte-Datei "KROGES" sind dadurch enthalten:

Kennzeichnende Größen
Konstruktionsparameter
Meßwerte
Errechnete bzw. graphisch bestimmte Größen

Der Datenumfang ist durch die vorgegebene Spaltenzahl von 80 Stück begrenzt. Grundsätzlich ist die Datei nach Erweiterung der Spaltenzahl für Zerkleinerungsgeräte der landwirtschaftlichen und forstlichen Produktion geeignet. Die Dateneingabe erfolgte von Hand in die Tastatur eines Kleinrechners, die Speicherung auf Disketten. Die Verrechnung der Daten erfolgte auf dem Großrechner des Leibnitz-Rechenzentrum nach vorherigem Datentransfer.

Aus der Programmbibliothek der Landtechnik Weihenstephan, AUERNHAMMER 1982 (211) wurden die folgenden Programme (Tab.15) verwendet:

Tab.15: Verwendete EDV-Programme

lfd. Nr.	Name des Programmes	Einsatzmöglichkeit	Autor/Jahr
1	ABMUR	Abbauende multiple Regression	Auernhammer/1973
2	IBMJOB	Erstellen von IBM-kompatiblen Disketten	Auernhammer/Wendl 1982
3	MUR	Bestimmende multiple Regression	Auernhammer/1973
4	PESK	Erstellen von statistischen Kenngrößen	Auernhammer/1972
5	PLOTTE 5	Grafische Darstellung von funktionalen Zusammenhängen	Wendl/1983
6	SORTFU	Sortieren numerischer Datenbestände mit wählbarem Format	Auernhammer/1979

5.1.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind in der Zerkleinerungsgerätedatei "KROGES" im Anhang S.196 dokumentiert. Eine Sichtung der ernteproduktgebundenen Datensätze ergab, daß deren Anzahl für eine statistisch abgesicherte Bewertung der Zerkleinerung von Maiskörnern, Korn-Spindel-Gemischen und Maisstroh zu gering ist. Daher wird die Versuchsauswertung exemplarisch auf die, für den Feldhäcksler-Einsatz auch bedeutendsten Erntegüter Silomais (67 Datensätze) und Maiskolben (81 Datensätze) konzentriert.

In die Datei sind auch die Versuchsergebnisse der Zerkleinerung von Weizenstroh aufgenommen worden. Wegen der morphologischen Ähnlichkeit von Stroh und der Maisgesamtpflanze (≙ Silomais) werden die 162 Datenpaare von Stroh und deren funktionale Verknüpfung im Anschluß an die Silomais-Ergebnisse diskutiert.

Bei Verrechnung der Silomais-Daten ist zu beachten, daß darin auch die Versuchsergebnisse von Scheibenrad-Feldhäckslern (146) enthalten sind. Da sich aber infolge des gleichen Zerkleinerungsgesetzes grundsätzlich gültige Zusammenhänge zwischen der theoretischen Häcksellänge und den Beschreibungsparametern des Teilchenkollektivs ableiten lassen und so der Datenumfang auf die o. g. 67 Datenpaare erweitert werden konnte, erscheint eine gemeinsame Diskussion der Häckslerergebnisse auf dadurch breiterer Basis vertretbar. Bei der Ergebnisdiskussion muß berücksichtigt werden, daß die Massenbelegung der Messer für den Datensatz nicht konstant gehalten werden konnte.

Bei der Definition des Zerkleinerungsgrades wird zur Bewertung des Häckselgutes nicht nur - wie bisher üblich - die theoretische Häcksellänge oder eine mittlere Häcksellänge herangezogen, sondern auch der Ausbreitungsparameter des Teilchenkollektivs, der Dispersionsgrad DG 3. Damit wird die Forderung von Kap. 3 hinsichtlich einer Strukturbeschreibung des Häckselgutes teilweise erfüllt.

Vergleichend zur Trennung der morphologisch verschiedenen Pflanzenteile-Körner von den Spindeln, Stengeln, Blättern und Lieschen wird auch die Rückstandssumme auf allen Sieben >10 mm = $(R_{10}+R_{15}+R_{25}+R_{40})$ ≙ R_{10-40} als Variable eines Datenpaares

errechnet und diskutiert. R_{40} ist als Strukturkennwert nur für Halmgut (Stroh) geeignet.

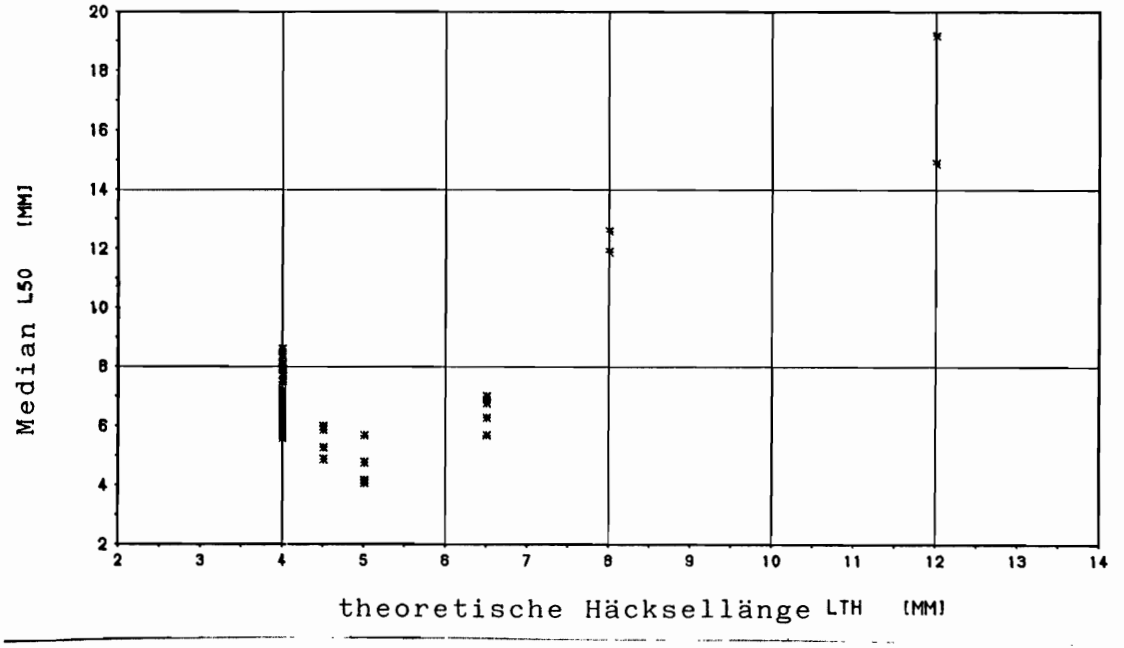
Die Verknüpfungsfaktoren der Zielfunktionen für die verschiedenen Sekundär-Zerkleinerungsvarianten $l_{RB} = f\ (l_{th}, Rk_r)$, Gl. (85) und $l_{NS} = f\ (l_{th}, l_s)$, Gl. (94) können wegen einseitiger Datenstruktur nicht errechnet werden. Dazu ist die gezielte Ergänzung der Datei erforderlich.

Der Energiebedarf wird als Trockenmassedurchsatz-bezogener oder spezifischer Leistungsbedarf errechnet. Die Darstellung erfolgt gem. Gl. (100, 102) in Abhängigkeit von dem Positions- und dem Ausbreitungsparameter des erzeugten Häckselgutes oder Schrotes. Zusätzlich wird die in der Praxis gebräuchliche funktionale Verknüpfung mit dem Durchsatz des feuchten Erntegutes diskutiert.

Die Ergebnisdiskussion erfolgt in umgekehrter Reihenfolge des Versuchsablaufes und deren Beschreibung in Kap. 5.1, da über die Bestimmung des Zerkleinerungsgrades die Bezugsgrößen für den Energiebedarf gewonnen werden.

5.1.4.1 Zerkleinerungsgrad von Silomais und Stroh

Für die Beschreibung des Zerkleinerungsgrades ist es in jedem Falle notwendig, vorab die Aussagekraft der theoretischen Häcksellänge als Positionswert zu klären. Daher sind in den Ergebnisdiagrammen Abb. 18 die äquivalente Körperachse des Teilchenkollektivs l_{50} und der Ausbreitungsparameter DG 3 in Abhängigkeit von der theoretischen Häcksellänge aufgetragen. Aus der Meßpunktverteilung läßt sich eine lineare Abhängigkeit



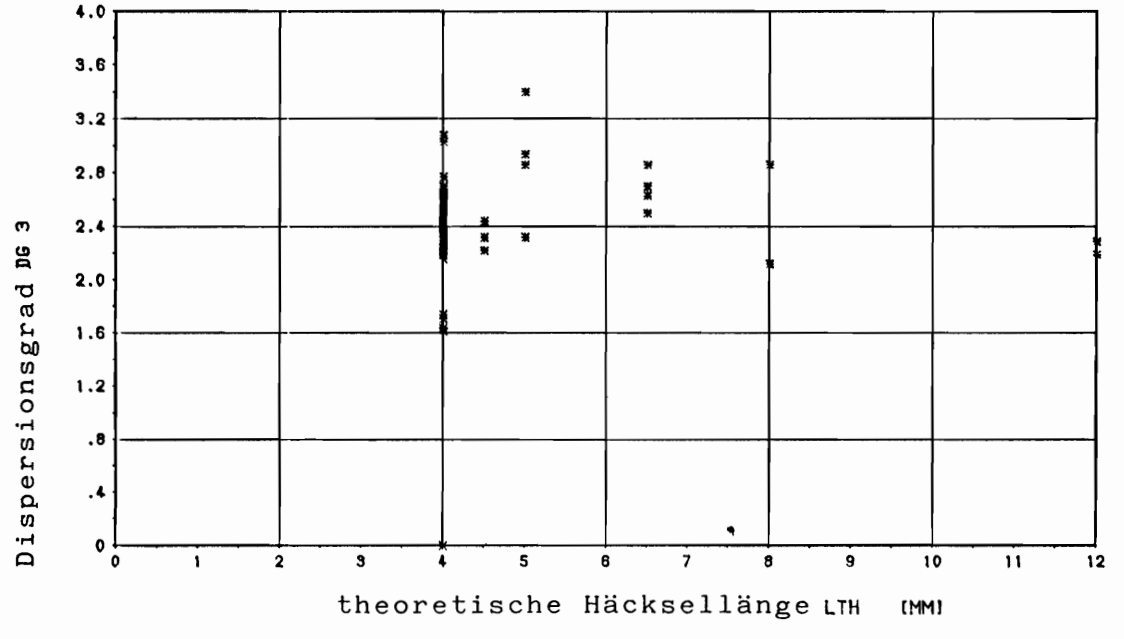


Abb. 18: Abhängigkeit des Median l_{50} und des Dispersiongrades DG 3 von der theoretischen Häcksellänge l_{th}
Material: Silomais, Z = 26 - 40 %, 67 Datenpaare

zwischen l_{50} bzw. DG 3 und l_{th} erwarten.

Eine Regressionsanalyse bestätigt diese Annahme:

$$l_{50} = 1{,}2044\ l_{th} + 1{,}0902 \quad \text{für } n = 67 \text{ mit } B = 51{,}3\%,\ t_S = -5{,}098$$

$$DG3 = 0{,}0354\ l_{th} + 2{,}1556 \quad \text{für } n = 67 \text{ mit } B = 0{,}9\%,\ t_S = -8{,}954$$

Tatsächlich sind beide Datenpaare signifikant miteinander verknüpft ($P < 0{,}001$) mit einem für Güter gutem Bestimmtheitsmaß. Andererseits veranschaulicht die Spannweite von l_{50} auf l_{th} = 4 mm die geringe Eignung von l_{th} als Positionsparameter. Der Anstieg von l_{50} für $l_{th} < 5$ mm weist auf die Grenzen der derzeitigen Einzug-Schneidwerk-Kombination bei geringen theoretischen Häcksellängen hin. Danach existiert eine gerätegebundene günstigste theoretische Häcksellänge, wird diese unterschritten, geht die Häckselqualität zurück. Die Streuung der Werte von DG3 um 2,4, unabhängig von l_{th}, zeigt daß eine Verringerung der theoretischen Häcksellänge den Feinheitsgrad nicht verbessert. Trägt man den Dispersionsgrad über dem Median auf Ergebnisdiagramm Abb. 19, so steigt dieser mit abnehmendem l_{50} an, deren Spannweite nimmt ab. D.h. je geringer die äquivalente Körperachse ist, um so größer ist die Ausbreitung der Verteilungskurve, um so ungleichmäßiger ist das Häckselgut.

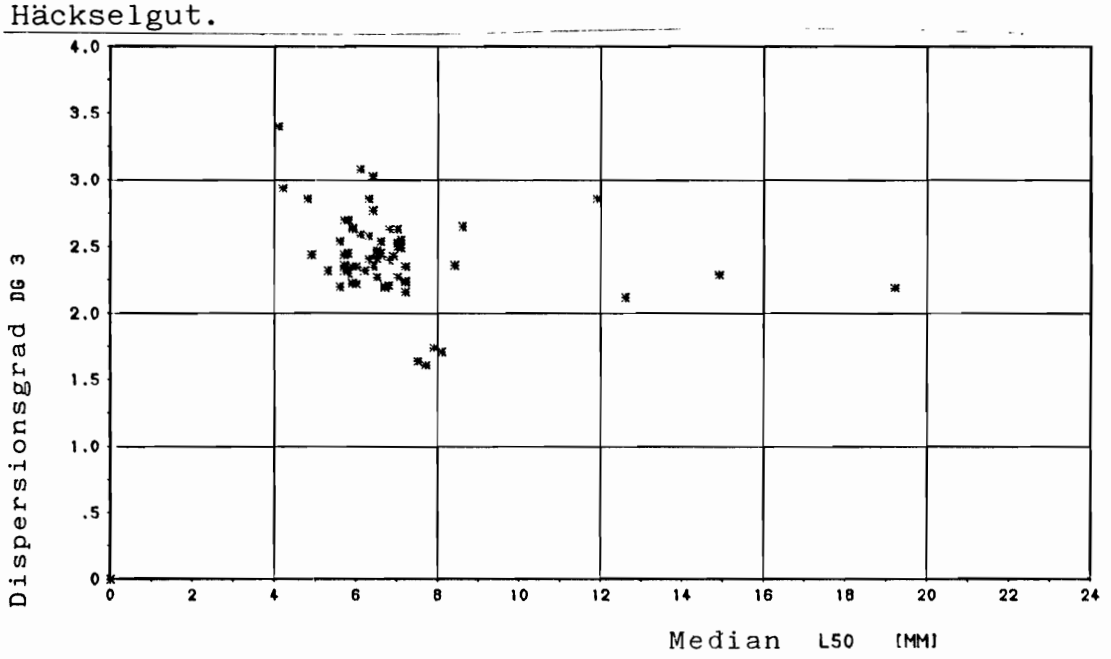


Abb.19: Abhängigkeit des Dispersionsparameters DG 3 vom Positionsparameter l_{50}
Material: Silomais, $\bar{Z}$ = 26 - 40 %, 67 Datenpaare

Eine lineare Regressionsanalyse ergibt eine hochsignifikante Verknüpfung:

$$DG3 = 0{,}0709\ l_{50} + 1{,}8086 \quad \text{für } n = 67 \text{ mit } B = 12\%,\ t_S = 5{,}190$$

Zusammenfassend kann gefolgert werden, daß die theoretische Häcksellänge nur in einem bestimmten Bereich (für die vorliegenden Ergebnisse bei $l_{th} > 5$ mm) die mittlere Teilchengröße des Häckselkollektivs signifikant beschreibt ($P < 0{,}001$). Wird dieser Bereich unterschritten, erlaubt die Streuung der Werte keine funktionale Verknüpfung. Außerdem stellt die Verkürzung der theoretischen Häcksellänge kein Mittel zur Verbesserung des Feinheitsgrades der Gleichmäßigkeit des Häckselgutes dar. Vielmehr werden dessen Bestwerte für $k_1 = 1$ erzielt. Folglich ist die theoretische Häcksellänge bei den heute üblichen Werten kein geeigneter Parameter für die Zielfunktion Energiebedarf = f (Zerkleinerungsgrad).

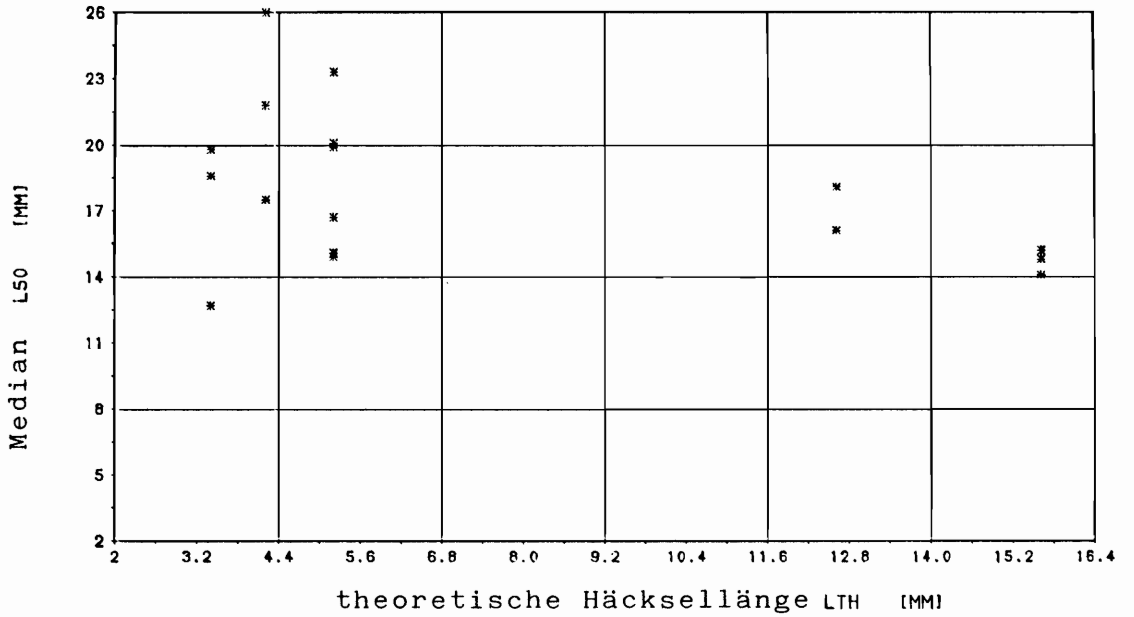
Dieses Ergebnis wird durch die analoge Darstellung der Datenpaare von Stroh, Ergebnisdiagramm Abb. 20 bestätigt. Auch hiernach stellt die theoretische Häcksellänge kein geeignetes Mittel zur Kennzeichnung des Zerkleinerungsgrades dar. Die Streuung der Einzelwerte berechtigt nicht zur Errechnung einer Regressionsgeraden.

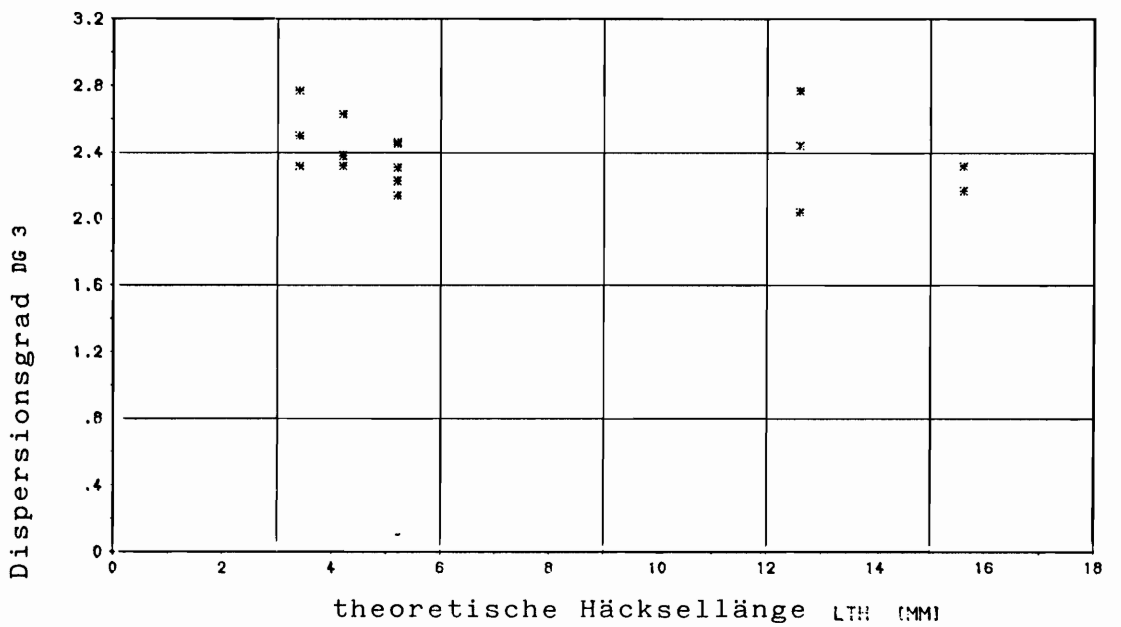
Tendenziell kann die gleiche Aussage für die Verknüpfung von l_{50} bzw. DG 3 mit l_{th} und DG 3 mit l_{50} für alle 162 Datenpaare von Stroh, also auch mit Sekundärzerkleinerung gemacht werden (Ergebnisdiagramme Abb. 21). Eine nochmalige exemplarische lineare Regressionsanalyse erhärtet dies:

$$l_{50} = -0{,}0402\ l_{th} + 13{,}0326 \quad \text{für } n = 162 \text{ mit } B = 0{,}3\%,\ t_S = -0{,}034$$

$$DG3 = 0{,}0528\ l_{th} + 1{,}4442 \quad \text{für } n = 162 \text{ mit } B = 31{,}5\%,\ t_S = -0{,}421$$

Der größere Konstantwert bei $l_{50} = f\ (l_{th})$ war für Stroh zu erwarten; die ungenügende statistische Sicherung läßt keine numerische Deutung zu.





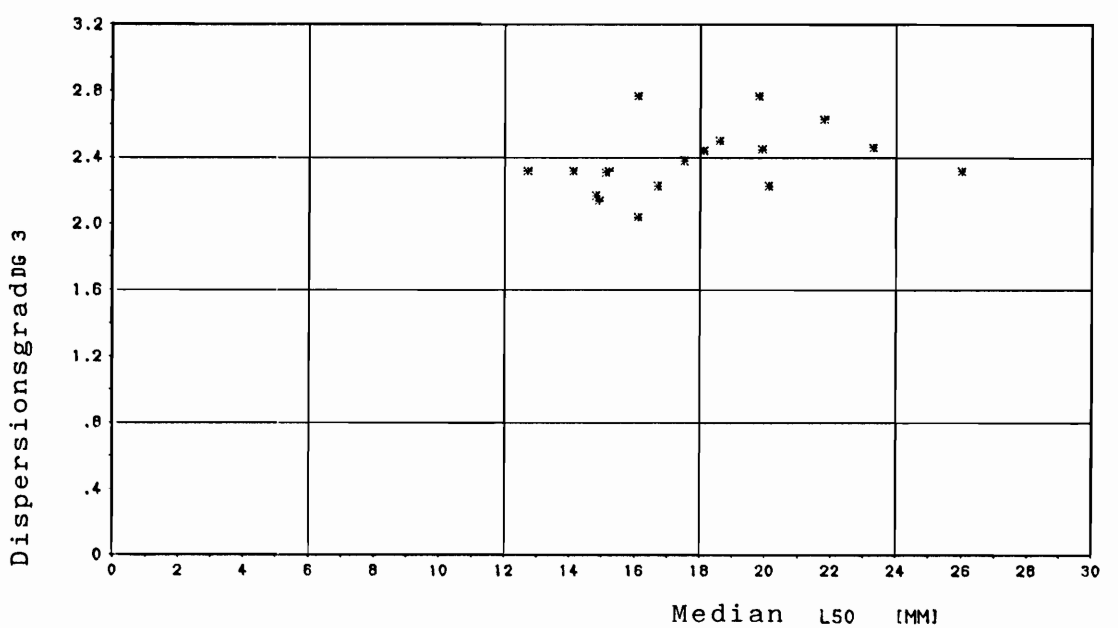
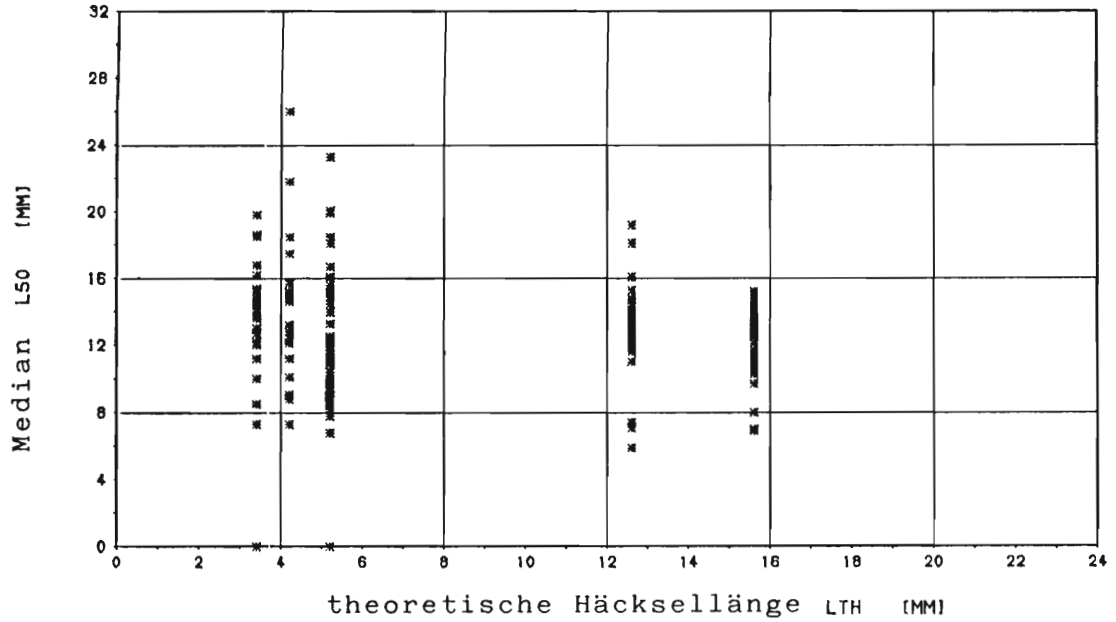
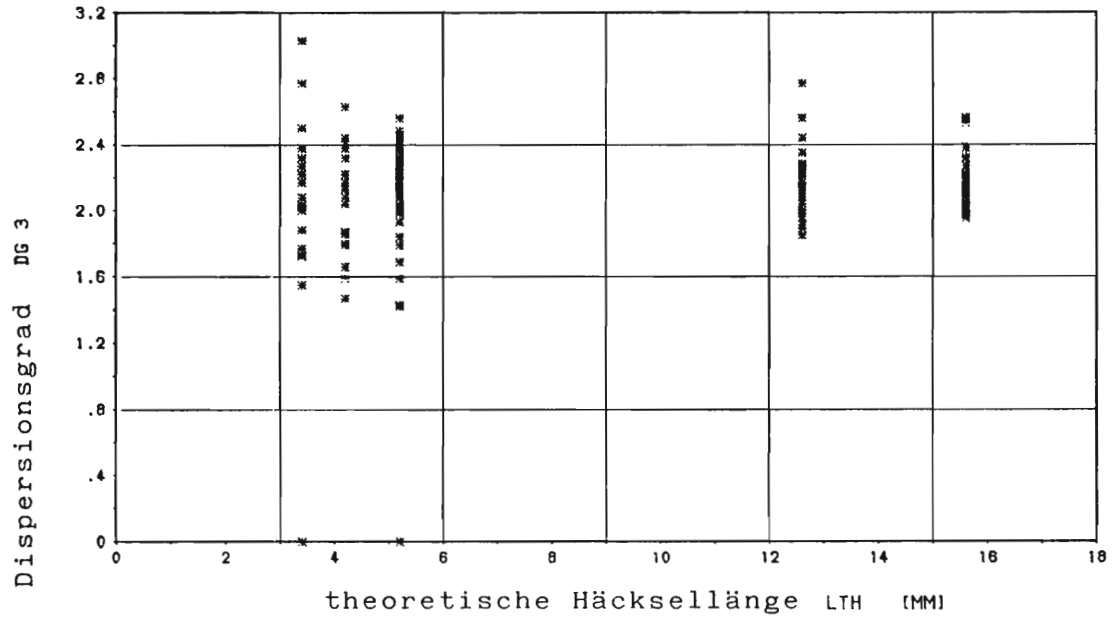


Abb. 20 : Darstellung der Verknüpfung ($l_{50}=f(l_{th})$, $DG3=f(l_{th})$ $DG3=f(l_{50})$, ohne Sekundärzerkleinerung
Material: Stroh, Z=85-87%, 18 Datenpaare





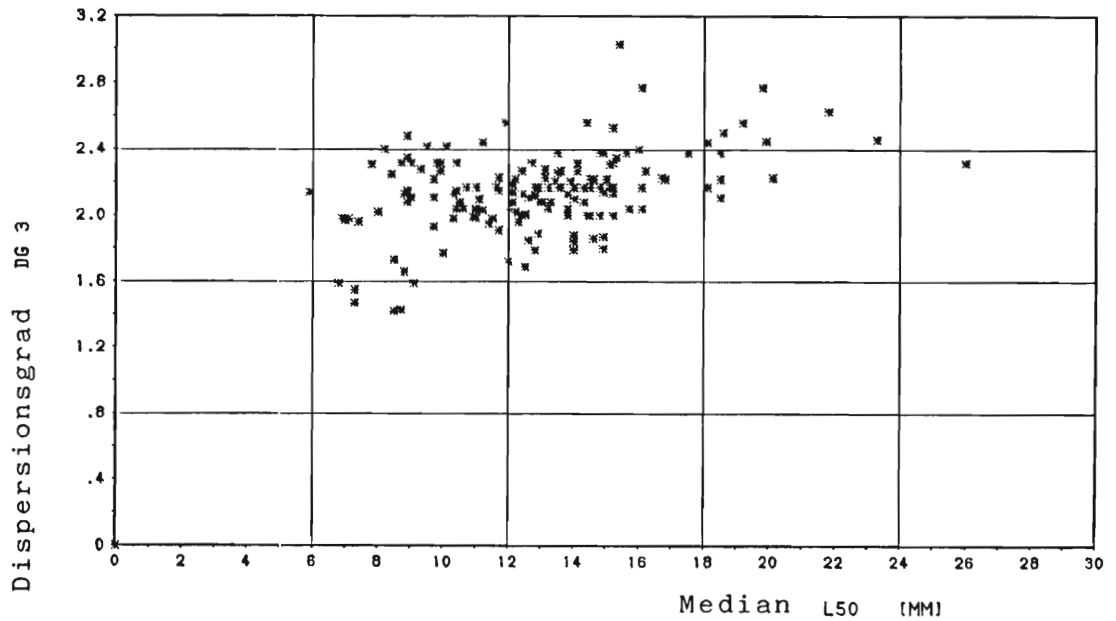


Abb. 21: Darstellung der Verknüpfung ($l_{50}=f(l_{th})$, $DG3=f(l_{th})$ und $DG3=f(l_{50})$ für Häckselgut nach Sekundärzerkleinerung.
Material: Stroh, Z=85-87%, 162 Datenpaare

Die Darstellung der Verknüpfung von DG 3 und l_{50} zeigt für "brüchiges" Stroh eine umgekehrte Verlaufstendenz wie bei Silomais. Bei Prallzerkleinerung senkt also die Verringerung von l_{th} auch den Dispersionsgrad. Für die Beurteilung der technischen Varianten der Sekundärzerkleinerung sind die Daten zu sortieren, und durch Verwendung unterschiedlicher Symbole zu kennzeichnen (o ohne Sekundärzerkleinerung, ▵ Reibboden, * Nachschneidesieb).

Vorab war die aus der Literatur bekannte Zielfunktion R_{40} = f (Sk_r) Gl. (93) auf ihre Gültigkeit zu prüfen. Gemäß Abb. 22 existiert für die vorliegenden Datenpaare von Stroh diese Abhängigkeit nicht.

Sind Abhängigkeiten DG3=f(l_{50}) auf eine funktionale Verknüpfung mit der relativen projizierten Schnittkantenlänge (Sk_r) oder Reibkantenlänge (Rk_r) hin zu untersuchen, Abb. 23 und 24, kann darauf noch verzichtet werden.

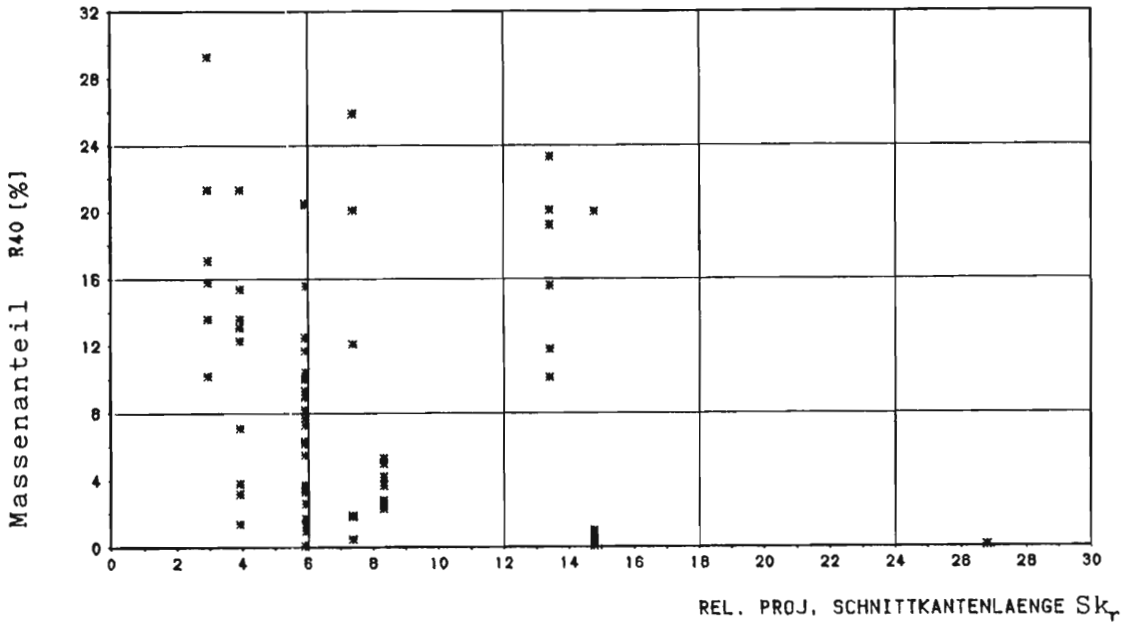


Abb. 22: Abhängigkeit der Rückstandsmenge R_{40} auf dem Sieb mit 40mm LochØ von der relativen projizierten Schnittkantenlänge SK_r
Material: Stroh, Z=85-87%, 48 Datenpaare

Dabei wird durch die unterschiedliche Ordnung der Datenpaare DG3=f(l_{50}) in Abb. 23 und 24 nachgewiesen, daß Reibboden und Nachschneidesiebe ein unterschiedliches Teilchenkollektiv

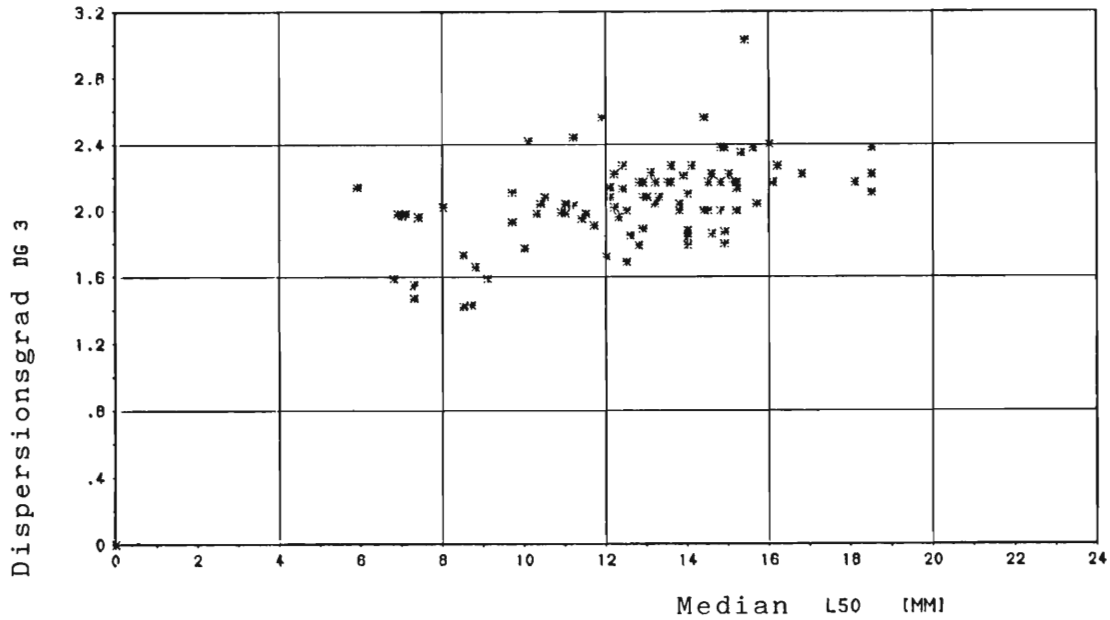


Abb. 23 : Verknüpfung von DG3 und l_{50} bei Sekundärzerkleinerung mit Reibböden
Material: Stroh, Z=85-87%, 96 Datenpaare

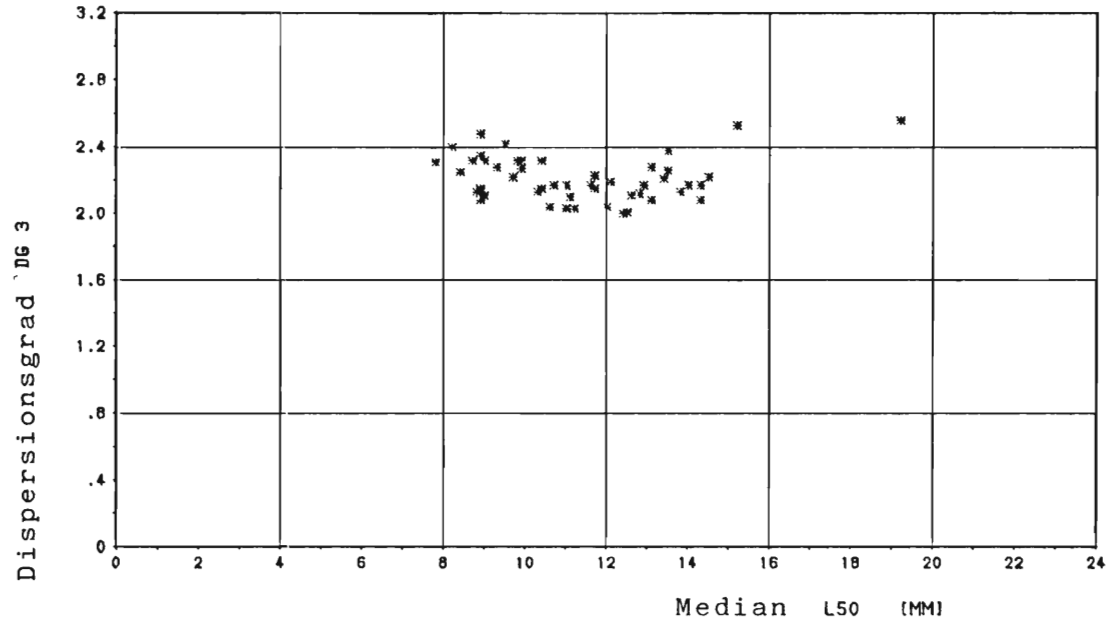


Abb. 24 : Verknüpfung von DG3 und l_{50} bei Sekundärzerkleinerung mit Nachschneidesieben
Material: Stroh, Z=85-87%, 48 Datenpaare

Für Reibböden belegt eine lineare Regressionsanalyse eine gewisse Abhängigkeit des DG3 von l_{50}, siehe hierzu Abb. 23:

$$DG3 = 0{,}0801\ l_{50} + 1{,}0227 \qquad \text{für } n = 96$$
$$\text{mit } B = 47{,}7\%,\ t_S = -1{,}939$$

erzeugen. Für Reibböden ergibt eine lineare Regressionsanalyse eine geringe signifikante Abhängigkeit ($P < 0{,}01$) des DG3 von l_{50} bei einem hohen Bestimmtheitsmaß:

$$DG3 = 0{,}0801\ l_{50} + 1{,}0227 \qquad \text{für } n = 96 \text{ mit } B = 47{,}7\%,\ t_S = -1{,}939$$

Somit ist der Feinheitsgrad von Strohhäcksel bei Nachschneidesieben unabhängig vom Median l_{50}, bei Reibboden diesem signifikant funktional verbunden.

Diese qualitative Unterscheidung gilt für die Zielfunktion DG3 $=f(Rk_r)$ nicht, Abb. 26, die Sekundärzerkleinerungsvarianten sind durch die unterschiedlichen Symbole gekennzeichnet.

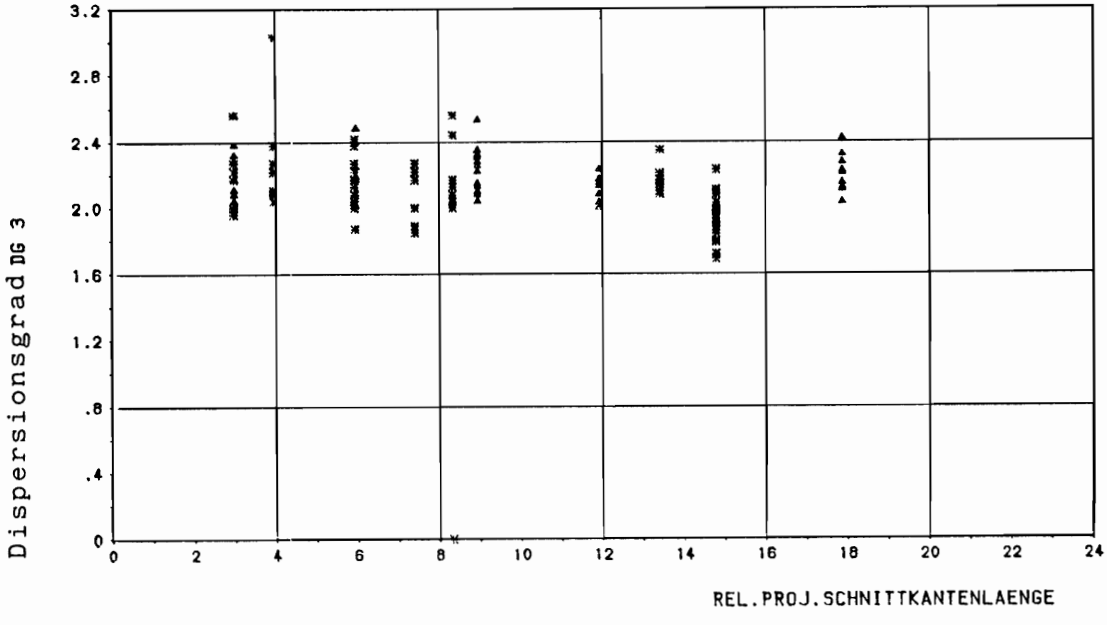


Abb. 25: Abhängigkeit des DG3 von der relativ projizierten Schnittkantenlänge Sk_r, Rk_r
Material: Stroh, Z=85-87%, 162 Datenpaare

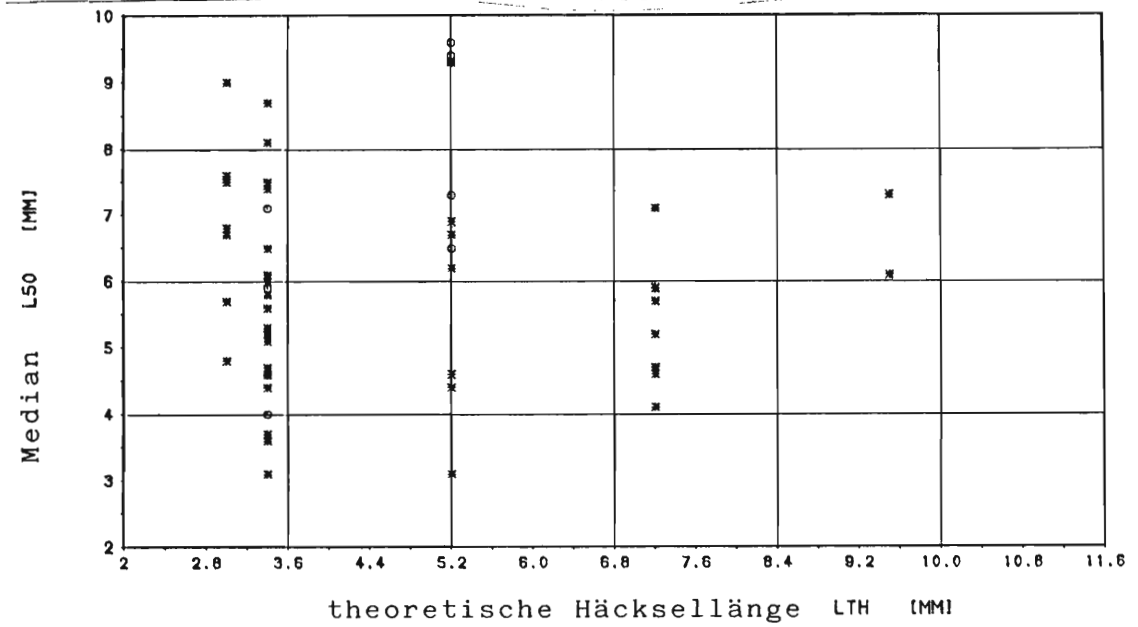
Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß bei brüchigen Häckselgütern (hoher E-Modul, geringe Grenzbruchfestigkeit) Reibböden das geeignete Werkzeug sind, um ein möglichst gleichmäßig feines Teilchenkollektiv zu erzeugen. Dies gilt für den vorliegenden Datensatz aus Versuchen mit geringer Massenbelegung der Messer.

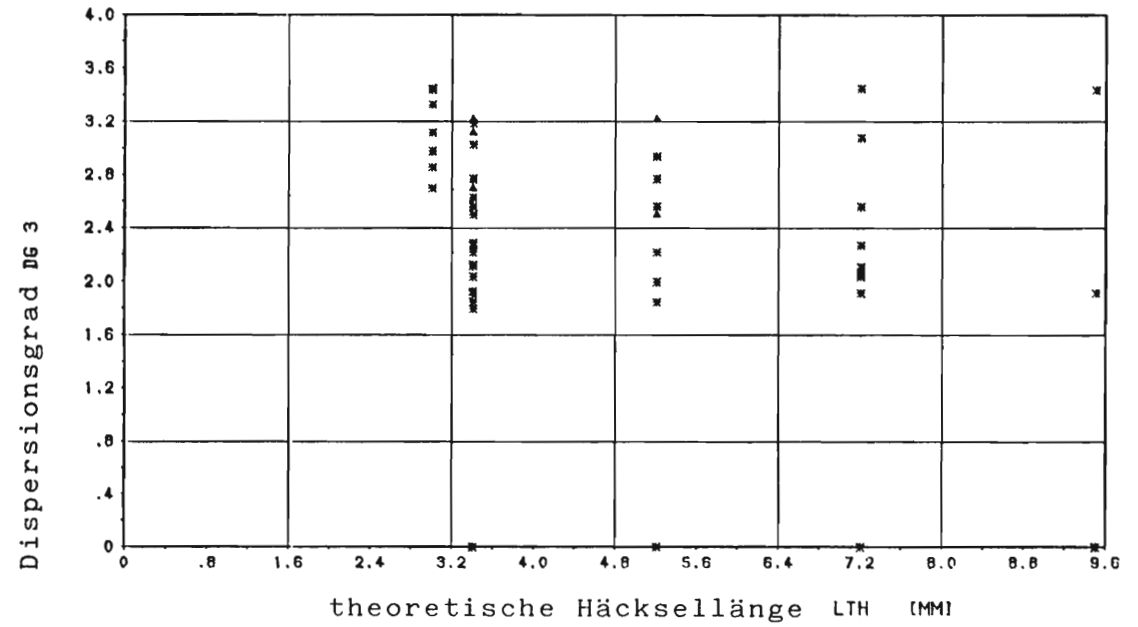
6.1.4.2 Zerkleinerungsgrad von Maiskolben

Die in Kap. 3 definierten Anforderungen an die Zerkleinerung von Maiskolben sind in Trommelfeldhäckslern nur durch eine zusätzliche Sekundärzerkleinerung zu erfüllen. Daher sind in den Ergebnisdiagrammen Abb. 26 alle Daten zur Beurteilung der Abhängigkeit von l_{50} und DG3 von l_{th} und der Verknüpfung von DG3 mit l_{50} aufgetragen. Erwartungsgemäß ergibt sich keine numerische Verknüpfung, so daß analog zu der Beschreibung der Teilchenkollektive bei Silomais für eine energetische Betrachtung der Wert l_{50} heranzuziehen ist. Hierfür ist zu überprüfen, ob sich der Feinheitsgrad mit l_{50} verändert, was gemäß Abb. 27 nicht der Fall ist. In diesen Darstellungen sind Symbole zur Kennzeichnung der Art der Zerkleinerung verwendet, △ für Reibböden, * für Siebe und ○ , falls es sich nur um eine Primärzerkleinerung handelt. Bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse muß einschränkend berücksichtigt werden, daß die Werte überwiegend mit der Maschine Nr. 7, Tab. 14 gewonnen wurden und die hohe Umfangsgeschwindigkeit des Wurfgebläses bei der Sekundärbeschleunigung eine erneute Nachzerkleinerung bewirkt hat. Zusammenfassend wird für die energetische Betrachtung analog zu Silomais als äquivalente Teilchengröße des Häckselgutes der Median l_{50} und nicht die theoretische Häcksellänge herangezogen werden müssen.

Die Ermittlung der Verknüpfungsfaktoren der Gl. (85) und (94) muß entfallen, da gemäß Abb. 26 der Datenumfang der ausschließlichen Primärzerkleinerung zur Ermittlung von k_1 nicht ausreicht.

Im Unterschied zu Stroh erzeugen bei Maiskolben Nachschneidesiebe ein gleichmäßigeres Häckselgut, gekennzeichnet durch einen niedrigeren Dispersionsgrad.





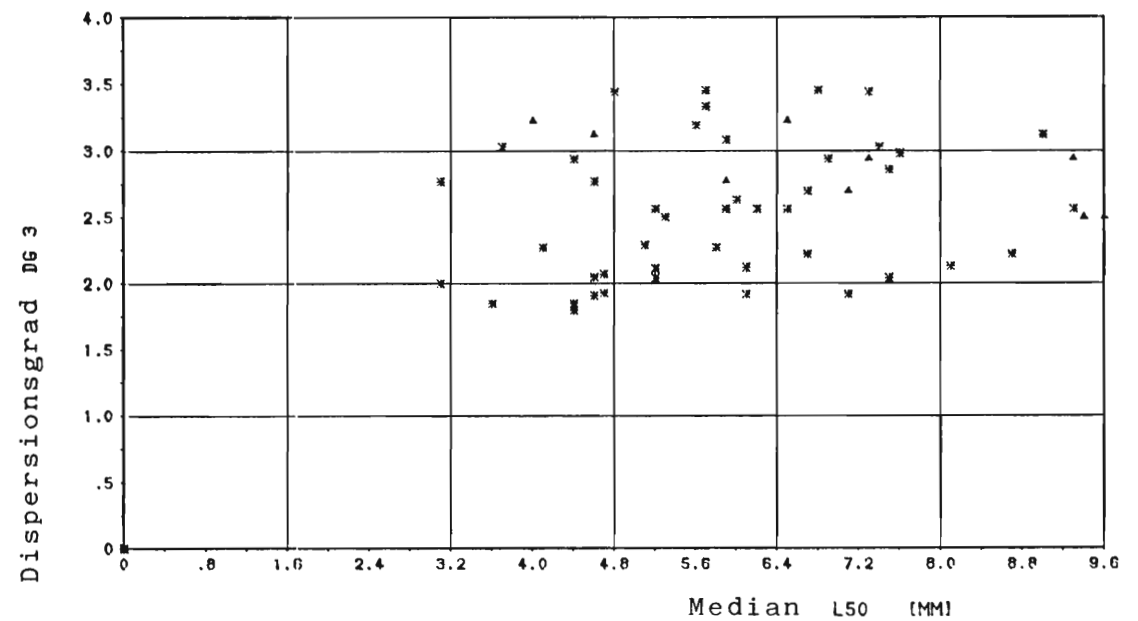
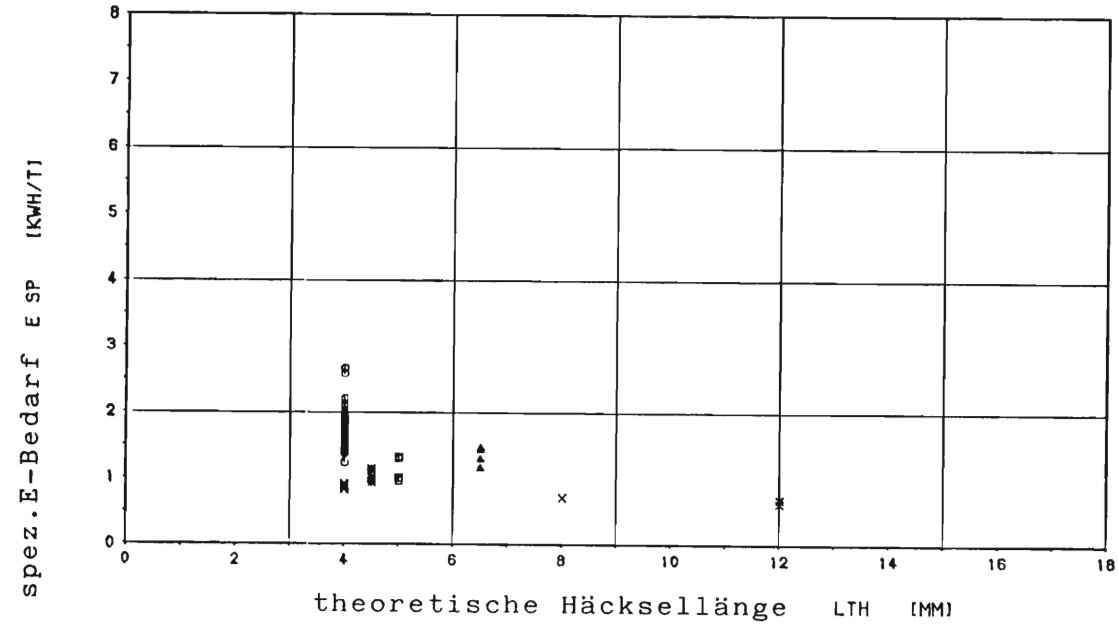


Abb. 26 : Abhängigkeit von l_{50} und DG3 von l_{th} und Verknüpfung von DG3 mit l_{50}
Material: Maiskolben, Z= 33-51% , 81 Datenpaare

6.1.4.3 Energiebedarf für die Zerkleinerung von Silomais und Stroh

Die in der Praxis gebräuchliche Verknüpfung des Zapfwellen-Leistungsbedarfes mit dem Durchsatz geht davon aus, daß bei gleicher theoretischer Häcksellänge auch stets das gleiche Zerkleinerungsergebnis erzielt wird, auch bei steigendem Durchsatz.



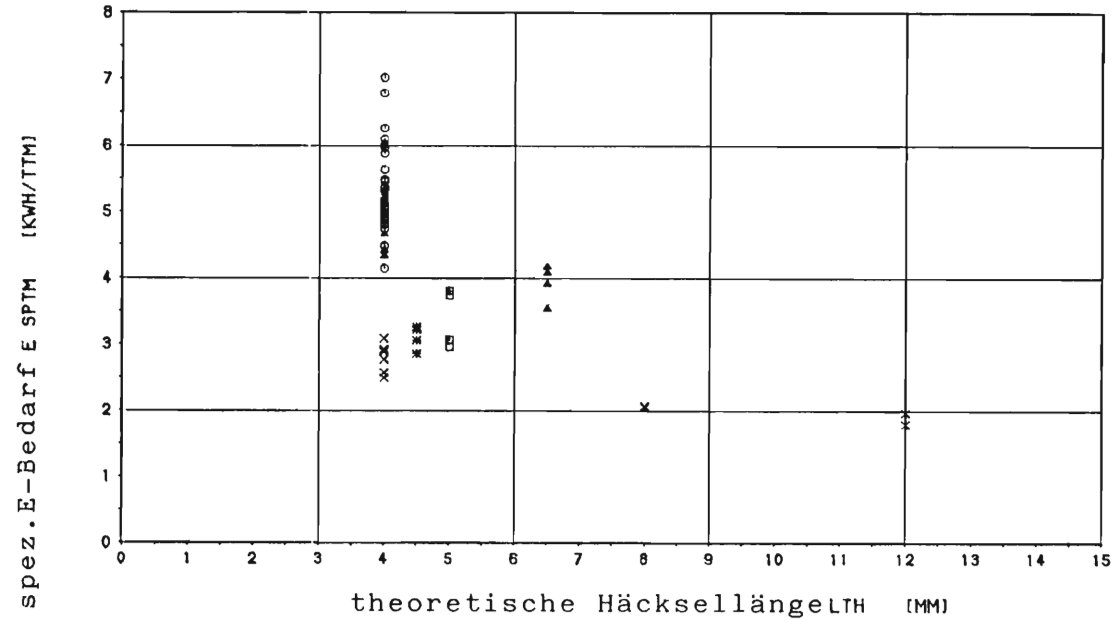


Abb. 27: Spez.Energiebedarf in Abhängigkeit von der theoretischen Häcksellänge
Material: Silomais, Z=26- 40 %, 67 Datenpaare

Wie aus der Behandlung des Zerkleinerungsgrades und der erzeugten Teilchenkollektive in der vorliegenden Arbeit hervorgeht, stellt dies eine unzulässige Vereinfachung dar. Es gilt dies auch für die Berechnung eines bezogenen Energiebedarfes in Abhängigkeit von l_{th}, was zu beweisen ist. Die Ergebnisdiagramme Abb. 27 dokumentieren die Versuchsergebnisse. Zur Kennzeichnung verschiedener Feldhäcksler wurden unterschiedliche Symbole verwendet, um so den Einfluß der Maschinenkonstruktion sichtbar zu machen. Eine Regressionsanalyse der Zielfunktion $E_{SpTM}=f(l_{th})$ ergibt unter Berücksichtigung der möglichen Verknüpfung gemäß Kap. 4.2.3 , $E'=f(l)$, $E'' \hat{=}$ Gl.(102), $E''' \hat{=}$ Gl.(103):

$$E'_{SpTM} = -0{,}4537\ l_{th} + 6{,}6175 \qquad \text{für } n = 67 \text{ mit } B = 33{,}5\%,\ t_S = -1{,}703$$

$$E''_{SpTM} = 18{,}783\ l_{th}^{-1} + 0{,}1947 \qquad \text{für } n = 67 \text{ mit } B = 38{,}8\%,\ t_S = 0{,}623$$

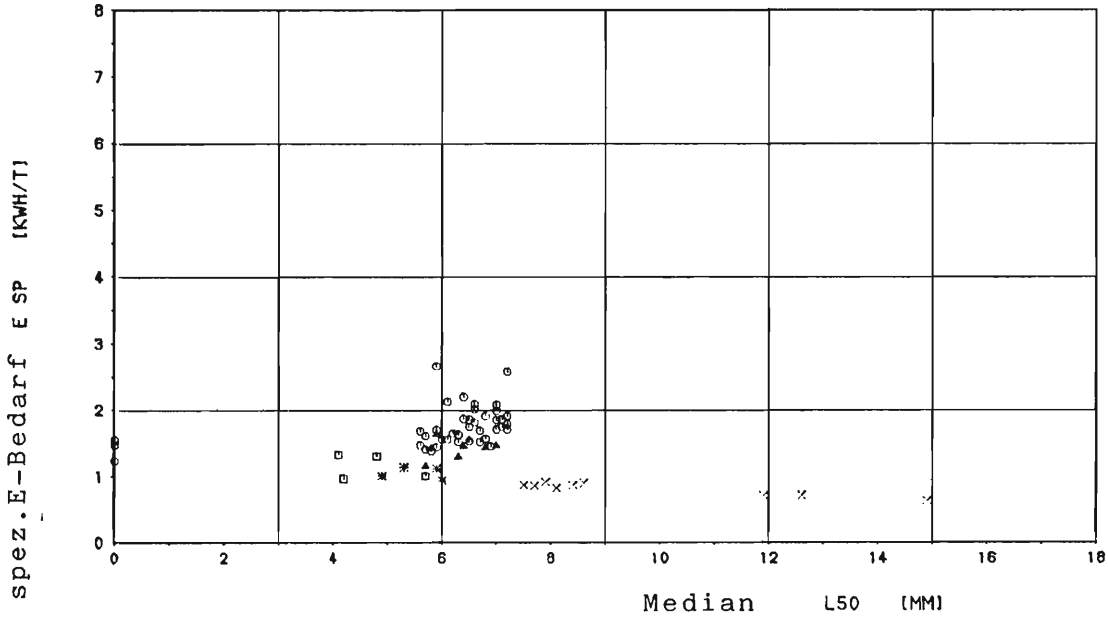
$$E'''_{SpTM} = 1619{,}59\ e^{-l_{th}} + 36{,}7865 \qquad \text{für } n = 67 \text{ mit } B = 18.8\%,\ t_S = 0{,}191$$

Die Regressionsgleichungen erlauben wegen der geringen Bestimmtheitsmaße und der Streuung der Werte für die geringste theoretische Häcksellänge keine gesicherte Aussage über den Energiebedarf der Zerkleinerung. So beträgt die Spannweite von E_{SpTM} für l_{th} = 4 mm 2,5 - 7 kWh/tTM.

In Nutzanwendung der theoretischen Betrachtung des Leistungsbedarfes auf S.90 und den daraus abgeleiteten Zielfunktionen für $E_{SpTM} = f(l)$, Gl. (102) und (103) wurden die Ergebnisse mit $l \hat{=} l_{50}$ ausgedruckt. Die Ergebnisdiagramme Abb. 28 veranschaulichen noch stärker den Maschineneinfluß und weisen außerdem die erwartete exponentielle Verknüpfung aus. Die Streuung der Werte um l_{50} = 6 mm schränkt hingegen die Berechtigung einer funktionellen Verknüpfung stark ein. Es wird dies durch das Ergebnis einer Regressionsanalyse bestätigt:

$$E''_{SpTM} = 11{,}448\ l_{50}^{-1} + 2{,}7501 \qquad \text{für } n = 67 \text{ mit } B = 8{,}3\ \%,\ t_S = 2{,}369$$

$$E'''_{SpTM} = -922{,}14\ e^{-l_{50}} + 63{,}1134 \qquad \text{für } n = 67 \text{ mit } B = 1{,}3\ \%,\ t_S = 0{,}213$$



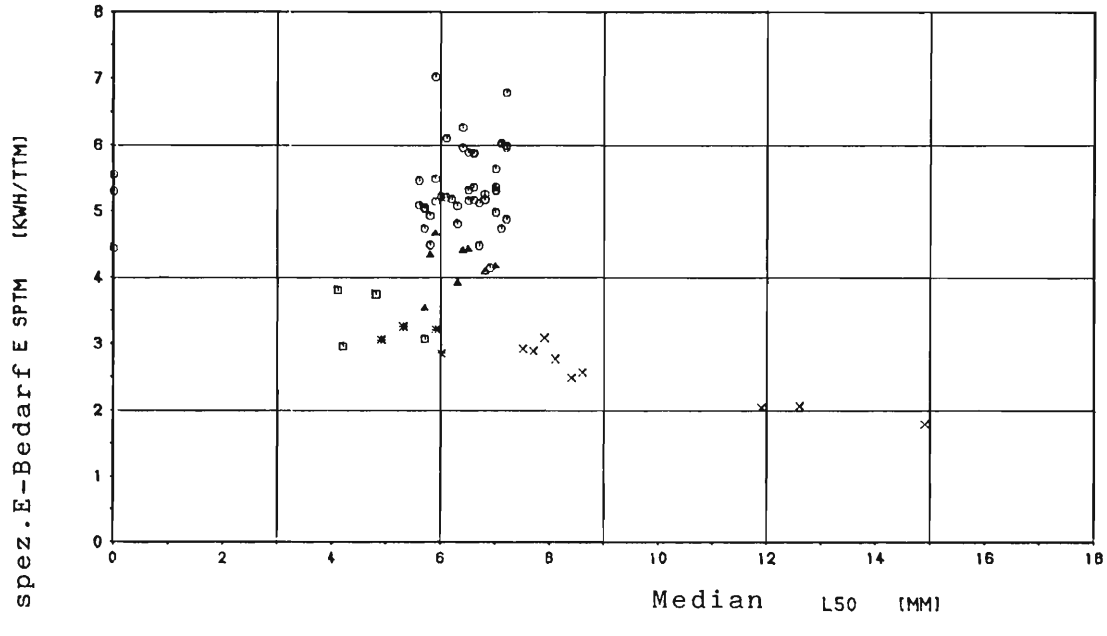


Abb. 28: Spezifischer Energiebedarf zum Häckseln von Mais in Abhängigkeit vom Median l_{50}
Material: Silomais, Z=26-40%, 67 Datenpaare

Infolge der signifikanten Verknüpfung $E''_{SpTM} = f(l_{50}^{-1})$, $(P < 0{,}01)$ ist eine abschätzende Ermittlung des spez. Energiebedarfs für unterschiedliche Zerkleinerungsgrade möglich. Die Darstellung von $E_{Sp} = f(l_{50})$ veranschaulicht demgegenüber unmittelbar den erforderlichen Energiebedarf, ohne erwartete analytische Abhängigkeit.

Die zeitaufwendige Ermittlung des Median zwingt zur Überprüfung anderer Abhängigkeiten, z.B. des Energiebedarfes E_{SpTM} von der Rückstandssumme R_{10-40}, also dem TM-Anteil auf Sieben > 10 mm Lochdurchmesser. R_{10-40} beschreibt den Umfang der Zerkleinerung der halmgutähnlichen Pflanzenteile.

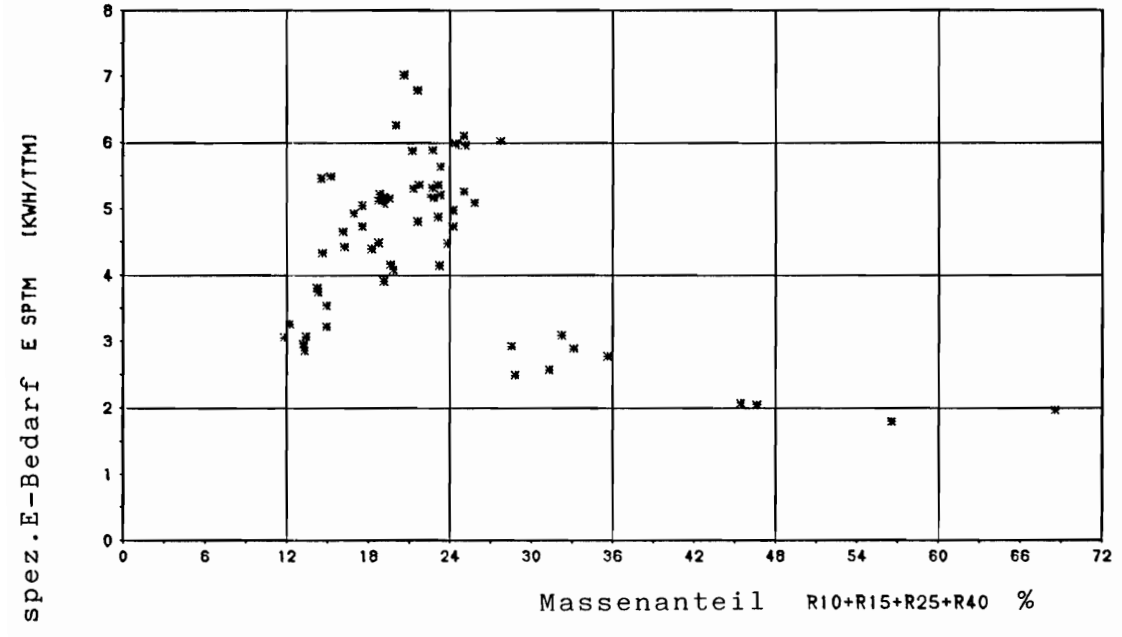


Abb. 29: Spez. Energiebedarf in Abhängigkeit von der Siebrückstandssumme $R_{10} + R_{15} + R_{25} + R_{40}$
Material: Silomais, Z=26-40%, 67 Datenpaare

Tatsächlich weist der spezifische Energiebedarf mit dem Massenanteil R_{10-40} eine ähnliche Verknüpfung wie mit dem Median l_{50} (Abb. 28) auf. Demnach wird die theoretische Betrachtung bestätigt, wonach der Energiebedarf der Zerkleinerung im wesentlichen von dem halmgutähnlichen Masseanteil und dessen, an die Trockenmasse gebundenen Scherenergie bestimmt wird. Dieser Zusammenhang muß noch in weiterführenden Untersuchungen

gesichert werden.

Eine analoge Verarbeitung der Datenpaare von Stroh veranschaulicht die gleiche funktionelle Verknüpfung und originäre Aussage, Abb. 31. Auch die Verwendung von Nachschneideeinrichtungen ändert an dieser Abhängigkeit nichts, so daß über diese funktionelle Verknüpfung eine allgemeine Aussage des Energiebedarfes zur Erzeugung eines Teilchenkollektives bestimmter äquivalenter Körperachse möglich wird.

Die Regressionsanalyse ergibt für den größeren Datenumfang höhere Bestimmtheitsmaße:

$$E''_{SpTM} = 83{,}0248\ l_{50}^{-1} - 3{,}1548 \quad \text{für } n = 160 \text{ mit } B = 35{,}3\%,\ t_S = 0{,}594$$

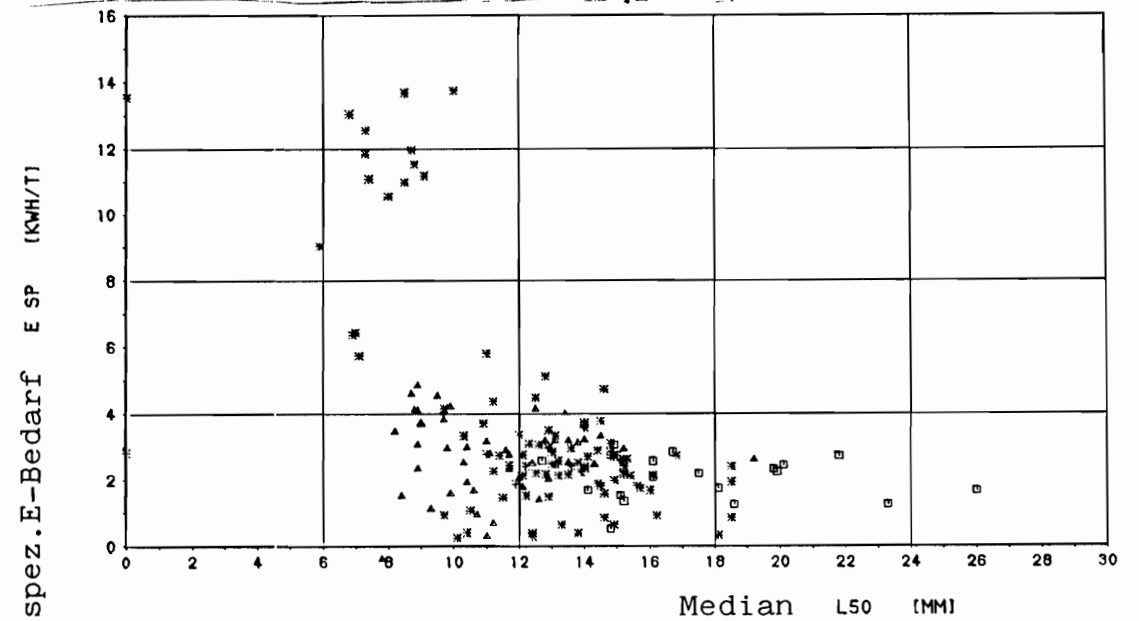
$$E'''_{SpTM} = 5744{,}4\ e^{-l_{50}} + 3{,}2948 \quad \text{für } n = 160 \text{ mit } B = 24{,}9\%,\ t_S = 7{,}231$$

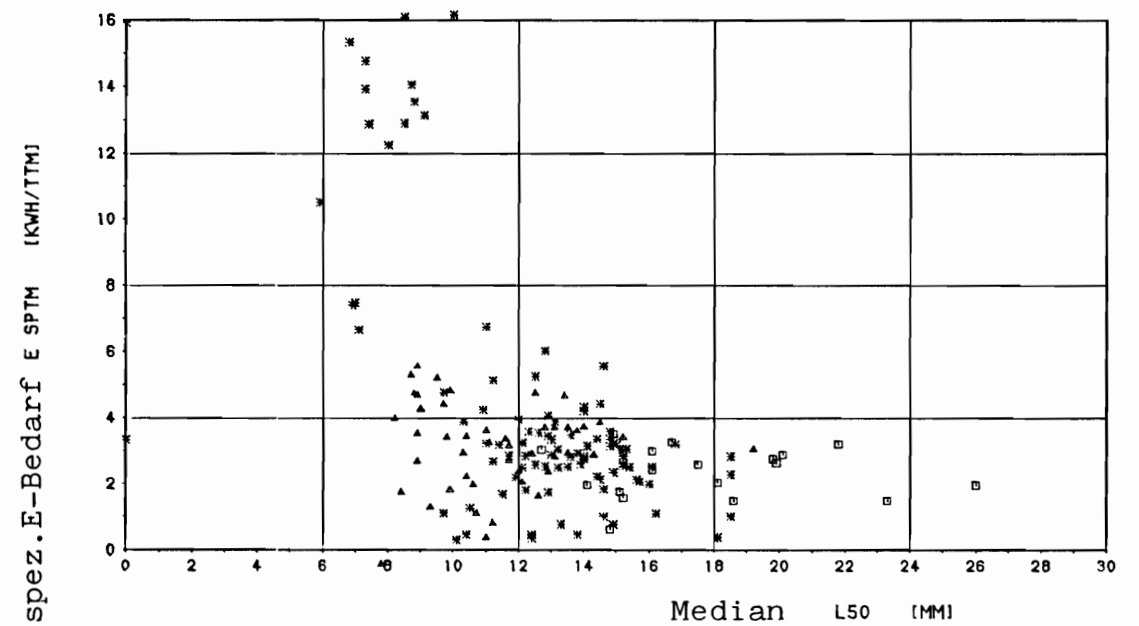
Auch für die Zielfunktion $E = f(R_{10-40})$ läßt sich aus Abb. 30 ein ähnlicher Zusammenhang ablesen.

Eine Verknüpfung $E_{SpTM} = f(1/\ln l_{50})$ ergab ein geringeres Bestimmtheitsmaß.

Die signifikante Verknüpfung $E'''_{SpTM} = f(e^{-l_{50}})$, $(P < 0{,}001)$ ermöglicht die Errechnung des Energiebedarfs der Strohzerkleinerung für unterschiedliche, effektive Häcksellänge ($\hat{=}\ l_{50}$).

Die Punktwolken der Meßwerte weisen aber auch auf eine zufällige Funktion hin, so daß eine mehrparametrige Überprüfung erforderlich ist.





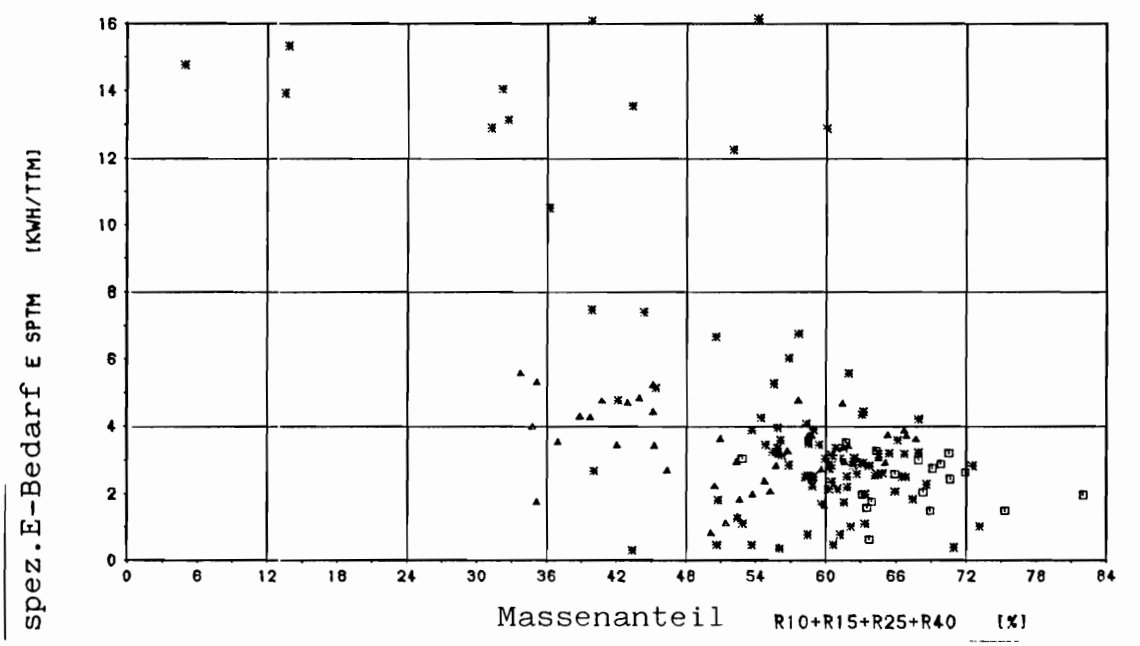
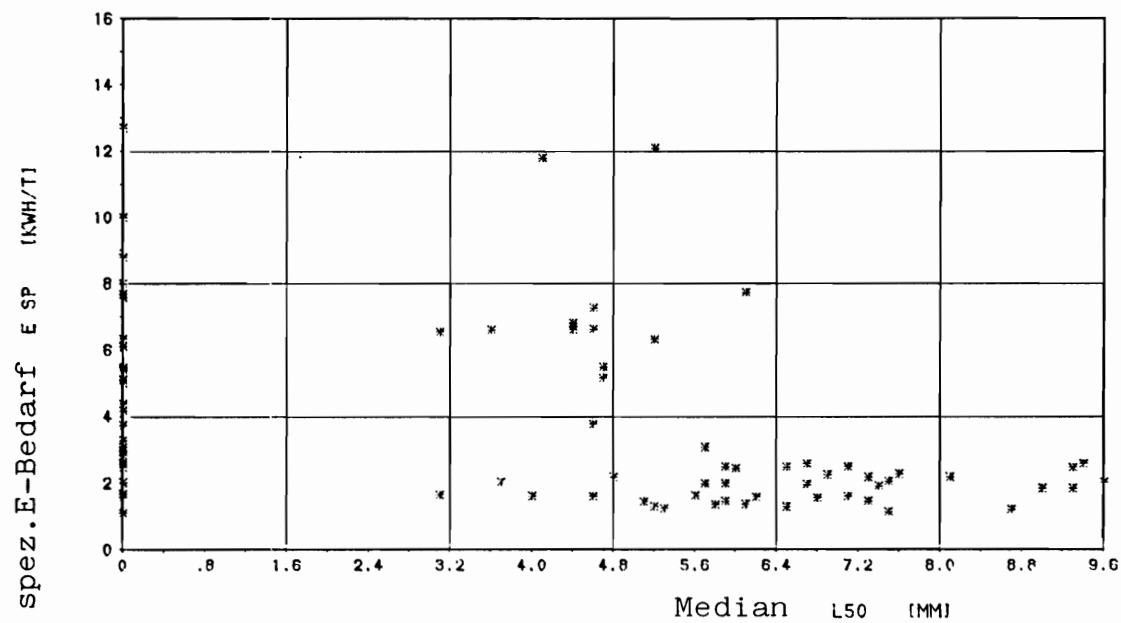


Abb.30 : Spez. Energiebedarf in Abhängigkeit vom Median l_{50} und der Rückstandssumme auf dem Sieb mit Lochø 10mm
Material: Stroh, Z=85-87%, 162 Datenpaare

6.1.4.4 Energiebedarf für die Zerkleinerung von Maiskolben

Für diese Ergebnisdokumentation der Verwendung von Nachzerkleinerungseinrichtungen ist gemäß Kap. 5.1.4.3 nur eine funktionelle Verknüpfung mit dem Positionswert des erzeugten Teilchenkollektives möglich. Für den Energiebedarf ergeben sich dann auch bei einem hohen Korn-und Spindelanteil ähnliche Zusammenhänge wie bei Silomais (Abb.28), die Darstellung des Energiebedarfes in Abhängigkeit von der Rückstandssumme zeigt nur für E_{SpTM} eine vergleichbare Ordnung.



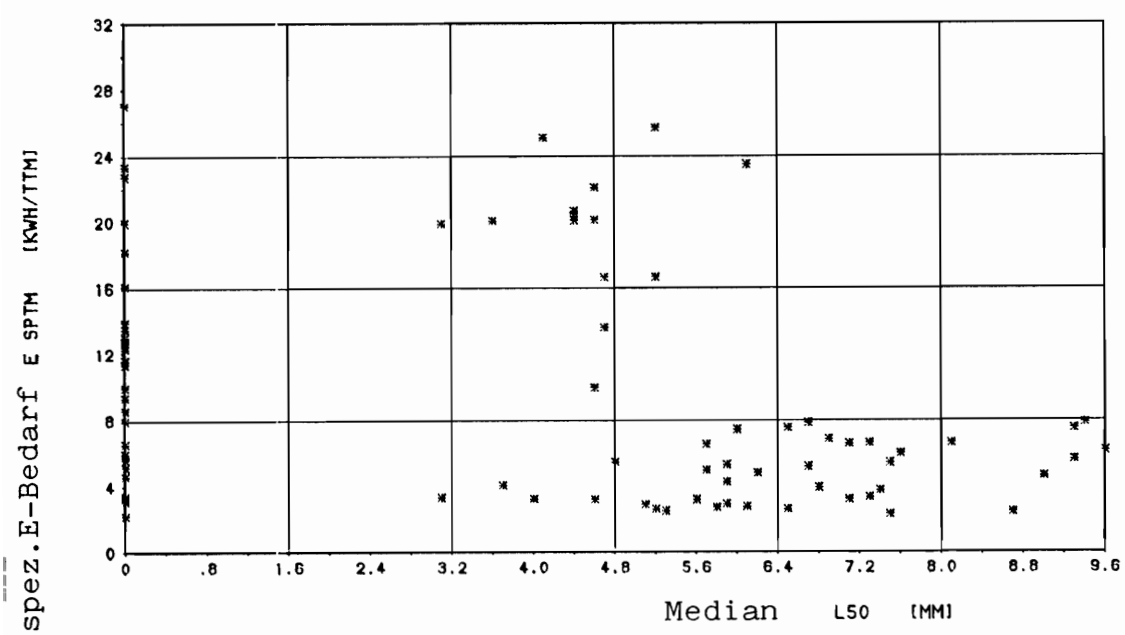


Abb. 31: Abhängigkeit des spez. Energiebedarfes vom Median l_{50}
Material: Maiskolben Z=33-51 %, 81 Datenpaare

Bei der Beurteilung des spezifischen Energiebedarfes in Abhängigkeit von l_{50} ist zu berücksichtigen, daß bei Häckselgemischen mit Bestandteilen unterschiedlicher Trockenmassedichte infolge der massebezogenen Wichtung der Median l_{50} in den Bereich größter TM-Dichte verschoben wird, siehe Kap. 3. Bei Silomais und Maiskolben handelt es sich dabei stets um eine linksseitige Asymetrie. Der Median sinkt also bei gleicher theoretischer Häcksellänge mit zunehmendem Kornanteil. Die funktionelle Verknüpfung mit l_{50} muß damit für jede Gutart zu einem anderen Ergebnis führen. Hierdurch lassen sich teilweise auch der Einfluß von Gentyp, Sorte, Düngung und Abreife erklären.

Die Regressionsanalyse gem. Gl. (102) ergibt für die Maiskolben-Zerkleinerung:

$$E''_{SpTM} = 61{,}104\ l_{50}^{-1} - 2{,}2431 \qquad \text{für } n = 53 \text{ mit } B = 19{,}8\%,\ t_S = 3{,}544$$

$$E'''_{SpTM} = 415{,}713\ e^{-l_{50}} + 64{,}1429 \qquad \text{für } n = 53 \text{ mit } B = 1{,}0\%,\ t_S = 1{,}649$$

Damit sind auch diese Verknüpfungen auf unterschiedlichem Niveau statistisch gesichert. Für alle Gutarten wurde mit der Zielfunktion $E = f(l_{50}^{-1})$ ein höheres Bestimmtheitsmaß erreicht.

Die unterschiedlichen Sekundär-Zerkleinerungsvarianten werden nur über den Positionswert des erzeugten Teilchenkollektives berücksichtigt. Aufgrund der Verteilung der Meßpunkte der verschiedenen Varianten im Ergebnisdiagramm Abb. 30 ist dies nur eingeschränkt zulässig und erklärt, warum keine gesicherte Verknüpfungsgleichung zu erwarten war. Erst eine gezielte Erweiterung des Datensatzes und eine varianzanalytische Untersuchung lassen ein verbessertes Ergebnis erwarten.

Aus der theoretischen Betrachtung des Materialflusses ist außerdem der Einfluß der Massenbelegung der Messer bekannt. Zur Veranschaulichung sind im Anhang S.191,192 die Ergebnisse früherer Untersuchungen KROMER, 1979 (139), als $P_{ZW} = f(Q)$ dargestellt.

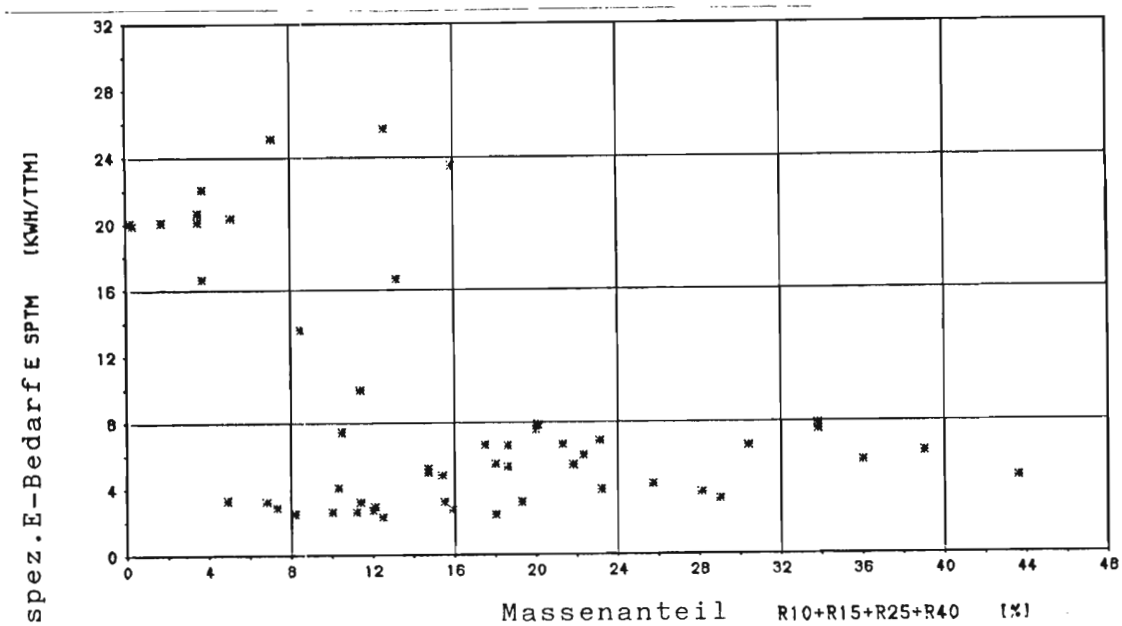


Abb. 32: Spez. Energiebedarf in Abhängigkeit von dem Massenanteil der Rückstandssumme auf Sieben >10 mm LochØ
Material: Maiskolben, Z=33-51%, 53 Datenpaare

Danach wirkt die Abnahme des Sekundär-Zerkleinerungseffektes mit steigendem Durchsatz linearisierend. Die Nachzerkleinerungsvarianten unterscheiden sich dann durch die Höhe des Konstantgliedes. Erst bei Nachschneidesieben mit geringem Lochdurchmesser wird auch der Steigungskoeffizient deutlich größer, ohne eine gesicherte Verbesserung der Beschreibungsparameter des erzeugten Teilchenkollektives.

Die Spannweite der linearen Regressionskoeffizienten beträgt 0,9731 - 0,9974 (B = 94,7-99,5%). Die hohen Bestimmtheitsmaße beruhen auf der einheitlichen Energiegleichung für die Materialbeschleunigung und dessen hohen Anteil bei der Versuchsmaschine Nr. 7, Tab. 14.

Die statistisch gesicherten Zielfunktionen $l_{50} = f(l_{th})$ und $E_{SpTM} = f(l_{th}$ oder $l_{50})$ werden in die Schlußbetrachtung aufgenommen.

7. Modifizierte Feldhäckslerkonzeptionen

Der konstruktionsmethodische Ansatz war in dieser Arbeit nicht durch systematische Kombination technischer Lösungen der Teilfunktionen abzuschließen. Damit entfallen auch die Arbeitsschritte Konkretisieren und Bewerten von Konzeptvariationen.

Vielmehr soll an zwei Beispielen die Anwendung der zuvor erläuterten theoretischen Betrachtungen und der Versuchsergebnisse dargestellt werden. Das Ergebnis ist die theoretische Erarbeitung eines modifizierten Trommel-Konzeptes und die praktische Verwirklichung eines Universal-Maisschroters. Daher wird zweckmäßigerweise weiter in eine Schneidwerk- und in eine Maschinenbetrachtung gegliedert.

7.1 Doppeltrommel-System

Die theoretische Betrachtung des Materialflusses in Kap. 4.2 hat gezeigt, daß für einen Schnittlängenbereich, der sich am Massenanteil der halmgutähnlichen Pflanzenteile orientiert, der Gesamtenergiebedarf von dem Anteil für die Materialbeschleunigung dominiert wird. Soll die Sekundärzerkleinerung auch bei wechselndem Durchsatz, d.h. unterschiedlich hoher Massenbelegung der Messer, sichergestellt sein, kommen als passive Einrichtungen nur Siebe und getrennte Fördereinrichtungen oder als aktive Einrichtungen nur angetriebene Werkzeuge in Frage.

In der Praxis ist dann der höhere spezifische Energiebedarf wesentlich auf die erneute oder mehrfache Beschleunigung des Häckselgutes zurückzuführen. Dies kann zu falschen Rückschlüssen hinsichtlich des tatsächlich erforderlichen Energiebedarfes führen. In den vorangegangenen Kapiteln war belegt worden, daß technische Varianten möglich sind, die den spezifischen Energiebedarf auch bei notwendiger Sekundärzerkleinerung nicht wesentlich erhöhen.

Hierbei können zwei Lösungswege beschritten werden.

1) Ersatz der Wurf- oder pneumatischen Förderung durch energetisch günstiger zu bewertende Förderverfahren (188, 209, 213, 214)

2) Kombination von Teilfunktionen in einer Zerkleinerungseinrichtung

Für beide Möglichkeiten gibt es technische Ausführungsbeispiele. Im ersten Fall führen mechanische Förderer zu einem höheren Leistungsgewicht bei eingeschränkter Variabilität des Verfahrens. Bei ortsfesten und teilortsfesten Häckseleinrichtungen sind beide Einschränkungen in Kauf zu nehmen, sie sind bei Feldmaschinen u.U. nicht durchzusetzen. Der zweite Lösungsweg der Kombination wurde bisher konsequent nur beim Ersatz von Zwischenförderern verfolgt, (150). Eine gewisse Analogie stellt die Nachzerkleinerung bei der Siloentleerung dar, (216). Daher wird nachfolgend erstmals die bei Häckslern nicht bekannte Verwendung eines

D o p p e l t r o m m e l - S y s t e m s vorgeschlagen und begründet.

Die Aufteilung von Schneiden (Primärzerkleinerung), Nachzerkleinern (Sekundärzerkleinerung) und Wurfförderung (Förderphase 2) auf zwei Trommeln gemäß Abb. 33 ermöglicht eine hohe Anpassung der Konstruktionsparameter an die technologischen Ansprüche.

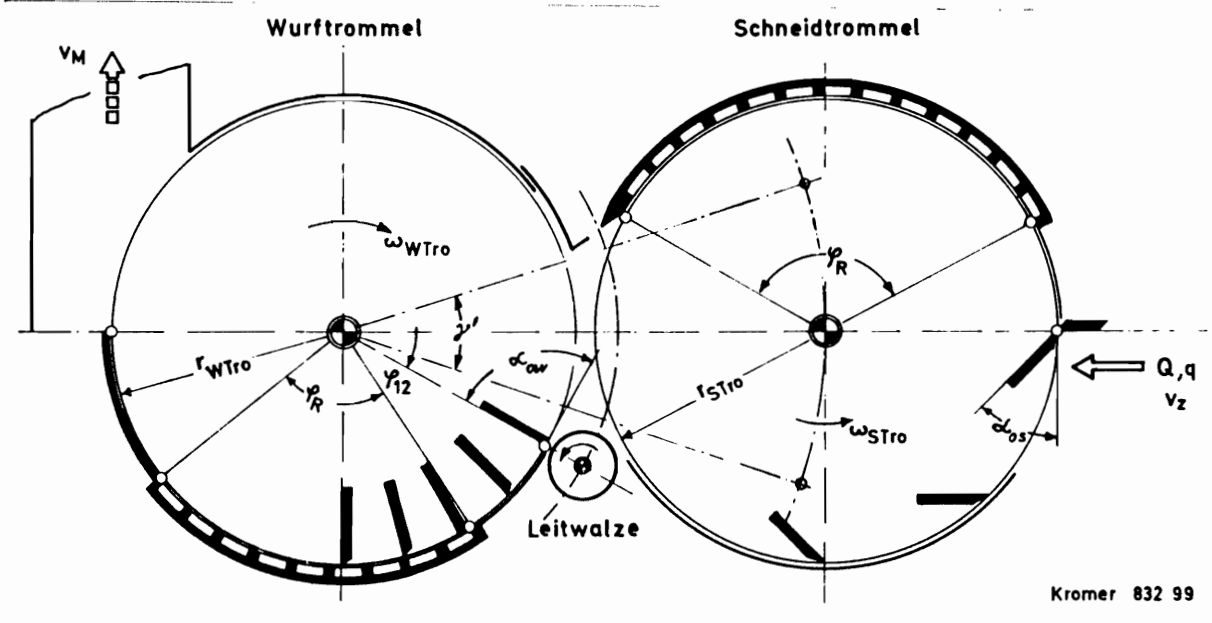


Abb.33: Schematische Darstellung des Doppeltrommel-Häckslersystems

Die Schneidtrommel dient der Zerkleinerung halmgutähnlicher Materialstrukturen. Dies bedeutet in der Praxis gemäß Kap. 4.1 eine theoretische Häcksellänge von $\geq$ 15 mm. Dadurch verringert sich die Preßstranghöhe h_P gegenüber konventionellen Maishäckslern auf ca. 33 %. In der Praxis wird aber die Verknüpfung von l_{th}, v_Z, h_P und q nach Gl. (34, 71) auch zur Erhöhung des Durchsatzvermögens genutzt. Die verbleibende Minderung von h_P verbessert die Voraussetzung einer ausreichenden Vorpressung des zugeführten Materials. Die Wahl der Messerwinkel erfolgt primär nach dem Ordnungsprinzip des geringsten Energiebedarfes, so daß gemäß Kap. 4.3 gilt: $32° < \alpha_o < 40°$. Der hierdurch vergrößerte Materialfluß $\sphericalangle \alpha''$ (siehe Abb. 35 , S. 176), die verringerte Abstützung des Materials am Gehäuse während der Förderphase 1 und die Verkürzung dieser Schlepp-Phase wie auch der vergrößerte Abwurfwinkel φ_4 sind gewollte Effekte. Der Reibboden über φ_{R-STro} kann entfallen und ist nur für den Materialanteil hoher Dichte des Häckselkollektives wirksam. Er ist austauschbar durch alle passiven Nachzerkleinerungselemente gemäß Abb. 12, z.B. durch eine zusätzliche Gegenschneide oder Siebe in systemgerechter räumlicher Anordnung. Der bzw. die Schnittwinkel λ sind so zu wählen, daß die Wurftrommel mit integrierter Sekundärzerkleinerung günstig beschickt wird. Die Verwendung einer Vielmessertrommel (66, 200) mit 20 - 36 Messern als Wurftrommel (und verlängerter Abwurfphase der Schneidtrommel) senkt die Massenbelegung des Messers und zwar bei Z_{M-STro} = 6 und Z_{M-WTro} = 24 auf ca. 25 %. Eine Verbreiterung der Wurftrommel ist möglich, aber wegen der erhöhten Wandreibung im Auswurfturm von Feldhäckslern nicht zweckmäßig.

Zur sicheren Materialübernahme ist in Abb. 33 eine Leitwalze vorgesehen, die durch eine Gegenschneide ersetzt oder mit dieser kombiniert werden kann.

Eine Veränderung der wirksamen Reibbodenlänge und damit des Nachzerkleinerungseffektes ist durch Schwenken einer der Trommeln um den Winkel γ' möglich. Der Messerwinkel α_{o-WTro} wird nach den Prioritäten der Anforderungsliste gewählt: $\alpha_o = 90 \pm 10°$. Für eine sichere Materialübernahme muß der Bereich $75° < \alpha_o < 90°$ gewählt werden.

Für die Wahl der Umfangsgeschwindigkeit gilt ebenfalls die ausgewogene Wertung in der Anforderungsliste. Grundsätzlich sind auch bei Verwendung des Trommelsystems alle Möglichkeiten der Energiebedarfssenkung zu nutzen. Für große Förderstrecken sollten also alternative Fördersysteme geprüft werden. Andererseits entsprechen die Messerwinkel des Sekundär-Zerkleinerungssystemes Vielmesser-Reibboden denen von Wurfgebläsen (124). Wird keine Nachzerkleinerung gefordert, kann der Reibboden entfernt und die Wurftrommel als konventionelles Wurfgebläse "betrieben" werden.

Hinsichtlich der Betriebsforderungen erhöht die geringere Schnitthäufigkeit die Standzeiten von Messer und Gegenschneide. Die geringere Messerzahl Z_{M-STro} verringert den Wartungsaufwand für das Nachstellen. Bei großer Kontakthäufigkeit in der Wurftrommel steht infolge a_o + 90° ein großer Verschleißquerschnitt zur Verfügung, so daß der Abstand Messer - Reibkante oder Trommelboden konstant bleibt. Die Verwendung von Doppeltrommelsystemen ist aus der Dreschtechnik bekannt, CASPERS 1969 (215), und festigkeitstechnisch beherrschbar. Deren Erprobung in Häckslern ist in Fortführung der beschriebenen Forschungsarbeiten wünschenswert.

Hinsichtlich der Forderungen nach entsprechender Futterzerkleinerung zur tierischen Verwertung ist durch die definierte Doppelzerkleinerung eine weite Anpassung von Zusammensetzung und Struktur des Teilchenkollektives möglich.

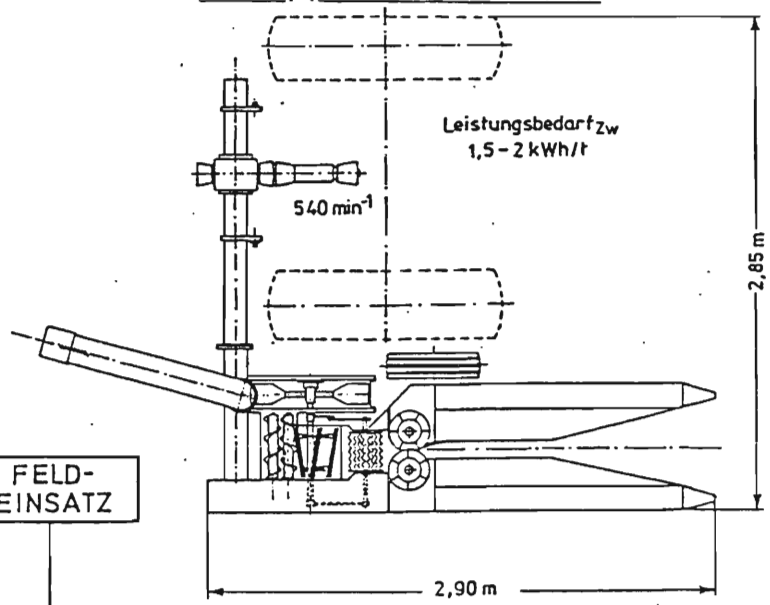
6.2 Universal-Maisschroter

Die ersten Forschungsergebnisse der vorliegenden Arbeit mündeten in die gerätetechnische Entwicklung einer Häckslertrommel für einen Universal-Maisschroter. Dieses Gerät wurde als Landsberg-Schroter Typ KH 1 erstmals auf der DLG-Ausstellung 1974 vorgestellt und als Neuheit auf dem Gebiet der Futterernte bewertet (218). Der Aufbau des Maschinenkonzeptes geht aus der Schemazeichnung, S. 151, hervor.

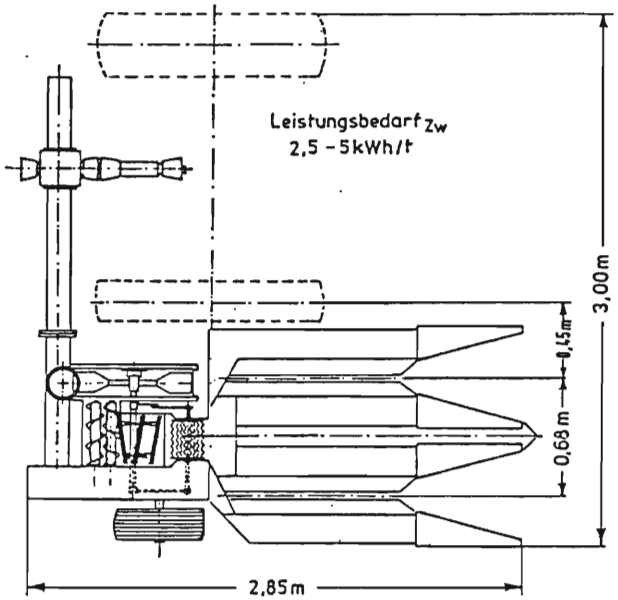
Das Konzept, ein Trommelschneidwerk als zentrales Bauelement eines Maschinensystems zu verwenden, ist heute aktueller als zum Zeitpunkt der Vorstellung, da erst in den letzten Jahren detailliertere Anforderungen an die Zerkleinerung erarbeitet wurden, s. Kap. 3. Die sich daraus ableitenden Forderungen nach einer den Stoffeigenschaften der Pflanzenteile angepaßten Zerkleinerung ist nur in Nutzung mehrerer Beanspruchungsmechanismen zu lösen. Soll dies in einer Zerkleinerungseinrichtung erfolgen, muß es sich stets um einen Kompromiß handeln. Erst die Sortierung der Pflanzenteile nach gleichen Stoffeigenschaften oder des Gesamt-Teilchenkollektives nach Pflanzenteilen gleicher mechanischer Eigenschaften schafft die Voraussetzung für eine definierte Materialaufbereitung, s. Kap. 2 (u.a. 56, 66, 219). Für die Herstellung von Futterrationen unterschiedlicher Rohfaser-, Nährstoffgehalte und Struktur wird daher ein zusätzlicher Siebvorgang akzeptiert und empfohlen. Voraussetzung ist eine den Pflanzenteilen entsprechende Zerkleinerung, d.h. mit sortierfähigen Größenmerkmalen.

Die Vorteile des auf S. 151 dargestellten Maschinen-Konzeptes liegen im möglichen Einsatz für alle Verwertungsstufen von Mais. Als Grundgerät ist es grundsätzlich für Halmgut und halmgutartige Abfallstoffe der agrarischen Produktion geeignet. Die vergleichsweise einfache Veränderung nahezu aller Konstruktionsparameter und die Kombinationsmöglichkeit mit verschiedenen Varianten der Sekundärzerkleinerung bewirkt einen großen Wahlbereich hinsichtlich Schrotfeinheit und Struktur. Der Zwangseinzug ist notwendig, um für unterschiedliche Einsatz- und

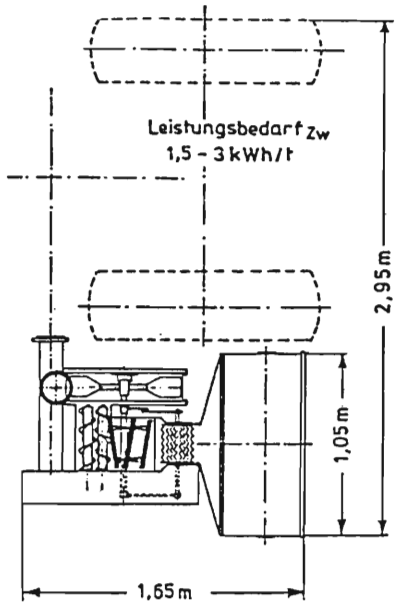
Schlepperanbauschroter



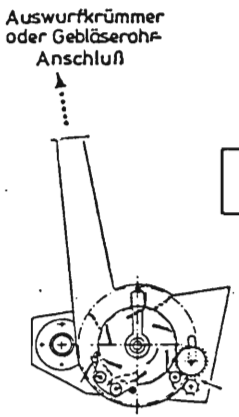
mit Maisschneidwerk



mit Maispflückvorsatz, 2 reihig
wahlweise mit Annahmemulde

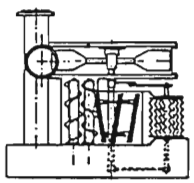


mit Schlegelmähvorsatz



FELD-EINSATZ

Basisgerät



STATIONÄRER EINSATZ

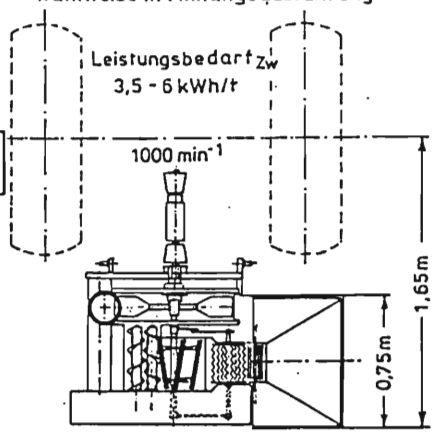
Technische Daten:

Durchsatzleistung	bis 20 t/h
Trommeldrehzahl	1000 min⁻¹
Trommelbreite	260 mm
Trommeldurchmesser	440 mm
theoret. Häcksellänge (6 Messer)	6 mm
Gebläsedrehzahl	1000 min⁻¹
Gebläsedurchmesser	700 mm
Förderhöhe	bis 12 m

Gebläse wahlweise mit Reibboden

Schlepperanbauschroter

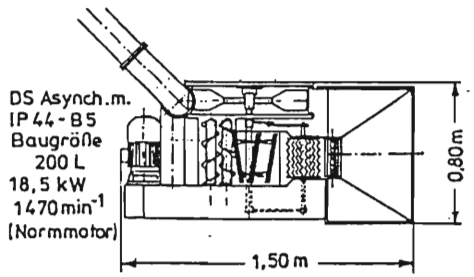
wahlweise in Anhängeausführung



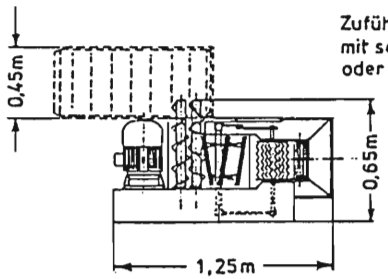
mit Annahmemulde, -schnecke o.ä.

wahlweise mit:
Quetschwalzenpaar
Vielmessertrommel

Einbauschroter mit Elektroantrieb



mit Fördergebläse



Zuführung und Annahme
mit separatem Förderband
oder Förderschnecke

ohne Fördergebläse

	Datum	Name
Gez.	7.10.1982	[illegible]
Gepr.		
Maßstab		

LANDTECHNIK WEIHENSTEPHAN

Maisschroter

Typ KH1

Z.Nr 822 326

Durchsatzbedingungen weitgehend konstante Voraussetzungen der Primärzerkleinerung geschaffen werden. Die geringen geometrischen Abmessungen (Trommel Ø 440 mm) ermöglichen dessen Integration in vorhandene Zerkleinerungssysteme. Beschickung und Weiterförderung sind variabel vorgesehen, also durch alle gängigen Fördergeräte zu lösen.

Zusammenfassend handelt es sich bei diesem Konzept um die geeignete Aggregation an sich bekannter Bauelemente der Primär- und Sekundärzerkleinerung.

8. Schlußbetrachtung

Mais ist eine der wichtigsten Kulturpflanzen der Erde, als Körnerfrucht nimmt er den zweiten Rang ein. Seine verlustarme Verwertung als Futtermittel, Nahrungsmittel oder industrieller Rohstoff erfordert eine Verfeinerung der Materialstruktur in einem Zerkleinerungsvorgang. Für die tierische Verwertung sind die komplexen Anforderungen an die Teilchengröße, an deren Verteilung und die Futterstruktur nicht immer durch eine einmalige, primäre Zerkleinerung zu erfüllen. Vielmehr werden hohe "Wirkungsgrade" bei der Verwertung nur durch eine den Stoffeigenschaften der einzelnen Pflanzenteile angepaßte, nochmalige, "sekundäre" Zerkleinerung erzielt. Für eine Kombination von Primär- und Sekundärzerkleinerung sind Trommelschneidwerke bevorzugt geeignet.

Eine ganzheitliche Betrachtung der Maiszerkleinerung führt zur Aufstellung eines polyfaktoriellen, mehrstufigen biologischen Modelles für das System Pflanze - Konservierung - Tier. Deren Glieder sind durch technologische Vorgänge miteinander verknüpft, in der agrarischen Produktion durch die landtechnischen Arbeitsverfahren der Futterbergung, der Futterkonservierung und der Fütterung. Dieses Modell ist nur zu bearbeiten, wenn die biotechnischen Randbedingungen aller Prozeßphasen bekannt sind. Somit genügt eine vorwiegend biologische Stoffbeschreibung der Gesamtpflanze, einzelner Pflanzenteile oder deren Gemische nicht. Vielmehr sind die mechanischen Stoffeigenschaften für alle Prozeßabläufe, deren Ergebnis und ökonomische Wertung mitbestimmend. Auch die Auslegung, die Konstruktion und die Auswahl von Zerkleinerungsgeräten ist auf die Kenntnis der mechanischen Stoffeigenschaften angewiesen. Daher werden die relevanten biologischen und mechanischen Stoffeigenschaften als biotechnische Eigenschaften bezeichnet.

Im Gegensatz zur industriellen Produktion existiert für die "Werkstoffe" der landwirtschaftlichen Produktion keine zusammenfassende Dokumentation der mechanischen Eigenschaften. Als erster Schritt dieser Arbeit werden daher die biotechnischen und verfahrenstechnischen Voraussetzungen der Maiszerkleinerung behandelt, in Stoffblättern katalogisiert und die fachübergreifenden

Zusammenhänge, speziell mit der Konstruktion von Trommelschneidwerken in Feldhäckslern, dargestellt.

Die mechanischen Stoffeigenschaften sind ursächlich mit der Stoff-Feuchte und damit der Trockensubstanz oder dem Trockenmassegehalt, der Temperatur, der Zustandsform und dem Beanspruchungsmechanismus verbunden. Sie beruhen auf dem mikro- und makrostrukturellen Pflanzenaufbau und hängen demnach auch von der genetischen Herkunft, dem Gentyp, der Sorte und der physiologischen Abreife ab. Die Zerkleinerung in Trommelschneidwerken wird mechanisch verwirklicht, so daß die Auswahl der relevanten mechanischen Eigenschaften von den wirkenden Beanspruchungsmechanismen abhängt. Zusätzlich werden kennzeichnende Stoffwerte zur Beschreibung der Gesamtpflanze, einzelner Teile oder deren Gemische erforderlich. Neben der Morphologie der Maispflanze in Abhängigkeit von der physiologischen Abreife bzw. des Standortes, sind auch die zugehörigen Trockenmasseertrage und feuchtebedingten Eigenschaftsänderungen zu dokumentieren.

Bei einer an den biotechnischen Eigenschaften von Mais orientierten Gliederung ist in fünf Verwertungsstufen und damit mindestens in die Ernteprodukte Körner, Korn-Spindel-Gemisch, Maiskolben, Silomais und Maisstroh zu unterscheiden. Daraus ergeben sich für den Maisanbau mit 75 cm Reihenabstand Spannweiten des durchschnittlichen Reihenertrages von 0,86 bis 7,28 kg/lfd. m und des Trockenmassegehaltes des Erntegutes von 20 bis 78 %. Vom Trockenmassegehalt hängen die Einsatzgrenzen der verschiedenen Erntetechniken ab. Die Erntewirkungsgrade betragen in Abhängigkeit von dem Ernteprodukt und der Erntetechnik 35 % (Maisstroh) bis 99,5 % (Maiskolben).

Neben diesen massegebundenen Anfangsbedingungen landtechnischer Arbeitsverfahren werden in der Arbeit stoffgebundene, mechanische Eigenschaften nach Größe und qualitativer Verknüpfung angegeben. Für die wirkenden Beanspruchungsmechanismen in Trommelschneidwerken sind dies der Elastizitätsmodul, der Gleitmodul, die Grenzbruchfestigkeiten, die Poissonzahl, die Reibungsbeiwerte und die Steifigkeit. In den Stoffblätter der verschiedenen Mais-Ernteprodukte sind deren Mittelwert oder Spannweiten aufgeführt. Die Stoffblätter veranschaulichen aber neben der

bedingten Übertragbarkeit ausländischer Untersuchungsergebnisse vor allem auch die Forschungslücken in der Ermittlung biotechnischer Stoffeigenschaften.

Aus den Stoffblättern geht hervor, daß es sich bei Häckselgut der verschiedenen Maisernteprodukte, bis auf Maiskörner, stets um Mischkollektive von Massenanteilen mit unterschiedlicher Feuchte und damit unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften handelt. Dies gilt analog für beschreibende Stoffwerte, wie die Dichte, die Partikelform (isometrisch, nadelig, tafelig) und die Oberflächenbeschaffenheit. Die Zusammenhänge sind bei der Ermittlung masse- oder volumengebundener Kennwerte von in sich homogenen Stoffen oder Stoffkollektiven zu berücksichtigen. So schwankt die Trockenmassedichte zwischen 140 kgTM/m^3 (Spindeln) und 1450 kgTM/m^3 (Körner) und die Schüttdichte zwischen 40 kg/m^3 (Spindeln mit 33 % Lieschenanteil) und 757 kg/m^3 (Körner). Der Elastizitätsmodul erstreckt sich je nach Pflanzenteil, Belastungsart und -richtung von 18 bis 6805 MPa. Hierbei handelt es sich nur um exemplarische Wertbereiche aus den Stoffblättern.

Bei der Lagerung von Häckselgut findet neben der Orientierung der Häckselpartikeln auch ein Feuchteausgleich zwischen den Massenanteilen statt, so daß für einzelne Stoffeigenschaften noch ein Zeitfaktor hinzukommt. Beispielhaft beruhen hierauf die zeitabhängige Zunahme der Lagerdichte und die Verhärtung der Spindeln. Die Spannweite der Kennwerte beruht auch auf dem Einfluß von Gentyp, Sorte, Anbaujahr, Bodenart, Nährstoffversorgung und Höhe der Niederschläge.

Die Lösung von Konstruktionsaufgaben wird durch die Anwendung einer angepaßten Konstruktionsmethodik im Feldhäckslerbau erreicht. Dabei sind die Aufstellung einer Anforderungsliste und damit die Definition des Zerkleinerungszieles notwendig. Wegen der komplexen Verknüpfung der biotechnischen Stoffkennwerte mit konservierungs- und fütterungstechnischen Ansprüchen existieren hierüber bisher nur wenig präzise Angaben. Für die Tierarten Rind und Schwein werden daher die aus der Literatur bekannten Einzelwerte fachkritisch gewertet und zusammengefaßt.

Für die Futterration von Schweinen wird ein Mittelschrot gefordert, zusätzlich für den Spindelanteil eine maximale Kantenlänge von 2 mm. Damit reicht jedoch die Beschreibung der Schrotfeinheit über den Rückstandsmassen-Anteil auf einem Sieb verwertungsrelevanter Lochabmessung oder über eine äquivalente Teilchengröße nicht aus. Die Zerkleinerung von Korn-Spindel-Gemischen muß vielmehr an dem Anteil der Spindeln orientiert werden, sofern keine Aussortierung der übergroßen Teile für eine getrennte Zerkleinerung oder für eine anderweitige Verwertung vorgesehen wird.

Für die Futterration von Rindern wird der Zerkleinerungsgrad überwiegend über die theoretische Häcksellänge und/oder den Anteil in einer Längenklasse angegeben. Die Spannweite der am meisten geforderten theoretischen Häcksellänge beträgt für Silomais 4 bis 8 mm, die Obergrenze 15 mm. Die Anteile (trockenes Gut) in der Längenklasse über 25 mm soll 5 % oder in der Längenklasse über 9,6 mm 20 % nicht übersteigen. Dabei bleibt die Rückwirkung der Teilchengröße und der Futterstruktur auf pansenphysiologische Parameter unberücksichtigt. Dies gilt auch für die Verteilungsfunktion der Dichte und der Formfaktoren, so daß in einer Größenklasse keine Aussage über den Volumenanteil, die Teilchenform und damit die verdauungsrelevante Teilchenoberfläche gemacht werden kann. Für Zusatzforderungen, wie die einer sicheren Zerstörung des Mehlkörpers, existieren repräsentative Größenklassen im Bereich von 4 bis 15 mm Sieblochdurchmesser.

Die konservierungstechnischen Anforderungen an den Zerkleinerungsgrad werden analog zur Fütterung unter Berücksichtigung des in- und ausländischen Schrifttums für die vorherrschende Konservierung über Milchsäure-Vergärung zusammengefaßt und gewertet. Danach wird es sich stets um einen Kompromiß zwischen Siliersicherheit, Verlustminimierung und Qualität der Futterkonserve auf der einen Seite und dem verfahrenstechnischen Aufwand auf der anderen Seite handeln. Zur Verringerung der stoffbedingten Entmischung (Sortierung) bei allen Fördervorgängen ist ein gleichmäßiges Häckselgut erforderlich. Daher soll der Massenanteil (trockenes Gut) in der Klasse über 10 mm unter 5 % betragen, obwohl für die theoretische Häcksellänge ein

zulässiger Höchstwert von 20 mm gilt. Erst bei einer entmischungsarmen Transport-, Einlagerungs-, Auslagerungs- und Fütterungstechnik können diese sehr hohen Forderungen an den Feinheitsgrad vernachlässigt werden.

Grundsätzlich wird es somit erforderlich, das Teilchenkollektiv nicht nur durch eine mittlere Häcksellänge (Positionswert) sondern auch durch einen Dispersions- oder Feinheitsgrad (Ausbreitungsparameter) zu beschreiben. Ein Verknüpfungsschema der Futterzerkleinerung mit dem landtechnischen Arbeitsverfahren und der tierischen Verwertung veranschaulicht die Kausalschleifen. Dabei wurden die bislang bekannten Zerkleinerungsziele der Verringerung der Teilchengröße, Vergrößerung der Oberfläche und Verringerung der Steife um das Ziel der Schaffung einer konservierungs- und verwertungsgerechten Struktur erweitert.

Die Definition des Zerkleinerungsgrades erfolgt nach einer methodischen Studie der Beschreibung von Häcksel- und Schrot-Teilchenkollektiven. Danach ist eine gesicherte Berechnung der Oberfläche des Kollektives nur in Kenntnis der Verteilungsfunktionen der Teilchengröße, der Trockenmassedichte und der Formfaktoren möglich. Nach vereinfachenden Annahmen wird die Betrachtung auf die Beschreibung der Verteilungsfunktionen der Teilchengröße einer Siebklassierung eingeschränkt. Neben der Diskussion einer Beschreibung des Häckselgutes durch Positions- und Ausbreitungsparameter einer empirischen Verteilung der Teilchengröße wurde die Gültigkeit mathematischer Verteilungsfunktionen überprüft. Als Ergebnis erweist sich die RRSB-Verteilungsfunktion als bevorzugt geeignet. Die erforderliche Linearität in einem modifizierten RRSB-Netz ergab für 295 Siebanalysen einen linearen Regressionskoeffizienten $r = 0{,}9791$ (Bestimmtheitsmaß $B = 95{,}86$ %). Die graphische Ermittlung einer äquivalenten Körperachse (Median l_{50}) und eines Dispersionsgrades (DG 3) erfordert keine gleichen Klassenbreiten. Damit können pflanzenmorphologisch, energetisch und verwertungstechnisch wichtige Größenklassen gezielt und/oder verfeinert erfaßt werden. Problematisch bleibt die statistisch nicht gesicherte Annahme einer gleichen Verteilung innerhalb der Klassen

und des Gesamtkollektives sowie die in Praxisversuchen selten zu erfüllenden Anforderungen an eine repräsentative und ausreichende Stichprobenzahl.

Die eingeschränkte Berechtigung der Siebklassierung von Häckselgut wird diskutiert und die Entwicklung einer geeigneten Plansiebvorrichtung beschrieben. Sie ist Bestandteil eines vorgeschlagenen Standardverfahrens der Ermittlung und Beschreibung von Maishäcksel-Kollektiven. Für den Datensatz von 295 Siebanalysen bestätigt sich die notwendige Beschreibung des erzeugten Häckselgutes über den Median und den Dispersionsgrad der RRSB-Verteilungsfunktion. Ein Vergleich der erzielten Zerkleinerungsgrade verschiedener Ernteprodukte ist bei unterschiedlichen morphologischen Aufbau ausgeschlossen. Mit zunehmendem Körneranteil ergibt sich auf Grund der Gewichtsklassierung ein scheinbar geringerer Median, was die notwendige Berücksichtigung der Verteilungsfunktion der Dichte erhärtet.

Grundsätzlich ist durch die Primärzerkleinerung in Trommelschneidwerken nur ein begrenzter Zerkleinerungsgrad zu erzielen; zusätzliche Einschränkungen treten durch die Konstruktion der Einzugsvorrichtungen auf. Für die untersuchte Häckslertechnik stellt eine Verringerung der theoretischen Häcksellänge unter 5 mm kein geeignetes Mittel dar für eine weitere Erhöhung des Zerkleinerungsgrades z.B. von Silomais unter l_{50} = 4 mm mit dem Dispersionsgrad DG 3 = 1,6. Dies ist nur durch eine Sekundärzerkleinerung möglich. Von den passiven technsichen Lösungen wird erst durch eine Nachzerkleinerung an Siebkanten in der Abwurfphase eine zusätzliche Verringerung des Median l_{50}, nicht aber des Dispersionsgrades erreicht. Es existiert nur teilweise eine gesicherte Verknüpfung zwischen dem Median bzw. Dispersionsgrad und der theoretischen Häcksellänge, ebenso nicht zwischen dem Median und dem Dispersionsgrad:

Silomais (Z = 26 - 40 %, 67 Datenpaare)

$l_{50} = 1{,}2044 \quad l_{th} + 1{,}0902$ (mm) $\quad B = 51{,}3$ %, $t_s = -5{,}098$

$DG3 = 0{,}0709 \quad l_{50} + 1{,}8086$ $\quad B = 12$ %, $t_s = 5{,}190$

Stroh (Z = 85 - 87 %, 96 Datenpaare, Sekundärzerkleinerung mit Reibboden)

$$DG3 = 0{,}0801 \quad l_{50} + 1{,}0227 \qquad B = 47{,}7\ \% \quad t_s = -1{,}939$$

Bei der Konstruktion von Häcksler-Trommelschneidwerken nach dem Lösungsprinzip der geringsten Verluste muß der erzielte Zerkleinerungsgrad mit dem dafür erforderlichen Einergiebedarf verglichen und, sofern möglich, funktionell verknüpft werden. In Anlehnung an die Konstruktionsmethodik wird dazu eine Funktionstruktur der Maiszerkleinerung in Trommelschneidwerken erstellt. Danach ist die Zerkleinerung in Trommelschneidwerken in einen primären Vorgang bei der Materialübernahme und einen sekundären Vorgang in allen Phasen der Materialförderung zu unterteilen.

Da die Anfangs- und Randbedingungen der Primärzerkleinerung für die einzelnen Pflanzenteile von Mais verschieden sind, existierte bisher kein allgemein gültiges Zerkleinerungsgesetz und keine einheitliche Energiegleichung. Folglich wurde die Abhängigkeit des Energiebedarfes von den einzelnen Kontruktionsparametern eingehend diskutiert und die einschlägige in- und ausländische Literatur tabellarisch angegeben.

Eine zusammenfassende Beschreibung des technischen Standes von Feldhäckslerschneidwerken einschließlich der wertmäßigen Erfassung der Schneidwerksparameter, ermöglichte die Quantifizierung des Massedurchsatzes in Feldhäckslern. Dieser wurde exemplarisch für Silomais ermittelt und für eine zweireihige Einheit graphisch dargestellt. Für die gesamte Angebotspalette schwankt die maximale spezifische Massenbelegung der Trommelmesser zwischen 0,18 und 0,42 g/mm und infolgedessen die Häckselgut-Schütthöhe vor dem Messer zwischen 16,6 und 44,9 mm. Demnach sind Reibböden bei Feldhäckslern hoher Durchsatzleistung kein geeignetes Maschinenelement zur Nachzerkleinerung.

Das Ergebnis einer analytischen Betrachtung sind Zielfunktionen $E = f\ (L_{th}$ oder $l_{50})$ unterschiedlicher mathematischer Form. Die technologische Einheit von Schnitt- und Beschleunigungsvorgang und deren unterschiedliche Verknüpfung mit dem Masse-Durchsatz

macht die experimentelle Überprüfung dieser Funktionen bzw. der Verknüpfungsfaktoren erforderlich. Dies gilt sowohl für die Primär- als auch die Sekundärzerkleinerung.

In mehrjährigen Feld- und Prüfstandsversuchen wurde der Leistungsbedarf für das Häckseln bzw. Schroten von Silomais, Maiskolben, Korn-Spindel-Gemischen, Maiskörner, aber auch Stroh und Halmfutter gemessen und für das erzeugte Teilchenkollektiv eine Siebanalyse erstellt. Damit konnte auf der Basis von insgesamt 372 Datensätzen die zuvor entwickelten Zielfunktionen überprüft werden. Dazu wurde der gemessene Leistungsbedarf in einen "bezogenen" spezifischen Energiebedarf umgerechnet. Als Ergebnis stellte sich heraus, daß keine einheitliche, statistisch gesicherte Verknüpfung mit einem Positionswert des Teilchenkolletives existiert. Damit bestätigen sich die theoretischen Betrachtungen und außerdem weist die Anordnung der Meßwerte in Punktwolken auf zufällige Funktionen hin. Die gesicherten Verknüpfungen sind für die Gutarten Silomais, Maiskolben und Stroh:

Silomais (Z = 26 - 40 %, 67 Datenpaare)

$$E_{SpTM} = -\ 0{,}4537\ l_{th} + 6{,}6175 \quad (kWh/tTM) \qquad B = 33{,}5\ \%,\ t_s = -1{,}703$$

$$E_{SpTM} = 11{,}448\ \ l_{50} + 2{,}7501 \quad (kWh/tTM) \qquad B = 19{,}8\ \%,\ t_s = 2{,}369$$

Maiskolben (Z = 33 - 51 %, 53 Datenpaare)

$$E_{SpTM} = 61{,}104\ \ l_{50}^{-1} - 2{,}2431 (kWh/tTM) \qquad B = 19{,}8\ \%,\ t_s = 3{,}544$$

Stroh (Z = 85 - 87 %, 160 Datenpaare)

$$E_{SpTM} = 5744{,}4\ \ l^{-1}50 + 3{,}2948 (kWh/tTM) \qquad B = 24{,}9\ \%,\ t_s = 7{,}231$$

Die analoge Verknüpfung des spezifischen Energiebedarfes entweder mit dem Median oder dem Rückstandsanteil der halmgutähnlichen Pflanzenteile bestätigt die theoretische Betrachtung, wonach der Energiebedarf für die Zerkleinerung in Feldhäckslern im wesentlichen von dem halmgutähnlichen Masseanteil und deren an die Trockenmasse gebundenen Scherenergie abhängt. Die erforderliche Zerkleinerung für die kornähnlichen Masseanteile ist im

Beschleunigungsenergiebedarf enthalten.

Mit Hilfe der Ergebnisdiagramme und der Verknüpfungsfunktionen wird es möglich, die Spannweite des Energiebedarfes für die Herstellung eines Häcksel- oder Schrotgutes bestimmter mittlerer Teilchengröße und bestimmten Dispersionsgrades anzugeben.

Aufbauend auf die theoretischen und experimentellen Untersuchungen konnte schließlich ein neues Schneidwerk-Konzept mit kombinierter Primär- und Sekundärzerkleinerung zur Vermeidung der Mehrfachbeschleunigung als Doppeltrommel-System vorgestellt werden. Andererseits ermöglicht bereits die geeignete Aggregation bekannter Bauelemente eine weitgehende Erfüllung der Zerkleinerungsziele. Als Ergebnis konnte auch ein entsprechendes und bereits erprobtes Maschinen-Konzept angegeben werden.

9. Formelzeichen, Begriffe und Definition

a	mm	Durchmesser oder Kantenlänge eines Siebloches
a_e	mm	äquivalenter Durchmesser einer Kugel gleichen Volumens
a_i	-	Verknüpfungsfaktor i = 1....
a_K	mm	Maiskornbreite
a_M	mm	Gutpolsterdicke auf oder vor dem Messer
A_g	Nm/cm³	Gestaltänderungsarbeit, spez.
A_v	Nm/cm³	Volumenänderungsarbeit, spez.
A_q	cm²	Querschnittsfläche
b	mm	Breite einer Reibleiste
b_i	-	Verknüpfungsfaktor i = 1.....
b_K	mm	Maiskornlänge
b_{Sk}	mm	Schnittkastenbreite
B_{Tro}	mm	Trommelbreite
c_i	-	Verknüpfungsfaktor i = 1.....
c_K	mm	Maiskorndicke
d_e	mm	äquivalenter Kugeldurchmesser
DG	-	Dispersionsgrad
D_{Ko}	mm	Maiskolbendurchmesser
D_{PW}	mm	Preßwalzendurchmesser
D_{Sp}	mm	Spindel-Außendurchmesser
D_{St}	mm	Maisstengeldurchmesser
D_{Tro}	mm	Trommeldurchmesser
D_i	%	Durchgangssumme durch Sieb i
E_S	J/kg	Schneidenergie, Index:STM= spez.,bezogen auf TN
E_{Sp}	MJ/t	spez. Energiebedarf bezogen auf t
E_{SpTM}	MJ/tTM	spez. Energiebedarf bezogen auf t TM
$E_{b,d}$	MPa	Elastizitätsmodul; Indizes: b = Biegung, d = Druck
f	-	Formfaktor isometrischer Körper
f_s	%	Füllungsgrad
F_B	N	Grenzbruchkraft
F_M	N	Messerkraft
$F_{R\ 1,2}$	N	Reibungskraft
F_{St}	N	Stauchkraft
F_{WS}	N	Schnittwiderstand

g	m/s^2	Erdbeschleunigung
G	MPa	Gleitmodul
G_G	kg	Gerätegewicht
GDD	°C	Growing Degree Days, Tagestemperatursumme
h_P	mm	Preßstranghöhe, Gutpolsterdicke
h_S	m	Silohöhe
h_{St}	mm	gestauchte Gutpolsterdicke
H_u	kJ/kg	unterer Heizwert
$\overline{k}$	-	Formfaktor, mittl.Formfaktor d.Teilchenkollektives
k_s	-	Stoßfaktor
k_A	-	Korrekturfaktor
k_D	-	Einheiten oder Proportionalitätsfaktor
k_L	-	Verknüpfungsfaktor
$k_{o,v}$	-	Formfaktoren; Indices: o der Oberfläche, v des Volumens
l	mm	Körperachse, Teilchenlänge
l_{50}	mm	Median (Positionswert)
$l_{50\ n}$	mm	Median im log-normalen WN
L_{Ko}	mm	Kolbendurchmesser
l_{NS}	mm	Häcksellänge bei Sekundärzerkleinerung mit Nachschneidesieben
l_{RB}	mm	Häcksellänge bei Sekundärzerkleinerung mit Reibboden
l_s	mm	geom. Mittel der Sieblochkantenlänge
l_{th}	mm	theor.Häcksellänge d. Nachschneideeinrichtung
$\overline{l}$	mm	Mittelwert, Indices: m = Massen-, z = Anzahl - Verteilung
m	g, kg	Ausgangsmasse, Einwaage
m_a	g	Masse aller Teilchen der Siebanalyse
M_A	dt/ha	aufgewachsene Pflanzenmasse pro Flächeneinheit
M_E	dt/ha	Erntemasse pro Flächeneinheit, Ertrag
m_i	g	Masse in der Siebklasse i
m_M	g	Masse auf dem Messer
m_{sR}	kg/m	spezifischer Reihenertrag
m_{SpM}	g/mm	spezifische Massenbelegung des Messers
m_T	kgTM	Masse, trocken
m_{TK}	g	Tausendkorngewicht, TKG
n_{PW}	min^{-1}	Preßwalzendrehzahl

n_{Tro}	min^{-1}	Trommeldrehzahl
O_{sv}	m^2/m^3	spezifische, volumenbezogene Oberfläche
O_{sm}	m^2/kg	spezifische, massebezogene Oberfläche
O_{mk}	m^2/kg	spezifische, massebezogene Oberfläche eines Kollektives kugeliger Teilchen
O_m	m^2	Oberfläche, massebezogen
p	Pa	Druck
p_N	daN/cm^2	Verdichtungs-, Normaldruck
P	kW	Leistungsbedarf
P_A	kW	Antriebsleistung
P_B	kW	Beschleunigungsleistungsbedarf (Index-Nr.= Ort)
P_R	kW	Reibleistungsbedarf
P_S	kW	Schneidleistungsbedarf
P_{ZW}	kW	Zapfwellenleistungsbedarf
Q	t/h	Gutdurchsatz
Q_{TM}	tTM/h	Trockenmasse-Durchsatz
Q_L	m^3/h	Luftdurchsatz
r	-	Korrelationskoeffizient
r_a	mm	Wurfschaufel-Außenradius
r_{Tro}	mm	Trommel-Radius
r_i	mm	Wurfschaufel-Innenradius
RK_r	-	rel. Reibboden-Kantenlänge
R_i	%	Rückstandssumme auf Sieb mit Durchmesser i = 2, 3, 6, 10, 15, 25, 40
RA	m	Reihenabstand
s_E	-	Einzugsschlupf
s_F	N/mm	Stiffness
s_1	mm	Abstand Wurfschaufel- oder Messer - Gehäuse
s_2	mm	Höhe der Reibleiste
sk_r	-	rel. Schnittkantenlänge
s_s	mm	Schneidenbreite
t	mm	Teilung der Reibbodenleiste
t_L	°C	Lufttemperatur
t_{LSch}	°C	Wachstums-Schwelltemperatur
t_{LD}	d	Lagerdauer
t_s	-	T-Wert
u_{Tro}	m/s	Trommelumfangsgeschwindigkeit

U	%	Feuchtegehalt (moisture content wet basis)
v	m/s	Geschwindigkeit eines Gutteilchens
v_F	km/h	Fahrgeschwindigkeit
v_s	m/s	Geschwindigkeit in Richtung der Schaufelfläche
v_L	m/s	Luftgeschwindigkeit
v_M	m/s	Materialgeschwindigkeit
v_Z	m/s	Einzugsgeschwindigkeit (Zuführgeschwindigkeit)
v_{Zeff}	m/s	effektive Einzugsgeschwindigkeit
V	cm^3	Volumen
V_e	cm^3	äquivalentes Volumen
V_H	cm^3	Hohlraumvolumen
V_K	cm^3	Kornvolumen
V_M	cm^3	Häckselvolumen auf dem Messer
V_R	cm^3	Porenvolumen
V_S	cm^3	Schüttvolumen
X	%	Feuchtegrad (moisture content dry basis)
z_a	Stck	Anzahl aller Teilchen der Siebanalyse
z_R	Stck	Reihenanzahl
Z	%	Trockenmassegehalt (TM-Gehalt)
Z_K	%	TM-Gehalt der Körner
Z_M	Stck	Messeranzahl
z_w	–	Beschleunigungskennziffer
α''	°	Winkel zwischen Messernormalen und Materialförderrichtung
α	°	Winkel zwischen Trommel- und Wurfschaufeltangente
α_o	°	Watenwinkel
β, γ, ψ	°	Ablenkung der Abwurfgeschwindigkeit
ε	-	Dehnung, Stauchung
ε_s	J/mm^2	spez. Scherenergie
γ'	°	Zuordnungswinkel in Doppeltrommel
γ	-	Schiebung
η_E	%	Erntewirkungsgrad
η_K	%	Wirkungsgrad der Konservierung
η_{Sieb}	-	Siebgütegrad
ζ	°	Winkelabweichung zur Hauptzuführrichtung
ξ	°	Abweichung der Gegenschneidenebene von der Trommelradialebene
φ	°	Gehäusewinkel

λ	°	Schnittwinkel (Winkel zwischen Messerschneide und Gegenschneide)
λ^*	-	Druckverhältnis
τ_s	MPa	Scherspannung
τ_B	MPa	Scherbruchspannung
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit
ρ	kg/m³	Dichte
ρ_H	kg/m³	Dichte des Hohlraummediums
ρ_L	kg/m³, t/m³	Lagerdichte
ρ_S	kg/m³	Schüttdichte
ρ_R	kg/m³	Rohdichte
ρ_{TM}	kg TM/m³	TM-Dichte
σ_B	MPa	Grenzbruchspannung
ν	-	Poisson'sche Zahl
ψ	-	Porosität ; Index: P= in Festkörpern
ψ_s	°	Ablenkung in der Messerebene
μ	-	Gleitreibungsbeiwert
μ_H	-	Haftreibungsbeiwert

Indizes:

s, x, y, z	Kennzeichnung der Wirkungsrichtung

Stoffgefüge

Struktur	Innerer Aufbau eines Körpers (oder Stoffgemisch), inneres Gefüge
Textur	(bevorzugte) Orientierung der Teilchen in einem Körper, z.B. Faserrichtung
Anisotropie	Richtungsabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften (herrührend von der Struktur und der Textur)
Porosität (Hohlraumanteil)	Anteil des kapillaren Hohlraumes am Gesamtvolumen eines Stoffes

$$\psi_P = \frac{V_H}{V_H + V_S}$$

Schrotfeinheit

(R = Siebrückstandssumme)

extra grob	$R_{2,1\ mm} < 50\ \%$, $R_{1,11\ mm} > 75\ \%$
grob	$R_{1,11\ mm} = 40 - 70\ \%$
mittelfein	$R_{1,11\ mm} = 5 - 40\ \%$

9. Literatur

1. OTTMANN, W.: Nahrung für 5 Mrd. Menschen.
mais 10 (1982) Nr. 3, S. 12 - 14

2. ● RINTELEN, P. (Hrsg.): Mais.
München: BLV Verlagsgesellschaft mbH., 1971

3. ● ZSCHEICHLER, J. (Hrsg.): Maisanbau und Verwertung.
Frankfurt/Main: DLG Verlag, 1979

4. KROMER, K.-H. und M. ESTLER: Maisanbau mit Folie.
Landtechnik 36 (1981) Nr. 6, S. 291 - 295

5. ● GROSS, F. und K. RIEBE: Gärfutter.
Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 1974

6. ● ESTLER, M.: Verfahrenstechnische Kriterien der Hochmechanisierung im Körnermaisanbau.
München-Weihenstephan, Techn. Univ., Dr.-Habil., 1981

7. BRENNER, W.G. und K. GRIMM: Schneid- und Wurfvorgänge in Trommelfeldhäckslern.
Landtechn. Forsch. 17 (1963) Nr. 5, S. 142 - 150

8. BRENNER, W.G. und K.-H. KROMER: Studien zu Einbau- und Anbaufeldhäckslern.
Landtechn. Forsch. 17 (1967) Nr. 6, S. 150 - 167

9. HILDEBRAND, S.C., L.V. NELSON, H.E. HENDERSON, D. HILLMANN, C.R. HOGLUND, R.L. MADDEX und R.G. WHITE: Corn Silage.
East Lansing, Michigan: Cooperative Extension Service, Michigan State University, Bull. E-665, 1969

10. BAADER, W.: Die Beurteilung der Funktion von Halmgutzerkleinerungsmaschinen.
Landtechn. Forsch. 18 (1970) Nr. 6, S. 164 - 169

11. ZIMMER, E., H. HONIG und U. KÜNTZEL: Futterkonservierung in Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau, 8. Aufl.
Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 1978

12. DERNEDDE, W. und H. HONIG: Auswirkungen der Häcksellänge auf das Silomaisverfahren.
Landbauforschung Völkenrode, 27 (1970) Nr. 1, S. 60 - 66

13. ● WENNER, H.-L. und Mitarb.: Landtechnik Bauwesen.
München: BLV Verlagsgesellschaft mbH., 1980

14. ● KIRCHGESSNER, M.: Tierernährung.
Frankfurt/Main: DLG Verlag, 1975

15. ZIMMER, E.: Einfluß der Zerkleinerung auf Gärverlauf und Futteraufnahme.
Landtechnik von morgen, 18, Freising: Schlüter, 1978

16. ROHR, K.: Vergleich der Verdaulichkeit zwischen Schafen und Kühen beim Einsatz einer Ration mit hohem Anteil an Maissilage.
Vortrag auf der Tagung des DMK-AK am 9.3.1979

17. SCHWARZ, F.J. und M. KIRCHGESSNER: Häcksellänge von Maissilage und ihr Einfluß auf Futteraufnahme und Milchleistung.
Das wissenschaftliche Futter, 28 (1982) Nr. 2, S. 97 - 106

18. ANONYM: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH., 1983

19. KEMPF, W.: Mais für die menschliche Ernährung.
mais 10 (1982) Nr. 1, S. 30 - 34

20. ZIMMER, E.: Futterkonservierung als pflanzenbauliches und biotechnisches Problem.
Landbauforschung Völkenrode 24 (1974) Nr. 1, S. 10 - 14

21. GLUTH, M. und M.VOSS: Vergleichende Betrachtungen zum Leistungsbedarf von Feldhäckslern.
Landtechn. Forsch. 16 (1966) Nr. 1, S. 172 - 177

22. • GRIMM, K., M. SCHURIG und A. WEIDINGER: Die Häcksellinie im modernen Futterbaubetrieb.
Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 1969

23. • KANAFOJSKI, C.: Grundlagen erntetechnischer Baugruppen.
Berlin: VEB Verlag Technik, 1973

24. • KROMER, K.-H.: Untersuchungen am Trommelfeldhäcksler unter besonderer Berücksichtigung der Materialförderung in und nach Schneid-Wurf-Trommeln.
München-Weihenstephan; Techn. Univ., Dr.-Ing.-Diss. 1967

25. • BURMISTROWA, M.F.: Physiomechanical properties of agricultural crops.
Moskau 1956; Übersetz. in: Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1963

26. • MOHSENIN, N.N.: Physical properties of plant and animal materials.
New York: Gordon & Breach Publishers Ltd., 1970

27. SEGLER, G.: Funktionsgerechtes Konstruieren im Landmaschinenbau.
Grundl. Landtechnik 12 (1955) Nr. 6, S. 5 - 17

28. • PAHL, G. und W. BEITZ: Konstruktionslehre.
Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1977

29. EHRENSPIEL. K.: Wie kann Konstruktionsmethodik der Praxis heute helfen?
München: Vortragskurzfassung, 1979

30. ● KANAFOJSKI, C.: Halmfruchterntemaschinen.
Berlin: VEB Verlag Technik, 1974

31. AHLGRIMM, H.-J.: Meßmethoden zur Ermittlung des Bruch- und Knickverhaltens von pflanzlichem Halmgut bei Zug-, Scher- und Biegebeanspruchung.
Landbauforschung Völkenrode (1970) Sonderheft Nr. 8, S. 32 - 52

32. ● FREY-WYSSLING, A.: Die pflanzliche Zellwand.
Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag , 1959

33. SHELEF, L. und N.N. MOHSENIN: Moisture relations in germ-endosperm and whole corn kernel.
Cereal Chemistry 43 (1966) Nr. 3, S. 347 - 353

34. STROPPEL. Th.: Zur Systematik der Technologie des Schneidens.
Grundl. Landtechn. 11 (1953) Nr. 5, S. 120 - 134

35. O'DOUGHERTY, M.J.: A review of research on forage chopping.
J. agric. Res. 27 (1982) Nr. 4, S. 267 - 289

36. GALINAT. W.C.: Botany and origin of maize.
in Technical monograph maize, Hrsg. von Ciba-Geigy, Basel: 1979

37. BRANDOLINI, A.G.: Report of the Southern-Mediterranean Committee.
in Proc. 6th Meeting of the Maize and Sorghum Section of Eucarpia, Freising-Weihenstephan, 1971, S. 57 - 94

38. KROMER, K.-H.: Einsatzbericht FH 35 in Südafrika und Mexiko (unveröffentlicht).
Landsberg: Bayerische Pflugfabrik GmbH., 1977

39. GROSS, F.: Einfluß des Wachstumsstandes und des Kolbenanteiles auf den Futterwert von Silomais.
mais 10 (1982) Nr. 1, S. 27 - 30

40. ● KRAXNER, H.: Ökonomik der Gewinnung und Verwertung von Kolbenschrotsilage.
München-Weihenstephan: Techn. Univ., Dr. agr.-Diss. 1979

41. KROMER, K.-H. und M. Estler: Maisanbau unter Folie.
mais 8 (1980) Nr. 2, S. 20 - 25

42. KROMER, K.-H. und K. FREESE-SCHULZ: Mais mit Folie anbauen?
DLG-Mitteilungen 95 (1980) Nr. 7, S. 410 - 413

43. KROMER, K.-H., S. KLEISINGER: Sätechnik für Mulchanbauverfahren.
Vortrag auf der Int. VDI-Tagung Landtechnik, Neu-Ulm, 1982

44. VIS, H.: Einfluß der Temperatursummen auf Blütezeit und Abreife bei Mais.
mais 9 (1981) Nr. 3, S. 27 - 30

45. STIEGER, W.: Wachstumsverlauf und Reifeentwicklung bei Mais.
mais 9 (1981) Nr. 3, S. 30

46. ● GUZMAN-LOPEZ, G.T.: Phänologie und Reife des Körnermaises in der Bundesrepublik Deutschland in Abhängigkeit von Witterung und Klima.
München-Weihenstephan: Techn. Univ., Dr. agr.-Diss. 1974

47. ANONYM: ASAE-Data: D 241/2, Density, specific gravity and weight moisture relationships of grain for storage.
St. Joseph, Mich.: ASAE-Yearbook, 1980

48. GRIMM, K.: Lieschkolbenschrot-Silage - seine Bewertung und Verwertung in der Schweine- und Rinderhaltung.
Mais Informationen Nr. 2, Hrsg. Harms, Herford: 1979

49. ROLLWAGEN, C. und H. STEINHAUSER: Ökonomik der Verfütterung von Maisstroh.
mais 7 (1979) Nr. 4, S. 18 - 19

50. ● ROLLWAGEN, C.: Ökonomik der Ernte und Verfütterung von Maisstroh.
München-Weihenstephan: Techn. Univ., Dr. agr.-Diss. 1981

51. KROMER, K.-H., J. DALLINGER und M. ESTLER: Techniken zur Ernte von Maisstroh.
Landtechnik 35 (1979) Nr. 10, S. 475 - 478

52. KROMER, K.-H. und M. MARTINOV: Tendenzen der Maisstrohernte.
Landtechnik 37 (1981) Nr. 9, S. 412 - 416

53. ● SCHNEIDER, A.: Das Arbeitsverfahren Maiskolbensilage in der Schweinemast.
KTBL-Berichte über Landtechnik Nr. 148, 1972

54. ● KROMER, K.-H.: Mechanisierung der Futterwirtschaft in den USA.
Grüne Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan, Nr. 13, 1971

55. KROMER, K.-H.: Tendenzen im Exaktfeldhäckslerbau in den USA und in Deutschland.
Grundl. Landt. 21 (1971) Nr. 4, S. 110 - 114

56. SCHROEDER, K.R. und F. BUCHELE: A total corn harvester.
ASAE-Paper No. 60-314, St. Joseph, Mich.: ASAE 1969

57. KROMER, K.-H.: Maisstroh-Silage.
Landtechnik 28 (1972) Nr. 18, S. 411 - 414

58. KROMER, K.-H. und M. ESTLER: Maisstroh statt Heu?
dlz 28 (1977) Nr. 9, S. 838 - 841

59. KROMER, K.-H. und J. DALLINGER: Erntetechnik und Verfütterung von Maisstroh.
mais 6 (1978) Nr. 3, S. 34 - 36

60. KROMER, K.-H., J. DALLINGER und M. ESTLER: Techniken zur Ernte von Maisstroh.
Landtechnik 34 (1981) Nr. 10, S. 475 - 478

61. KROMER, K.-H.: Maisstroh ernten, verfüttern, verbrennen?
dlz 32 (1981) Nr. 9, S. 1146 - 1149

62. ● NATALICCHIO, E. und C. SEMENZA: Possible production, recovery techniques, present and alternative uses of agricultural byproducts.
Hrsg. von C.N.R. Nr. 23, Rom 1981

63. CHUNG, Y.G., S.J. MARLEY und W.F. BUCHELE: Design of a corn cob collector for a combine.
ASAE-Paper No. 81-1568, St. Joseph, Mich.: ASAE 1981

64. BARGIEL, D.A., J.B. LILJEDAHL und C.B. RICHEY: A combine cob saver.
Transactions ASAE, 25 (1982) Nr. 3, S. 544 - 548

65. KUSTERMANN, M. und H.D. KUTZBACH: Der Einfluß thermischer Vorbehandlung auf die statische Festigkeit von Maiskörnern.
Teil 1 Grundl. Landtechnik 31 (1981) Nr. 5, S. 171 - 177
Teil 2 Grundl. Landtechnik 32 (1982) Nr. 1, S. 8 - 12

66. ● GRIMM, K.: Lieschkolbenschrot - ein neues Verfahren.
Grüne Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan 1976

67. RIEMANN, U. und H.v. KEISER: Maisverwertung ohne Trocknen.
mais 2 (1974) Nr. 3, S. 8 - 11

68. HAHNEL, K.: Kolbensilage: Die moderne Form des Körnermais-Anbaues?
Agrarübersicht 29 (1978) Nr. 9, S. 576 - 578

69. HAAKE, F. und H.v. KEISER: Körnermaisernte in Norddeutschland.
mais 6 (1978) Nr. 3, S. 24 - 26

70. ● SCHIEFER, K. (Hrsg.): Verfahrenstechnik, Nahrungsmitteltechnik und Haushaltstechnik. Bd. 1 - 3
Reinbeck bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH., 1972

71. VRANY, Z.: Experimental studies of force and energy conditions on the cutting cylinders of choppers.
Zemed. Tech. 17 (1971) Nr. 10, S. 629 - 648

72. ORTH, H.W.: Ein Beitrag zur Analyse der Halmgutbewegung in einem Trommelhäcksler.
Landbauforschung Völkenrode, 1975, Sondernr. 28

73. IGE, M.T. und M.F. FINNER: Effects and interactions between factors affecting the shearing characteristic of forage harvesters.
Transactions ASAE 18 (1975) Nr. 6, S. 1011 - 1016

74. • SASS, F. und CH. BOUCHÉ (Hrsg.): Dubbels Taschenbuch für den Maschinenbau.
Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag 1955, Bd. 1 und Bd. 2, 11. Aufl.

75. • PRESTON, R.D.: The physical biology of plant cell walls.
London: Chapman & Hall Ltd., 1974

76. • GRIMM, K.: Schneid- und Wurfvorgänge in Trommel-Feldhäckslern.
München-Weihenstephan: Techn. Univ. Dr.-Ing.-Diss. 1964

77. • BERENTSEN, O.J.: Energy requirements for grass chopping.
Meldinger fra Norges Landbrukshøgskole, 52 (1973) Nr. 28

78. MOUSTAFA, S.A.M., S.W. SEARCY und G.H. BRUSEWITZ: Development of a forage chopping energy standard procedure.
ASAE Grain and Forage Harvesting, Proc. 1st Int. Grain and Forage Conf., 1977, S. 261 - 164

79. RICHTER, D.W.: Friction coefficients of some agricultural materials.
Agric. Engng. 36 (1954) No. 6, S. 411 - 413

80. BLEVINS, F.Z. und H.J. HANSEN: Analysis of forage harvester design.
Agric. Engng. 37 (1956) No. 1, S. 21 - 26

81. WIENEKE, F.: Reibungswerte von Pflanze und Faserstoffen.
Landtechn. Forsch. 6 (1956) Nr. 5, A. 146 - 151

82. • SACHT, H.O.: Das Verdichten von Halmgütern in Strangpressen.
Düsseldorf: VDI-Verlag, Fortschrittbericht VDI-Z, 1966

83. DERNEDDE, W.: Die technologischen Eigenschaften von Gras und deren Einfluß auf den Schneidvorgang.
Landbauforschung Völkenrode (1972) Sondernr. 8, S. 53 - 57

84. • SCHILD, G.-J. und H. HONIG: Methodische Untersuchungen zur Bewertung von Grundfutter.
Hamburg/Berlin: Verlag Paul Parey, Sdrh. Ber. Ldw. 191 (1975) S. 393 - 401

85. HONIG, H.: Bestimmungen des Trockenmassegehaltes in Grundfutter mit einem Heißluft-Schnelltrockner; 1. Mitteilung: "Laboruntersuchungen"
Das wirtschaftseigene Futter, 27 (1981) Nr. 3, S. 185 - 191

86. BORSTEL, U.v.: Bestimmungen des Trockenmassegehaltes in Grundfutter mit einem Heißluft-Schnelltrockner; 2. Mitteilung: "Laboruntersuchungen"
Das wirtschaftseigene Futter, 27 (1981) Nr. 3, S. 192 - 195

87. VOSS, N.: Untersuchungen über TS-Bestimmungen zu Gärfutter durch Toluol-Destillation im Vergleich zur Trocknung bei 150 °C.
Das wirtschaftseigene Futter, 11 (1965) Nr. 11, S. 275 - 283

88. ANONYM: Moisture measurements - forages.
ASAE-Standard No. S 352, St. Joseph, Mich.: ASAE Yearbook 1981

89. ANONYM: Moisture measurements - grain and seeds.
ASAE-Standard No. S 358.1, St. Joseph, Mich.: ASAE Yearbook 1981

90. VERMA, L.R., A. NOOMHORM und M.D. THOMAS: The use of a microwave oven in moisture determination.
ASAE-Paper No. 81-3519, St. Joseph, Mich.: ASAE 1981

91. ANONYM: Bestimmung der Schüttdichte, Entwurf DIN 52-110.
Berlin/Köln: Beuth Verlag GmbH., 1976

92. ● GRIMM, A.: Die Kosten der Grasanwelksilage bei verschiedenen Ernte-, Konservierungs- und Fütterungsverfahren.
München-Weihenstephan: Techn. Univ., Diss. 1967

93. MESTER, L.: Neues Stereometer - das Porosimeter.
Mérés és Automatika, 26 (1978) Nr.11, S. 425 - 427 (in ungarisch)

94. ● 'T HART, C., A.H. BOSMA und M.G. TELLE: Physical properties of ensiled grass and corn, silo capacities and silage pressures in cylindrical tower silos.
Institute of Agricultural Engineering, Res. Rep. 3, 1979, Niederlande

95. ● SMIRNOW, J.J.: Futterbereitungsmaschinen.
Berlin: VEB Verlag Technik, 1958

96. RUMPF, H. und E.F. EBERT: Darstellung von Kornverteilung und Berechnung der spezifischen Oberfläche.
Chemie-Ing. Tech., 36 (1964) Nr. 5, S. 523 - 537

97. ● BATEL, W.: Einführung in die Korngrößenmeßtechnik.
Berlin/Heidelberg/New York: Springer Verlag, 3. Aufl., 1971

98. ANONYM: Messen von Partikeln - Begriffe und Definition.
VDI-Richtlinien VDI 3491, Blatt 1, Berlin/Köln: Beuth Verlag, 1980

99. ANONYM: Method of determining and expressing fineness of feed materials by sieving.
ASAE-Standard No. S 319, St. Joseph, Mich.: ASAE-Yearbook 1976

100. WESSEL, J.: Verfahren des Siebens und des Windsichtens.
Grundl. Landtechn. 18 (1968) Nr. 4, S. 151 - 157

101. ● BERNHARD, M.: Experimentelle Untersuchungen über die Zerkleinerung von Gersten- und Maissilage in Walzenmühlen.
KTBL-Berichte über Landtechnik, 110 , München-Wolfratshausen: Hellmut Neureuther-Verlag 1967

102. ANONYM: Friction coefficients of chopped forages.
ASAE-Data D 251.1, St. Joseph, Mich.: ASAE-Yearbook 1980

103. ANAZODO, U.G.N. und E.R. NORRIS: Mechanical properties of the corn cob.
ASAE-Paper No. 79-3056, St. Joseph, Mich.: ASAE 1979

104. ANONYM: Resistance to air flow through grains and storage components.
ASAE-Paper No. S 272, St. Joseph, Mich.: ASAE 1980

105. BAADER. W.: Einfluß der Beschickungsvorrichtung, der Lage des Beschickungspunktes zur Trommel und der Schlagleistenanordnung auf den Dreschvorgang.
Grundl. Landtechnik 14 (1964) Nr. 21, S. 16 - 21

106. EIMER, M.: OPtimierung der Arbeitsqualität des Schlagleistendreschwerkes.
Grundl. Landtechnik 27 (1977) Nr. 1, S. 12 - 17

107. CHOWDHURY, M.H. und G. KLINE: Stress cracks in corn kernels from compression loading.
ASAE-Paper No. 78-3541, St. Joseph, Mich.: ASAE 1978

108. CHOWDHURY, M.H. und W.F. BUCHELE: Development of a numerical damage index for critical evaluation of mechnical damage of corn.
Transactions of the ASAE 19 (1976) Nr. 3, S. 428 - 432

109. CHOWDHURY, M.H. und W.F. BUCHELE: The nature of corn kernel damage inflicted in the shelling crescent of grain combines.
Transactions of the ASAE 21 (1978) Nr. 4, S. 610 - 614

110. CHOWDHURY, M.H. und W.F. BUCHELE: Effect of kernel moisture content and sample size in the resistance force in the shear press.
ASAE-Paper No. 79-1953, St. Joseph, Mich.: ASAE 1979

111. MOREIRA, S.M.E., G.W. KRUTZ und G.H. FORSTER: Crack formation in corn subject to impact
ASAE-Paper No. 80-3534, St. Joseph, Mich.: ASAE 1981

112. MOREIRA, S.M.E., G.W. KRUTZ und C.T. SUN: Simulation of stresses inside the corn kernel.
ASAE-Paper No. 81-3043, St. Joseph, Mich.: ASAE 1981

113. PAULSEN, M.R. und W.R. NAVE: Corn damage from conventional and rotary combines.
Transactions ASAE 23 (1980), Nr. 5 , S. 1110 - 1116

114. BALASTREIRE, L.A., F.L. HERUM, K.K. STEVENS und J.L. BLAISDELL: Fracture of corn endosperm in bending. -
Part I : Fracture Parameters.
Part II: Fracture analysis by fractorgraphy and optical microscopy.
Transactions ASAE 25 (1982) Nr. 4, S. 1057 - 1065

115. ANAZODO, U.G.N. und E.R. NORRIS: Effects of genetic and cultural practices on the mechanical properties of corn cobs.
J. agric. Eng. Res. 16 (1981), S. 97 - 107

116. HALYK, R.H. und L.W. HURLBUT: Tensile and shear characteristics of alfalfa stems.
Transactions of the ASAE, 11 (1968) Nr. 2, S. 256 - 257

117. PICKETT, L.K., J.B. LILJEDAHL, C.G. HAUGH und A.J. ULLSTRUP: Rheological properties of corn stalks subjected to transverse loading. - ASAE-Paper No. 68-815, St. Joseph, Mich.: ASAE 1968

118. PRASAD, T. und C.P. GUPTA: Mechanical properties of maize stalk as related to harvesting.
J. agric. Eng. Res. 20 (1975)Nr.1,S. 79 - 87

119. BRIGHT, R.W. und R.W. KLEIS: Mass shear strenght of haylage.
Transactions of the ASAE 23 (1980)Nr. 4, S. 816 - 821

120. HALL, F.E., R.D. BRAZEE und C.W. HALL: Cross-sectional area measurements alfalfa stems.
Transactions of the ASAE, 13 (1970)Nr. 5, S. 577 - 579, 586

121. Mc RANDAL, D.M. und P.B. Mc NULTY: Mechanical and physical properties of grasses.
Transactions of the ASAE, 23 (1980)Nr. 4, S. 816 - 821

122. PRINCE, R.P., D.W. BRADWAY und R.J. RAVEZ: Resistance of corn stalks to external loading.
ASAE-Paper No. NA 69-204, St. Joseph, Mich.: ASAE 1969

123. RICHEY, C.B., J.B. LILJEDAHL und V.J. LECHTENBERG: Corn stover harvest for energy production.
Transactions of the ASAE 25 (1982) Nr. 4, S. 834 - 839

124. • KAMPF, G.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Wurfgebläsen.
VDI-Forschungsheft 466, Düsseldorf: VDI-Verlags GmbH., 1958

125. • VOß, H.: Ermittlung von Stoffgesetzen für Halmgut.
Braunschweig: Techn. Univ. , Dr.-Ing.-Diss. 1969

126. • SCHMITZ, J.: Untersuchungen zur Kalibrierung von Mais.
Bonn: Rheinische-Friedrichs-Universität, Dr.agr.-Diss. 1967

127. • FOUAD, H.A.: Möglichkeiten einer Langkalibrierung der Maiskörner.
Bonn: Rheinische-Friedrichs-Universität, Dr.agr.-Diss. 1968

128. • GLUTH, M.: Untersuchungen zur Gebläseförderung.
VDI-Forschungshefte 544
Düsseldorf: VDI-Verlags GmbH. 1971

129. • STREHLER, A., E.-M. HOFSTETTER und F. HEINS: Energiegewinnung aus Stroh.
Forschungsbericht J. Kommission der EG in Schriftreihe der Landtechnik Weihenstephan Nr. 4 (1980)

130. • KELLNER, O. und M. BECKER: Nährwert und Nährwertermittlung.
Grundzüge der Fütterungslehre, Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey (1962), S. 58 - 83

131. • DÖRFLER, H. (Hrsg.): Die Landwirtschaft. (2. Aufl.)
München: BLV Verlagsgesellschaft mbH. 1983

132. • HANF, C.-H., K.-W. HELL und H. HONIG: Produktionsverfahren in der Grünlandbewirtschaftung und ihre betriebliche Einordnung.
Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 5 (1970)

133. ANONYM: Futterwerttabellen der DLG für Wiederkäuer.
Arbeiten der DLG, Bd. 17, Frankfurt/Main: DLG-Verlag 1968

134. ANONYM: Futterwerttabellen der DLG für Schweine.
Arbeiten der DLG, Bd. 50, Frankfurt/Main: DLG-Verlag 1965

135. ROTH-MEIER,D.A., J. KIRCHGESSNER, K. GRIMM und F.X. ROTH: Zur Verfütterung verschiedener Maiskolbenschrotsilagen in der Schweinemast.
Das wirtschaftseigene Futter 19 (1973) Nr. 2, S. 73 - 79

136. KEISER, H.v.: Erforderliche Spindelzerkleinerung im CCM.
Diskussionsbeitrag (mündlich)
CCM-Fachgespräch der Firma KHD-Fahr, Lauingen 1980

137. HAAKE, H.: CCM-Erfahrung seit 1947.
mais 9 (1981) Nr. 1, S. 18 - 20

138. • RIEMANN, U.: Aufbereitung von Schrotmischungen im landwirtschaftlichen Betrieb.
KTL-Flugschrift Nr. 18, Wolfratshausen:Neureuther-Verlag 1968

139. KROMER, K.-H.: Möglichkeiten der Nachzerkleinerung bei Exaktfeldhäckslern.
Grundl. Landtechnik 29 (1979) Nr. 5, S. 166 - 175

140. JORGENSEN, N.A. et al.: Effect of forage particle size on animal performance.
ASAE-Paper No. 78-1048, St. Joseph, Mich.: ASAE 1978

141. BARRINGTON, G.P. und N.A. JORGENSEN: Corn silage length of cut-effects on digestibility.
ASAE-Paper No. 76-1009, St. Joseph, Mich.: ASAE 1976

142. BARRINGTON, G.P., O.J. BERGE und M.F. FINNER: Effect of using a recutting in a cylinder cut forage harvester for chopping low moisture grass silage.
ASAE-Paper No. 69-145 (1969), St. Joseph, Mich.: ASAE 1969

143. WARNER, R.G.: The impact of diet on milk fat percentage. Galley 1 13578 CU, Printer 10-11. Cal. 25 picas, Dept. of Animal Science, Ihaca, N.Y.: Cornell University

144. KAUFMANN, W. und H. HAGEMEISTER: Fütterungstechnik und Verdauungsablauf bei Milchkühen. Übersichten zur Tierernährung 1 (1973), S. 193 - 221

145. MILLER, C.N. et al.: Effect of altering the physical form of corn silage on utilization by dairy cattle. J. Dairy Science 52 (1969) Nr. 12, S. 1955 - 1960

146. SCHURIG, M.: Untersuchungen an drei Silomaishäckslern. Versuchsbericht (unveröffentlicht), Freising-Weihenstephan: Landtechnik Weihenstephan 1982

147. PIRKELMANN, H. und G. KRACK: Maisquetsche verhindert Futterverluste. dlz 32 (1981) Nr. 7, S. 970 - 973

148. BARTSCH, J.A., HAUGH, C.G., ATHOW, L. and R.M. PEART: Impact damage to soybean seed. ASAE-Paper No. 79-3037, St. Joseph, Mich. ASAE 1979

149. HONIG, H. und K. ROHR: Einfluß der Häcksellänge auf den Siliervorgang. mais 10 (1982) Nr. 4, S. 8

150. ANONYM: Der Körnerporzessor im John Deere Feldhäcksler. Mannheim: Hrsg. von Firma John Deere 1982

151. BOXBERGER, J. und G. LANGENEGGER: Bauliche Lösungen zur Verbesserung der Fließeigenschaften von Flüssigmist. in: Tagungsbericht d.2. LKS-Informationstagung 1980, Freising-Weihenstephan: Landtechnik Weihenstephan 1981

152. SCHURIG, M.: Optimale Häcksellängen für Silo-Mais aus landwirtschaftlicher Sicht. Landtechnik von morgen, Folge 12, S. 33 - 35, Freising: Hrsg. von Firma Schlüter 1972

153. • WEIDINGER. A.K.: Technische und funktionelle Untersuchungen an ausgewählten mechanischen Fütterungsanlagen für Rinder. Dissertation TU München-Weihenstephan: Techn. Univ. Dr.-agr.-Diss. 1967

154. MESSER, H.J.M. und J.C. HAWKINS: The influence of moisture content and chop length of forage maize on silage bulk density and the pressure on bunker silo walls. J. agric. Eng. Res. 22 (1977), S. 175 - 182

155. PIRKELMANN, H. und L. MAIER: Silageentnahme - einige Wünsche bleiben offen. mais 7 (1979) Nr. 4, S. 31 - 32

156. • BRUNS, P.: Die Entnahme und Verteilung von Gärfutter. Kiel: Univ. Dr.-agr.-Diss. 1966

157. HALYK, R.M.: The role of material density in the evaluation of forage harvesting systems.
ASAE-Paper No. 71-114, St. Joseph, Mich.: ASAE 1971

158. • KROMER, K.-H.: Verfahrenstechnische Lösungen der intensivierten Feldproduktion mit Folie.- Sonderheft
Freising-Weihenstephan: Landtechnik Weihenstephan 1982

159. BATEL, W.: Über das Sortieren körniger Stoffe.
Grundl. Landtechnik 10 (1060) Nr. 12, S. 18 - 24

160. ANONYM: Darstellung von Korn-(Teilchen)-Größenverteilungen.
Grundlagen DIN 66141, Berlin/Köln: Beuth Vertrieb-GmbH., 1974

161. • MORTASAWI, M.: Die Schnittlänge von Halmguthäcksel.
Arbeiten der Landw. Hochschule Hohenheim, Bd. 29, 1963

162. SAQUIB, G.S. und M.F. FINNER: Simulated ideal length of cut for forage harvesters.
Transactions of the ASAE 25 (1982) Nr. 5, S. 1237 - 1238

163. BÖLÖNI, J.: Particle size distribution of barley ground by hammermill.
Transactions of the ASAE 23 (1980) Nr. 6 , S. 1578 - 1584

164. BRÜGGEMANN, J. und K.-H. NIESAR: Der Einfluß der morphologischen Beschaffenheit der Mischkomponenten auf den Homogenitätsgrad einer Mischung.
Studien zur industriellen Mischfutterherstellung, 2. Mitteilung, Hamnurg: Fachverband der Futtermittelindustrie e.v. 1962

165. GALE, G.E. und M.J. O'DOUGHERTY: An apparatur for the assessment of the length distribution of chopped forage.
J. agric. Eng. Res. (1982) Nr. 27, S. 35 - 43

166. DERNEDDE, W. und H. PETERS: Wirkung und Leistungsbedarf von Nachschneidesystemen für Exaktfeldhäcksler.
Grundl. Landtechnik 26 (1976) Nr. 1, S. 23 - 30

167. • SCHMID, J.: Zerkleinerung von Körnermais und Lieschkolben mit der Vielmessertrommel und verschiedenen Reibbodenarten.
Freising-Weihenstephan: Technische Universität, Diplomarbeit 1979

168. ORTH, H.W. und H. PETERS: Verfahren zur Bestimmung der Halmlänge mit Hilfe eines Schwingsiebes.
Grundl. Landtechnik 25 (1975) Nr. 6, S. 187 - 188

169. ANONYM: Darstellung von Korn-(Teilchen)-Größenverteilungen.
Potenznetz DIN 66143
Berlin/Köln: Beuth Vertriebs-GmbH., 1974

170. ANONYM:
Logarithmisches Normalverteilungsnetz DIN 66
Berlin/Köln: Beuth Vertrieb-GmbH. 1974

171. ANONYM:
RRSB-Netz DIN 66145
Berlin/Köln: Beuth vertrieb-GmbH. 1976

172. GÖRLITZ, F.O.: Reinigungssieb Granomat RGRS - eine neue Siebmaschine für die Reinigung von Zerealien.
diagramm (1982) Nr. 74, S. 9 - 12

173. BAADER, W.: Das Verhalten eines Schüttgutes auf schwingenden Siebrosten.
Grundl. Landtechnik 11 (1961) Nr. 13, S. 13 - 20

174. ZABELTITZ, CHr.v.: Einfluß von Siebart und Siebbewegung auf den Siebgütegrad und den Abrieb des Siebgutes (Zuckerrübensamen)
Grundl. Landtechnik 13 (1963) Nr. 18, S. 35 - 41

175. ANONYM: Haver EML - Laborsiebmaschinen und Geräte
P 62 442 370 5 Fe, Oelde: Firma Hayer & Boecker, 1970

176. ANONYM: DLG-Prüfberichte von Hammermühlen, Gruppe 9 h/55.
Frankfurt/Main: DLG e.V. Fachbereich Landtechnik - Prüfungsabteilung

177. MØLLER, F.: Determining of particle length in cobs and wafers.
Transactions ASAE 18 (1975) Nr. 18, S. 950 - 951

178. FINNER, M.F., J.E. HARDZINSKI und L.L. PAGEL: Evaluating particle length of chopped forages.
ASAE Technical Paper No. 78-1047, St. Joseph, Mich.: ASAE 1978

179. KROMER, K.-H. und J. DALLINGER: Schnellmethode zur Bestimmung der Häcksellängenverteilung.
Freising-Weihenstephan: Bedienungsanleitung Landtechnik Weihenstephan 1972

180. • HENGST, M.: Einführung in die mathematische Statistik und ihre Anwendung.
Mannheim, Wien, Zürich: Bibliographisches Institut AG., 1967

181. • SACHS, L.: Angewandte Statistik (4. Auflage)
Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag

182. BOOKHOLDT, M.: Zur Gutzuführung in Halmgutzerkleinerungsmaschinen.
agrartechnik 30 (1980) Nr. 8, S. 363 - 364

183. • KROMER, K.-H., E. MOSER, J. RANNERTSHAUSER, P. SCHULZE-LAMMERS und H. SINN: Verwertung von Obstbaum-Schnittholz
KTBL-Schrift Nr. 275 (1982)

184. ANONYM: Forage harvester 700/800, 3838 rev. 57730 MW
West Bend: Gehl Company 1978

185. CHANCELLOR, W.J., C.B. RICHEY, W.C. WHEELER und D.A. FISHER: Energy requirement for cutting forage.
Agr. Eng. 39 (1958) Nr. 10, S. 633 - 639, 652

186. CHANCELLOR, W.J.: Influence of particle movement on energy losses in an impeller blower.
Agr. Eng. 41 (1960) Nr. 2, S. 92 - 94

187. REZNIK, N.E.: Zur Theorie der Schneid-Wurf-Trommel in Siloerntemaschinen (russ).
Traktory i sel'chozmasiny 34 (1964) Nr. 9, S. 19 - 28

188. REZNIK, N.E.: Begründung des Wurfvorganges der Silageerntemaschine.
Traktory i sel'chozmasiny 36 (1966) Nr. 2, S. 28 - 32

189. ALICHASCHKIN, J.S. und J.W. CHOMENKO: Zur Bestimmung der Messerform der Trommelschneidwerke von Silageerntemaschinen.
Traktory i sel'chozmasiny 35 (1965) Nr. 5, S. 23 - 26

190. TRIBELHORN, R.E. und J.L. SMITH: Chopping energy of a forage harvester.
Transactions ASAE 18 (1975) Nr. 3 , S. 423 - 430

191. KUPR, J., I. LANCA und E. CAPEK: Ergebnisse der Funktions- und Energieforschung der Einrichtung für die Häckselguthomogenisierung.
Zemed. Techn. 28 (1982) Nr. 11, S. 661 - 672

192. • BRENNER, W.G.: Untersuchungen an Dreschtrommeln unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung von Kleinmähdreschern.
RKTL-Schriften H. 51 (1934)

193. • CASPERS, L.: Die Abscheidungsfunktion als Beitrag zur Theorie des Schlagleistendrechwerkes.
Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 19 (1973), 145 S.

194. KROMER, K.-H.: Möglichkeiten der Nachzerkleinerung bei Exaktfeldhäckslern.
Vortrag VDI-Tagung, Landtechnik, München 1972

195. CROSBY, C.J. und J. de SZABO: Hammer-mills, official test report Nos. 7307 - 7318
Silverton, RSA: Dept. of Agr. Technical Services , 1973

196. GLUTH, M. und M. VOß: Vergleichende Betrachtungen zum Leistungsbedarf von Feldhäckslern.
Landtechn. Forschung 16 (1966) Nr. 5, S. 177 - 183

197. SEGLER, G.: Ein möglichst geringer Kraftbedarf.
Landtechnik 6 (1951) Nr. 4 , S. 144 - 147

198. LILJEDAHL, J.B., G.L. JACKSON, R.P. de GRAFF und M.E. SCHROEDER: Measurement of shearing energy.
Agric. Engng. 42 (1961) Nr. 6, S. 298 - 301

199. KLIMANOV, A.V.: Determining the power requirement for cutting in forage harvesters.
Traktorý i Selschomaschiny 34 (1964) Nr. 3, S. 33 - 34

200. SAQUIP, G.S. und M.F. FINNER: Machine variables affecting energy requirements of forage harvesters.
ASAE-Paper No. 82-1527, St. Joseph, Mich.: ASAE 1982

201. FISCHER-SCHLEMM, W.E. und O. EGGERT: Der Einfluß des Häckselmesser-Watenwinkels auf die Schneidhaltigkeit und Kraftbedarf.
Landtechn. Forschung 5 (1955) Nr. 4, S. 109 - 111

202. HORA, O. und A. CERMAK: Results of investigation with chopping cylinders.
Zemedelska Technika 13 (1967) Nr. 10, S. 639 - 650

203. REZNIK, N.E., V.N. BUCHARKIN und B.A. POPOV: Beitrag zur Theorie von Schneidtrommeln mit Flachmessern und sich verdichtendem Förderstrom (russ.).
Traktory i Selschomaschiny 45 (1975) Nr. 1, S. 25 - 28

204. ANONYM: dlz-Typentabelle Maishäcksler.
dlz 30 (1979) Nr. 7, S. 1008 - 1010

205. ZIRNGIBL, O.: Typentabellen von Maisspezialhäckslern, gezogenen Feldhäckslern, mehrreihigen Anbaufeldhäckslern und selbstfahrenden Feldhäckslern.
Freising-Weihenstephan: Landtechnik 25.9.1980 (unveröffentlichter Bericht)

206. • ANONYM: Sammelband mit DLG-Prüfberichten über Trommelfeldhäcksler, Anbau-Feldhäcksler u.a.
Frankfurt/Main: DLG. Fachbereich Landtechnik - Prüfungsabteilung

207. HERPPICH, R. und K.-H. KROMER: Vereinfachung des Auswerteverfahrens bei Leistungsmessungen an Landmaschinen

208. • Anonym: DIN-Taschenbuch 22, Normen für Größen und Einheiten in Naturwissenschaft und Technik, AEF-Taschenbuch, 3. Auflage.
Berlin: Deutscher Normenausschuß (DNA), 1972

210. KLINNER, W.: Equipment for harvesting - forage harvesters-testing procedure, ISO/TC 23/SC7.
Silsoe: NIAE 1982

211. STANZEL, H.: Systematische Fehler der Leistungsmeßkette der Landtechnik Weihenstephan. - Mündliche Information
Freising: Landtechnik Weihenstephan 1983

211. AUERNHAMMER, H.: Programmbeschreibung.
Freising: Landtechnik Weihenstephan 1982

212. ANONYM: Agricultural machinery management data.
ASAE D 230.3, St. Joseph, Mich.: ASAE-Yearbook 1981

213. KLEISINGER, H.: Flachsiloentnahme - Technische Lösungen und Arbeitsverfahren.
Technische Univ. München-Weihenstephan: Hausarbeit der wissenschaftlichen Prüfung für das HL, 1978

214. HOWE, S.D. und T. BISHOP: Forage harvesters: designs for the '80s.
Power Farming 61 (1982) Nr. 4, S. 36 - 47

215. CASPERS, L.: Systematik der Dreschorgane.
Grundl. Landtechn. 19 (1969) Nr. 1, S. 9 - 17

216. GRIMM, K.: Nachzerkleinerung von LKS bei der Beschickung und Entnahme von Gärfutter-Silos.
in: Tagungsbericht der 2. LKS-Informationstagung 1980, Freising-Weihenstephan: Landtechnik Weihenstephan 1981

217. KEISER, H.v.: Technik bei Getreide und Maisernte.
Landtechnik (1974) Nr. 11, S. 479 - 481

218. KROMER, K.-H.: Einreihiger Anbau-Maiskolbenschroter
DE 23 52 167 C3, DBP 23 52 167 v. 22.6.78

219. KROMER, K.-H.: Verfahren zum getrennten oder gleichzeitigen Pflücken oder Schneiden von Mais und hierfür geeignete mehrreihige Maisvollerntemaschine.
DT 24 49 314 A1, DOS 24 49 314 v. 29.4.76

220. SCHERER, R. und H.D. KUTZBACH: Mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten
Grundl. Landtechnik 28 (1978) Nr. 1, S. 6 - 12

Literatur - Kurzverzeichnis

Ahlgrimm 31
Alichaschkin 189
Anazodo 103,115
Auernhammer 211
Baader 10,105,173
Ballastreire 114
Boxberger 151
Barrington 141,142
Bartsch 148
Batel 97,159
Berentsen 77
Bernhard 101
Blevins 80
Böloni 163
Bookholdt 182
Borstel 86
Brandolini 37
Brenner 7,8,192
Bright 119
Brüggemann 164
Bruns 156
Burmistrova 25
Caspers 193,215
Chancellor 185,186
Chowdhury 107,108,109,110
Chung 63
Crosby 195
Deere 150
Dernedde 11,83,166
Dörfler 131
Ehrenspiel 29
Eimer 106
Estler 6
Finner 178
Fischer-Schlemm 201
Fouad 127
Frey-Wyssling 32
Gale 165
Galinat 36
Gehl 184
Gluth 21,128,196
Görlitz 172
Grimm, A. 92
Grimm, K. 22,48,66,76,216
Gross 5,39
Guzman-Lopez 46
Haake 69,137
Hahnel 68
Hall 120
Halyk 116,157
Hanf 132
Haver 175
Hengst 180
Herppich 207
Hildebrand 9
Honig 85,149
Hora 202
Howe 214
Ige 73,220
Jorgensen 140
Kampf 124
Kanafojski 23,30
Kaufmann 144
Keiser 136,217
Kellner 130
Kempf 19
Kirchgessner 14
Kleisinger 213
Klimanov 199
Klinner 209
Kraxner 40
Kromer 4,24,38,41,42,43,51,54,55,57,58,59,60,61,139,158,179,183,194,218,219

Kupr	191
Kustermann	65
Liljedahl	198
Mc Randal	121
Messer	154
Mester	93
Miller	145
Møller	177
Mohsenin	26
Moreira	111,112
Mortasawi	161
Monstafa	78
Nataliccho	62
O´Dougherty	35
Orth	72,168
Ottmann	1
Pahl	28
Paulsen	113
Pickett	117
Pirkelmann	147,155
Prasad	118
Preston	75
Prince	122
Reznik	187,188,203
Richter	79
Riemann	67,138
Rintelen	2
Rohr	16
Rollwagen	49,50
Roth-Meier	135
Rumpf	96
Sachs	181
Sacht	82
Saquib	162,200
Sass	74
Scherer	220
Schiefer	70
Schild	84
Schmid	167
Schmitz	126
Schneider	53
Schroeder	56
Schurig	146,152
Schwarz	17
Segler	27,197
Shelef	33
Smirnow	95
Stanzel	211
Stieger	45
Strehler	129
Stroppel	34
´T Hart	94
Tribelhorn	190
Verma	90
Vis	44
Voss	87,125
Vrany	71
Warner	143
Weidinger	153
Wenner	13
Wessel	100
Wieneke	81
Zabeltitz	174
Zimmer	11,15,20
Zirngibl	205
Zscheischler	3
ASAE-Data	47,102,104,212
ASAE Standard	88,89,99
Normen	91,98,160,169,170,171, 208
Prüfberichte	176,195,206
Statistiken	18,133,134,204