

# Das Trocknungsverhalten einiger Futtergräser

Von Ilyas Kurtulus Tuncer, Franz Wieneke und Dietrich Lehmann, Göttingen

Eine sichere Handhabung der Trocknung von Halmfutter mit erwärmter Luft setzt die Kenntnisse pflanzenspezifischer Trocknungsparameter des zu verarbeitenden Gutes voraus. Im folgenden Beitrag sind die wichtigsten Kennwerte einiger häufig auftretender Futtergräser für den Temperaturbereich von 15 bis 100 °C zusammengestellt. Außer der zeitlichen Feuchtigkeitsabnahme während des Trocknungsvorganges und der daraus abgeleiteten Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Feuchte der einwirkenden Luft und der Aufbereitungsart des Grases werden die Desorptions- und Adsorptionsisothermen und die daraus erchenbare Bindungsenthalpie des Wassers an das Halmgut dargestellt. Dabei wird auf die Bedeutung pflanzenphysiologischer Vorgänge wie Öffnungs- und Schließbewegungen der Stomata oder temperaturabhängige Strukturänderungen in Form von Koagulation u.ä. besonders eingegangen.

Über das Trocknungsverhalten von Halmfutter sind mehrere Arbeiten erschienen, die sich mit der Bestimmung der Sorptionsisothermen und der Trocknungsgeschwindigkeiten einzelner Futterpflanzen wie Luzerne [1 bis 5], Klee [5] oder verschiedener Grasarten [5; 6] bei bestimmten Trocknungstemperaturen befassen. Die gewonnenen Daten reichen jedoch nicht aus, um die Trocknung von Halmgut – speziell mit erwärmter Luft in größeren Temperaturbereichen – theoretisch sicher zu beherrschen. Deshalb wurden am Landmaschineninstitut der Universität Göttingen Versuche<sup>1)</sup> unternommen, die zur Klärung des Trocknungsverhaltens einiger häufig auftretender Futtergräser im Temperaturbereich von 15 bis 100 °C beitragen sollten.

Die Messungen wurden an dünn-schichtigen 50-g- und 100-g-Proben ausgeführt, die so locker gebunden waren, daß die Oberfläche jedes Pflanzenteils mit der Trocknungsluft in Berührung kam. Eine Blindprobe des gleichen Ausgangsmaterials diente zur Trockensubstanzbestimmung im Trockenschrank.

Als Versuchsaapparaturen standen zwei Klimaschränke zur Verfügung, in denen die Trocknungsluft für Temperaturen bis 100 °C mit einer zeitlichen und räumlichen Genauigkeit von  $\pm 0,3$  bzw.  $\pm 0,5$  grad und für 10 bis 95 % relative Feuchte mit einer Genauigkeit von  $\pm 1,5$  % geregelt werden konnte.

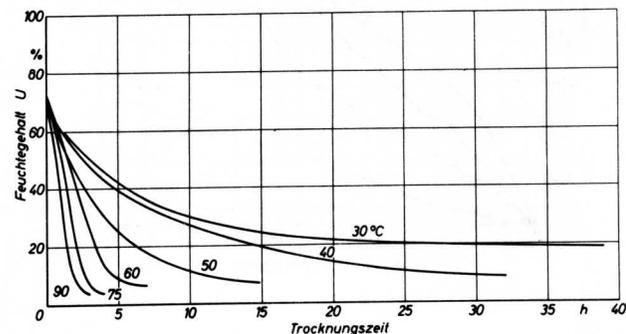
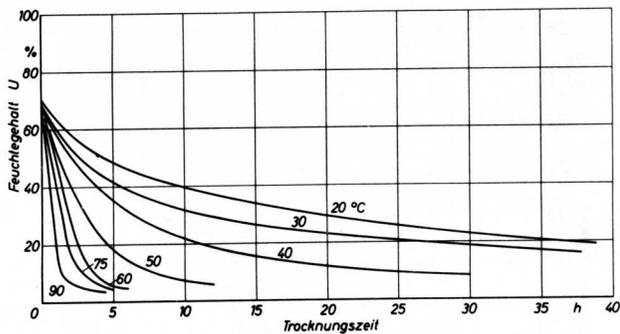
Während der Versuche wurden die Temperatur und die relative Feuchte der Trocknungsluft im Klimaschrank und das Gewicht der Halmgutprobe kontinuierlich registriert, wobei ein Doppelbandschreiber, der nach dem psychrometrischen Prinzip arbeitete, das Klima aufzeichnete und eine elektronische Präzisionswaage die Probenmasse auf 0,01 g genau feststellte und über ein Schreibgerät aufzeichnete. Die aus den Trocknungsversuchen gewonnenen Kurven für die zeitliche Feuchteabnahme der Grasproben zeigen einen mit fortschreitender Trocknung geringer werdenden Wasserverlust und eine asymptotische Annäherung an den Feuchte-Gleichgewichtswert. Die **Bilder 1 und 2** lassen die charakteristischen Kurvenverläufe für die Trocknung von Lieschgras erkennen, aus denen ersichtlich wird, daß Temperaturerhöhungen und Feuchteverminderungen der Umgebungsluft die Wasserabgabe beträchtlich beschleunigen. Bei hohen relativen Luftfeuchten verliert das Gut nicht durch Trocknung, sondern durch mikrobielle Umsetzungen an Masse. Das Gras wird durch das lange Verharren in feuchter Umgebung bei nur geringen Trocknungsraten ausgelaut und verliert seine Farbe, oder es setzt Schimmelbildung ein.

Um die Temperaturabhängigkeit der Feuchteabnahme zu verdeutlichen, wurden die Kurven für die Trocknung von Deutschem Weidelgras bei Temperaturen zwischen 15 und 90 °C und jeweils konstanter relativer Luftfeuchte in den **Bildern 3 bis 5** dreidimensional aufgetragen. Diese Darstellungen zeigen deutlich die Verkürzung der Trocknungszeit bei steigender Temperatur, wobei besonders das sprunghafte Ansteigen der zeitlichen Feuchte-

*Prof. Dr.-Ing. Franz Wieneke ist Ordinarius und Direktor des Landmaschineninstituts der Universität Göttingen. Dr. sc. agr. Ilyas Kurtulus Tuncer war wissenschaftlicher Mitarbeiter am genannten Institut und ist jetzt an der Atatürk-Universität Erzurum (Türkei) tätig, Dipl.-Ing. Dietrich Lehmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am gleichen Institut.*

<sup>1)</sup> Diese Arbeiten wurden durch die Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft ermöglicht.

**Bild 1.** Zeitlicher Trocknungsverlauf bei verschiedenen Lufttemperaturen für Lieschgras bei konstanter relativer Luftfeuchte  $\varphi = 20\%$  (II. Schnitt).



**Bild 2.** Zeitlicher Trocknungsverlauf bei verschiedenen Lufttemperaturen für Lieschgras bei konstanter relativer Luftfeuchte  $\varphi = 40\%$  (II. Schnitt).

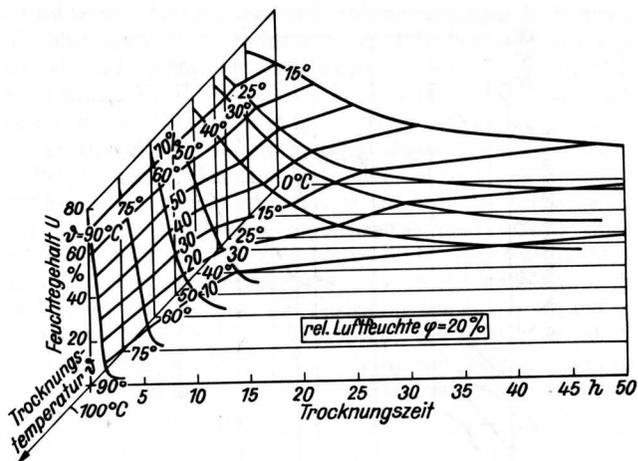
abnahme im Bereich von etwa  $50^\circ\text{C}$  auffällt. Die Ursache für die starke Zunahme der Trocknungsgeschwindigkeit in diesem Bereich muß vermutlich in Strukturänderungen im Gras, wie Koagulation des Eiweißes oder Schmelzen der Wachsschicht der Kutikula, gesucht werden.

Sowohl bei höheren wie niedrigeren Werten ist der Einfluß der Temperatur auf die Feuchteabnahme geringer. Bei Temperaturen unterhalb von  $40^\circ\text{C}$  wirkt eine Zunahme der relativen Feuchte stark verlangsamernd auf die Wasserabgabe, so daß bei sehr feuchter Luft mit etwa  $90\%$  Schimmelbildung im Gras auftritt, ehe der Trocknungsprozeß abgeschlossen ist. Dagegen bewirkt ein Trocknungsklima mit über  $80\%$  relativer Feuchte bei Temperaturen über  $50^\circ\text{C}$  das oben erwähnte Auslaugen und Verfärben des Probegutes im Verlauf der Feuchteabgabe. Diese Art der Denaturierung läßt ebenfalls auf eine Eiweißkoagulation bei Temperaturen von über  $50^\circ\text{C}$  schließen. Dies bedeutet, daß sich hohe Luftfeuchten in allen Fällen, auch bei hohen Temperaturen, für die Trocknung unvorteilhaft auswirken.

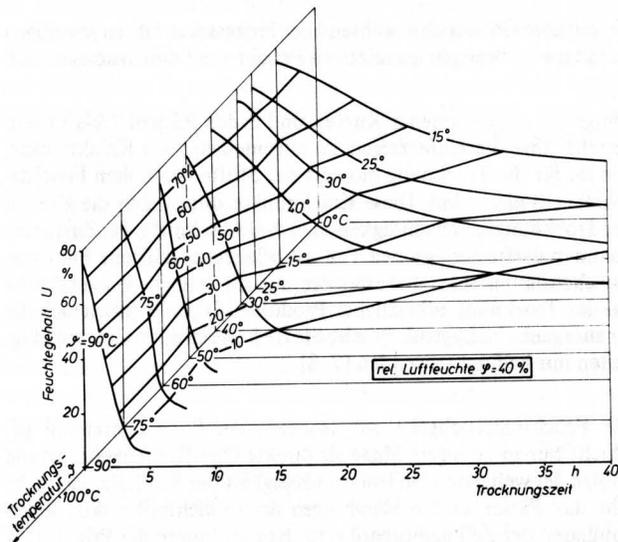
Die starke Zunahme der Wasserabgabe im Temperaturbereich von etwa  $50^\circ\text{C}$  hat eine beachtliche Verkürzung der zur Trocknung auf Lagerfähigkeit ( $20\%$  Gutsfeuchte) nötigen Zeit zur Folge, wie aus Bild 6 hervorgeht.

Eine vertiefte Aussage über das Trocknungsverhalten liefert die Darstellung der Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt des Halmgutes. Dabei wird, wie bei biologischen Stoffen üblich, die Trocknungsgeschwindigkeit nicht auf die Gutsoberfläche, die nicht exakt zu messen ist und sich im Verlauf der Trocknung durch Schrumpfung stark verändert [4], sondern auf die während der Trocknung gleichbleibende Trockenmasse bezogen. Um die bei pflanzlichen Gütern unvermeidbare Schwankung im Anfangsfeuchtegehalt zu eliminieren, trägt man

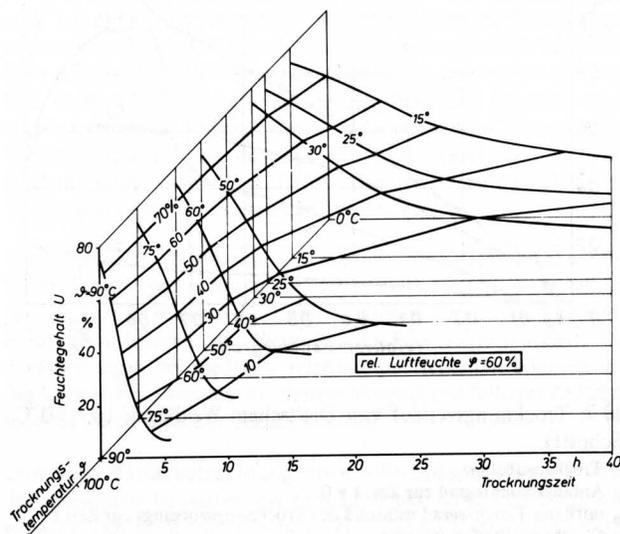
**Bild 3.** Trocknungsverhalten von Deutschem Weidelgras bei verschiedenen Lufttemperaturen und konstanter relativer Luftfeuchte  $\varphi = 20\%$  (II. Schnitt).



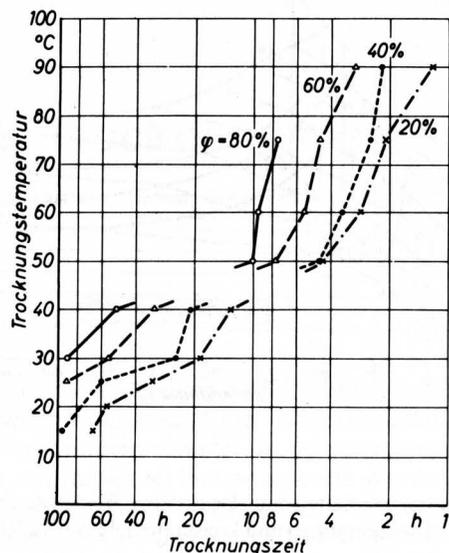
**Bild 4.** Trocknungsverhalten von Deutschem Weidelgras bei verschiedenen Lufttemperaturen und konstanter relativer Luftfeuchte  $\varphi = 40\%$  (II. Schnitt).



**Bild 5.** Trocknungsverhalten von Deutschem Weidelgras bei verschiedenen Lufttemperaturen und konstanter relativer Luftfeuchte  $\varphi = 60\%$  (II. Schnitt).



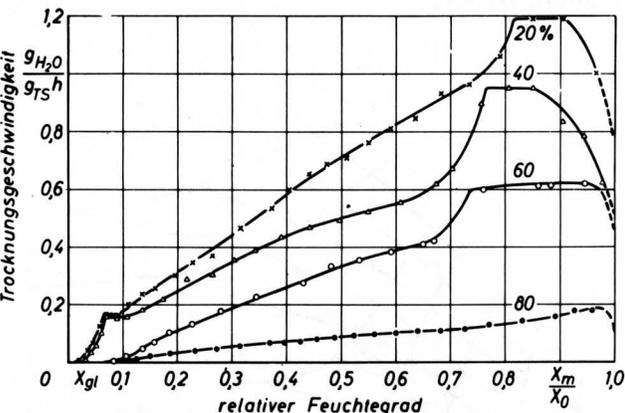
**Bild 6.** Zur Trocknung auf Lagerfähigkeit ( $U = 20\%$ ) erforderliche Trocknungszeit bei verschiedenen Temperaturen und Feuchten der Luft für Deutsches Weidelgras (II. Schnitt).



die mittlere Gutsfeuchte während des Prozesses auf ihren jeweiligen Anfangswert bezogen als relativen Feuchtegrad dimensionslos auf.

Einige der so gewonnenen Kurven sind in den Bildern 7 bis 11 dargestellt. Ihre Verläufe zeigen im allgemeinen zwei Knickpunkte, wie sie für die Trocknung biologischer Stoffe von hohen Feuchtegehalten typisch sind. Diese Knickpunkte unterteilen die Kurven der Trocknungsgeschwindigkeiten in drei Abschnitte. Ihr Zustandekommen dürfte zum großen Teil auf pflanzenspezifische Faktoren zurückzuführen sein, insbesondere auf die Art der Wasserabgabe bei der Trocknung pflanzlicher Produkte. Deshalb lassen sich die für anorganische hygroskopische Stoffe hergeleiteten Gesetzmäßigkeiten nur bedingt anwenden [7; 8].

Die Feuchtigkeitsabgabe am trocknenden Pflanzenmaterial geschieht nur in geringem Maße als direkte Oberflächenverdunstung infolge der weitgehenden Undurchlässigkeit der Kutikula; vielmehr geht das Wasser an den Mündungen der sublichtmikroskopischen Kapillaren der Zellmembranoberflächen im Innern der Pflanzen in

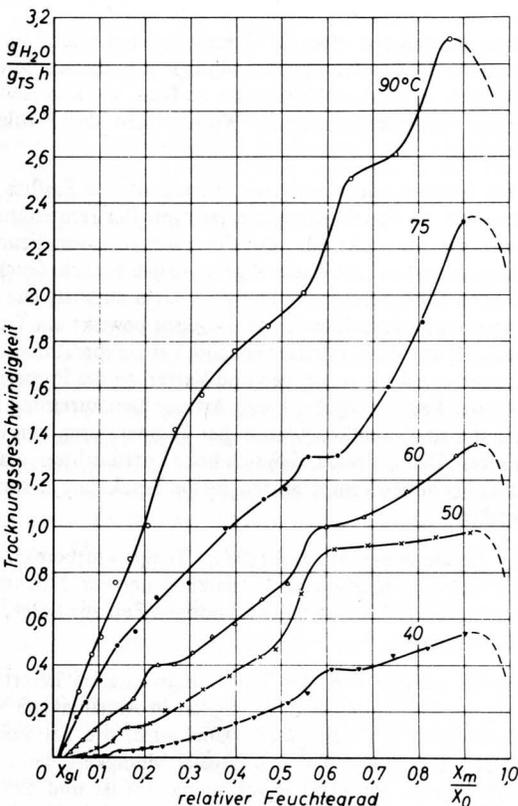
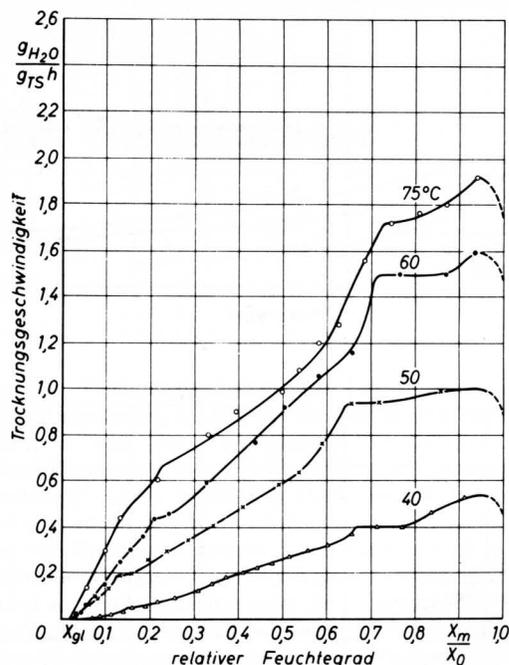


**Bild 7.** Trocknungsverlauf von Deutschem Weidelgras ( $\vartheta = 60^\circ\text{C}$ , I. Schnitt).

TS Trockensubstanz  
 $X_0$  Anfangsfeuchtegrad zur Zeit  $t = 0$   
 $X_m$  mittlerer Feuchtegrad während des Trocknungsvorgangs zur Zeit  $t$   
 $X_{gl}$  Gleichgewichtsfeuchtegrad

**Bild 8.** Trocknungsverlauf von Deutschem Weidelgras ( $\varphi = 20\%$ , II. Schnitt).

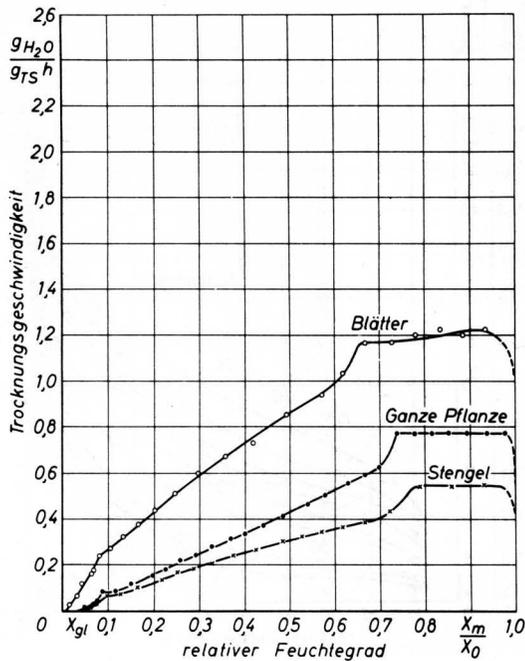
Legende s. Bild 7



**Bild 9.** Trocknungsverlauf von Lieschgras ( $\varphi = 20\%$ , II. Schnitt).

Legende s. Bild 7

**Bild 10.** Trocknungsverlauf einzelner Pflanzenteile von Deutschem Weidelgras ( $\vartheta = 50^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 20\%$ , II. Schnitt).  
Legende s. Bild 7

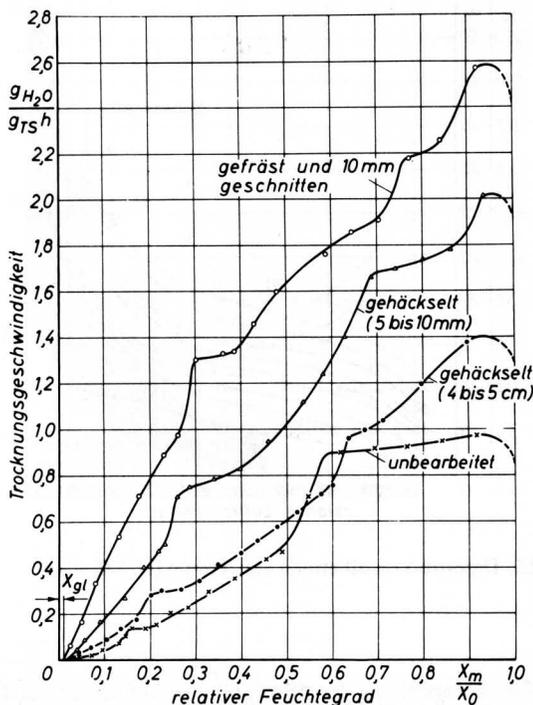


Dampfform über und wird über die Stomata an die Umgebungsluft abgegeben. Lediglich an den Verletzungsstellen findet eine direkte Verdunstung statt.

Damit kommt den Öffnungs- und Schließbewegungen der Stomata in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt der Pflanze große Bedeutung zu, wie auch an anderer Stelle ausgeführt wird [8 bis 10]. Man kann annehmen, daß die Gräser in der ersten Trocknungsphase eine bestimmte Wassermenge in Form von Transpirationsfeuchte bei geöffneten Stomata relativ leicht abgeben, was eine gleichbleibende, hohe Trocknungsgeschwindigkeit im ersten Abschnitt zur Folge hat. Erreicht der sinkende Turgor in den Schließzellen der Stomata infolge des zunehmenden Wasserdefizits einen pflanzenspezifischen Grenzwert (etwa 60 bis 70 % Gutsfeuchte), so schließen sich die Öffnungen, und die Trocknungsgeschwindigkeit nimmt ab. Je höher die Trocknungstemperatur ist, um so größer ist die anfängliche Wasserabgabe, um so eher ist jedoch auch das Schließen der Stomata zu erwarten. Dieser Sachverhalt könnte die Lage des ersten Knickpunktes mitbestimmen, wie aus den Bildern 7 bis 9 hervorgeht.

Der zweite Knickpunkt tritt nur bei der Trocknung mit niedrigen Luftfeuchten auf, da er bei höheren Werten schon im Bereich der Gleichgewichtsfeuchte liegt. Kurz davor, am Ende des zweiten Trocknungsabschnittes scheint für kurze Zeit eine nahezu konstante Trocknungsgeschwindigkeit zu herrschen. Die Ursache dieser Erscheinung und des nachfolgenden Übergangs in den dritten Abschnitt mag sowohl auf pflanzenphysiologische Veränderungen wie Ausdörren der Atmungsorgane, Schrumpfung der Oberfläche mit Rißbildung als auch auf das Erreichen der maximalen hyroskopischen Feuchtigkeit an allen Stellen des Materials, wie in der theoretischen Erläuterung der Knickpunkte [7; 8] beschrieben wird, zurückzuführen sein.

Der Unterschied der Trocknungsgeschwindigkeiten für die einzelnen Pflanzenteile Blätter und Stengel in Bild 10 läßt einerseits auf einen voneinander abweichenden Anfangsfeuchtegehalt dieser Teile schließen, andererseits macht er wiederum den Einfluß der Stomata deutlich, die in weit größerer Zahl auf der Blatt- als auf der Stengeloberfläche vertreten sind. Die Wirkung unterschiedlicher Zerkleinerung des Gutes auf die Trocknungsgeschwindigkeit wird in Bild 11 sichtbar. Je stärker der Aufbereitungsgrad ist, um so mehr ändert sich die Struktur des zu trocknenden Materials; die für den Stoffübergang wirksame Oberfläche wird vergrößert, das leicht zu entfernende Wasser nimmt durch Zerstörung des Gefüges zu, es stellt sich eine höhere Trocknungsgeschwindigkeit ein. Erst wenn diese Feuchtigkeit verdunstet ist, bestimmen vermutlich ähnliche Faktoren wie bei un bearbeitetem Gut den weiteren Kurvenverlauf mit seinen Knickpunkten. Zur völligen Klärung dieser Vorgänge bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen, speziell über die Veränderung der Gutsstruktur beim Trocknungsvorgang.



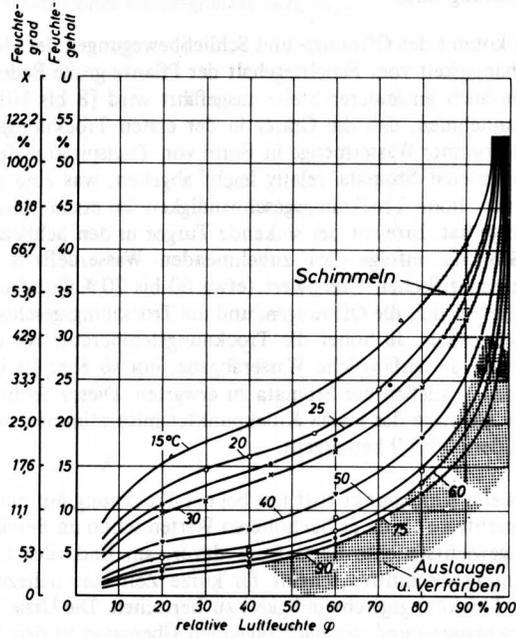
**Bild 11.** Trocknungsverlauf von Deutschem Weidelgras bei unterschiedlichem Zerkleinerungsgrad ( $\vartheta = 50^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 20\%$ , II. Schnitt).  
Legende s. Bild 7

Für die vier Grasarten Deutsches Weidelgras, Lieschgras, Knaulgras und Trefle wurden die Desorptionsisothermen im Temperaturbereich von 15 bis  $100^\circ\text{C}$  aufgenommen, indem Proben der jeweiligen Grasart bis auf Gleichgewichtsfeuchte getrocknet wurden, Bild 12 bis 15. Sie zeigen alle den für pflanzliche Produkte typischen S-förmigen Verlauf, der auf die unterschiedliche Art der Flüssigkeitsbindung an das Gut in Abhängigkeit von der Gutsfeuchte zurückzuführen ist. Höhere Temperaturen bewirken eine Verminderung der Gleichgewichtsfeuchte des Halmgutes.

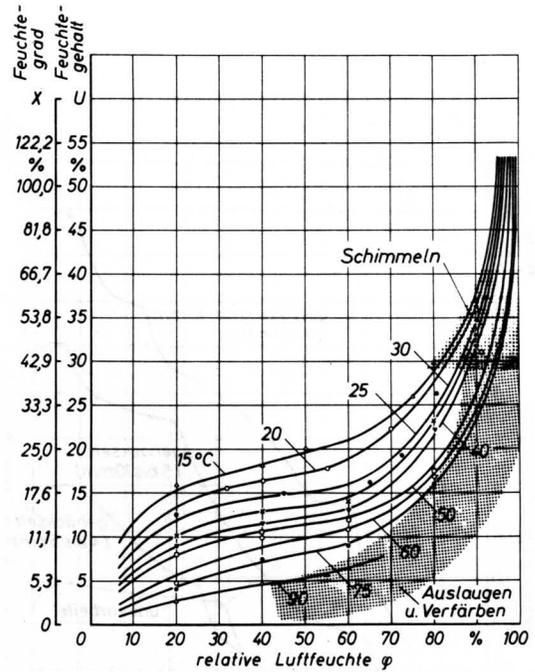
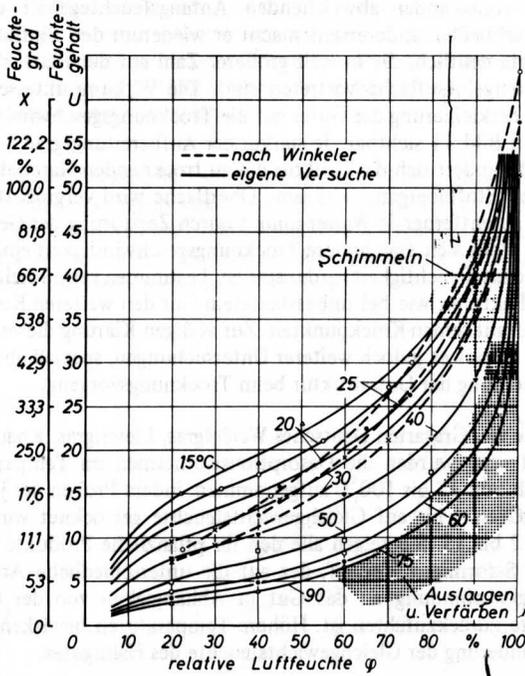
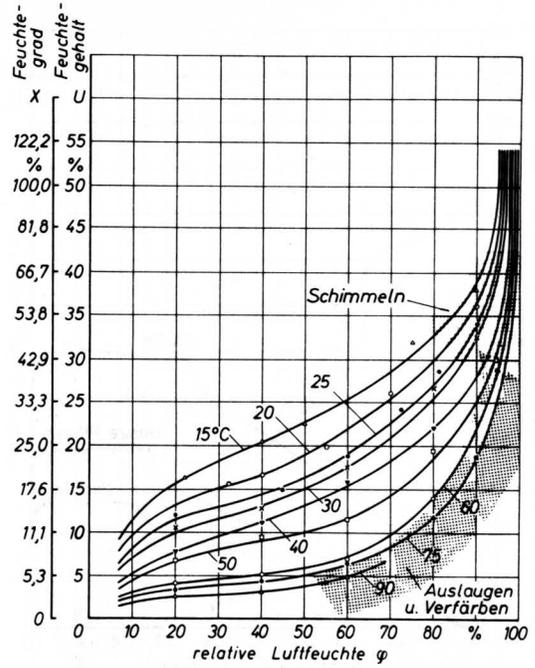
Die gefundenen Werte sind mit den aus der Literatur bekannten Darstellungen gut vergleichbar, wie aus einer Gegenüberstellung mit den von B. Winkler [6] unter ähnlichen Versuchsbedingungen ermittelten Kurven für Wiesengras in Bild 13 hervorgeht. Die Abweichungen bei niedrigen relativen Luftfeuchten könnten mit der Verwendung von blattreicherem Material mit höherer Anfangsfeuchte durch Winkler erklärt werden.

Durch die Wiederbefeuchtung zuvor vollständig trockener Proben der genannten Grasarten bis zum Erreichen eines Feuchtegleichgewichtes im Temperaturbereich von 15 bis  $40^\circ\text{C}$  erhält man Werte

**Bild 12. Desorptionsisothermen von Deutschem Weidelgras (II. Schnitt).**



**Bild 14. Desorptionsisothermen von Knautgras (II. Schnitt).**



**Bild 13. Desorptionsisothermen von Lieschgrass (II. Schnitt).**

**Bild 15. Desorptionsisothermen von Trespe (II. Schnitt).**

für die Adsorptionsisothermen in den Bildern 16 bis 19. Für relative Luftfeuchten von 20 bis 60% hat eine Temperaturerhöhung nur geringen Einfluß auf die adsorbierte Flüssigkeit, erst im Bereich höherer Werte divergieren die Isothermen stärker. Auch hier stimmen die Meßergebnisse mit vergleichbaren Darstellungen anderer Verfasser gut überein.

Eine Gegenüberstellung der Adsorptionsisothermen der Bilder 16 bis 19 und der Desorptionsisothermen der Bilder 12 bis 15, für Lieschgrass im Bild 20 zusammengefaßt, macht auf die starke Hysterese zwischen den Kurven aufmerksam, die über den ganzen Bereich relativer Luftfeuchten wirksam bleibt und erst für annähernd gesättigte Luft abnimmt. Sie begründet sich auf irrever-

Bild 16. Adsorptionsisothermen von Deutschem Weidelgras.

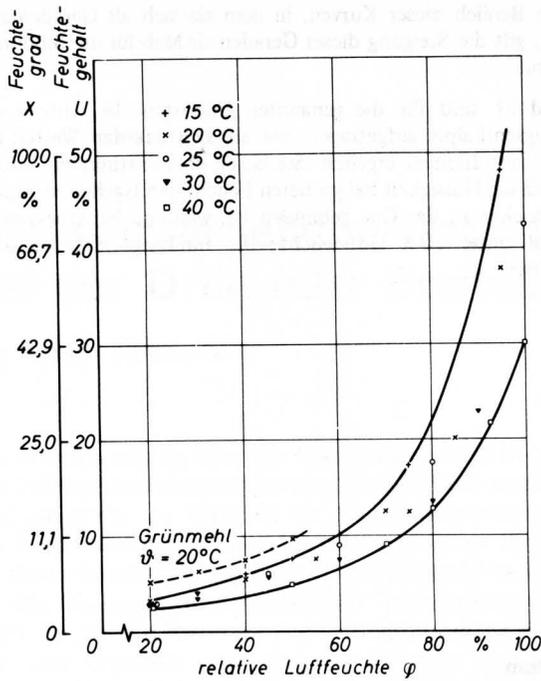


Bild 18. Adsorptionsisothermen von Knautgras.

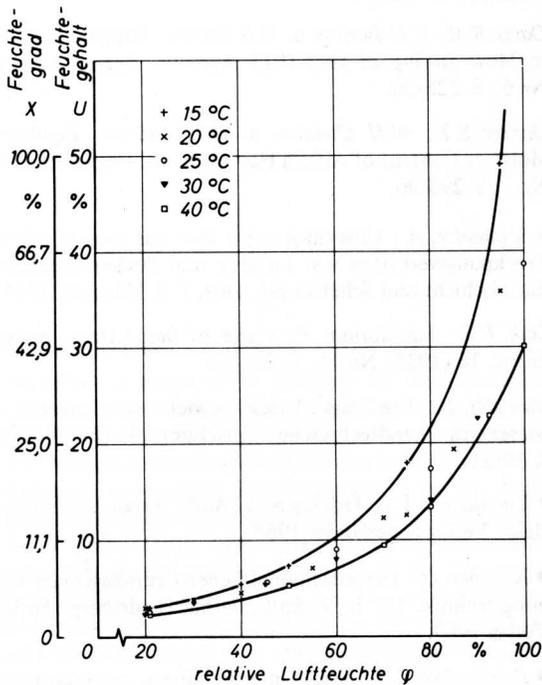
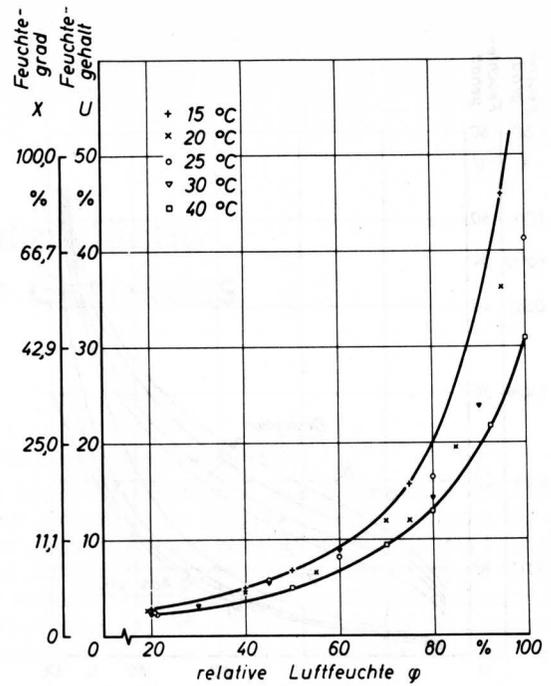


Bild 17. Adsorptionsisothermen von Lieschgrass.

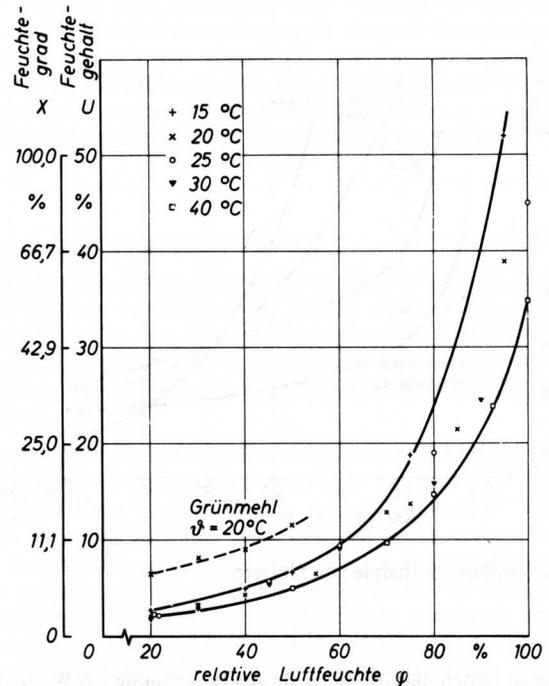
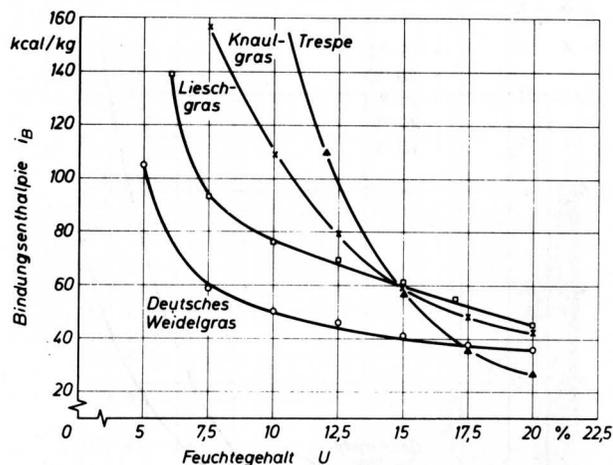
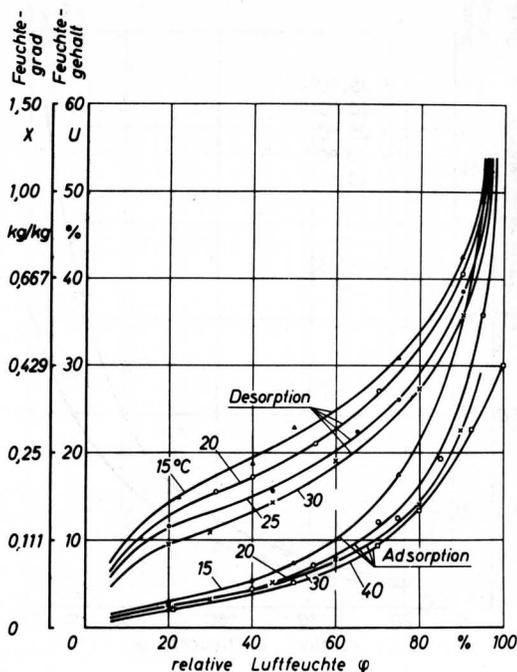


Bild 19. Adsorptionsisothermen von Trespe.

sible Vorgänge bei der Trocknung biologischer Produkte, die beim Wiederbefeuchten eine entsprechend große Wasseraufnahme durch das getrocknete Gut verhindern. Die mit Grünmehl bei 20°C ausgeführten Adsorptionsversuche zeigen, daß trotz wesentlich vergrößerter Stoffaustauschfläche der Hystereseffekt erhalten bleibt, Bild 16 und 19. Bakker-Arkema [1], der Luzerne sowohl

trocknete als auch von 10% Feuchtegehalt aus wiederbefeuchtete, stellte fest, daß sich die Hysterese mit zunehmender relativer Luftfeuchte vergrößerte. Die von J.E. Hubart [11], J.D. Babbitt [12] und M.B. Breeze [13] für Weizen und Reis gefundenen Abweichungen der De- und Adsorptionsisothermen voneinander stimmen prinzipiell mit den geschilderten Ergebnissen überein. Die Desorptions-

**Bild 20.** Hysterese zwischen Desorptions- und Adsorptionsisothermen von Lieschgras.



**Bild 21.** Bindungsenthalpie von Gräsern.

isothermen bilden die Grundlage für die Berechnung der Werte der Bindungsenthalpie  $i_B$ , die über dem jeweiligen Feuchtegehalt des Gutes aufgetragen ein Maß für die zur Trocknung des Stoffes zusätzlich zur Verdampfungswärme aufzuwendende Energie darstellt. Sie wird nach der Formel

$$i_B = -R_D A \left[ \frac{d(\ln \varphi)}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \right] \text{ für } X = \text{konst}$$

berechnet, wobei  $R_D$  die Gaskonstante des Dampfes,  $A$  das mechanische Wärmeäquivalent,  $\varphi$  die relative Luftfeuchte,  $T$  die absolute Trocknungstemperatur bedeuten. Für einen bestimmten Feuchtegrad  $X$  lassen sich also die entsprechenden Werte für die Temperatur  $T$  und die relative Luftfeuchte  $\varphi$  aus den Desorptionsisothermen

entnehmen und als Kurve  $\ln \varphi = f\left(\frac{1}{T}\right)$  abbilden. Für denjenigen Bereich dieser Kurven, in dem sie sich als Geraden ausweisen, gilt die Steigung dieser Geraden als Maß für die Bindungsenthalpie.

In Bild 21 sind für die genannten Grasarten die Kurven der Bindungsenthalpie aufgetragen, wie sie sich aus den Werten der Sorptionsisothermen ergeben. Sie lassen übereinstimmend erkennen, daß die Flüssigkeit bei größeren Feuchtigkeitsgehalten zunehmend locker an das Gut gebunden ist, während bei trocknerem Material unter 20% Gutsfeuchte die Bindungskräfte deutlich anwachsen.

### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Bakker-Arkema, F.W., C.W. Hall u. E.J. Benne: Equilibrium Moisture Content of Alfalfa. Michigan Quarterly Bull. 44 (1961) 3, S. 492/96.
- [2] Davis, R.B., G.E. Barlow u. D.B. Brown: Supplemental Heat in Mow Drying of Hay (III). Agricult. Engng. 31 (1950) Nr. 5, S. 223/26.
- [3] Dexter, S.T., W.H. Sheldon u. D.I. Waldron: Equilibrium Moisture Content of Alfalfa Hay. Agricult. Engng. 28 (1947) Nr. 7, S. 295/96.
- [4] ● Schneider, A.: Untersuchungen über das charakteristische Trocknungsverhalten von Luzerne und Zuckerrübenblatt in Einzelschicht und Schüttungen. Diss. T.H. München 1954.
- [5] Zink, F.J.: Equilibrium Moistures of Some Hays. Agricult. Engng. 16 (1935) Nr. 11, S. 451/52.
- [6] Winkeler, B.: Feuchtigkeitsgleichgewicht von Luzerne und Wiesengras. Landtechnische Forschung 4 (1954) Nr. 2, S. 59/61.
- [7] ● Kneule, F.: Das Trocknen. 2. Aufl. Aarau u. Frankfurt/Main: Verlag Sauerländer 1968.
- [8] ● Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Bd. I, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1963.
- [9] ● Reichenbach, H.: Neue Untersuchungen zur Transpiration abgeschnittener Pflanzensprosse. Berlin: Akademie-Verlag 1958.
- [10] Whitney, L.F., H.M. Agrawal u. R.B. Livingston: The Effects of Stomata Opening on High Temperature, Short Time Drying of Alfalfa Leaves and Orchard Grass. ASAE-Paper No. 66-665.
- [11] Hubart, J.E., F.R. Earle u. F.R. Senti: Moisture Relations in Wheat and Corn. Cereal Chemistry 34 (1957) S. 422/23.
- [12] Babbit, J.D.: Hysteresis in the Adsorption of Water Vapor by Wheat. Nature 156 (1945) S. 265/66.
- [13] Breeze, M.B.: Hysteresis in the Hygroscopic Equilibria of Rough Rice at 25°C. Cereal Chemistry 32 (1955) S. 481/87.