

Grundlagen des Quetschens von feinstengeligem Halmgut

Von **Werner Darnedde**, Braunschweig-Völkenrode*)

Die Aufbereitung von feinstengeligem Halmgut durch rotierende Quetschwalzen zur Erzielung verkürzter Trocknungszeiten ist grundsätzlich möglich. Durch die Druckeinwirkung platzen die Stengel auf, so daß eine unmittelbare Verbindung der Hohlräume des Stengels mit der umgebenden Luft entsteht. Bei den Blättern wird die verdunstungshemmende äußere Zellschicht beschädigt, wodurch gleichfalls Verbindungen zu dem wasserführenden System der Pflanze hergestellt werden, die von der Pflanze nicht mehr reguliert werden können. Hierdurch wird die erste Trocknungsphase mit der konstanten, sehr hohen Trocknungsgeschwindigkeit verlängert, d. h. die Gesamttrocknungszeit verkürzt. Die Versuche haben aber ergeben, daß solche charakteristischen Verletzungen nur unter bestimmten Voraussetzungen erzielt werden, u. a. durch die Zuführung des Gutes in einer sehr dünnen Schicht.

Einleitung

Die Trocknung von Halmgut zur Gewinnung von Heu ist noch immer das am meisten verbreitete Konservierungsverfahren des Halmgutes. Bei Schlechtwetterperioden können jedoch erhebliche Verluste wie auch eine beträchtliche Qualitätsminderung des Futters auftreten. Um lagerfähig zu sein, muß das Gut (es handelt sich dabei in der Bundesrepublik in erster Linie um Wiesen- und Ackergras und weniger um Leguminosen) auf einen Feuchtigkeitsgehalt von mindestens 20% herabgetrocknet werden. Hierfür sind etwa 4 bis 8 Trocknungstage erforderlich. Regenfreie Perioden von dieser Dauer sind in unseren Breiten aber nicht sehr häufig, wie das Diagramm von Pedersen in [1] zeigt. Ziel der Heuwerbung muß es daher sein, die erforderliche Trocknungsdauer auf einen Zeitraum von etwa 1 bis 3 Tagen zu vermindern, da solche Schönwetterperioden wesentlich öfter vorkommen und auch von der Wettervorhersage zuverlässig angekündigt werden können.

Einschlägige Versuche, unter anderem von Wieneke und Claus [2], haben ergeben, daß solche entscheidenden Verkürzungen der Trocknungszeit mit den üblichen Heumaschinen, wie Wender und Zetter, auch durch häufigeren Einsatz nicht zu erreichen sind. Bessere Erfolge wurden dagegen besonders in den USA mit den Quetsch- und Knickzettlern bei der Trocknung von Leguminosen erzielt [3]. Diese Maschinen schließen das Gut durch eine Quetschung zwischen zwei rotierenden Walzen so auf, daß ein schnellerer Austritt des Wassers ermöglicht wird. Die in den USA gebauten Maschinen sind jedoch in erster Linie für die dort weit verbreiteten Leguminosen mit ihren gegenüber dem Gras wesentlich dickeren Stengeln geeignet. Daher wurden in verschiedenen Instituten, auch in Europa, Versuche unternommen, die aufzeigen sollten, wie das Verfahren auf die Aufbereitung von feinstengeligen Gräsern abgestimmt und weiterentwickelt werden kann. Hierzu wurden besonders von Segler [4] zahlreiche Versuche auf dem Felde angestellt. Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen, systematisch durchgeführten Untersuchungen sollen einen Beitrag zur Klärung dieses Problems liefern.

*) Vorgelesen auf der 23. Tagung der Landmaschinen-Konstrukteure in Braunschweig-Völkenrode am 14. Oktober 1965. Die zwischenzeitlichen Ergebnisse sind in dem vorliegenden Bericht mit enthalten, so daß der Inhalt dem Stand bei Abschluß der Untersuchungen entspricht.

Dipl.-Ing. Werner Darnedde ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Landmaschinenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baader) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode. Die vorstehende Arbeit ist unter dem vormaligen Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. Franz Wieneke, jetzt Universität Göttingen, entstanden.

Aufbau und Festigkeit der Pflanzen

Um die Wirkung des Quetschens auf den Trocknungsverlauf von Pflanzen erklären zu können, bedarf es zunächst einer näheren Betrachtung des morphologischen Aufbaus und der Festigkeit der Pflanzen. Sie bestehen aus einer Vielzahl von Zellen, die entsprechend ihrer Aufgabe aufgebaut und angeordnet sind, Bild 1 [5]. Im Innern befinden sich mehrere unregelmäßig aufgebaute, sehr locker geschichtete Zellenreihen, die wegen ihrer lockeren Schichtung auch Schwammparenchym genannt werden. Nach oben hin schließen sich dichter gelagerte Zellenreihen an. Wegen ihres exakten Aufbaus werden sie als

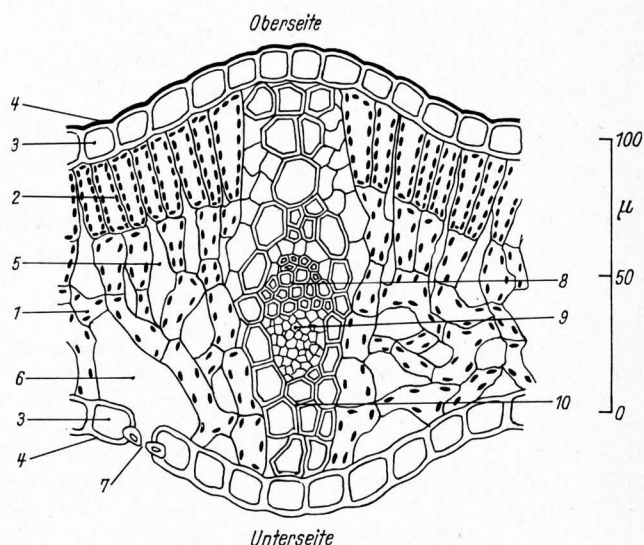


Bild 1. Blattquerschnitt nach Strasburger [5].

- | | | |
|---------------------|----------------------|--------------|
| 1 Schwammparenchym | 6 Atemhöhle | } Blattrippe |
| 2 Palisadengewebe | 7 Spaltöffnung | |
| 3 Epidermis | 8 Gefäßteil | |
| 4 Kutikula | 9 Siebteil | |
| 5 Interzellularraum | 10 Sklerenchymfasern | |

Palisadengewebe bezeichnet. Den Abschluß bildet schließlich die Epidermis mit der sie umgebenden Kutikula. Die Epidermis ist aus besonders stabilen Zellen aufgebaut, die neben den Sklerenchymfasern die Festigkeit der Pflanze gewährleisten. Die Kutikula ist eine isolierende dünne Schicht, welche die unkontrollierte Verdunstung von Wasser durch die Blattoberfläche in entscheidendem Maße verhindert. Die im Palisadengewebe beginnenden und im darunterliegenden Schwammparenchym besonders zahlreichen Zwischenräume werden als Interzellulare und, sofern sie durch eine Spaltöffnung mit der umgebenden Luft in Verbindung stehen, als Atemhöhlen bezeichnet.

In regelmäßigen Abständen sind die Blätter von einem in der Längsrichtung verlaufenden Röhrensystem, dem Leitbündel, durchzogen. Das Leitbündel ist nach der Funktion in den Siebteil für den Transport organischer Stoffe und den Gefäßteil für den Wassertransport getrennt. Umgeben sind die Leitbündel von einem aus den Sklerenchymfasern bestehenden Festigungsgewebe.

Die erwähnten Spaltöffnungen, Bild 2, sind wichtige Regulierungseinrichtungen für den Wasserhaushalt der Pflanzen. Sie behalten auch noch nach dem Abschneiden der Pflanzen teilweise ihre Funktion in der Verdunstungssteuerung der Pflanze, wie besonders Reichenbach [6] in eingehenden Untersuchungen fest-

stellte. Sie reagieren auf den osmotischen Druck, der ein Maß für die Wassersättigung darstellt, und auf den Lichteinfall. Die Spaltöffnung ist bei geringem osmotischen Druck in den Zellen geschlossen. Steigt der Druck in den hantelförmigen Schließzellen und in den Nebenzellen an, so beginnen sich diese Zellen zu dehnen, Bild 2. Diese Ausdehnung erfolgt vor allem an den dünnwandigen Enden der hantelförmigen Schließzellen, wobei die dickwandigen Mittelteile zwangsweise ein wenig auseinanderdrücken und den Spalt öffnen.

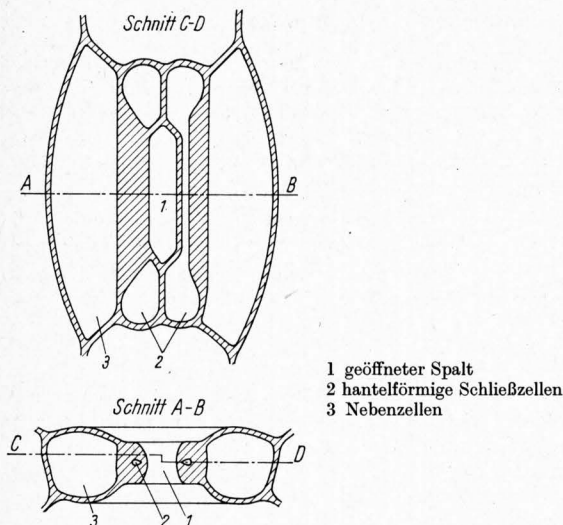


Bild 2. Spaltöffnung beim Gramineen-Typus, schematisch nach Fitting (in [5] S. 77).

Die Spaltöffnungen sind besonders zahlreich in der Wachstumszone an der Blattspitze angeordnet. Entfernt man diese Spitzen, so verlangsamt sich dadurch der Trocknungsverlauf der übrigen Pflanze, wie Bild 3 zeigt, besonders dann, wenn die Spaltöffnungen während des Schnittzeitpunktes geöffnet waren (im vorliegenden Beispiel um 11.45 Uhr). Das Bild zeigt, daß durch die in der Spitze des Blattes besonders zahlreichen Spaltöffnungen im geöffneten Zustand mehr Wasser verdunstet als die Schnittstelle, die beim Abtrennen der Blattspitze entsteht. Der unterschiedliche Anfangsfeuchtegehalt vermittelt außerdem einen Eindruck von den relativ großen Schwankungen der Wassersättigung der Pflanze während eines Tages. Dabei ist der Zustand der Wassersättigung für die Aufbereitung von Bedeutung, wie später noch gezeigt wird.

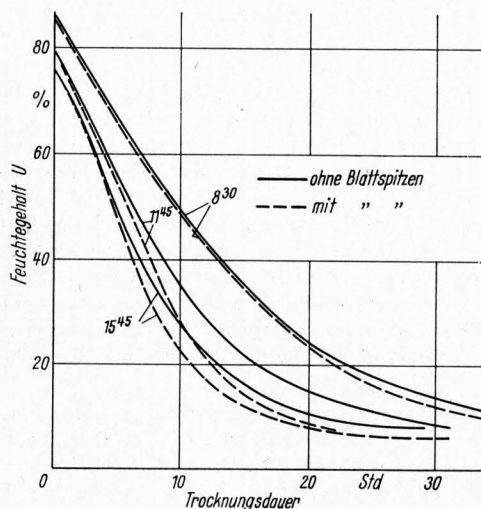


Bild 3. Einfluß des Schnittzeitpunktes auf den Trocknungsverlauf von Grasblättern.

Das von den Wurzeln aufgenommene Wasser steigt durch die Stengel zu den Blättern. Für die Bewegung sorgen der Druck in den Wurzeln und die Saugwirkung der Verdunstung an der Blattoberfläche. Auf dem gesamten Weg in den Leitbahnen durch die Pflanze wird das Wasser an die benachbarten Inter-

zellarräume abgegeben. Diese stellen ein kommunizierendes System dar, an das die Zellen angeschlossen sind. Die Zellen können also bei entsprechendem Vorrat ihren Bedarf an Wasser aus den Zwischenräumen decken. Der Wasserüberschuß gelangt zu den Atemhöhlen und über die Spaltöffnungen ins Freie. Dieser kontinuierliche Wasserstrom besorgt neben dem Transport von Nährstoffen auch noch die Kühlung der Pflanze. Die verhältnismäßig große Verdunstungsleistung der Spaltöffnungen beruht auf dem Randwirkungsgesetz. Die Fläche der Spaltöffnungen beträgt bei maximaler Öffnung etwa 2% der Blattoberfläche, durch die sie 50 bis 60% der Wassermenge, die eine freie Wasserfläche in der Größe der Blattoberfläche verdunsten könnte, an die umgebende Luft abgibt. Das Randwirkungsgesetz sagt aus, daß von mehreren kleinen Flächen mehr Wasser verdunstet wird, als von einer flächengleichen großen Fläche, da die umgebenden Randflächen, durch die auch nach den Seiten hin verdunstet wird, größer sind. Diese Tatsache ist auch für die Aufbereitung durch Quetschen von Bedeutung, da durch sie eine möglichst große Zahl künstlicher Spaltöffnungen, die von der Pflanze nicht reguliert werden können, geschaffen werden soll.

Die Stengel der Gräser sind im Gegensatz zu den Blättern nicht mit Spaltöffnungen versehen; sie bestehen in erster Linie aus den Leitbahnen, welche in Bündeln um den zumeist hohlen Innenraum angeordnet sind. Durch ihre Röhrenform sind sie besonders widerstandsfähig gegen Druck-, Zug- und Biegebeanspruchungen. Für die Aufbereitung durch Quetschen interessiert dabei besonders die Festigkeit gegenüber einer Druckbeanspruchung senkrecht zur Halmachse. Ein entsprechender Versuch zeigte eine starke Abhängigkeit der zum Bruch des Halmes führenden Querkraft von dem Stengeldurchmesser, Bild 4. Dabei wurde ein rechteckiger Stempel von 1 x 4 mm Kantenlänge auf den Halm gesetzt, der auf einer festen Platte lag,

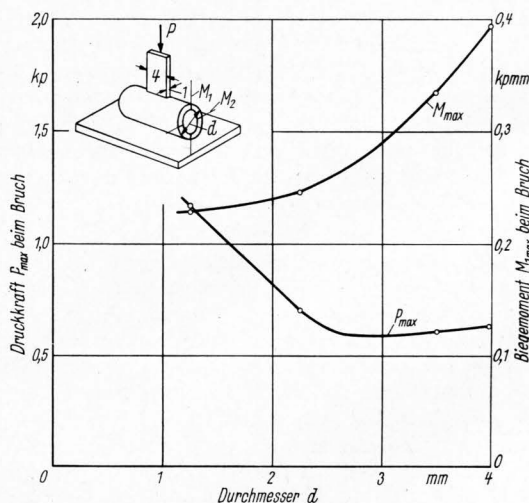


Bild 4. Einfluß des Stengeldurchmessers auf die Bruchfestigkeit von Grasstengeln.

und die Belastung beim Aufplatzen desselben gemessen. Die bei der Belastung in der Halmwand auftretenden Biegemomente lassen sich nach der Formel für dünnwandige Kreisringe errechnen [7]:

$$M_1 = 0,318 P \frac{d}{2},$$

wobei P die Stempelkraft und d der Stengeldurchmesser ist.

Verwendete Formelzeichen

g_{TS}	g/gh	Trocknungsgeschwindigkeit (verdunstete Wassermasse je Trockenmasseneinheit und Trocknungsstunde)
t_L	°C	Lufttemperatur
U	%	Feuchtegehalt des Halmgutes, Wassergehalt bezogen auf die Gesamtmasse
X	%	Feuchtegrad des Halmgutes, Wassergehalt bezogen auf die Trockenmasse
v_B	m/s	Zuführungsgeschwindigkeit
φ_L	%	relative Luftfeuchte

Dieses Moment erzeugt unterhalb des Lastangriffspunktes am inneren Umfang des Stengelrohrs eine Zugkraft, die zum Aufreißen des Halmes an dieser Stelle führt, **Bild 5**. Ein zweites charakteristisches Moment tritt in der Halmwand um 90° vom Kraftangriffspunkt versetzt auf:

$$M_2 = 0,182 P \frac{d}{2}$$

Dieses Moment erzeugt am äußeren Halmumfang eine Zugkraft, die zum Aufreißen der Außenhaut führt. Dadurch ergibt sich die auch aus dem Schrifttum bekannte Form eines gequetschten Halmes mit zwei gegenüberliegenden Rissen am inneren Umfang, **Bild 5**, und zwei jeweils um 90° versetzten Knicken am äußeren Umfang [8]. Die aus der gemessenen Kraft P_{\max} errechneten maximalen Biegemomente M_{\max} sind ebenfalls in das Diagramm in **Bild 4** eingetragen. Die Kurve zeigt, daß die Bruchfestigkeit der Stengel mit zunehmendem Durchmesser infolge der Verholzung dickerer Halme steigt. Für die Aufbereitung bleibt jedoch die wichtige Tatsache festzuhalten, daß die erforderliche Druckkraft zum Zerbrechen von Stengeln gleicher Struktur mit abnehmendem Durchmesser steigt.

Die flachen Blätter der Gräser lassen sich nun nicht so einfach wie die Stengel durch eine Druckeinwirkung zum Platzen ihrer Oberfläche bringen. Bei ihnen interessiert zu wissen, welchen Widerstand sie dem Eindringen von Werkzeugen, wie beispielsweise denen einer profilierten Stahlwalze, entgegensetzen. Bei Tastversuchen mit dem bereits beschriebenen Stempel zeigte sich, daß der Eindringwiderstand der Grasblätter durch ihre Struktur beeinflusst wird und sich außerdem mit dem Feuchtegehalt verändert. Der Widerstand nimmt mit der Zahl der von den Kanten des Werkzeugs geschnittenen Fasern (gemeint sind die Sklerenchymfasern des Festigungsgewebes) zu, da die Festigkeit der Fasern größer ist, als diejenigen des dazwischenliegenden Gewebes. Bei einem rechteckigen Werkzeug ist deshalb der Widerstand bei senkrecht zur Faserrichtung aufgesetzter Längskante größer als bei parallel dazu verlaufender Längskante. Der Widerstand nimmt ferner mit abnehmendem Feuchtegehalt zu, weil das welkende Gewebe den Schneidkanten des Stempels einen größeren Widerstand entgegensetzt, als die frischen, mit Feuchtigkeit gefüllten Zellen der frischen Blätter.

Mit dem verwendeten Stempel von 1×4 mm Kantenlänge wurde beispielsweise bei parallel zu den Fasern aufgesetzten Längskanten bei Knaulgrasblättern ein Eindringwiderstand P_{\max} von etwa 1,3 kp im frischen Zustand und von 2,1 kp nach 90 min Welkdauer gemessen. Die Stempellast wurde bis zur kritischen Last P_{\max} gesteigert, bei deren Erreichen der Stempel beschleunigt in das Gut eindringt. Bei unter 45° zur Faserrichtung aufgesetzten Längskanten des Stempels wurden dagegen Kräfte von 2,4 bzw. 3,2 kp gemessen. Für die Aufbereitung durch profilierte Quetschwalzen ergibt sich daraus der Hinweis, daß bei einer schneidenden Bearbeitung der Schnitt möglichst in der Längsrichtung der Blätter erfolgen sollte.

Versuchseinrichtung, -durchführung und -gut

Die Versuche wurden im wesentlichen auf zwei Versuchsständen durchgeführt. Einmal wurde in Modellversuchen das Gut von Hand auf Platten verschiedenen Materials in genau bestimmten Schichtdicken gelegt und von verschiedenen, ebenfalls von Hand bewegten Modellwalzen gequetscht, **Bild 6**. Ein weiterer Versuchsstand war mit austauschbaren Originalquetschwalzen bestückt; außerdem konnten bei diesem Versuchsstand der Preßdruck, die Walzenumfangsgeschwindigkeit und die Zuführungsgeschwindigkeit des Halmgutes verändert werden, **Bild 7**. Die Trocknung der einzelnen Gutproben wurde in einer Klimakammer unter definierten Bedingungen durchgeführt und durch Wägung in gewissen Zeitabschnitten ermittelt, **Bild 8**. Die Luftverhältnisse der Kammer mit 30°C Lufttemperatur und 40% Luftfeuchte waren relativ günstig; sie entsprechen etwa einem sonnigen Hochsommertag, wobei noch die fehlende Sonneneinstrahlung in der Klimakammer berücksichtigt ist. Daneben wurden einige Proben im Freien getrocknet, um den Einfluß der Witterung zu kontrollieren.

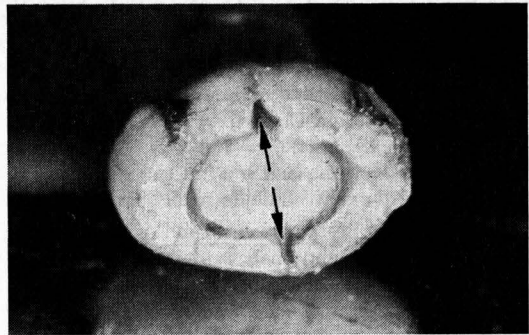


Bild 5. Innen aufgeplatzter Halmknoten beim Belastungsversuch nach **Bild 4**.

Vergrößerung: 10fach

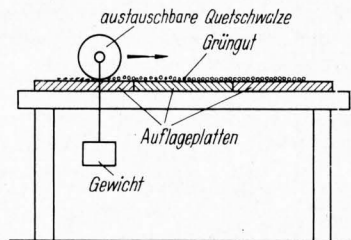


Bild 6. Einfache Modellversuchseinrichtung zur Aufbereitung des Halmguts durch Modellquetschwalzen.

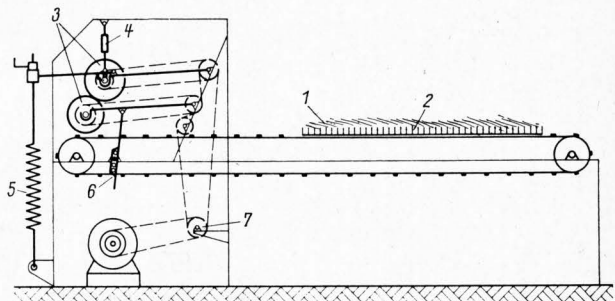


Bild 7. Versuchsstand zur Aufbereitung von Halmgut mit Originalquetschwalzen.

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1 Halmgut | 5 einstellbare Zugfedern |
| 2 Zuführband mit Gummifingern | 6 Höhenverstellung der Quetschwalze |
| 3 austauschbare Quetschwalzen | 7 Antrieb mit Variator und Drehmomentgeber |
| 4 Weggeber | |

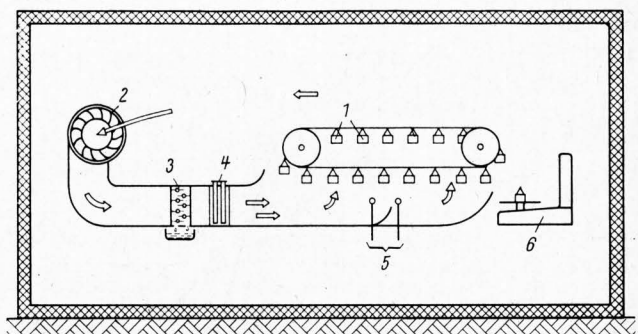


Bild 8. Klimakammer zur Trocknung der Versuchsproben.

- | | |
|------------------|---------------------------------|
| 1 Probenbehälter | 4 Heizung |
| 2 Gebläse | 5 Temperatur- und Feuchtefühler |
| 3 Kühlung | 6 Waage |

Die Schwierigkeiten bei der Beschaffung von gleichmäßigem Versuchsmaterial für landwirtschaftliche Versuche sind hinreichend bekannt. Neben den großen Unterschieden, die bereits unter den noch nicht gemähten Pflanzen bestehen, kommen bei den vorliegenden Versuchen noch die sehr beachtlichen Änderungen des Pflanzenzustandes nach dem Schnitt hinzu. Das Versuchsgut unterscheidet sich im einzelnen durch folgende Faktoren:

Grasart,
Standort und Bestandsdichte,
Witterung während der Wachstumszeit,
Wachstumszustand und damit Gewichtsverteilung
auf Stengel und Blätter,
1. oder 2. Schnitt,
Wassersättigungszustand im Augenblick des
Schnittes und Welkdauer nach dem Schnitt.

Grasart, Standort, Bestandsdichte und Klima bedingen die Festigkeit der Pflanze und insbesondere die Ausbildung der Kutikula. Der Anfangsfeuchtegehalt und der entsprechend verschiedene Sättigungsgrad der Pflanzen bestimmt nicht nur (über den Öffnungsgrad der Spaltöffnungen) den Trocknungsverlauf der nicht aufbereiteten Pflanzen (Bild 3), sondern auch den Wirkungsgrad der Aufbereitung, also die Relation zwischen Trocknungsdauer des aufbereiteten bzw. nicht aufbereiteten Gutes, wie Bild 9 zeigt. Die Kurven geben den Trocknungsverlauf von unter gleichen Bedingungen aufbereitetem und nicht aufbereitetem Gut wieder, das an zwei aufeinander folgenden Tagen aus dem gleichen Bestand gemäht wurde. Die geringere Beschleunigung der Trocknung des weniger gesättigten, am Nachmittag geschnittenen und aufbereiteten Gutes gegenüber dem un bearbeiteten Gut ist auf den eingangs beschriebenen

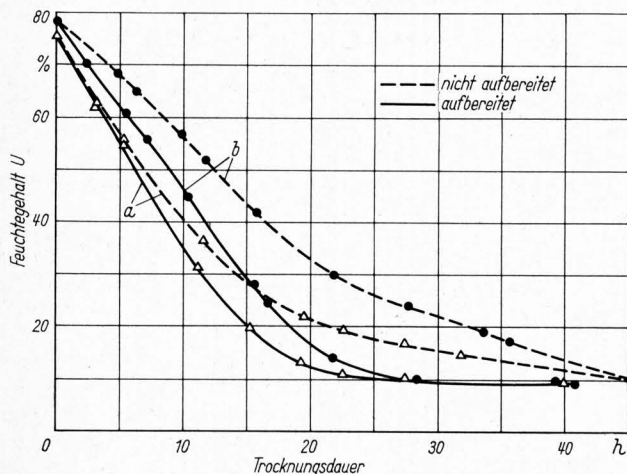


Bild 9. Einfluß der Witterungsbedingungen und der Wassersättigung beim Zeitpunkt des Schnittes auf die Wirkung der Aufbereitung.

- a am 18. 8. 1965 um 16.25 Uhr geschnittenes Gras
 $t_L = 25,4^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 50\%$
- b am 19. 8. 1965 um 10.10 Uhr geschnittenes Gras
 $t_L = 20^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 75\%$

Trocknung des Halmgutes im Klimaraum bei $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

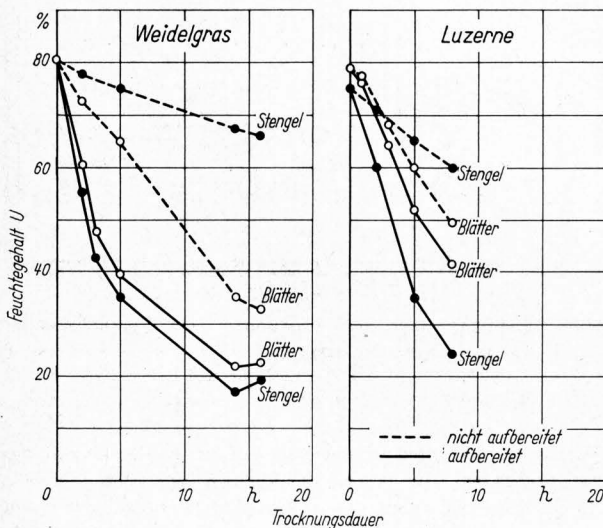


Bild 10. Wirkung der Aufbereitung bei Blättern und Stengeln.

Trocknung im Freien:
mittlere Temperatur $t_L = 20^\circ\text{C}$
mittlere Luftfeuchtigkeit $\varphi_L = 60\%$
Sonnenscheindauer 9 Std.

Unterschied der Widerstandsfähigkeit gegenüber Druckbeanspruchungen und der somit bei gleicher Belastung erzielbaren Zerstörung zurückzuführen.

Zu den übrigen Einflußgrößen ist noch folgendes zu sagen: Blätter trocknen im nicht aufbereiteten Zustand wesentlich schneller als Stengel, wie Bild 10 zeigt. Andererseits ist die Aufbereitung bei Stengeln wesentlich wirksamer als bei Blättern, wie das gleiche Bild zeigt. Gras mit hohen Anteilen an Blättern, wie es besonders im 2. und 3. Schnitt vorkommt, benötigt darum kürzere Trocknungszeiten als das stengeligeres Gras des 1. Schnittes. Ebenso erreicht überständiges altes Gras etwas schneller den Feuchtegehalt von 20% als junges frisches Gras. Zusammenfassend muß also festgestellt werden, daß in dem angegebenen Versuchszeitraum kein absolut gleiches Versuchsmaterial zur Verfügung stehen konnte, obwohl in erster Linie nur Weidel- und Knaulgras von jeweils zwei nebeneinanderliegenden Versuchsflächen untersucht wurden. Bei allen Versuchen wurden deshalb Proben mit nicht aufbereitetem Gut parallel getrocknet, die einen zuverlässigen Vergleich der Wirkungsweise der Aufbereitung ermöglichen. Der Einfluß der Welkdauer wurde weitgehend dadurch ausgeschaltet, daß das Gras erst unmittelbar vor dem Versuch geschnitten wurde. Über einzelne Ausnahmen wird später noch berichtet.

Modellversuche

Um die Grenzen der Beschleunigung der Trocknung durch Aufbereitung unter den Bedingungen der Klimakammer festlegen zu können, wurde in zwei Versuchen das Gras kurz gehäckselt (5 mm) bzw. der Länge nach in der Mitte aufgeschnitten. Daraus ergeben sich für den Austritt der Feuchtigkeit optimale Bedingungen, besonders bei Grasstengeln, wie Bild 11 zeigt. Zu diesem Versuch wurde stengeliges Weidelgras mit einem sehr geringen Blattanteil benutzt. In dem Diagramm ist der Feuchtegehalt des Gutes über der Trocknungsdauer aufgetragen. Die obere Kurve

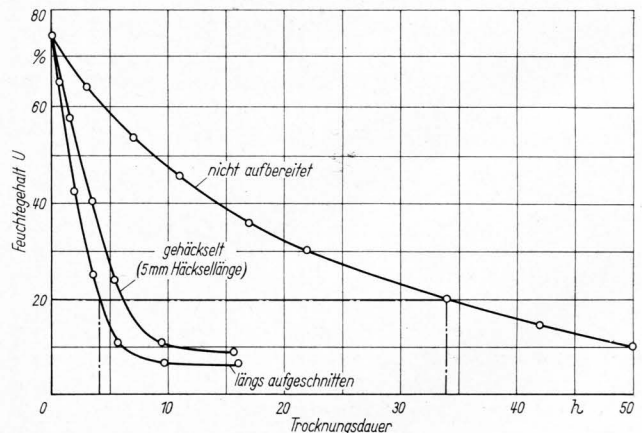


Bild 11. Trocknungsverlauf bei optimaler Aufbereitung (Modellversuch).

Versuchsgut: grobstengeliges Weidelgras
Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

stellt den Trocknungsverlauf von unbeschädigten Halmen dar. Darunter liegen die Kurven der gehäckselten und der längs aufgeschnittenen Halme. Bei den Stengeln wird durch den Längsschnitt der gesamte Hohlraum freigelegt, und es entstehen zwei Schnittflächen in der Halmwand. Dadurch erklärt sich auch die enorme Verkürzung der Trocknungsdauer bis zur Erreichung der 20% Grenze von 34 auf 4 Stunden, die selbst von dem extrem kurz gehäckselten Gut nur annähernd erreicht wurde. Etwas anders liegen die Verhältnisse bei Grasblättern. In Bild 12 sind die Trocknungskurven von Blättern des Knaulgrases, das in gleicher Weise wie die Stengel bearbeitet wurde, dargestellt. Hierbei konnte durch den Längsschnitt nur eine Verkürzung der Trocknungsdauer von 19 auf 8 Stunden erreicht werden, während das gehäckselte Gras im unteren Feuchtigkeitsbereich sogar etwas schneller trocknete. Aus beiden Diagrammen geht jedoch klar hervor, welche Möglichkeiten für die Beschleunigung der Trocknung von Halmgut durch mechanische Bearbeitung grundsätzlich bestehen. Im folgenden sollen nun in erster Linie die

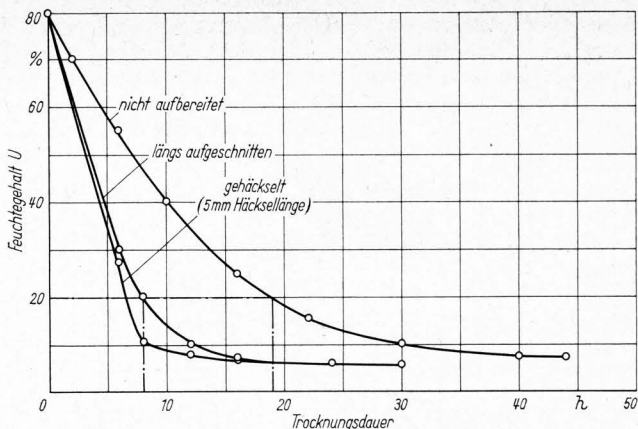


Bild 12. Trocknungsverlauf bei optimaler Aufbereitung (Modellversuch).

Versuchsgut: blattreiches Knaulgras
Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

Probleme der Aufbereitung durch Quetschen und der Einfluß der verschiedenen Parameter behandelt werden.

Einfluß des Walzenprofils

Das Walzenprofil bestimmt weitgehend die Art und vor allem das Ausmaß der Beschädigung, also die Länge der angequetschten und gequetschten Halnteile. In einem Modellversuch wurde Gras, das in einer Schicht auf einer ebenen harten Gummiplatte lag, durch verschiedene Walzen mit unterschiedlichen Profilen gequetscht. Dabei waren die Profile so gestaltet, daß das Gut jeweils in einer Länge von 5 mm gequetscht wurde und dann in Abständen von 5, 10 und 15 mm ungequetscht blieb. In den einzelnen Versuchen wurde also nacheinander die Hälfte, ein Drittel und ein Viertel des Gutes gequetscht, wobei die Linienlast je cm Walzenlänge mit 10 kp so hoch gewählt wurde, daß die oben errechneten Preßdrücke zur Zerstörung des Gutes auf jeden Fall erreicht wurden. Daneben wurde in einem weiteren Versuch mit einer glatten Walze das Gut in der gesamten Länge gequetscht. Die Trocknungskurven dieser so bearbeiteten und unter einheitlichen Bedingungen in der Klimakammer getrockneten Gutproben sind in **Bild 13** dargestellt. Das Diagramm zeigt die erhebliche Beschleunigung der Trocknung, die schon erreicht wird, wenn nur ein Viertel der gesamten Halmlänge in regelmäßigen Abständen (15 mm) gequetscht wird. Um nun erklären zu können, worauf diese Wirkung beruht, erscheint es zweckmäßig, das dem Praktiker geläufige Diagramm von Feuchtegehalt und Trocknungsdauer auf ein solches mit Feuchtegrad und Trocknungsgeschwindigkeit umzurechnen, da dieses Diagramm die theoretische Erörterung vereinfacht, **Bild 14**. Beim Feuchtegrad X wird die Masse des jeweils enthaltenden Wassers auf die

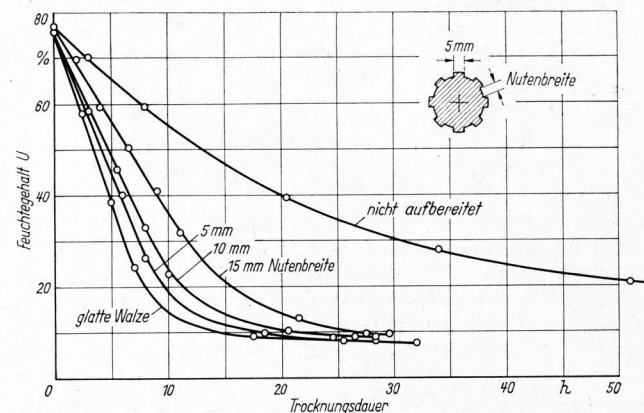


Bild 13. Einfluß der Walzenprofilierung auf den Trocknungsverlauf (Modellversuch).

Versuchsgut: Weidelgras, 1. Schnitt
Walze mit Längsrippen, 200 mm \varnothing
Belastung: 10 kp/cm Walzenlänge
Unterlage: Gummiplatte, hart (88 shore)
Schichtdicke: 1 Halmschicht
Trocknung im Klimaraum: $t_\varphi = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

konstante Trockensubstanzmasse bezogen. Im Gegensatz zum Feuchtegehalt U ändert sich also der Feuchtegrad X proportional mit der im Gut enthaltenen Wassermenge. Damit läßt sich aus **Bild 14** die Trocknungsgeschwindigkeit als Quotient der Änderung des Feuchtegrades und der zugehörigen Trocknungsdauer bilden. Eine Gerade bedeutet demnach in diesem Diagramm eine konstante Trocknungsgeschwindigkeit, während eine Kurve auf die Änderung der Trocknungsgeschwindigkeit hindeutet.

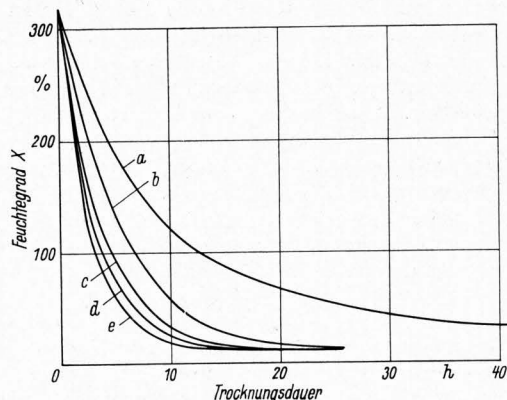


Bild 14. Einfluß der Walzenprofilierung auf den Trocknungsverlauf (umgerechnet auf den Feuchtegrad).

Versuchsdaten wie in **Bild 13**

	Bearbeitung	gequetschte Halmlänge	ungequetschte Halmlänge	$a = \frac{\text{Quetschlänge}}{\text{Gesamtlänge}}$
a	unbearbeitet	0	Gesamtlänge	0
b	Riffelwalze	5 mm	15 mm	$\frac{1}{4}$
c	Riffelwalze	5 mm	10 mm	$\frac{1}{3}$
d	Riffelwalze	5 mm	5 mm	$\frac{1}{2}$
e	Glattwalze	Gesamtlänge	0	$\frac{1}{1}$

In **Bild 15** ist die aus den Feuchtegradkurven ermittelte Trocknungsgeschwindigkeit (in Gramm verdunstetes Wasser je Gramm Trockensubstanz und Stunde Trocknungsdauer) über dem Feuchtegrad aufgetragen. Grundsätzlich läßt sich zu dem Geschwindigkeitsverlauf sagen, daß das Gras in ähnlicher Weise trocknet, wie es von anderen porigen Gütern bekannt und beschrieben ist. Danach verläuft die gesamte Trocknung in drei Abschnitten. Im ersten Abschnitt herrscht eine konstante

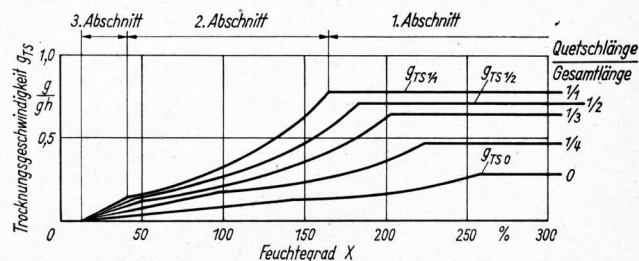


Bild 15. Einfluß der Walzenprofilierung auf die Trocknungsgeschwindigkeit.

g_{TS} Trocknungsgeschwindigkeit in g verdunstetes Wasser je g Trockensubstanz und Trocknungsstunde

Trocknungsgeschwindigkeit; in diesem wird die Feuchtigkeit verdunstet, die sich außen am Gut befindet und diejenige, die aus dem Inneren des Gutes, beispielsweise durch Kapillarkräfte an die Oberfläche transportiert wird. Der zweite Abschnitt beginnt mit der Wanderung des Trocknungsspiegels von der Oberfläche weg in das Gutsinnere. Dabei nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit in degressiver Weise ab. Der dritte Abschnitt schließlich beginnt bei hygroskopischen Gütern dann, wenn das Wasser nur noch über Dampfdiffusion transportiert wird. Dies hat einen weiteren Abfall der Trocknungsgeschwindigkeit — häufig in linearer Weise — zur Folge. Das Diagramm zeigt nun daß das mit der glatten Walze gequetschte Gut (1/1) im vorliegenden Versuch etwa die 2,5fache Anfangsgeschwindigkeit

derjenigen des unbearbeiteten Gutes besitzt und diese konstante hohe Anfangsgeschwindigkeit auch wesentlich länger beibehält. Auch der Übergang vom zweiten in den dritten Abschnitt vollzieht sich erst sehr spät bei einem Feuchtegrad von etwa 40% gegenüber 140% bei dem unbearbeiteten Gut. Das Quetschen verändert also einmal das Gut in der Weise, daß ein beschleunigter Transport zur Oberfläche ermöglicht wird. Weiter wird auch im Inneren der Pflanze der Austausch der Feuchtigkeit erleichtert, so daß der Umweg über die Dampfdiffusion teilweise erspart wird, wie das Hinausschieben des dritten Trocknungsabschnittes zeigt. Interessant ist ferner ein Vergleich der übrigen Trocknungsgeschwindigkeitskurven. Bei dem nur zum Teil gequetschten Gut sollte man eine Anfangsgeschwindigkeit erwarten, die sich etwa aus den ermittelten Werten der vollkommen gequetschten bzw. der ungequetschten Halme — den Anteilen entsprechend — zusammensetzt. Wenn a also beispielsweise den Längensanteil des gequetschten und b den des ungequetschten Halmes angibt ($a + b = 1$), so erhält man eine rechnerische Anfangsgeschwindigkeit nach der Formel

$$g'_{Tsa} = a g_{Tsa} + b g_{Tsa}$$

Die tatsächlich gemessenen Werte g_{Tsa} liegen jedoch höher, Tafel 1. Dies erklärt sich aus der Tatsache, daß offensichtlich Wasser aus den unverletzten Halmteilen über die benachbarten verletzten Halmteile verdunstet wird. Dadurch erhöht sich die Gesamttrocknungsgeschwindigkeit um die Differenz Δg_{Tsa} zwischen der errechneten Trocknungsgeschwindigkeit g'_{Tsa} und der tatsächlich gemessenen g_{Tsa} :

$$\Delta g_{Tsa} = g_{Tsa} - g'_{Tsa}$$

Bei auf $\frac{1}{3}$ der Gesamtlänge gequetschten Halmen ($a = \frac{1}{3}$ und $b = \frac{2}{3}$) ergibt sich danach folgende „zusätzliche“ Trocknungsgeschwindigkeit

$$\Delta g_{TS \frac{1}{3}} = 0,65 - \frac{1}{3} \cdot 0,77 - \frac{2}{3} \cdot 0,29 = 0,20 \text{ [g/gh]}$$

wobei 0,65 die tatsächlich gemessene Anfangstrocknungsgeschwindigkeit, 0,77 die der im ganzen gequetschten und 0,29 die der ungequetschten Halme sind. Von Interesse ist es nun, diese zusätzliche Trocknungsgeschwindigkeit auf die beiden Anteile der Halme zu beziehen, wobei man Δg_{Tsa} durch a bzw. b zu dividieren hat. Diese in **Tafel 1** aufgeführten bezogenen Werte zeigen, daß die Trocknungsgeschwindigkeit der gequetschten Halmteile um so stärker zunimmt, je größer die Anteile der benachbarten unverletzten Halmabschnitte sind. Umgekehrt wird die spezifische Wassermenge, die aus den unverletzten Halmteilen zusätzlich über die Verletzungen verdunstet wird, geringer.

Tafel 1. Anfangstrocknungsgeschwindigkeit von gequetschtem und ungequetschtem Weidelgras (Bild 15).

Art der Aufbereitung	gequetschte Halm-länge	ungequetschte Halm-länge	Anfangstrocknungsgeschwindigkeit				
			g_{Tsa} gemessen	g'_{Tsa} er-rechnet	Δg_{Tsa} bezogen auf		
Anteil a	mm	mm	g/gh	g/gh	Ge-samt-länge	An-teil a	An-teil b
ungequetscht	—	gesamt	0,29	—	—	—	—
$\frac{1}{4}$ gequetscht	5	15	0,57	0,41	0,16	0,64	0,21
$\frac{1}{3}$ gequetscht	5	10	0,65	0,45	0,20	0,60	0,30
$\frac{1}{2}$ gequetscht	5	5	0,70	0,53	0,17	0,34	0,34
$\frac{1}{1}$ gequetscht	gesamt	—	0,77	—	—	—	—

Soviel über den allgemeinen Einfluß der Aufbereitung von Halmgut auf den Trocknungsverlauf. Im folgenden sollen nun die einzelnen Einflüsse auf die Art und den Umfang der Verletzungen behandelt werden.

Schichtdicke

Die Schichtdicke des zwischen den Bearbeitungswerkzeugen befindlichen Gutes hat sich im Laufe der Untersuchungen als eine sehr wesentliche Größe erwiesen. In **Bild 16** sind beispielsweise die Kurven für den Trocknungsverlauf von Halmgut

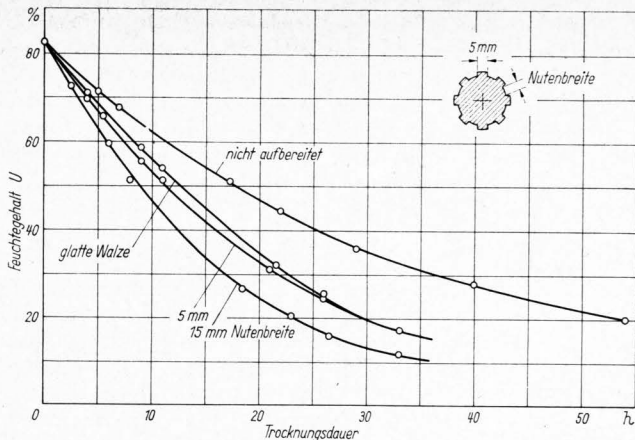


Bild 16. Einfluß der Walzenprofilierung auf den Trocknungsverlauf bei dickeren Halmgutsdichten (Modellversuch).

Versuchsdaten wie in Bild 13
Schichtdicke jedoch ~ 10 Halmschichten

dargestellt, das mit den gleichen Walzen (wie in Bild 13) bearbeitet wurde, nur in einer wesentlich erhöhten Schichtdicke von etwa 10 Halmlagen. Das Ergebnis dieser Versuche ist in zweifacher Beziehung bemerkenswert: erstens ist die Wirkung der Aufbereitung insgesamt erheblich geringer, zum anderen ist die Wirksamkeit der Profile umgekehrt. Bei der großen Schichtdicke ergibt sich eine weiche Bettung der Halme ineinander, so daß es in den mittleren Halmlagen zu keiner Zerstörung kommt, die die Verdunstung fördern könnte. Lediglich bei dem groben Profil und der großen Nutenbreite ergibt sich an den

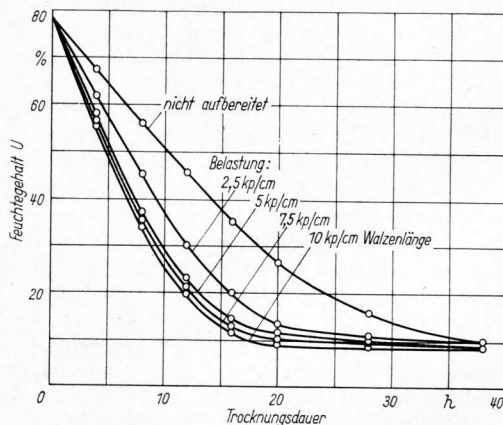


Bild 17. Einfluß der Linienlast bei einer Halmschicht auf den Trocknungsverlauf (Modellversuch).

Versuchsgut: Knaulgras
Walze: Stahl, glatt, 200 mm \varnothing
Unterlage: Gummiplatte, hart (88 shore)
Schichtdicke: 1 Halmschicht
Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

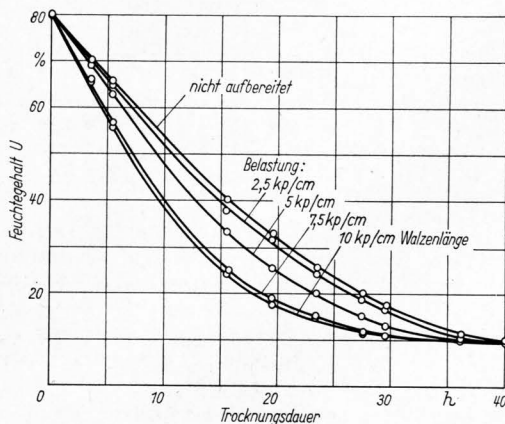


Bild 18. Einfluß der Linienlast auf den Trocknungsverlauf bei dickeren Halmgutsdichten (Modellversuch).

Versuchsdaten wie in Bild 17, Schichtdicke jedoch 10 Halmschichten

Profilkanten eine gewisse, tiefer gehende Knickwirkung; außerdem ist der spezifische Druck unter einer Profilleiste größer als bei der glatten Walze, die eine große Schmiegungsfläche aufweist. Die Wirksamkeit eines Walzenprofils ist also von der zugeführten Schichtdicke abhängig.

100 und 200 mm sind in **Bild 20** dargestellt. Es zeigt sich, daß ein Unterschied in der Wirkung auf den Trocknungsverlauf erst bei dem kleinsten Durchmesser von 25 mm auftritt, der in der Praxis wohl kaum zu verwirklichen sein wird. Die unterschiedliche Wirkung beruht einmal auf dem höheren spezifischen

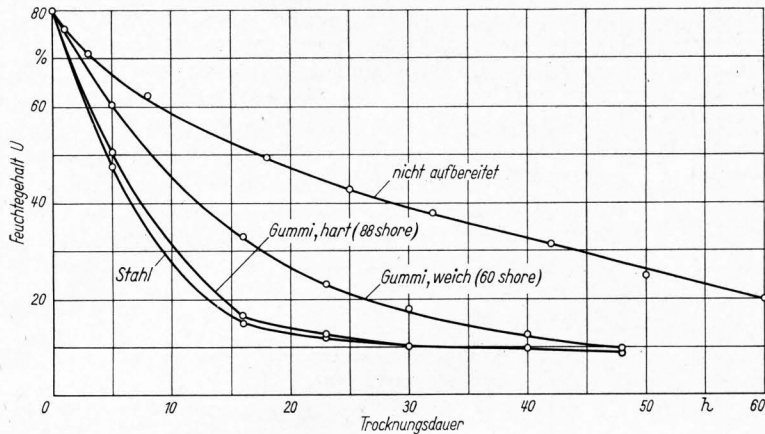


Bild 19. Einfluß der Härte der Walzenunterlage auf den Trocknungsverlauf (Modellversuch).

Versuchsgut: junges Weidelgras
Walze: Stahl, glatt, 200 mm ϕ
Belastung: 5 kp/cm Walzenlänge
Schichtdicke: 1 Halmschicht
Trocknung im Klimaraum:
 $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

Linienlast

Der Einfluß der Linienlast ist in **Bild 17** dargestellt. Die Trocknungskurven zeigen, daß bei der gewählten, in der Praxis üblichen Werkstoffkombination von Stahl und hartem Gummi und einer Schichtdicke von nur einer Halmlage eine Steigerung der Belastung über 5 kp/cm Walzenlänge hinaus keine Trocknungsbeschleunigung von Bedeutung mehr bewirkt. Bei Belastungen zwischen 5 bis 7 kp/cm beginnt außerdem je nach Wachstumszustand des Gutes schon der unerwünschte Saftaustritt. Bei einer Erhöhung der Schichtdicke ergibt sich ähnlich wie bei den Profilen eine geringere Aufbereitungswirkung, **Bild 18**. Damit zeigt sich auch hier die überragende Bedeutung der Gutschichtdicke.

Werkstoffkombination und -härte

Die folgenden Einflußgrößen wurden nur bei der optimalen Schichtdicke von einer Halmlage untersucht. **Bild 19** zeigt die Bedeutung des Werkstoffes bzw. dessen Härte. Die Versuche mit Weidelgras zeigen eine weitaus geringere Aufbereitungswirkung bei der weichen gegenüber der harten Gummipolsterung. Bei der weichen Polsterung wird die Halmschicht „besser“ eingebettet, wodurch es infolge der größeren Auflagefläche zu einem geringeren spezifischen Flächendruck kommt. Die Wirkung der Stahlplatte unterscheidet sich nicht wesentlich von derjenigen der harten Gummipolsterung, da die spezifischen Flächendrücke zwischen den beiden weit weniger differieren als die zwischen weicher und harter Gummipolsterung. Die bei statischer Belastung aus der gemessenen Auflagebreite bei der gegebenen Zwischenschicht aus einer Halmlage errechneten Werte des spezifischen Flächendrucks sind

bei Stahl auf Stahl	0,65 kp/mm ²
bei Stahl auf hartem Gummi	0,47 kp/mm ²
bei Stahl auf weichem Gummi nur	0,17 kp/mm ² .

(Ohne Zwischenschicht liegt der spezifische Flächendruck für die Kombination Stahl auf Stahl natürlich wesentlich höher.) Dieses Beispiel zeigt deutlich, daß eine Steigerung des spezifischen Flächendrucks wesentlich über die Druckfestigkeit des Halmgutes hinaus keine weitere Verkürzung der Trocknungsdauer mehr bringt. Liegt der spezifische Flächendruck dagegen unter der Halmfestigkeit, so läßt die Wirkung auf die Trocknungsgeschwindigkeit stark nach. Es werden im wesentlichen nur noch die dickeren, aus der Schicht herausragenden Stengel, und ein Teil der Blattrippen zerstört.

Walzendurchmesser

Der Walzendurchmesser hat ebenfalls einen Einfluß auf die Aufbereitungswirkung, und zwar schon deshalb, weil er ein bestimmender Faktor für den spezifischen Flächendruck ist. Die Ergebnisse von Versuchen mit Walzendurchmessern von 25,

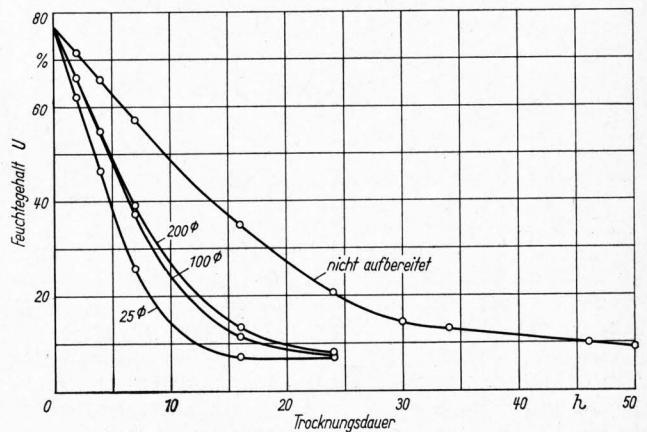


Bild 20. Einfluß des Walzendurchmessers auf den Trocknungsverlauf (Modellversuch).

Versuchsgut: Knaulgras
Walzen: Stahl, glatt; 25 mm, 100 mm und 200 mm ϕ
Belastung: 10 kp/cm Walzenlänge
Unterlage: Gummipolsterung, hart (88 shore)
Schichtdicke: 1 Halmschicht
Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

Flächendruck (unter den gegebenen Bedingungen verhalten sich die spezifischen Flächendrücke der Walzen mit 200, 100 und 25 mm Durchmesser wie 6 : 8 : 18) und zum anderen wohl auch auf der Form, d. h. der verschiedenen Krümmung der Walzenoberfläche. Der kleine Durchmesser ergibt beim Eindringen in das Halmgut eine größere Biegebeanspruchung.

Versuche mit Originalquetswalzen

Die vorstehenden Ergebnisse wurden in Modellversuchen mit der Versuchseinrichtung nach **Bild 6** gewonnen. Im folgenden wird über die Ergebnisse der Versuche mit den Originalquetswalzen berichtet. Bei diesen Versuchen in dem Versuchsstand nach **Bild 7** kommen als wesentliche Momente noch die dynamische Krafteinleitung, der Einfluß des Einzugsvorgangs und neben der reinen Druckeinwirkung noch eine gewisse Biegebeanspruchung durch den Aufnahmevorgang hinzu.

Zuführ- bzw. Fahrgeschwindigkeit

Auch bei der Aufbereitung des Gutes zwischen zwei rotierenden Quetswalzen hat die Schichtdicke eine entscheidende Bedeutung. Beim Einsatz der ausgeführten Maschine wird diese neben der Schwaddicke in erster Linie von der Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Auf dem Versuchsstand wurde deshalb eine Versuchsreihe gefahren, bei der die Schwaddicke konstant gehalten und die Zuführgeschwindigkeit verändert wurde. Aus dem Kurvenverlauf in **Bild 21** ist zu ersehen, daß sich in dem vorliegenden Fall eine optimale Aufbereitung bei einer Zuführ-

geschwindigkeit von 1,45 m/s ergeben hat. Bei einer noch kleineren Geschwindigkeit (0,85 m/s) nimmt die Wirkung geringfügig und bei höherer Geschwindigkeit (2,5 und 3,5 m/s) in stärkerem Maße ab, d. h. für gegebene Verhältnisse von Maschine und Grasart, insbesondere der Graslänge, ergibt sich nur bei einer bestimmten Geschwindigkeit ein gleichmäßig dünner Gutstrom, durch den eine optimale Aufbereitung sichergestellt wird. Sinkt die Geschwindigkeit unter diesen Wert, so kommt es zu zeitweiligen Unterbrechungen des Gutstroms mit anschließenden Stauungen bei der Wiederaufnahme des Schwads. Das Gras wird stoßweise eingezogen, was zu einer unterschied-

Walzenumfangs- und Fahrgeschwindigkeit einzelne Halme aus dem Schwad herausgerissen werden und dabei viele kleine Blätter abgetrennt werden können.

Linienlast

Der Einfluß der Linienlast ist erwartungsgemäß von verschiedenen anderen Faktoren abhängig, so daß ein allgemeingültiges Diagramm darüber nicht gezeigt werden kann. Die Linienlast wirkt sich bei dünner Gutschicht bzw. kleiner Zuführgeschwindigkeit aus, **Bild 22**. Bei dünner Schicht reichen schon verhältnismäßig geringe Kräfte aus, um die dickeren

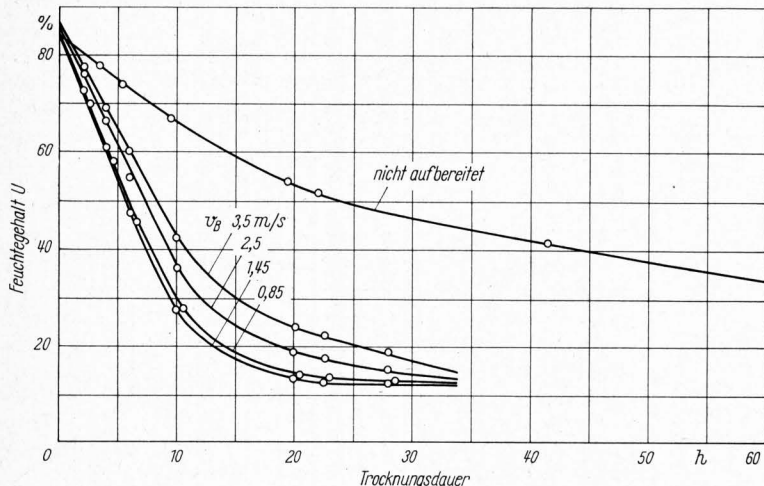


Bild 21. Einfluß der Zuführgeschwindigkeit auf den Trocknungsverlauf.

Versuchsgut: Weidelgras
Walzenpaar: Stahl, glatt / Gummi, glatt
Walzendurchmesser: 185 mm
Umfangsgeschwindigkeit der Walzen: 10 m/s
Belastung: 6 kp/cm Walzenlänge
Zuführgeschwindigkeit v_B des Gutes: 0,85; 1,45; 2,5 und 3,5 m/s
Zuführhilfe: vor den Quetschwalzen war eine Pick-up-Walze (200 mm \varnothing) aus Blechsegmenten vorgeschaltet
Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

lichen, im Mittel schlechteren Aufbereitung führt. Bei wachsender Zuführgeschwindigkeit wird zwar bis zu einer gewissen oberen Grenze ein gleichmäßiger Gutstrom erzeugt, doch wächst auch die Schichtdicke zwischen den Walzen, was zu der starken Verminderung der Aufbereitungswirkung führt. Im vorliegenden Versuch war vor die glatten Quetschwalzen eine kleine Pick-up-Walze aus Blechsegmenten von 200 mm Durchmesser, wie sie zeitweilig in den USA verwendet wurde, vorgeschaltet. Ohne Pick-up-Walze liegt das Optimum meist noch etwas unter dem angegebenen Wert, da das Auflösungsvermögen bei der Aufnahme durch die profilierte untere Walze geringer ist. Das Auflösungsvermögen der Quetschwalzen läßt sich auch durch eine Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit über die üblichen Werte von 8 bis 10 m/s nicht merklich verbessern. Höhere Umfangsgeschwindigkeiten führen unter Umständen nur zu höheren Bröckelverlusten, da bei einer zu großen Differenz zwischen

Stengel und die Blattrippen teilweise zu zerstören. Höhere Kräfte führen zu stärkeren Veränderungen in der Halmstruktur, die auch die stärker gebundene Feuchtigkeit in der späteren Trocknungsphase leichter verdunsten läßt. Bei größeren Schichtdicken bzw. Zuführgeschwindigkeiten, wie sie in der Praxis üblich sind, liegt auch die erforderliche Mindestbelastung höher, wie **Bild 23** erkennen läßt.

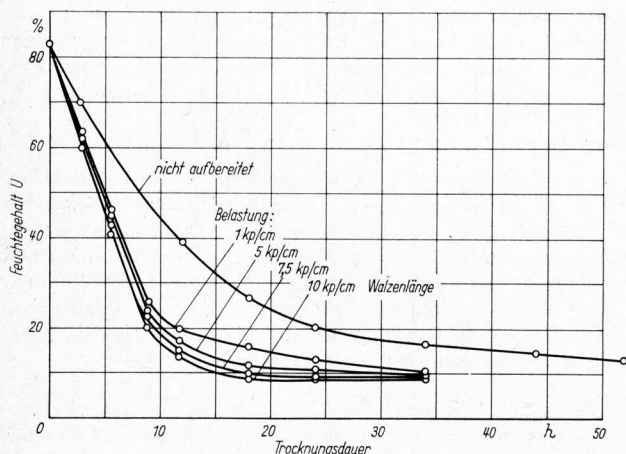


Bild 22. Einfluß der Linienlast bei geringer Zuführgeschwindigkeit auf den Trocknungsverlauf.

Versuchsgut: Wiesengras, gemischt
Walzenpaar: Stahl, glatt / Gummi, glatt (78 shore)
Walzendurchmesser: 185 mm
Umfangsgeschwindigkeit der Walzen: 10 m/s
Zuführgeschwindigkeit: 0,85 m/s
Zuführhilfe: Pick-up-Walze (wie in Bild 21)
Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

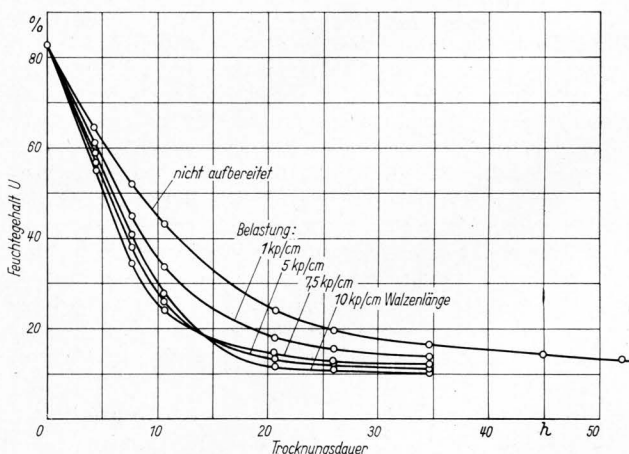


Bild 23. Einfluß der Linienlast bei höherer Zuführgeschwindigkeit auf den Trocknungsverlauf.

Versuchsdaten wie in Bild 22, Zuführgeschwindigkeit jedoch 2,5 m/s

Die in Bild 21 bis 23 angegebenen Linienlasten sind aus den im Stillstand gemessenen Federkräften errechnet worden. In Wirklichkeit sind die Linienlasten infolge der Walzenschwingungen bis zu etwa 20% größer.

Zu dem Einfluß der Linienlast muß abschließend noch die Kombination zweier genuteter Gummiwalzen besprochen werden. In einem Versuch, bei welchem (zur Kontrolle der übrigen mit reinem Weidel- bzw. Knaulgras gefahrenen Versuche) gemischtes Wiesengras verwendet wurde, zeigte sich, daß die Linienlast überhaupt keinen Einfluß auf die Aufbereitungswirkung bzw. auf den Trocknungsverlauf hatte, **Bild 24**. Dies hat verschiedene Gründe. Zunächst einmal wurde bei dieser Walzenkombination

festgestellt, daß bei einer Steigerung der Linienlast sich vor allem die Breite der Auflagefläche erhöht und somit der spezifische Flächendruck nicht proportional mit der Linienlast steigt. Aus den gemessenen Auflageflächen ergaben sich für die Linienlasten von 5 bis 10 kp/cm spezifische Flächendrücke, die zwischen 0,22 bis 0,28 kp/mm² lagen.

Zum anderen mußte das für diese Versuche verwendete Gras von einer etwas entfernter liegenden Wiese herbeigeschafft werden, so daß zwischen Schnitt und Aufbereitung eine Zeitspanne von etwa 25 bis 35 Minuten lag. Nach dem eingangs geschilderten Einfluß der Welkdauer auf die „Druckfestigkeit“ des Halmgutes wird damit klar, daß diese bei dem verwendeten Versuchsgut schon zu einem wesentlichen Teil über dem durch die beiden Gummiwalzen erzeugten spezifischen Flächendruck lag. Die Aufbereitung beschränkte sich daher auf die leichter zu beschädigenden dicken Halme und Blattrippen. Bei allen

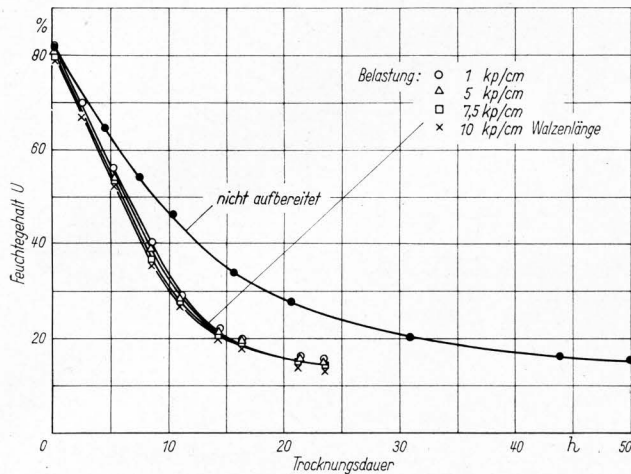


Bild 24. Einfluß der Linienlast bei der Kombination zweier Gummiquetschwalzen auf den Trocknungsverlauf.

Versuchsgut: Wiesengras, gemischt
Walzenpaar: zwei Gummiwalzen mit Nuten (68 shore)
(Bauart Crusher)
Walzendurchmesser: 200 mm
Umfangsgeschwindigkeit der Walzen: 10 m/s
Zuführungsgeschwindigkeit: 0,85 m/s
Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

anderen Walzenkombinationen wurde dieser Effekt nicht oder nicht in dieser Eindeutigkeit festgestellt. Der Einfluß der Welkdauer ist auch bei verschiedenen Untersuchungen in den USA festgestellt worden. So wurde beispielsweise von Luttrell [7] die Forderung erhoben, daß das Gut spätestens 20 Minuten nach dem Schnitt gequetscht werden sollte. Aber auch diese Versuche von Luttrell wurden meistens mit einer Maschine, die mit zwei Gummiwalzen arbeitete, durchgeführt.

Werkstoffkombination und -härte

Wie bereits bei den Modellversuchen zu sehen war, spielt die Härte des Gummis eine Rolle; dies zeigt sich auch beim Versuch mit Originalquetschwalzen, **Bild 25**, in überraschender Weise. Entsprechend den Ergebnissen des Modellversuchs ist die Aufbereitungswirkung bei weichem Gummi geringer. Durch die größere Nachgiebigkeit kann jedoch die weiche Walze unterschiedliche Schichtdicken innerhalb der Arbeitsbreite besser ausgleichen, sie ist also von der Gleichmäßigkeit der zugeführten Schichtdicke nicht so abhängig. So zeigt sich als Ergebnis, daß die weiche Walze offensichtlich geringere Zerstörungen erzielt dafür jedoch eine größere Anzahl von Halmen erfaßt. Trotzdem ist eine harte Gummiwalze in Verbindung mit einer Stahlwalze zu empfehlen, da sie bei ungünstiger Beschickung in der Wirkung kaum hinter der weichen Walze zurückbleibt, bei günstiger Beschickung jedoch wesentlich bessere Arbeit liefert.

Die Kombination Stahl auf Stahl scheidet für ausgeführte Maschinen aus verschiedenen Gründen, u. a. wegen der geringen Einzugsfähigkeit, weitgehend aus.

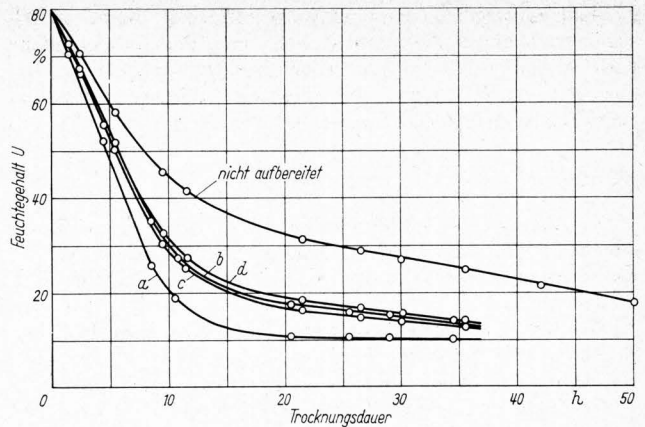


Bild 25. Einfluß der Gummihärte bei verschiedenen Zuführungsgeschwindigkeiten auf den Trocknungsverlauf.

Versuchsgut: Weidelgras
Walzendurchmesser: 185 mm
Umfangsgeschwindigkeit der Walzen: 10 m/s
Belastung: 6,5 kp/cm Walzenlänge
Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$
Kurve a: harte Gummiwalzen (78 shore), $v_B = 0,85$ m/s
Kurve b: harte Gummiwalzen (78 shore), $v_B = 2,5$ m/s
Kurve c: weiche Gummiwalzen (66 shore), $v_B = 0,85$ m/s
Kurve d: weiche Gummiwalzen (66 shore), $v_B = 2,5$ m/s

Schlupf zwischen den Quetschwalzen

Es ist naheliegend, das Halmgut nicht nur einer Druckbeanspruchung zu unterwerfen, sondern diese durch eine Scherbeanspruchung zu ergänzen. Dies kann man dadurch erreichen, daß man die beiden Walzen mit verschiedener Umfangsgeschwindigkeit laufen läßt. Der so entstehende Schlupf bewirkt eine Scherspannung in dem Gutstrom zwischen den Walzen. Entsprechende Versuche zeigten auch eine positive Wirkung auf den Aufbereitungseffekt, **Bild 26**. Der Schlupf wird zweckmäßigerweise nicht durch einen Zwangsantrieb beider Walzen erzeugt, sondern durch eine angetriebene und eine frei mitlaufende Walze. Dadurch ergibt sich eine erhebliche Verminderung des Leistungsbedarfs, wie auch die Beanspruchung der Maschine geringer wird. Bei frei mitlaufender zweiter Walze stellt sich ein Schlupf von etwa 1 bis 1,5% ein, der eine ausgezeichnete Aufbereitung bewirkt. Es empfiehlt sich aber (wie bei ausgeführten Maschinen vielfach üblich), die zweite Walze trotzdem über einen

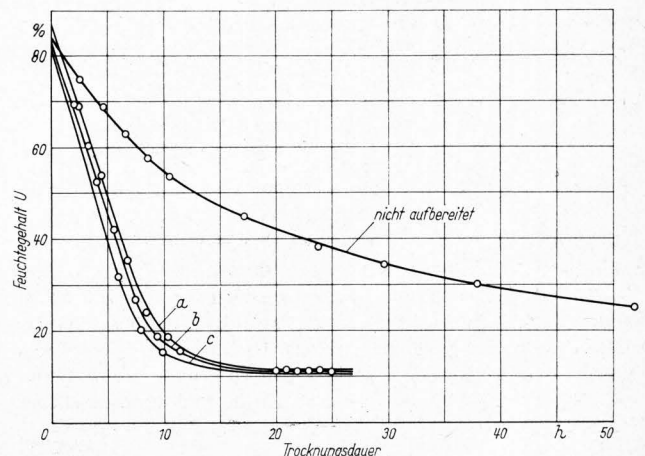


Bild 26. Einfluß von Schlupf zwischen den Quetschwalzen auf den Trocknungsverlauf.

Versuchsgut: Weidelgras
Walzenpaar: Gummiwalze, glatt / Stahlwalze, glatt
Walzendurchmesser: 185 mm
Umfangsgeschwindigkeit der Walzen: 10 m/s
Belastung: 7 kp/cm Walzenlänge
Zuführungsgeschwindigkeit: 0,85 m/s
Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$
Kurve a: 1% Zwangsschlupf; $N = 6,5$ PS
Kurve b: 5% Zwangsschlupf; $N = 10$ PS
Kurve c: 1,3% negativer Schlupf; $N = 5$ PS
(eine Walze nicht angetrieben)

Freilauf anzutreiben, der dann einzusetzen hat, wenn ein bestimmter Schlupf überschritten wird und Verstopfungsgefahr besteht. Einschränkend muß jedoch nachgetragen werden, daß auch hier die Wirksamkeit bei erhöhter Zuführgeschwindigkeit also größerer Schichtdicke, zurückgeht.

Walzenprofilierung

Der Einfluß der Walzenprofilierung ist für den Konstrukteur am interessantesten. In dem eingangs erwähnten Aufsatz [3] wurde bereits darauf hingewiesen, daß die heute (beispielsweise in den USA) gebräuchlichen Walzenprofile weniger auf eine Verbesserung der Aufbereitungswirkung als vielmehr auf eine Erhöhung der Einzugsfähigkeit hin entwickelt worden sind. Darum wird abschließend noch ein Diagramm mit Ergebnissen gezeigt, die mit verschiedenen handelsüblichen Walzen gewonnen wurden, **Bild 27**. Die Kurven gelten für eine geringe Zuführgeschwindigkeit, d. h. eine dünne Halmschicht. Die geringste Wirkung geht von den Knickwalzen aus, wobei allerdings für diese Kombination festgestellt werden kann, daß das Aufbereitungsergebnis mit wachsender Schichtdicke etwas besser wird. Mit der Kombination zweier weicher genuteter Gummiwalzen konnten geringfügig günstigere Werte erzielt werden.

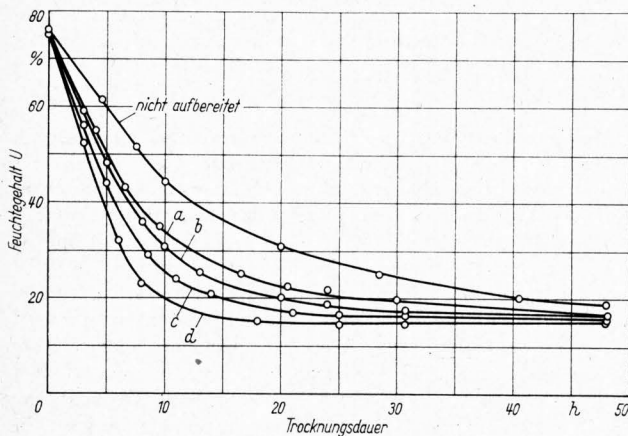


Bild 27. Einfluß der Walzenprofilierung auf den Trocknungsverlauf (Vergleich üblicher Walzenkombinationen).

- Versuchsgut: Wiesengras, gemischt
 Umfangsgeschwindigkeit der Walzen: 10 m/s
 Belastung: 6 kp/cm Walzenlänge
 Zuführgeschwindigkeit: 0,85 m/s
 Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$
 Walzenpaarung:
 a Knickwalzen (Bauart Crimper), 200 mm \varnothing
 b Gummiwalzen mit schmalen Nuten (68 shore), (Bauart Crusher) 200 mm \varnothing
 c Gummiwalze, glatt (78 shore) / Stahlwalze mit breiten Nuten, 185 mm \varnothing (Bauart Semicrusher)
 d Gummiwalze, glatt (78 shore) / Stahlwalze, glatt, 185 mm \varnothing (Bauart Crusher)

Besser in seiner Wirkung ist der Semi-Crusher, die Kombination einer glatten Gummiwalze mit einer Stahlwalze, die mit breiten Nuten und ebenso breiten Leisten versehen ist. Die günstigste Wirkung erzielt jedoch ein Crusher, also die Kombination einer glatten Stahlwalze mit einer glatten Gummiwalze. Eine solche Walzenkombination kann jedoch das Gut nicht vom Boden aufnehmen und ist auf eine zusätzliche Pick-up-Vorrichtung angewiesen.

Einfluß der Witterung

Für die landwirtschaftliche Praxis von großer Bedeutung ist natürlich der Einfluß der Witterung auf den Trocknungsverlauf von aufbereitetem Halmgut. Der Unterschied zwischen dem Trocknungsverlauf von nicht aufbereitetem und aufbereitetem Halmgut ist erwartungsgemäß bei günstiger Witterung wesentlich größer als bei ungünstiger, **Bild 28**. Bei dem guten Wetter (16. 7.) war der Vorsprung so groß, daß das gequetschte Gut schon am ersten Tage bis auf 20% herabgetrocknet und somit lagerungsfähig war.

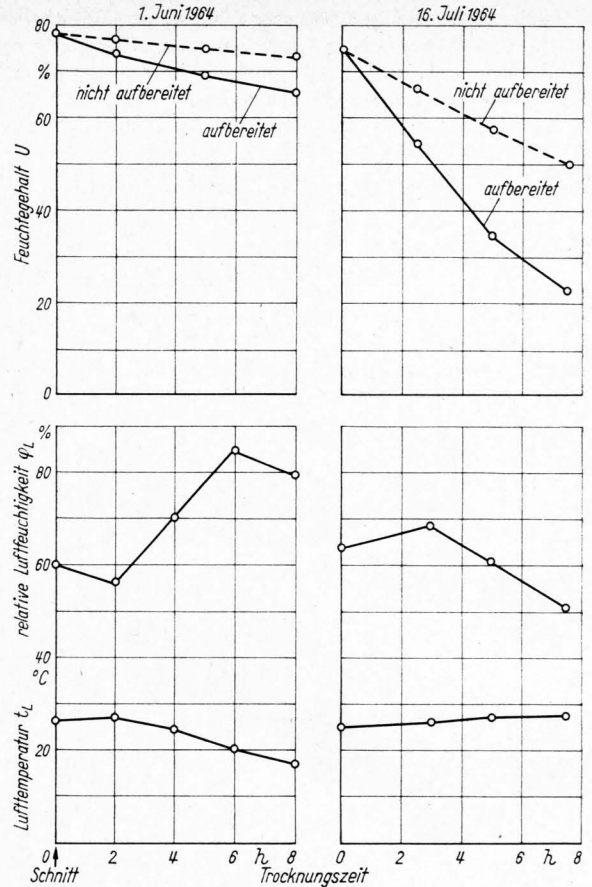


Bild 28. Einfluß der Witterungsbedingungen an zwei verschiedenen Tagen auf den Trocknungsverlauf im Freien von aufbereitetem und nicht aufbereitetem Halmgut.

Versuchsgut: Weidelgras

Wie verhält sich das Gut nun aber bei Niederschlag, also etwa bei Regen? Hier hat sich gezeigt, daß dies sehr vom dem Feuchtegrad des Halmgutes im Augenblick des Niederschlags abhängt. Die einzelnen Vorgänge lassen sich am besten an einem Diagramm zeigen, in dem der Feuchtegrad des Gutes über der Trocknungsdauer aufgetragen ist, **Bild 29**. Zunächst trocknete das aufbereitete Gut schneller als das nicht aufbereitete. Dann wurden beide Proben bei einem niedrigen Feuchtegrad mit 10 mm Niederschlag während eines Zeitraums von zwei Stunden wieder angefeuchtet. Anschließend wurden beide Proben unter den gleichen Umständen wieder getrocknet. Aus dem Verlauf der Kurven ist zu ersehen, daß sich dann bei beiden Proben eine sehr hohe, fast gleich große Anfangstrocknungsgeschwindigkeit ergibt, die noch über derjenigen des aufbereiteten Gutes im

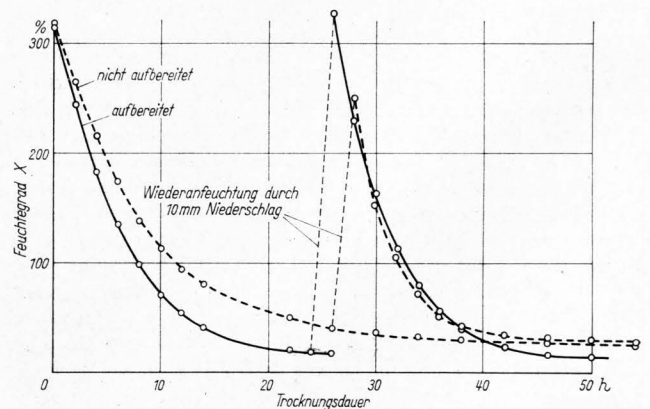


Bild 29. Trocknungsverlauf von Halmgut nach Wiederanfeuchtung.

Versuchsgut: Weidelgras, 2. Schnitt
 Trocknung im Klimaraum: $t_L = 30^\circ\text{C}$ und $\varphi_L = 40\%$

ersten Trocknungsabschnitt liegt. Es handelt sich hierbei um die oberflächliche, nicht oder nicht tief eingedrungene Feuchtigkeit. Der erste Trocknungsabschnitt mit der konstanten Trocknungsgeschwindigkeit liegt bei dem aufbereiteten Gut in einem höheren Feuchtegradbereich. Ebenso beginnt sie sich schon bei einem höheren Feuchtegrad zu verlangsamen. Daraus geht hervor, daß es mehr Wasser in sich aufgenommen hat. Das nicht aufbereitete Gut trocknet also bis zu dem vor der Anfeuchtung erreichten Feuchtegehalt schneller ab als das aufbereitete Gut.

In der Praxis sind die Zusammenhänge jedoch etwas komplizierter. Bei den meisten Feldversuchen wird das aufzubereitende und das nicht aufzubereitende Vergleichsgut gleichzeitig gemäht. Bei einem etwaigen Regen hat das aufbereitete Gut dann schon einen geringeren Feuchtegrad erreicht als das nicht aufbereitete. Das nicht aufbereitete Gut gibt danach die eingeregnete Feuchtigkeit nur bis etwa zum vorherigen Feuchtegrad schneller wieder ab, um anschließend dann mit der ursprünglich langsameren Geschwindigkeit weiterzutrocknen. Das aufbereitete Gut trocknet hingegen bis zu dem vor dem Regen erreichte geringeren Feuchtegrad schneller wieder ab. Dies hat zu der etwas verallgemeinernden Aussage geführt, daß aufbereitetes Gut eingeregnete Feuchtigkeit schneller wieder abgibt. Noch anders ist es, wenn die Schlechtwetterlage über einen längeren Zeitraum andauert. Hier zeigt sich, daß die über Nacht andauernde Bodenfeuchtigkeit auch in das nicht aufbereitete Gut stärker eindringt und anschließend ebenfalls entsprechend langsamer trocknet, wie **Bild 30** erkennen läßt.

Leistungsbedarf

Bei der Betrachtung des Leistungsbedarfs der Quetschwalzen muß vorausgeschickt werden, daß die Versuche auf dem Stand keine sehr wirklichkeitsnahen Werte ergeben können, da Verstopfungen naturgemäß nur selten auftreten. In der Praxis muß außer der zusätzlich erforderlichen Fahrleistung noch eine große Leistungsreserve für kurzzeitige Überlastungen vorhanden sein, da gerade bei drohenden Verstopfungen die Walzendrehzahl nicht abfallen darf. Der Leistungsbedarf bei den Standversuchen war in erster Linie vom Durchsatz abhängig. Bei einer Versuchsreihe ergab sich z. B. bei einer Vervielfachung des Durchsatzes von 3,5 auf 14 kg/s eine Verdreifachung des Leistungsbedarfs von 8 PS auf 24 PS. Eine Steigerung der Linienlast bewirkt besonders bei großen Schichtdicken ab etwa 8 kp/cm Walzenlänge einen progressiven Anstieg des Leistungsbedarfs. Der Einfluß der Profilierung der Walzen auf den Leistungsbedarf ist offenbar gering. Lediglich die Knickwalzen haben gegenüber den Quetschwalzen einen um etwa 30% kleineren Leistungsbedarf, der von der Schichtdicke unabhängig ist.

Zusammenfassung

Es werden zunächst einige theoretische Probleme der Halmgut-trocknung besprochen. Anschließend werden die Ergebnisse zahlreicher Versuchsreihen mit Modell- und Originalwalzen erläutert, die sich folgendermaßen zusammenfassen lassen.

Die Trocknung von Halmgut kann durch Schaffung künstlicher Verdunstungsöffnungen und die Änderung der Struktur beschleunigt werden. Die Öffnungen, oder einfacher gesagt, Beschädigungen der Pflanzenoberfläche und -struktur können durch verschiedene Verfahren erzeugt werden, von denen hier das Quetschen behandelt wird. Dazu müssen im einzelnen folgende Voraussetzungen erfüllt sein. Beschädigungen durch

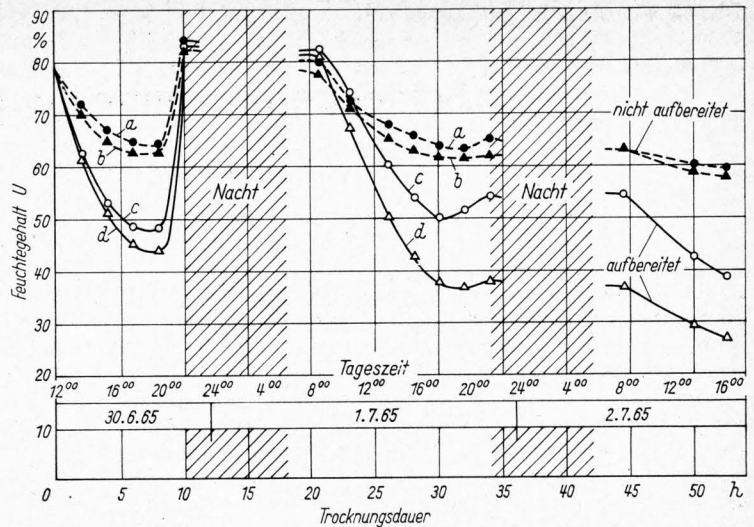


Bild 30. Einfluß der Bodenfeuchte auf den Trocknungsverlauf im Freien.

Kurve a: nicht aufbereitetes Gut auf dem Boden
 Kurve b: nicht aufbereitetes Gut 0,5 m über dem Boden
 Kurve c: aufbereitetes Gut auf dem Boden
 Kurve d: aufbereitetes Gut 0,5 m über dem Boden

Druck können grundsätzlich von allen Walzentypen erzeugt werden, sofern der spezifische Flächendruck zwischen Walzen und Halmgut größer ist als die Druckfestigkeit des Gutes. Der spezifische Flächendruck ist neben der Linienlast hauptsächlich von der Kombination des Walzenwerkstoffes abhängig. Der Druck kann jedoch nicht in beliebig dicken Gutschichten in der Weise zur Wirkung kommen, daß auch die Mittelschichten verdunstungsfördernd beschädigt werden. Schnittverletzungen der Pflanzenoberflächen können nur durch harte Walzen und dann auch nur in der die Walzen berührenden Gutschicht erzeugt werden. Daraus erklärt sich der überragende Einfluß einer geringen Schichtdicke bei der Aufbereitung von Halmgut durch Quetschwalzen zur Erzielung einer höheren Trocknungsgeschwindigkeit.

Schrifttum

- [1] Wieneke, F.: Probleme der Halmfütterernte und -konservierung. *Grundl. Landtechn.* **16** (1966) Nr. 1, S. 9/17.
- [2] Wieneke, F., und H.-G. Claus: Der Einfluß der Heuwerbmäschinaschinen auf Trocknung und Verluste. *Landtechn.* **19** (1964) H. 11, S. 418/21, 424, 426/28.
- [3] Wieneke, F., und W. Dervedde: Entwicklung und Forschung auf dem Gebiet des Quetschens und Knickens von Halmgut. *Grundl. Landtechn.* **15** (1965) Nr. 3, S. 65/70.
- [4] Segler, G., H. Lanz und A. Scheuermann: Verkürzung der Trocknungszeit und Verbesserung der Arbeitstechnik bei der Heugewinnung durch Halmgutbehandlung mit Druck- und Schlagwerkzeugen. *Landtechn. Forsch.* **15** (1965) H. 6, S. 184/91.
- [5] Strasburger, E., u. a.: *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen.* 28. Aufl. Stuttgart: Gust. Fischer Verlag 1962. U. a. S. 77 und 138.
- [6] Reichenbach, H.: *Neue Untersuchungen zur Transpiration abgeschnittener Pflanzensprosse.* Berlin: Akadem. Verlag 1958.
- [7] HÜTTE, des Ingenieurs Taschenbuch. 28. Aufl. Berlin: Wilh. Ernst u. Sohn 1955. S. 918.
- [8] Luttrell, H.: *Hay conditioning contributes to quality hay in Tennessee.* University of Tennessee, Agric. Exper. Station, Bull. 327. 1961.