

4. Zusammenfassung

Das rolldynamische Verhalten von AS-Reifen bestimmt wesentlich die Fahrsicherheit, den Fahrkomfort und die Beanspruchung von Felge, Achse und Fahrzeugaufbau im Bereich hoher Geschwindigkeit.

Insbesondere die Reifenerregungen der grobstolligen und großvolumigen AS-Reifen aufgrund von fertigungstechnischen Toleranzen konnten als Hauptursache instabiler Reifenverhaltens identifiziert werden. Kritische Fahrzeugzustände lassen sich demnach nur durch eine Verbesserung des Rundlaufverhaltens von Felge und Reifen verhindern. Als besonders nachteilig haben sich in diesem Zusammenhang Unrundheiten 1. Ordnung, d.h. Exzentrizitäten erwiesen, da sie erst bei hohen Fahrgeschwindigkeiten und damit bei niedrigen Dämpfungswerten die Eigenfrequenz des Rad-Masse-Systems anregen.

Während die Radunrundheiten und -unwuchten vorwiegend im niederfrequenten Schwingungsbereich wirksam waren, regte die grobstollige Reifenprofilierung Rad und Teile des Fahrzeugaufbaus im hohen Frequenzbereich an. Hierbei handelte es sich in erster Linie um Resonanzerscheinungen aufgrund der halben und ganzen Stolleneingriffsfrequenz im Bereich bis 100 Hz. Diagonalfelgen regten die Fahrzeugachse erheblich stärker an als Radialreifen. Das bessere Komfortverhalten der Radialreifen ist auf die stärkere Entkopplung von Reifengürtel und Radachse aufgrund der weicheren Seitenwand sowie auf das gleichmäßige bandartige Einlaufen des Reifengürtels zurückzuführen. Es deutet sich ferner an, daß weitere Verbesserungen des Abrollverhaltens durch geeignete, in die Radmittelebene gebogene Stollenformen, durch niedrigere Stollenhöhen und eine gewisse Überdeckung der rechts- und linksseitigen Profilstollen erreicht werden können.

Mit dem Anstieg der Fahrgeschwindigkeiten werden die Überrolleigenschaften mit den Bewertungskriterien Schluckgrad und Radlaststoßfaktor hinsichtlich der Fahrsicherheit und Bauteilbeanspruchung immer wichtiger. Das Überrollverhalten ist insbesondere von den äußeren Einflußgrößen Reifeninnendruck, Radlast und Rollgeschwindigkeit abhängig. Ein hoher Auslastungsgrad, niedriger Reifeninnendruck und hohe Fahrgeschwindigkeiten führten

im allgemeinen zu großem Schluckvermögen, da das Rad-Masse-System aufgrund seiner Trägheit und der stoßförmigen Beanspruchung nur ungenügend reagieren konnte. Die Hauptverformung fand deshalb in einem lokal begrenzten Bereich in der Reifenseitenwand und den Profilstollen statt. Zwischen den Radialreifen und Diagonalfelgen konnten keine größeren Unterschiede festgestellt werden.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Kising, A. u. H. Göhlich*: Kenndatenermittlung von AS-Reifen für höhere Geschwindigkeiten als Basis numerischer Simulation. Vortrag bei der Internationalen Tagung Landtechnik, Braunschweig 1987.
- [2] *Kising, A. u. H. Göhlich*: Dynamic properties of agricultural tyres. Vortrag AG-ENG, Paris 1988.
- [3] *Kising, A. u. H. Göhlich*: Ackerschlepper-Reifendynamik, Teil 1: Fahrbahn- und Prüfstandsergebnisse. Grundle. Landtechnik Bd. 38 (1988) Nr. 3, S. 78/87.
- [4] *Kising, A. u. H. Göhlich*: Ackerschlepper-Reifendynamik, Teil 2: Dynamische Federungs- und Dämpfungswerte. Grundle. Landtechnik Bd. 38 (1988) Nr. 4, S. 101/106.
- [5] *Göhlich, H. u. A. Kising*: Flachbahnreifenprüfstand zur Kennwertermittlung von großvolumigen Traktor- und Baumaschinenreifen. Forschung aktuell 1987, Jg. 4, Nr. 16/77, S. 52/54.
- [6] • *Reimpell, J. u. P. Sponagel*: Fahrwerkstechnik: Reifen und Räder. Würzburg: Vogel-Buchverlag 1986.
- [7] • *Buschmann, H. u. P. Koeßler*: Handbuch für den Kraftfahrzeugingenieur. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt 1972.
- [8] *Senger, G.*: Über dynamische Radlasten beim Überrollen kurzweiliger Unebenheiten durch schwere Luftreifen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik Heft 187, 1967.

Trocknungs- und Befeuchtungskinetik von Gras in dünnen Schichten

Von Andreas Spittel, Paulinenaue*)

DK 664.8.047:633.1.004.12

Bei der Belüftungstrocknung von Halbheu in Bergeräumen wird das Gut je nach Richtung der treibenden Kraft – örtlich und zeitlich wechselnd – durch Entzug von Wasser getrocknet oder durch Kondensation befeuchtet. Die Ausdehnung der Trocknungs- und Befeuchtungszone und somit das Temperatur- und Feuchtigkeitsprofil im Haufwerk wird dabei wesentlich von der Geschwindigkeit des Wärme- und Wasseraustausches zwischen Trocknungsgut und umgebender Luft bestimmt. Der Beitrag stellt im Schrifttum verfügbare Versuchsergebnisse und die Ergebnisse eigener Trocknungs- und Befeuchtungsversuche an dünnen Grasschichten dar, die zur Modellierung der Belüftungstrocknung von Halbheu dienen können.

*) Dr.-Ing. A. Spittel ist Abteilungsleiter am Institut für Futterproduktion Paulinenaue der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.

1. Stand der Kenntnisse

Für die Computersimulation des Trocknungsprozesses von Halbheu in Belüftungsanlagen ist die Kinetik des Wasseraustausches zwischen Trocknungsgut und umgebender Luft eine notwendige Komponente [1].

Die analytische Berechnung der Trocknungsgeschwindigkeit von Gras mit einem Diffusionsmodell ist mit vertretbarem Aufwand und hinreichender Genauigkeit nicht möglich. Der Diffusionswiderstand des Blattes bzw. des Halmes von Gräsern ist in Diffusionsrichtung örtlich unterschiedlich, und auch die Verteilung des Wassers im Pflanzengewebe ist inhomogen. Die massebezogene Pflanzenoberfläche ist von Teil zu Teil verschieden und variiert zudem mit dem Entzug von Wasser. Deshalb wird die Trocknungsgeschwindigkeit experimentell durch Trocknen von Einzelteilen oder dünnen Schichten ermittelt.

Im klassischen Trocknungsversuch [2] werden die Temperatur, die Feuchte und die Geschwindigkeit der mit Überschuß strömenden Luft entsprechend den zu modellierenden Verfahrensbedingungen eingestellt und konstant gehalten. Die Gutfeuchte wird indirekt durch Wiegen der Gutmasse in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt.

| Ansatz | Bestimmung der Konstanten | Unters. Bereich | Grasart | Autor |
|--|--|--|--|-------------------------|
| $X - X_e = a \exp(-k_1 t) + b \exp(-k_2 t)$ mit $a = X_0 - b - X_e$ | $k_1 = 0,01249 \exp(0,0703 \vartheta)$ $k_2 = 0,00190 \exp(0,0585 \vartheta)$ $b = 0,00415 X_0 + 0,032296 \vartheta$ $k_1 = 0,00383 \exp(0,0875 \vartheta)$ $k_2 = 0,00135 \exp(0,0628 \vartheta)$ $b = 0,00370 X_0 + 0,039573 \vartheta$ | $\vartheta_L = 20-50 \text{ }^\circ\text{C}$ — $X_0 = 3,3-3,9$ | Lolium perenne S 23 Lolium perenne + Lolium multiflorum Sabel | Rees [3] |
| | a, b, k_1 , k_2 , X_0 tabellarisch | $\vartheta_L = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varphi_L = 0,50$ $X_0 = 1,89-6,72$ | Lolium multiflorum | Jones [5] |
| $\chi = (X - X_e)/(X_0 - X_e)$ $\chi = \exp(-b [-\ln(1 - \chi)]^m t)$ $\chi = \exp(-\sqrt{t/a})$ | m, b tabellarisch a tabellarisch | — — — | Grasgemisch | Lamond u.a. [11, 13] |
| $X/(X + 1) = \exp(a + b t)$ | a, b tabellarisch | $\vartheta_L = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ — $X_0 = 1,89-6,04$ | Lolium perenne Dactylis glomerata Poa pratensis | Elsässer [9] |
| $d\bar{X}/dt = a + b \Delta p$ | a, b tabellarisch | $\vartheta_L = 16; 26 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varphi_L = 0,64; 0,75; 0,92$ — | Lolium multiflorum | Harris u.a. [7] |
| $\chi = (X - X_e)/(X_0 - X_e)$ $\chi = \exp(-k t)$ | $k = a \exp(b \vartheta)$ a, b tabellarisch | $\vartheta_L = 20-410 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varphi_L = 0,1-0,8$ — | Lolium perenne Lolium multiflorum | Menzies [10] |
| $W = a \exp(-k t) + b$ | a, b, k tabellarisch | $\vartheta_L = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varphi_L = 0,50; 0,75$ — | Lolium perenne Festuca ovina Anthoxantum Agrostis stoloris Cynosurus | Morris [15] |
| $d\bar{X}/dt = k(a - X)$ | a, k tabellarisch | $\vartheta_L = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varphi_L = 0,68$ $X_0 = 7,5$ | Lolium multiflorum | Rumney [12] |
| $d\bar{X}/dt = -a(X - X_e)$ | a graphisch | $\vartheta_L = 20-50 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varphi_L = 0,2-0,9$ $X_0 \approx 3-4$ | Lolium perenne Phleum pratense Arrhenaterum | Wilhelm [16] |

Tafel 1. Analytische Beschreibung des Trocknungsverhaltens von Gras im Schrifftum.

Tafel 1 gibt eine Zusammenstellung aller im Schrifftum recherchierten analytischen Beschreibungen von klassischen Trocknungsversuchen der Gräser Trocknung und der Versuchsbedingungen [1 bis 19].

Rees [3] beschreibt die gewonnenen Trocknungskurven als einziger Autor geschlossen analytisch, den Einfluß der Luftfeuchte läßt er unberücksichtigt. Alle anderen Autoren geben die zu den Regressionsgleichungen gehörigen Konstanten in Tafeln oder Grafiken an.

Die Sekundärauswertung der in Tafel 1 angegebenen Gleichungen und weiterer Literatur, entsprechend der in Abschnitt 2.3 dargestellten Auswertungsmethoden, gestattet den Vergleich der Ergebnisse und die Darstellung der Anfangstrocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur und Gutfeuchte zu Versuchsbeginn.

Bild 1 und 2 mit sehr starken Streuungen der Einzelwerte verdeutlichen, daß es erforderlich ist, weitere Ursachen für die Abweichungen zwischen den einzelnen Ergebnissen aufzudecken. Außer den aufgezeigten Haupteinflußgrößen wirkte eine Vielzahl weiterer Einflüsse, wie Grasart und -sorte, Luftfeuchte, Vegetationsstadium, Blatt/Halm-Verhältnis, Vorbehandlung des Grasses u.a.

Wesentliche Erkenntnisse aus den Bildern sind der exponentielle Einfluß der Anfangsgutfeuchte und die lineare Abhängigkeit der Anfangstrocknungsgeschwindigkeit von der Lufttemperatur.

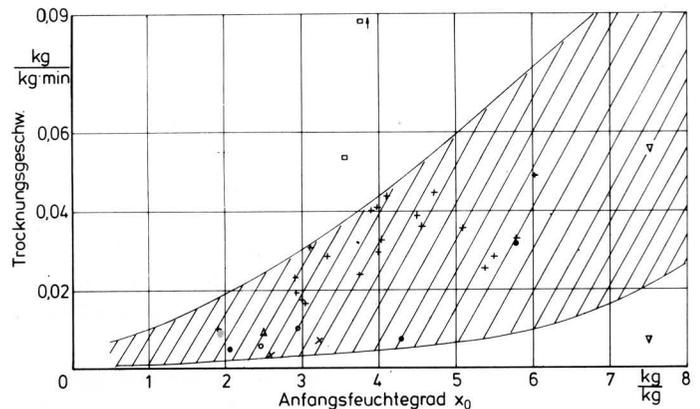


Bild 1. Trocknungsgeschwindigkeit von Gras in Abhängigkeit von der Gutfeuchte zu Versuchsbeginn.

- Rees [3]
- △ Tuncer u.a. [4]
- Jones [5]
- × Johnson [6]
- + Elsässer [9]
- ▽ Rumney [12]
- Lamond u.a. [13]
- /// Bereich eigener Meßwerte

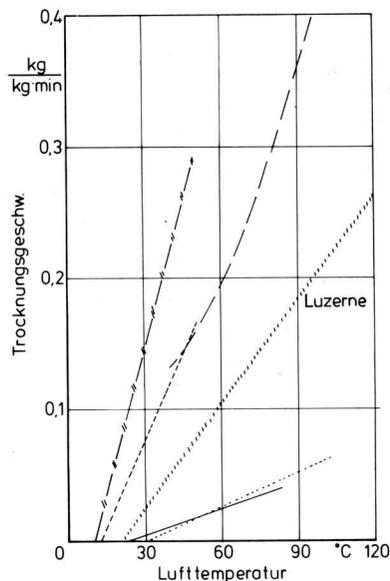


Bild 2. Trocknungsgeschwindigkeit bei Versuchsbeginn von Gras und Luzerne in Abhängigkeit von der Lufttemperatur.

— Rees [3, S. 23] — Tuncer u.a. [4, Bild 8]
 - - - Rees [3, Sabel] - - - Menzies u.a. [10]
 ····· Tuncer u.a. [4, Bild 9] ····· Schneider [14, Bild 44]

Besonders den Einfluß der Anfangsgutfeuchte haben verschiedene Autoren außer acht gelassen und sind so zu fragwürdigen Ergebnissen gekommen.

Einheitlich wird im Schrifttum über Unterschiede in der Trocknungsgeschwindigkeit verschiedener Pflanzenteile berichtet. Blätter trocknen schneller als Halme [4 bis 8]. Jones [5], Johnson u.a. [6] sowie Tuncer u.a. [4] ermittelten für das Verhältnis der Trocknungsgeschwindigkeiten Werte zwischen 2 und 3. Bei einer intakten abgeschrittenen Pflanze erfolgt gesetzmäßig ein Teil der Wassergabe aus dem Stengel über das Blatt [5, 8].

Untersuchungen zum Einfluß des Vegetationsstadiums von Gras auf die Trocknungsgeschwindigkeit ergaben, daß physiologisch sehr junges Gras und im Herbst geschnittenes Gras schneller trocknen als Gras in der Vorblüte [5, 9]. Rees [3] und Menzies [10] erklären diese Unterschiede durch Änderungen des Anfangswassergehaltes sowie Änderungen des Blatt/Halm-Verhältnisses in der Vegetationszeit. Ein gesicherter Einfluß des Vegetationsstadiums des Grases auf seine Trocknungsgeschwindigkeit wurde nicht nachgewiesen.

Der Nachweis von Unterschieden im Trocknungsverhalten verschiedener Grasarten war Gegenstand der Untersuchungen vieler Autoren [4, 9, 15 bis 19, u.a.]. Die Ergebnisse sind sehr widersprüchlich, bedingt durch den Vergleich von Versuchen bei verschiedenen Ausgangsfeuchten und von Versuchsdurchführungen ohne bzw. mit zu geringer Belüftung des Grases. Unter Beachtung der verschiedenen Werte der Ausgangsfeuchte ergibt sich aus der Gesamtheit der Untersuchungen ein sehr geringer Einfluß der Grasart auf die Trocknungsgeschwindigkeit. *Dactylis glomerata* ist relativ schwer zu trocknen, hingegen gibt *Festuca arundinacea* seine Feuchtigkeit schnell ab.

Im Schrifttum liegen für verschiedene für die Belüftungstrocknung von Halbheu relevante Fragestellungen nur unzureichende Ergebnisse vor. Das betrifft insbesondere die Trocknungsgeschwindigkeit bei Anfangsfeuchten $X_0 < 2$ kg/kg und den Einfluß der Luftfeuchte in Wechselwirkung mit der Temperatur. Ebenso wurden über die Befeuchtungsgeschwindigkeit von Gräsern bislang keine Ergebnisse veröffentlicht.

Diese Kenntnislücken waren Anlaß für eigene Experimente zur Trocknung und Befeuchtung von Gräsern, um Parameterwerte für die Modellierung von Trocknungsprozessen zu beschaffen.

2. Versuchsmethodik

2.1 Versuchseinrichtung

Der erforderliche Luftstrom wurde von einem regelbaren Axialgebläse durch eine Meßleitung zur Volumenstrommessung angesaugt und druckseitig in einen Ausgleichsbehälter geführt. In diesem wurde die Luft durch eine Elektroheizung PI-geregelt temperiert. Die Probenbehälter wurden zur Belüftung auf eine perforierte Abdeckung des Ausgleichsbehälters gesetzt. Der Strömungswiderstand dieser perforierten Abdeckung wurde im Verhältnis zu dem der befüllten Probenbehälter sehr groß gewählt, so daß 6 Proben parallel mit gleichem Luftstrom belüftet werden können.

Die Versuchseinrichtung hatte folgende technische Daten:

| | |
|--------------------------------|------------|
| Luftgeschwindigkeit | 0–0,07 m/s |
| Temperaturerhöhung | 0–16 K |
| Regelgenauigkeit | 0,8 K |
| Durchmesser der Probenbehälter | 302,6 mm. |

2.2 Versuchsdurchführung und Versuchsgut

Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft wurde einheitlich bei allen Versuchen entsprechend dem Erwartungswert der realen Belüftungsanlage mit 0,065 m/s konstant gehalten. Vorversuche ergaben bei Geschwindigkeiten $v_L > 0,05$ m/s vernachlässigbar kleine Effekte der Luftgeschwindigkeit.

Als Versuchsgut standen artenreine und gemischte Bestände der wichtigsten Gräser und Luzerne von verschiedenen Standorten eines Gebiets zur Verfügung.

Die Versuchspartien wurden unterschiedlich vorbehandelt, um die Ausgangsfeuchte und die Gutstruktur zu variieren. Die Trocknungsversuche wurden mit frisch gemähtem, mit angewelktem und mit warmluftgetrocknetem Pflanzenmaterial in einem Zeitraum von 3 Jahren durchgeführt.

Zur Variation der Luftfeuchte bei den verschiedenen Versuchen wurde die Versuchseinrichtung unter verschiedenen Witterungsbedingungen betrieben.

Das Pflanzenmaterial wurde auf den Siebboden der Probenbehälter unregelmäßig in dünnen Schichten bis zu einer maximalen Masse von 100 g abgelegt, mit dem Probenbehälter gewogen und zur Belüftung auf die Versuchseinrichtung gestellt.

Der zeitliche Wasserentzug wurde durch Abnehmen und Wiegen der Probenbehälter ermittelt; die jeweilige Unterbrechung der Belüftung betrug weniger als 20 s. Die Wägung erfolgte zu Versuchsbeginn im Abstand von wenigen Minuten und zu Versuchsende mit zunehmendem Abstand – bis zu mehreren Stunden. Nach der letzten Wägung wurde die Trockenmasse des Versuchsgutes ermittelt.

Die Temperatur und Feuchte der zuströmenden Luft sowie die Ausgangsfeuchte wurden bei den Trocknungsversuchen in folgenden Bereichen variiert:

| | |
|----------------------|------------------------------|
| Lufttemperatur | $\vartheta_L = 18,6–35,3$ °C |
| relative Luftfeuchte | $\varphi = 0,26–0,82$ |
| Ausgangsfeuchte | $X_0 = 0,07–8,42$ kg/kg. |

2.3 Auswertung

Durch die Überführung der Versuchsvariablen in eine normierte Form lassen sich alle Versuche jeweils durch zwei Bewertungsgrößen, nämlich "Trocknungsgeschwindigkeit zu Versuchsbeginn" und "Exponent der Trocknungsgleichung" beschreiben. Dies ist besonders für den Vergleich von Versuchen und für die Prozeßmodellierung von Vorteil [2, S. 171/175]. Die Versuchsauswertung erfolgte mit dem Normierungsprogramm NORMI [20].

Die reale Trocknungsgeschwindigkeit wurde durch Bestimmung des Anstieges der Verbindungsgeraden bzw. einer Parabel durch benachbarte Meßpunkte berechnet. Die dimensionslose Form der realen Trocknungsgeschwindigkeit ist:

$$\psi = \frac{d\bar{X}/dt}{(d\bar{X}/dt)_0} \quad (1).$$

Die Trocknungsgeschwindigkeit ist eine Funktion der meßtechnisch nicht zugänglichen Gutfeuchte an der Gutoberfläche. Im Rechenprogramm wird deshalb ihre Abhängigkeit von der dimensionslosen mittleren Gutfeuchte χ bestimmt:

$$\chi = (\bar{X} - \bar{X}_e) / (\bar{X}_0 - \bar{X}_e) \quad (2)$$

$$\psi = \chi^n \quad (3)$$

Die analytische Darstellung der realen Trocknungsgeschwindigkeit enthält somit nur noch 2 von den Trocknungsbedingungen abhängige Größen, den Exponenten n und die Trocknungsgeschwindigkeit zu Trocknungsbeginn $(d\bar{X}/dt)_0$:

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \left(\frac{\bar{X} - \bar{X}_e}{\bar{X}_0 - \bar{X}_e} \right)^n \left(\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_0 \quad (4)$$

Die Analyse der in 244 Einzelversuchen gewonnenen Daten bezüglich vermuteter Einflüsse und Abhängigkeiten erfolgte mit Standardsoftware dbase und abstat auf einem Bürocomputer. Die Anfangsgeschwindigkeit des Überganges von Feuchtigkeit zwischen Gut und vorbeiströmender Luft wird entsprechend der Trocknungstheorie durch die Gleichung:

$$\left(\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_0 = \frac{A \beta}{R_D T} (P_{DO} - P_{DL}) \quad (5)$$

beschrieben.

Die Dampfdruckdifferenz als treibende Kraft des Stoffüberganges ist hier errechenbar, da sich der Trocknungsspiegel zu Versuchsbeginn an der Gutoberfläche befindet. Der Zustand an der Gutoberfläche ist durch das Sorptionsgleichgewicht mit der Anfangsgutfeuchte und durch die Kühlgrenztemperatur bei adiabater Trocknung gekennzeichnet:

$$P_{DO} = \varphi_e P_{DS} \quad (6)$$

$$\varphi_e = 1 - \exp(-0,026 T X_0) \quad (7)$$

Die relative Luftfeuchte beim Sorptionsgleichgewicht φ_e konvergiert sehr schnell gegen 1, so daß bei Gutfeuchten $X_0 > 1$ an der Oberfläche näherungsweise Sättigung vorliegt. Entsprechend Bild 1 nimmt die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit jedoch mit größerer Anfangsgutfeuchte weiter zu. Dieser Zusammenhang ist durch die meßtechnisch nicht zugängliche Abhängigkeit der massebezogenen Oberfläche und der Stoffübergangszahl von der Gutfeuchte bestimmt. Abweichend von Gl. (5) wurde deshalb in der Versuchsauswertung der physikalisch plausible Regressionsansatz:

$$\left(\frac{d\bar{X}}{dt} \right)_0 = a + b X_0 (P_{DO} - P_{DL}) + c X_0^2 \quad (8)$$

verwendet.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Trocknung

Verschiedene Vorbehandlungen der Pflanze (frisch geschnitten, angewelkt, warmluftgetrocknet), die die Änderung der Gutfeuchte zur Folge hatten, ergaben eine stetige Abhängigkeit der Trocknungsgeschwindigkeit von der Gutfeuchte X_0 . Neben der Gutfeuchte X_0 als einflußgröße ist somit kein Einfluß der untersuchten Vorbehandlungen der Pflanzen gegeben. In Tafel 2 sind die Ergebnisse der Regressionsgleichungen für verschiedene Pflanzenteile angegeben.

Ein signifikanter Einfluß der Grasart wurde weder für die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit noch für den Exponenten der Trocknungsgleichung (Gl. (4)) festgestellt. Unter Beachtung der Ausgangsfeuchte ist auch das Trocknungsverhalten von ganzen Luzernepflanzen identisch mit dem von Gräsern. Die Analyse des Exponenten n ergab weiterhin Unabhängigkeit von der Gutfeuchte, von der Trocknungstemperatur und von der Luftfeuchte. Signifikant verschiedene Exponenten wurden aber für frisch geschnitte-

| | Konstanten n. Gl. (8) | | | Streuung | | | Bestimmtheitsmaß B | Anzahl d. Meßwerte |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------|
| | a (10 ⁻³) | b (10 ⁻⁶) | c (10 ⁻⁴) | S _{Rest} (10 ⁻³) | S _b (10 ⁻⁶) | S _c (10 ⁻⁵) | | |
| Ganze Pflanze | -1,35 | -7,77 | -3,92 | 6,88 | 1,00 | 9,42 | 0,866 | 179 |
| Blatt | -3,02 | -5,28 | - | 10,9 | 1,69 | - | 0,379 | 18 |
| Halm | -0,474 | -3,33 | - | 2,95 | 0,524 | - | 0,717 | 17 |

Tafel 2. Werte der Konstanten der Trocknungsgleichung und der ermittelten Streuung.

ne bzw. angewelkte Pflanzen sowie für verschiedene Pflanzenteile ermittelt, Tafel 3.

Die Tafeln 2 und 3 bestätigen das im Schrifttum beschriebene unterschiedliche Wasserabgabeverhalten von Halmen und Blättern. Die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit von Blättern ist feuchteabhängig ca. 2–3mal höher als die von Halmen.

Dieser Faktor kennzeichnet das Verhältnis der massebezogenen Oberflächen der unterschiedlichen Gutteile, da nach Gl. (5) eine direkte Proportionalität zwischen der spezifischen Oberfläche und der Anfangstrocknungsgeschwindigkeit gegeben ist. Des weiteren fällt die Trocknungsgeschwindigkeit von Stengeln (Halmen) sehr viel schneller ab als die von Blättern. Der Abfall der Trocknungsgeschwindigkeit von ganzen Pflanzen, ausgedrückt durch den Exponenten n in Tafel 3, entspricht etwa dem von Halmen. Die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit hingegen ist statistisch betrachtet identisch mit der von Blättern. Die Trocknungsgeschwindigkeit von ganzen Pflanzen ist demnach zu Trocknungsbeginn durch die große massebezogene Oberfläche der Blätter bestimmt und im weiteren Trocknungsverlauf durch die Wasserabgabe des Halmes begrenzt.

| | Exponent n | Streuung S _n | Anzahl d. Meßwerte |
|----------------------|------------|-------------------------|--------------------|
| Ganze Pflanze frisch | 1,83 | 0,36 | 68 |
| angewelkt | 2,47 | 0,76 | 78 |
| Blatt frisch | 1,19 | 0,27 | 10 |
| angewelkt | 1,82 | 0,59 | 6 |
| Halm frisch | 1,86 | 0,29 | 10 |
| angewelkt | 2,29 | 0,53 | 5 |

Tafel 3. Exponent der Trocknungsgleichung und Streuung des Exponenten bei der Trocknung unterschiedlich vorbehandelter, ganzer Pflanzen bzw. Pflanzenteile.

Das ausgewiesene Bestimmtheitsmaß der Regression für ganze Pflanzen von $B = 0,866$ (Tafel 2) ist Beleg für den Haupteinfluß der Gutfeuchte und der Dampfdruckdifferenz auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Die verbleibenden Abweichungen der Meßwerte von der Regressionsgleichung, nur 13,4 % der Gesamtstreuung, haben ihre Ursache in während der Vegetationszeit sich änderndem Blatt/Halm-Verhältnis, in variablen Wuchsbedingungen, in Arten- und Sorteneinfluß sowie in Meß- bzw. Versuchsfehlern. Tafel 3 weist im Mittelwert für angewelktes Gras höhere Exponenten aus als für frisch geschnittenes (oder warmluftgetrocknetes) Gras. Eine Ursache dafür ist die Beeinflussung des Pflanzengewebes und des Diffusionsweges durch Vorbehandlung.

Weiterhin wurde ermittelt, daß Abweichungen der Oberflächenfeuchte von der mittleren Gutfeuchte einen mehr oder minder großen Abfall der Trocknungsgeschwindigkeit bewirken. Der Exponent n variiert im Extremfall von 0,8 bei äußerlich sehr trockenen Pflanzen bis zu 6,0 bei befeuchteten Pflanzenoberflächen.

In Bild 3 ist die Trocknungsgeschwindigkeit von Halmen und ganzen Pflanzen dargestellt, wobei für die letzteren auch der Einfluß eines veränderten Exponenten auf die Trocknungsgeschwindigkeit eingezeichnet ist. Der schraffierte Bereich kennzeichnet die jeweilige Standardabweichung des Exponenten. Die Hypothese, daß zwischen dem Exponenten n und der Anfangstrocknungsgeschwindigkeit eine Beziehung besteht, konnte bei der Auswertung der Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden.

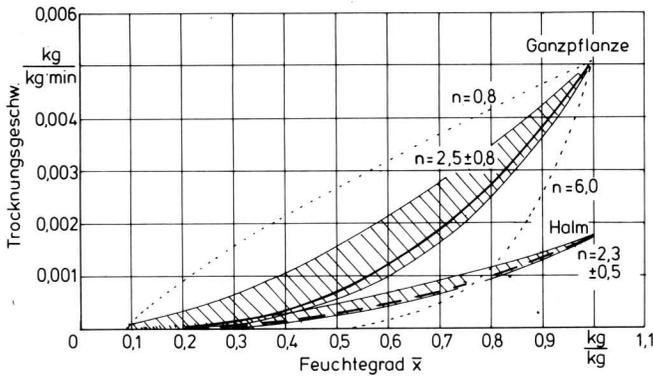


Bild 3. Trocknungsgeschwindigkeit von ganzen Pflanzen und Halmen in Abhängigkeit von der mittleren Gutfeuchte; Einfluß des Exponenten der Trocknungsgleichung.

3.2 Befeuchtung

Die Auswertung der insgesamt 30 Befeuchtungsversuche von Gras und Luzerne erfolgte analog den Trocknungsversuchen auf Basis der Gl. (4). Als Haupteinflußgröße auf den Exponenten in dieser Gleichung und auf den Startwert der Befeuchtungsgeschwindigkeit wurde die relative Luftfeuchte ermittelt. Für negative Dampfdruckdifferenzen beschreibt die Beziehung

$$\left(\frac{d\bar{X}}{dt}\right)_0 = -4,26 \cdot 10^{-3} + 8,08 \cdot 10^{-3} \varphi - 1,80 \cdot 10^{-6} (P_{DO} - P_{DL}) \quad (9)$$

den Startwert der Befeuchtungsgeschwindigkeit von ganzen Pflanzen in der Einheit $\text{kg}/(\text{kg min})$ mit einer Bestimmtheit von $B = 0,857$.

Die Abhängigkeit des Exponenten von der relativen Luftfeuchte:

$$n = 3,32 - 2,71 \varphi \quad (10)$$

ist hochsignifikant, ergibt jedoch nur ein geringes Bestimmtheitsmaß ($B = 0,339$, $s_R = 0,52$).

Weitere gesicherte Einflüsse sowie Unterschiede zwischen Gras und Luzerne konnten weder für den Startwert der Befeuchtungsgeschwindigkeit noch für den Exponenten ermittelt werden.

In Bild 4 ist die Befeuchtungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der mittleren Gutfeuchte für verschiedene relative Luftfeuchten dargestellt. Die näherungsweise lineare Abhängigkeit der Befeuchtungsgeschwindigkeit von der mittleren Gutfeuchte ist durch den Betrag des Exponenten nach Gl. (10) bedingt. Zur Bestimmung der Gln. (9) und (10) wurden die unabhängigen Variablen in folgenden Bereichen variiert.

| | |
|----------------------|--|
| Lufttemperatur | $\vartheta_L = 14,8 - 22,3 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| relative Luftfeuchte | $\varphi = 0,53 - 0,87$ |
| Ausgangsfeuchte | $X_0 = 0,001 - 0,201 \text{ kg/kg}$ |

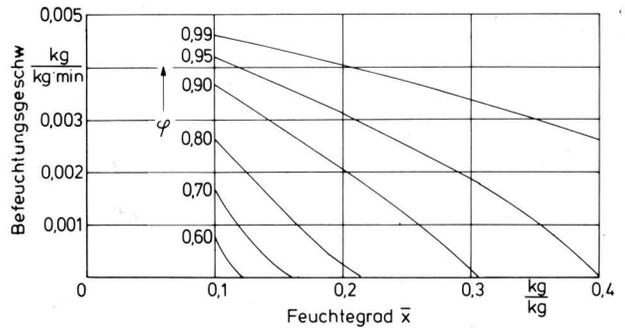


Bild 4. Befeuchtungsgeschwindigkeit ganzer Pflanzen als Funktion der mittleren Gutfeuchte, relative Feuchte der Luft als Parameter.

4. Zusammenfassung

Auf Grundlage einer Schrifttumauswertung und eigener Versuche wurden allgemeingültige Gleichungen für die Trocknungs- und Befeuchtungskinetik von Gras und Luzerne in dünnen Schichten entwickelt. Die Ergebnisse sind direkt für Simulationsrechnungen an Haufwerken mit definierter Luftströmung verwendbar.

Die Abhängigkeiten entsprechen folgenden Gesetzmäßigkeiten:

- Von den unabhängigen Einflußgrößen auf die Trocknungsgeschwindigkeit von Gras haben die Gutfeuchte und die Dampfdruckdifferenz zu Trocknungsbeginn den größten Einfluß.
- Unterschiede im Trocknungsverhalten verschiedener Gräser sind vernachlässigbar gering. Momentane Differenzen sowie Veränderungen über die Vegetationszeit sind ursächlich durch Verschiebung des Blatt/Halm-Verhältnisses begründet.
- Die Anfangstrocknungsgeschwindigkeit von Blättern ist 2–3mal größer als die von Halmen. Im weiteren Trocknungsverlauf vergrößert sich das Verhältnis der Trocknungsgeschwindigkeiten auf Werte bis zu 5, da die Trocknungsgeschwindigkeit von Halmen relativ schnell abfällt.
- Die Anfangsbefeuchtungsgeschwindigkeit von Gras ist hochsignifikant linear von der relativen Luftfeuchte abhängig. Der Abfall der Befeuchtungsgeschwindigkeit mit zunehmender Feuchtigkeit des Pflanzenmaterials ist bei hohen Luftfeuchten geringer als bei kleinen Luftfeuchten.

Verwendete Formelzeichen

| | | |
|-------------------|-----------------------------|--|
| A | m^2/kg | spezifische Oberfläche |
| P_{DL} | Pa | Wasserdampfdruck der Luft |
| P_{DO} | Pa | Wasserdampfdruck an der Gutoberfläche |
| P_{DS} | Pa | Wasserdampfdruck bei Sättigung |
| Δp | Pa | Wasserdampfdruckdifferenz |
| R_D | $\text{J}/(\text{kg K})$ | Gaskonstante von Wasserdampf |
| t | min | Trocknungszeit |
| T | K | absolute Temperatur |
| W | kg | Wassermasse |
| X | kg/kg | Gutfeuchte |
| X_e | kg/kg | Gleichgewichtsgutfeuchte |
| X_0 | kg/kg | Anfangsgutfeuchte |
| $d\bar{X}/dt$ | $\text{kg}/(\text{kg min})$ | Geschwindigkeit der Trocknung bzw. Befeuchtung |
| $(d\bar{X}/dt)_0$ | $\text{kg}/(\text{kg min})$ | Anfangsgeschwindigkeit der Trocknung bzw. Befeuchtung |
| β | m/min | Stoffübergangszahl |
| ϑ | $^\circ\text{C}$ | Temperatur |
| φ | — | relative Luftfeuchte |
| φ_e | — | rel. Luftfeuchte bei Sorptionsgleichgewicht |
| χ | — | normierte Gutfeuchtigkeit |
| ψ | — | normierte Geschwindigkeit der Trocknung bzw. Befeuchtung |

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Spittel, A.*: Computersimulation der Belüftungskonservierung – eine Methode zur optimalen Konstruktion und Bewirtschaftung von Trocknungsanlagen. Agrartechnik (Berlin) Bd. 36 (1986) Nr. 10, S. 454/56.
- [2] • *Weiss, S. u. K.-E. Miltzer*: Thermische Verfahrenstechnik I. Leipzig: VEB Deutscher Verlag Grundstoffindustrie 1986.
- [3] *Rees, D.V.H.*: Investigations on the drying of herbage at temperatures up to 50 °C. J. British Grassland Society Bd. 29 (1974) S. 47/55.
- [4] *Tuncer, I.K., F. Wieneke u. D. Lehmann*: Das Trocknungsverhalten einiger Futtergräser. Grundl. Landtechnik Bd. 20 (1970) Nr. 2, S. 38/44.
- [5] *Jones, L.*: The effect of stage of growth on the rate of drying of cut grass at 20 °C. Grass and Forage Sc. Bd. 34 (1979) S. 139/44.
- [6] *Johnson, T.R., J.W. Thomas u. C.A. Rotz*: Drying rate of cut forages after spray treatments to hasten drying. J. Dairy Science Bd. 67 (1984) Nr. 8, S. 1745/51.
- [7] *Harris, C.E. u. M.S. Dhanoa*: The drying rates of component parts of inflorescence-bearing tillers of Italian ryegrass. Grass and Forage Sc. Bd. 39 (1984) Nr. 4, S. 271/74.
- [8] *Harris, C.E. u. J.N. Tullberg*: Pathways of water loss from legumes and grasses cut for conservation. Grass and Forage Sc. Bd. 35 (1980) Nr. 1, S. 1/11.
- [9] *Elsaesser, M.*: Auswirkungen der Heubelüftung mit solar erwärmter Trocknungsluft auf Qualitätseigenschaften von Mähweidefutter. Diss. Univ. Stuttgart-Hohenheim, 1984.
- [10] *Menzies, D.J. u. J.R. O'Callaghan*: The effect of temperature on the drying rate of grass. J. agric. Engng. Res. Bd. 16 (1971) Nr. 3, S. 213/22.
- [11] *Lamond, W.J., C.A. Glasbey u. H.B. Spencer*: The effect of conditioner throughput rate on the drying rate of grass. Dep. Note SIN/464, SIAE, Penicuik 1986.
- [12] *Rumney, R.P., C.E. Harris u. M.S. Dhanoa*: The effect of rewetting on some drying characteristics of Italian ryegrass leaves in simulated hay-making conditions. Agric. and Forest Meteorology Bd. 32 (1984) Nr. 2, S. 133/44.
- [13] *Lamond, W.J., E.A. Smith u. P.J. Bowden*: The effect of conditioning on hay drying – a field trial (1983). Dep. Note SIN/442, SIAE, Penicuik 1985.
- [14] *Schneider, A.*: Untersuchungen über das charakteristische Trocknungsverhalten von Luzerne und Zuckerrübenblatt in Einzelschichten und durchströmten Schüttungen. Diss. TU München, 1954.
- [15] *Morris, R.M.*: The rate of water loss from grass samples during hay-type conservation. J. British Grassland Soc. Bd. 27 (1972) S. 99/105.
- [16] *Wilhelm, F.*: Trocknungsverhalten von Briketts aus ange-welktem Halmgut und Trocknungsverhalten von landwirt-schaftlichem Halmgut. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 18, S. 1/171. Düsseldorf: VDI-Verlag 1973.
- [17] *Hübner, R. u. F. Wagner*: Untersuchungen über den Trock-nungsverlauf von Gräsern und Kleearten. Das wirtschaftseigene Futter Bd. 21 (1975) Nr. 3, S. 247/63.
- [18] *Owen, I.G. u. D. Wilman*: Differences between grass species and varieties in rate of drying at 25 °C. J. agric. Science Bd. 100 (1983) S. 629/36.
- [19] *Jones, L. u. J. Prickett*: The rate of water loss from cut grass of different species dried at 20 °C. Grass and Forage Sc. Bd. 36 (1981) Nr. 1, S. 17/23.
- [20] Normi: Programm zur Auswertung des klassischen kineti-schen Experimentes. TU Dresden, Sektion VVT, WB TVT/UST 1985.

Das Kennfeld eines Getreidesatzrockners

Teil 1: Praktische Versuche

Von Alexander Coenen, Bernd Ciesler und Franz Wieneke, Göttingen*)

DK 664.8.047:633.2.004.12

Satzrockner weisen gegenüber dem Durchlauftrockner eine geringere Trocknungsleistung und eine relativ hohe Gefahr des Verderbs auf, wenn höhere Getreideschüttungen mit nur mäßig erwärmter Luft (3–5 K) oder geringen Belüftungsgeschwindigkeiten getrocknet werden sollen.

Es erschien deshalb notwendig, das Potential einer Leistungssteigerung der Satzrocknung von Getreide zu untersuchen. Dazu wurden am Institut für Agrartechnik in Göttingen Versuche zur Ausbildung und Wanderung der Trocknungszone und zu Qualitätsveränderungen in hohen Schüttungen angestellt. Aus dem Einfluß der verschiedenen Trocknungsparameter wurde dann ein Trocknungsmodell für die Satzrocknung mathematisch formuliert.

*) Dr. A. Coenen ist und Dr. B. Ciesler war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Agrartechnik der Universität Göttingen; Prof. Dr.-Ing. F. Wieneke ist Direktor dieses Institutes.

1. Einleitung

Über den Verlauf der Feuchteabgabe bei der Satzrocknung von Getreide liegt eine Vielzahl von Veröffentlichungen vor, die in zwei neueren Arbeiten [1, 2] zusammengestellt sind. Die Erkenntnisse reichen indes nicht aus, ein vollständiges Arbeitskennfeld eines Satzrockners als Basis für eine Steuerung oder Regelung des Trocknungsprozesses zu erstellen. Insbesondere fehlen Ergebnisse über die Ausbildung und Wanderung der Trocknungszone in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußgrößen.

Diese Größen sollten bei der Trocknung in hohen Schüttungen erfaßt werden und die Grunddaten für ein einfaches Trocknungsmodell liefern, mit dessen Hilfe die Satzrocknung energiesparender, verlustärmer und mit höherer Leistung als bisher durchgeführt werden kann.

2. Versuchsdurchführung

Zur Lösung der gestellten Aufgabe wurde das Trocknungsverhalten von feuchtem Getreide in hohen Schüttungen bei unterschiedlichen, aber jeweils konstanten Zuluftbedingungen und Belüftungsgeschwindigkeiten untersucht. Systematisch wurde durch Ändern