

Experimentelle Untersuchungen über die spezifische Wärme von Körnermais, Gräsern und Leguminosen

Von Reiner Koschatzky, Hohenheim

DK 536.63:634.004.12

Bei der Ernte, Konservierung und Verarbeitung von Pflanzenprodukten spielen Wärme- und Stoffaustauschvorgänge eine wichtige Rolle. Für die Berechnung dieser Vorgänge ist die Kenntnis der maßgebenden Stoffeigenschaften - und darunter auch der spezifischen Wärme - notwendig.

In der vorliegenden Arbeit wird die mittlere spezifische Wärme für verschiedene Temperaturbereiche mit Hilfe eines Mischungskalorimeters bestimmt. Die Ergebnisse sind in Diagrammen aufgetragen und als Gleichungen zur Berechnung der mittleren spezifischen Wärme als Funktion des Feuchtegehaltes angegeben.

1. Einleitung

Die Kenntnis der spezifischen Wärme von Körnerfrüchten und Halmgut ist bei der Berechnung von Wärme- und Stoffaustauschvorgängen von großer Bedeutung. Sie treten bei der Lagerung, Kühlung, Trocknung und Gärung auf.

Ihre Bestimmung bereitet erheblich größere Schwierigkeiten als die Ermittlung der spezifischen Wärme anorganischer, homogener Stoffe. Körnerfrüchte und Halmgut sind wie alle landwirtschaftlichen Produkte inhomogene Stoffe, deren Struktur und chemische Zusammensetzung nicht nur von botanischen, sondern auch bei gleichem Pflanzenaufbau von den Standortverhältnissen abhängig sind.

Bedingt durch das schlechte Wärmeleitvermögen von Körnerfrüchten und Halmgut bilden sich bei der Bestimmung der spezifischen Wärme innerhalb der Proben Temperaturgradienten aus, die zu Feuchtebewegungen und Änderung der Bindungsform der Feuchte führen können [1]. Weiter besteht die Möglichkeit, daß bei feuchten biologischen Stoffen exotherme Reaktionen auftreten, die von Atmungsvorgängen und Gärprozessen herrühren.

Ungleichmäßiges Ausgangsmaterial, Feuchtebewegungen und Änderung der Bindungsform der Feuchte, sowie exotherme Reaktionen während der Versuchsdurchführung können erhebliche Fehler bei der Messung der spezifischen Wärme verursachen.

**) Dipl.-Ing. Reiner Koschatzky ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Landtechnik der Universität Hohenheim (Lehrstuhlinhaber: Prof.Dr.-Ing. G. Segler)*

Die Mittel für die Untersuchungen wurden freundlicherweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft bereitgestellt.

2. Definition

Unter der spezifischen Wärme c wird diejenige Wärmemenge verstanden, die erforderlich ist, um 1 Kilogramm eines Stoffes um 1 Grad zu erwärmen. Man unterscheidet dabei zwischen differentieller oder wahrer und integraler oder mittlerer spezifischer Wärme. Die differentielle spezifische Wärme gilt bei einer bestimmten Temperatur und ergibt sich hinreichend genau bei Zu- oder Abfuhr endlicher Wärmemengen.

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{d\vartheta} \quad (1)$$

Die integrale spezifische Wärme ist in einem Temperaturbereich definiert. Sie wird bei Berechnungen von Trocknungs- und Erwärmungsvorgängen angewandt.

$$[c] \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} = \frac{1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} c \, d\vartheta \quad (2)$$

Bei feuchten Stoffen kann die spezifische Wärme sowohl auf die Trockenmasse m_S als auch auf die Gesamtmasse ($m_S + m_W$) bezogen werden, wobei m_W die Feuchtemasse darstellt [2].

$$c_{KX} = \frac{1}{m_S} \frac{dQ}{d\vartheta} \quad (3)$$

$$c_{KU} = \frac{1}{m_W + m_S} \frac{dQ}{d\vartheta} \quad (4)$$

Zwischen der auf die Trockenmasse bezogenen spezifischen Wärme c_{KX} und der auf die Gesamtmasse bezogenen spezifischen Wärme c_{KU} besteht folgender Zusammenhang:

$$c_{KX} = c_{KU} (1 + X) \quad (5)$$

Für die Anwendung in der Trocknungstechnik ist es günstiger, die spezifische Wärme auf die Trockenmasse zu beziehen, da diese während des Trocknungsvorgangs konstant bleibt. Entsprechend der Definition für den Feuchtegrad $X = m_W/m_S$ besteht zwischen Feuchtegrad X und der Feuchtemasse m_W ein linearer Zusammenhang.

3. Meßverfahren

Zur Bestimmung der spezifischen Wärme von landwirtschaftlichen Produkten bieten sich folgende Meßverfahren an:

- 3.1 Indirekte Bestimmung über die Dichte ρ , die Wärmeleitfähigkeit λ und die Temperaturleitfähigkeit a nach der Beziehung

$$c = \frac{\lambda}{a \cdot \rho} \quad (6)$$

- 3.2 Ermittlung mit einem Phasenumwandlungskalorimeter (Eiskalorimeter), bei dem die dem Kalorimeter zugeführte oder entzogene Wärmemenge keine Temperaturänderung, sondern eine Phasenumwandlung an der Kalorimetersubstanz hervorruft, deren Größe gemessen wird. Die Prozesse laufen streng isotherm ab, wobei die Versuchstemperatur fest an die Tripelpunkttemperatur der Kalorimetersubstanz gebunden ist [3,4].
- 3.3 Bestimmung in einem Flüssigkeitskalorimeter (Mischungskalorimeter) in dem zwei Stoffe, die verschiedene Temperaturen haben, miteinander in Berührung gebracht werden, bis sich bei einem adiabaten Verlauf eine gemeinsame Mischungstemperatur eingestellt hat [3,4].

4. Bisherige Arbeiten

Die spezifische Wärme von Körnerfrüchten wurde von verschiedenen Verfassern untersucht. *Babitt* [5], *Moote* [1], *Disney* [6], *Schäfer* [7], *Kazarian* [8], *Maltry* [2] u.a. [9,10,11] bestimmten die spezifische Wärme von Weizen. *Disney* [6] untersuchte neben Weizen auch Gerste. *Haswell* [12] gibt Werte für Hafer und Reis an. Untersuchungen über die spezifische Wärme von Mais sind bei *Kazarian* [8] und *Pabis* [13] zu finden.

Für Weizen liegt eine Vielzahl von Versuchsergebnissen vor, die den Einfluß von Feuchtegrad, Temperatur, Sorte und Zerkleinerungsgrad berücksichtigen. Für Mais sind in der Literatur unterschiedliche Werte angegeben, die außerdem nur den Bereich bis zu einem Feuchtegehalt von $U = 25\%$ umfassen [8,13].

Daten für Halmgut werden lediglich von *Hall* [9] und *Wienecke* [14] angegeben. Der Einfluß der Temperatur und der Grasart auf die spezifische Wärme ist bislang nicht untersucht.

Babitt [5], *Moote* [1] und *Kazarian* [8] ermittelten die spezifische Wärme indirekt aus Messungen der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit. *Schäfer* [7] und *Maltry* [2] arbeiteten mit einem Mischungskalorimeter, *Disney* [6] verwendete für seine Untersuchungen ein Eiskalorimeter.

Hirsch [15], *Bekassov* [16] und *Filonenko* [17] geben auf Grund von theoretischen Betrachtungen die spezifische Wärme eines feuchten Stoffes als Summe der spezifischen Wärme der Trockenmasse c_{KO} und des freien Wassers c_W an.

$$c_{KX} = c_{KO} + c_W X \quad (7)$$

Wie bereits *Disney* [5] und *Maltry* [2] bei Weizen nachwies, kann die spezifische Wärme nicht aus den einzelnen Größen additiv bestimmt werden, da sie für freies Wasser c_W und gebundenes Wasser c_{WB} nicht identisch ist.

5. Aufgabenstellung

Ziel der Untersuchung war die Bestimmung der spezifischen Wärme von den drei Maissorten Inra, Velox und Brillant, den bei uns am häufigsten angebauten Grasarten Wiesenschwingel (*Festuca pratensis*), Knautgras (*Dactylus glomerata*) und Weidelgras (*Lolium perenne*), sowie der beiden Leguminosen Luzerne (*Medicago sativa*) und Rotklee (*Trifolium pratense*). Bei Mais soll insbesondere der Bereich hoher Kornfeuchte untersucht werden. Die Resultate sollen mit denen anderer Verfasser verglichen werden. Zum Vergleich liegen für Gräser und Leguminosen jedoch nur wenige Ergebnisse vor [9,14].

6. Auswahl und Vorbereitung der Proben

Bei der Untersuchung biologischer Stoffe muß die Auswahl und Vorbereitung des Versuchsgutes sorgfältig durchgeführt werden. Um reproduzierbare Verhältnisse zu erhalten, wurde das Halmgut auf Versuchspartellen in Reinkultur angebaut, vor dem Schossen gemäht und auf 10 mm gehäckselt. Die Maiskolben sind von Pflanzen mit gleichem Standort geerntet und von Hand entkörnt worden, damit keine Beschädigungen an den Körnern auftreten, wie es bei der mechanischen Ernte der Fall sein kann.

Zur Bestimmung der spezifischen Wärme in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt wurden die Proben bei 20 °C getrocknet, und ihre Werte bei verschiedenen Feuchten, durch Unterbrechen der Trocknung ermittelt. Um auch Zahlen für absolut trockenes Gut zu erhalten, sind einzelne Proben im Vakuum-Trockenschrank auf $U = 0\%$ getrocknet worden.

7. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Da die Genauigkeit bei der in Punkt 3.1 beschriebenen indirekten Methode zur Bestimmung der spezifischen Wärme aus Gründen der möglichen Fehlerkumulation beim Ermitteln der physikalischen Größen nicht ausreichend erscheint und bei der Verwendung eines Phasenumwandlungskalorimeters die Temperatur in dem gewünschten Bereich nicht variiert werden kann, wurde ein Mischungskalorimeter eingesetzt.

Den Versuchsaufbau zeigt **Bild 1**. Die Versuchsanlage besteht im wesentlichen aus dem Mischungsgefäß, einem Vorwärmer, den Temperaturmeßeinrichtungen und den Umwälzthermostaten.

Der zu untersuchende Stoff wird in ein dampfdichtes Versuchsgefäß (a) eingewogen, dieses in den Vorwärmer (b) gebracht und dort auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt bzw. abgekühlt. Die Einwaage ist durch die Größe des Versuchsbehälters begrenzt und beträgt bei Mais 150 g, bei Halmgut je nach Feuchte 50 bis 100 g. Dabei lag der Hohlraumanteil ϵ für die Maisproben in der Größenordnung von 40 % und für die Halmgutproben bei 70 %.

Die Temperatur des zu untersuchenden Stoffes wird mit einem geeichten Thermometer bestimmt und, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung in der Probe zu gewährleisten, 30 Minuten konstant gehalten. Die Temperatur im Vorwärmer regelt ein Umwälzthermostat (c).

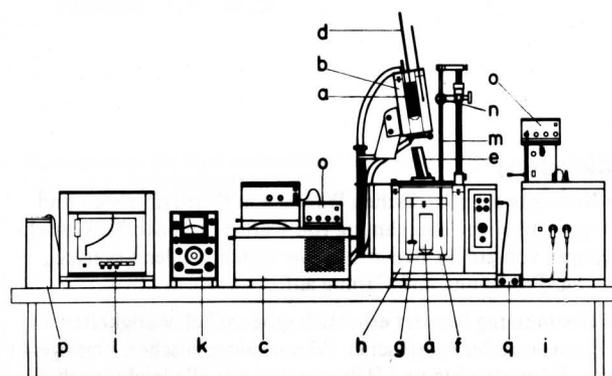


Bild 1. Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung

- | | |
|----------------------|-------------------------------|
| a Versuchsgefäß | i Umwälzthermostat 2 |
| b Vorwärmer | k Trägerfrequenzmeßverstärker |
| c Umwälzthermostat 1 | l Linienschreiber |
| d Thermometer | m Kalorimeterthermometer |
| e Rutsche | n Ableselupe |
| f Mischungsgefäß | o Thermositorregler |
| g Rührer | p Dewargefäß |
| h Kalorimetermantel | q externer Zeitgeber |

Danach wird der Versuchsbehälter aus der Halterung gelöst und gelangt über ein Rutsche (e) in das mit destilliertem Wasser gefüllte Mischungsgefäß (f). Für einen intensiven Wärmeaustausch und eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Mischungsgefäß sorgt ein magnetisch angetriebener Rührer (g).

Um die Wärmeverluste an die Umgebung gering zu halten, befindet sich das Mischungsgefäß in dem mit Wasser gefüllten Kalorimetermantel (h), der von einem Thermostaten (i) auf konstanter Temperatur gehalten wird. Durch die Regelung der Manteltemperatur kann erreicht werden, daß die Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Mischungsgefäß minimal wird. Mit dieser Methode kann auch bei Temperaturen, die stark von der Raumtemperatur

abweichen, eine hohe Meßgenauigkeit erzielt werden. Die Regelgenauigkeit der beiden Thermostaten beträgt 0,1 Kelvin.

Die Temperaturänderung der Flüssigkeit im Mischungsgefäß wird mit einem Widerstandsfühler (Pt 100) aufgenommen, mit einem Trägerfrequenzmeßverstärker (k) verstärkt und von einem Kompensations-Linienschreiber (1) registriert.

Das Ablesen der Temperatur im Mischungsgefäß sowie die laufende Kontrolle der Registriereinheit wird mit einer Ableselupe an geeichten Kalorimeterthermometern mit 1/100 K Skala durchgeführt.

Feuchtebestimmungen vor und nach den Versuchen sollten klären, ob während der Versuchsdauer Veränderungen in der Gutfeuchte auftreten. Die unzerkleinerten Maisproben und das gehäckselte Halmgut wurden 24 Stunden lang bei 105 °C getrocknet.

8. Versuchsauswertung

Die Bestimmung der spezifischen Wärme nach dem Mischungsverfahren erfordert zwei Vorversuche, um die Gerätekonstanten zu ermitteln.

Die Wärmebilanz für das Mischungsgefäß:

$$(c \cdot m + K_G) (\vartheta_a - \vartheta_e) = K_{Kal} (\vartheta_e - \vartheta_k) \quad (8)$$

zeigt den Weg dazu auf:

1. Bestimmung der Wärmekapazität K_{Kal} des Kalorimetergefäßes, durch Einbringen eines Körpers bekannter Wärmekapazität K anstelle von $(c \cdot m + K_G)$.
2. Bestimmung der Wärmekapazität K_G des leeren Probenbehälters ($c \cdot m = 0$), nachdem zuvor K_{Kal} bestimmt wurde.

Sind beide Größen mit ausreichender Genauigkeit bekannt, kann in einem weiteren Versuch die Wärmekapazität des gefüllten Probenbehälters bestimmt und daraus die spezifische Wärme des Gutes nach der Beziehung

$$c = \frac{1}{m} \left(\frac{\vartheta_e - \vartheta_k}{\vartheta_a - \vartheta_e} K_{Kal} - K_G \right) \quad (8a)$$

berechnet werden.

Für die Auswertung der Versuche ist die genaue Registrierung des Temperaturverlaufes im Kalorimeter notwendig. **Bild 2** zeigt den Temperaturanstieg im Kalorimeter in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (vielfach als Gangbeobachtung bezeichnet). In der Anlaufperiode werden die auf das Kalorimetergefäß außen einwirkenden Wärmemengen in Form von Temperaturänderungen registriert. Je kleiner die Steigung der 'Anlaufgeraden', desto geringer ist die eingebrachte oder entzogene Wärmemenge.

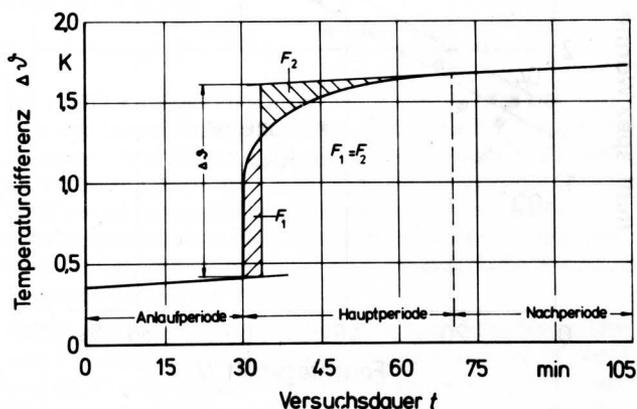


Bild 2. Temperaturverlauf (Gangbeobachtung) des Mischungskalorimeters.

Die Hauptperiode beginnt beim Einwurf des Probenkörpers mit der Temperatur ϑ_a . In diesem Augenblick muß auch die Temperatur ϑ_k der Kalorimeterflüssigkeit bekannt sein. Sie betrug bei den ausgewerteten Versuchen durchschnittlich 10 °C. Der Versuch ist beendet, wenn sich die Temperaturen von Wasser und Einwurfkörper ausgeglichen haben und der Temperaturverlauf wieder linear ist. Da die beiden linearisierten Strecken der Anlauf- und Nachperiode, in der Literatur als Gangeraden bezeichnet, nicht parallel sind, wird die Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta$ zur Bestimmung der Mischungstemperatur ϑ_e graphisch ermittelt [3,4,19].

Die beiden Ganggeraden wurden in den Bereich der Hauptperiode verlängert. Der Abstand dieser beiden Geraden gibt zu einem bestimmten Zeitpunkt die gesuchte, der zugeführten Wärmemenge proportionale Temperaturdifferenz $\Delta \vartheta = \vartheta_e - \vartheta_k$ an.

Die senkrechte Strecke, die mit der Temperaturkurve und den beiden extrapolierten Geraden gleicher Größe bildet ($F_1 = F_2$), gibt den Betrag der Temperaturänderung $\Delta \vartheta$ an. Damit sind über die Beziehung $\vartheta_e = \vartheta_k + \Delta \vartheta$ sämtliche für die Berechnung der spezifischen Wärme notwendigen Temperaturen bekannt.

9. Versuchsergebnisse und Diskussion

Wegen der besseren Vergleichsmöglichkeit mit den in der Literatur angegebenen Werten wurde die spezifische Wärme bei allen graphischen Darstellungen nicht in Abhängigkeit vom Feuchtegrad X , sondern als Funktion des Feuchtegehaltes U wiedergegeben (Bild 3 bis 8 und Tafel 1). Die in den Bildern aufgetragenen Werte stellen die mittlere spezifische Wärme im Bereich zwischen $\vartheta = 10$ °C und der jeweils angegebenen oberen Bereichsgrenze ϑ_a dar. Ebenso sind die in Tafel 1 angegebenen Gleichungen zu verstehen als Gleichungen zur Berechnung der mittleren spezifischen Wärme zwischen der Temperatur $\vartheta = 10$ °C und der jeweils genannten Temperatur ϑ_a .

Für das untersuchte Halmgut konnte statt der vorgesehenen zwei Proben temperaturen von 30 °C und 60 °C nur jeweils eine mit ausreichender Sicherheit ausgewertet werden. Wie sich bei einem Vergleich der Meßdaten herausstellte, war bei Halmgut eine besonders starke Streuung infolge der Verwendung eines Aluminiumprobenbehälters aufgetreten. Daher konnten die Meßwerte bei $\vartheta_a = 60$ °C für die Leguminosen und bei $\vartheta_a = 30$ °C für die Gräser keine Verwendung finden. Die genaue Ursache für die schwankenden Meßergebnisse beim Einsatz des Al-Behälters konnte nicht geklärt werden. Eine Wiederholung der im Al-Probenbehälter durchgeführten Versuche war im gleichen Jahr (1972) aus Mangel an Versuchsgut nicht möglich. Die in diesem Bericht aufgeführten Kenndaten beziehen sich ausschließlich auf die Verwendung von V2A-Stahl-Behältern.

In **Tafel 1** sind die aus den Meßwerten abgeleiteten Gleichungen für die untersuchten Feuchtebereiche zusammengestellt. Die Konstanten wurden durch Regressionsanalysen bestimmt, denen ein umfangreiches Datenmaterial aus dem Versuchsjahr 1972 zugrunde lag. Der Korrelationskoeffizient r stellt ein Maß für die Übereinstimmung der Messungen mit der mathematischen Funktion dar. Da die r -Werte in allen Fällen sehr nahe bei 1,0 liegen, ist eine gute Übereinstimmung zwischen Meßwert und Funktion gegeben. Die spezifische Wärme des gebundenen *) Wassers erhält man durch Einsetzen von $U = 100$ % in die Regressionsgleichung.

Bild 3 zeigt die spezifische Wärme der untersuchten Grasarten bei der Proben temperaturen $\vartheta_a = 60$ °C. Dabei ist ein Streubereich angegeben, innerhalb dessen alle Versuchswerte liegen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Grasarten lassen sich aus den Gleichungen in **Tafel 1** entnehmen.

*) Als gebundenes Wasser wird hier und im folgenden die Gesamtmenge des Wassers im Material der Probe verstanden.

Tafel 1. Gleichungen zur Berechnung der mittleren spezifischen Wärme im Bereich von $\vartheta = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $\vartheta = \vartheta_a$ als Funktion des Feuchtegehaltes U.

Versuchsgut	Art	Proben-Temperatur ϑ_a [$^{\circ}\text{C}$]	Gleichung zur Berechnung der mittleren spezifischen Wärme als Funktion des Feuchtegehaltes U c_{KU} [kJ/kg K]	Korrelationskoeffizient r	Spez. Wärme des gebundenen Wassers c_{WB} [kJ/kgK]	Gutfeuchtebereich
Gräser	Wiesenschwingel	60	$c_{\text{KU}} = 1,277 + 2,633 \cdot 10^{-2} U$	0,989	3,910	$0 \leq U \leq 85\%$
	Weidelgras		$c_{\text{KU}} = 1,277 + 2,788 \cdot 10^{-2} U$	0,982	4,065	
	Knaulgras		$c_{\text{KU}} = 1,252 + 2,826 \cdot 10^{-2} U$	0,989	4,140	
Leguminosen	Luzerne	30	$c_{\text{KU}} = 1,285 + 2,365 \cdot 10^{-2} U$	0,917	3,650	$0 \leq U \leq 90\%$
	Rotklee		$c_{\text{KU}} = 1,545 + 2,290 \cdot 10^{-2} U$	0,988	3,834	
Mais	Velox	15	$c_{\text{KU}} = 1,114 + 2,846 \cdot 10^{-2} U$	0,980	3,989	$0 \leq U \leq 50\%$
		30	$c_{\text{KU}} = 1,222 + 2,750 \cdot 10^{-2} U$	0,934	3,973	
		60	$c_{\text{KU}} = 1,294 + 3,441 \cdot 10^{-2} U$	0,989	4,734	
	Inra 258	15	$c_{\text{KU}} = 0,904 + 2,939 \cdot 10^{-2} U$	0,969	3,834	
		30	$c_{\text{KU}} = 1,193 + 2,625 \cdot 10^{-2} U$	0,970	3,818	
		60	$c_{\text{KU}} = 1,369 + 2,721 \cdot 10^{-2} U$	0,991	4,090	
	Brillant	15	$c_{\text{KU}} = 1,080 + 2,334 \cdot 10^{-2} U$	0,981	4,320	
		30	$c_{\text{KU}} = 1,122 + 3,328 \cdot 10^{-2} U$	0,993	4,450	
		60	$c_{\text{KU}} = 1,247 + 3,282 \cdot 10^{-2} U$	0,986	4,529	

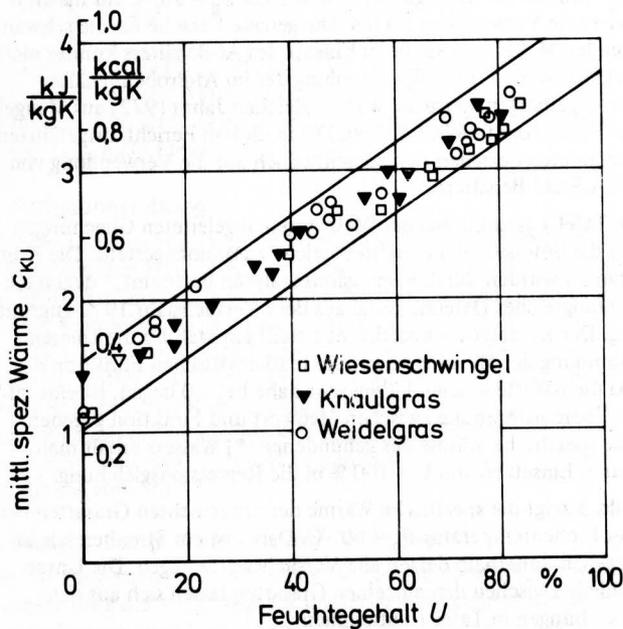


Bild 3. Mittlere spezifische Wärme ($\vartheta = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $\vartheta = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) von Wiesenschwingel, Knaul- und Weidelgras in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

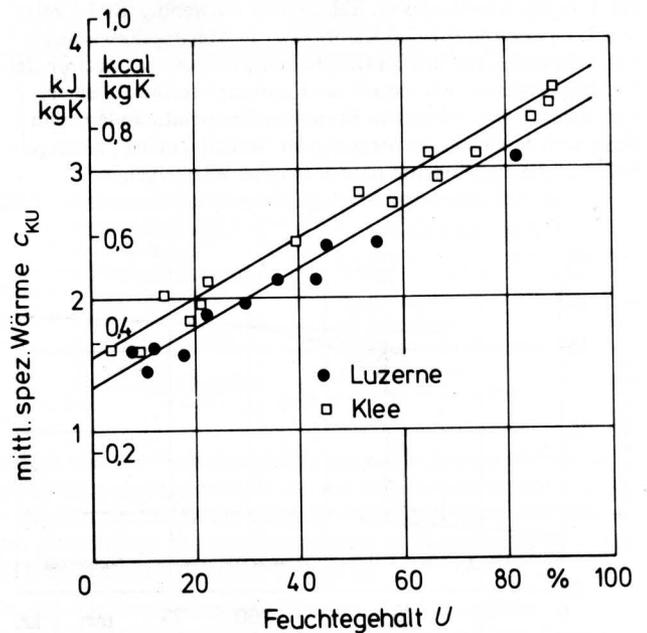


Bild 4. Mittlere spezifische Wärme ($\vartheta = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) von Luzerne und Rotklee in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

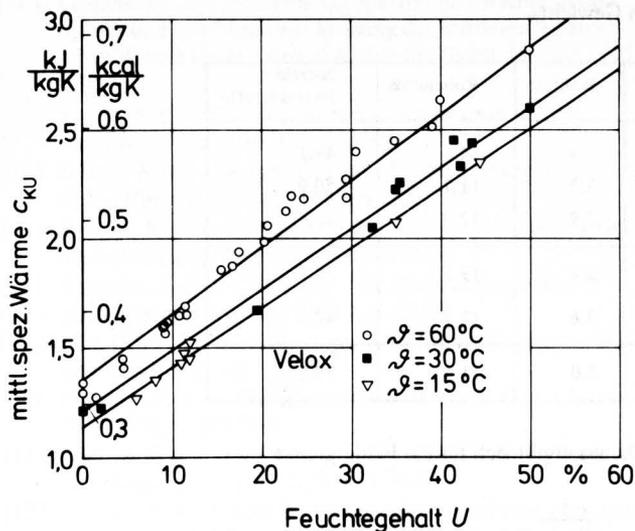


Bild 5. Mittlere spezifische Wärme von Mais (Sorte Velox) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt für die Temperaturbereiche $\vartheta = 10^\circ\text{C}$ bis $\vartheta = 60^\circ\text{C}$; $\vartheta = 10^\circ\text{C}$ bis $\vartheta = 30^\circ\text{C}$; $\vartheta = 10^\circ\text{C}$ bis $\vartheta = 15^\circ\text{C}$.

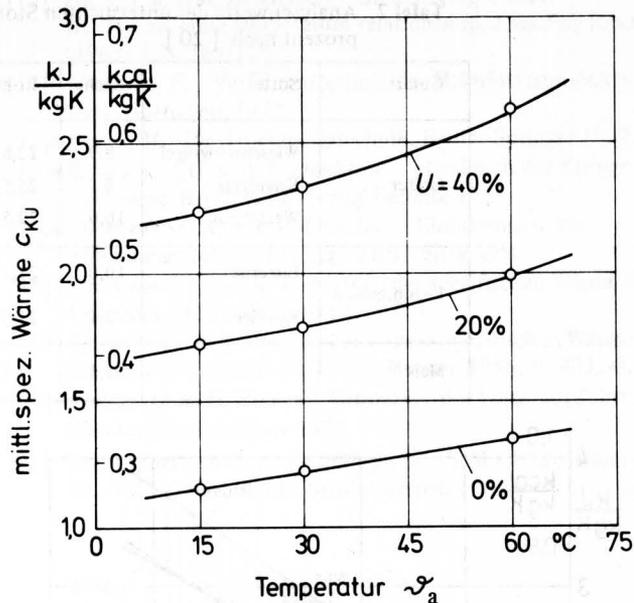


Bild 7. Mittlere spezifische Wärme von Mais (Sorte Velox) bei verschiedenen Feuchtegehalten in Abhängigkeit von der oberen Grenztemperatur.

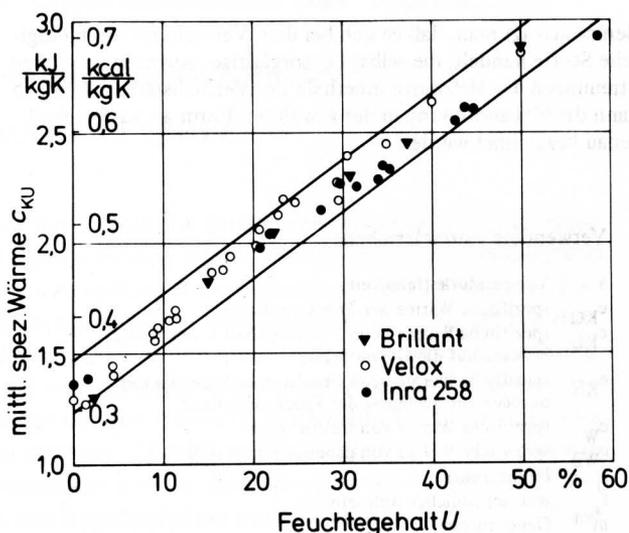


Bild 6. Mittlere spezifische Wärme ($\vartheta = 10^\circ\text{C}$ bis $\vartheta = 60^\circ\text{C}$) in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt für die Maissorten Brilliant, Velox und Inra 258.

Die in **Bild 4** dargestellten Werte für die spezifische Wärme von Klee und Luzerne weisen eindeutige Unterschiede auf, liegen aber bei einem etwas flacheren Geradenverlauf ebenfalls im Bereich der Gräser, vergleiche **Bild 8**. Die geringere Steigung der Geraden für Klee und Luzerne ist möglicherweise auf die niedrigere Versuchstemperatur als bei den Gräsern zurückzuführen. Diese Vermutung liegt nahe, da wie **Bild 7** zeigt, die spezifische Wärme mit steigender Temperatur zunimmt.

Für die Maissorte Velox ist in **Bild 5** die spezifische Wärme über dem Feuchtegehalt bei den Versuchstemperaturen 15°C , 30°C und 60°C aufgetragen. Für die Temperaturen $\vartheta_a = 15^\circ\text{C}$ und 30°C verlaufen die Ausgleichsgeraden nahezu parallel. Für die 60°C -Gerade steigen die Werte mit wachsendem Feuchtegehalt stärker an. Daraus geht hervor, daß sich bei zunehmender Versuchstemperatur nicht nur die spezifische Wärme der Trockensubstanz ändert, sondern auch die des gebundenen Wassers. Diese

Feststellung hat jedoch nur Gültigkeit, wenn keine exothermen Reaktionen im Versuchsgut aufgetreten sind und Kondensation im Probenbehälter während des Versuchs ausgeschlossen werden kann. Grundsätzlich gilt dieser Zusammenhang auch für die anderen untersuchten Maissorten, Inra und Brillant, deren Gleichungen ebenfalls in **Tafel 1** aufgeführt sind.

Bild 6 soll den geringen Unterschied der spezifischen Wärme bei den untersuchten Maissorten für die Versuchstemperatur 60°C aufzeigen. Die sortenbedingte Differenz der spezifischen Wärme liegt bei $\pm 5\%$ des Mittelwertes. Ähnlich geringe Unterschiede hat *Schäfer* [7] für zwei verschiedene Weizensorten gemessen.

Grundsätzlich wurde bei allen hier untersuchten Halmgutarten und Maissorten eine lineare Abhängigkeit der spezifischen Wärme vom Feuchtegehalt des Gutes festgestellt. *Moote* [1], *Schäfer* [7], *Kazarian* [8] und *Pfalzner* [10] kamen bei Weizen zu den gleichen Ergebnissen. Im Gegensatz dazu zeigen die von *Disney* [6] wiedergegebenen Kurven Knickpunkte auf. Aus dieser Tatsache folgert *Disney* [6] eine Abhängigkeit der spezifischen Wärme des gebundenen Wassers vom Feuchtegehalt des Gutes, die hier nicht bestätigt werden konnte.

Hinsichtlich der spezifischen Wärme von gebundenem und freiem Wasser haben *Disney* [6] und *Maltry* [2] Unterschiede festgestellt, die auch bei den eigenen Messungen aufgetreten sind. Die Werte für die spezifische Wärme von gebundenem Wasser liegen bei Leguminosen und Gräsern zwischen $3,65$ und $4,14$ kJ/kgK ($0,87$ und $0,97$ kcal/kg grad). Die von Mais können über $4,187$ kJ/kgK ($1,0$ kcal/kg grad) ansteigen. Die oben genannten Unterschiede bei den verschiedenen Fruchtarten sind wahrscheinlich durch die verschiedenartige Bindungsform begründet.

In **Bild 7** ist die Abhängigkeit der spezifischen Wärme von der Temperatur aufgetragen. Wie bereits bei **Bild 5** am Beispiel der Maissorte Velox erwähnt, nimmt die spezifische Wärme mit steigender Temperatur zu. Bei niedrigen Feuchtegehalten ($U = 20\%$) ist eine lineare Abhängigkeit zwischen spezifischer Wärme und Temperatur gegeben, d.h. differentiale und integrale spezifische Wärme sind für die Mitteltemperatur einer Temperaturspanne gleich groß. Mit zunehmendem Feuchtegehalt im Versuchsgut sind dagegen Abweichungen von der Linearität zu beobachten, die exotherme Reaktion in den Proben während der Aufheizzeit vermuten lassen.

Tafel 2. Analysenwerte der untersuchten Stoffe in Gewichtsprozent nach [20].

Gutart	Sorte	Asche	Rohfaser	Rohfett	Roheiweiß	N-freie Extraktstoffe
Gräser	Wiesenschwingel	9,9	22,8	3,4	14,6	49,1
	Knautgras	8,5	25,5	3,3	11,7	50,9
	Weidelgras	10,0	29,5	2,9	12,0	45,4
Leguminosen	Luzerne	10,0	27,7	3,2	19,5	39,5
	Rotklee	9,4	27,0	3,6	17,7	42,1
Mais		1,5	2,5	5,0	11,4	79,5

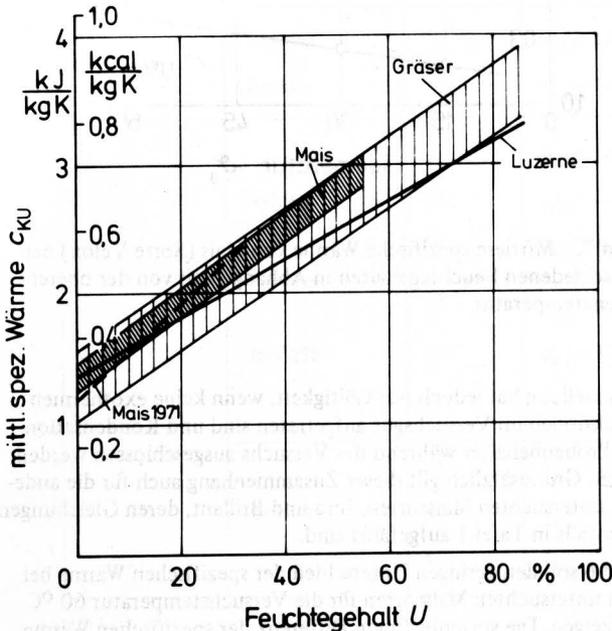


Bild 8. Mittlere spezifische Wärme in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt für die untersuchten pflanzlichen Stoffe.

Eine Zusammenfassung der Werte für die spezifische Wärme der untersuchten Halmgüter und Maissorten aus dem Versuchsjahr 1972 ist in **Bild 8** eingetragen. Zum Vergleich ist auch das Ergebnis einer Maisprobe der Sorte Inra 258 bei der Versuchstemperatur 60 °C aus dem Jahr 1971 dargestellt.

10. Fehlerbetrachtung

Zur genauen Kalibrierung der gesamten Meßanordnung wurden Kontrollversuche mit destilliertem Wasser als Versuchsgut durchgeführt. Die dabei ermittelten spezifischen Wärmen lagen zwischen 4,141 und 4,195 kJ/kgK (0,989 und 1,002 kcal/kgK) und weichen maximal 1 % von den in der Literatur angegebenen Werten ab.

Die in Gleichung (8) angeführten Gerätekonstanten K_{Kal} und K_G wurden durch je 10 Wiederholungsversuche bestimmt. Dabei ergab sich für beide Werte eine Standardabweichung von 0,6 %. Für die weiteren Meßgrößen können folgende Ablesefehler angenommen werden.

Meßgröße	Ablesegenauigkeit	rel. Fehler
ϑ_a	$\pm 0,05$ K	$f_1 = \pm 0,15$ %
ϑ_k	$\pm 0,005$ K	$f_2 = \pm 0,8$ %
$\Delta \vartheta$	$\pm 0,01$ K	$f_3 = \pm 1,5$ %
m	$\pm 0,05$ g	$f_4 = \pm 0,05$ %

Daraus ergibt sich für die Fehlergrenze

$$\sum_{n=1}^i f_i = \pm (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) = \pm 2,5 \%$$

und für den wahrscheinlichen Ablesefehler

$$f_s = \pm \sqrt{\sum_{n=1}^i f_i^2} = \pm 1,7 \%$$

Berücksichtigt man, daß es sich bei dem Versuchsgut um biologische Stoffe handelt, die selbst bei sorgfältiger Auswahl zu großen Streuungen der Meßwerte innerhalb der Versuchsreihe führen, so kann die Meßanordnung in der gewählten Form als ausreichend genau bezeichnet werden.

Verwendete Formelzeichen:

- a Temperaturleitfähigkeit
- c_{KO} spezifische Wärme der Trockensubstanz
- c_{KU} spezifische Wärme beim Feuchtegehalt U des Stoffes, bezogen auf die Gesamtmasse
- c_{KX} spezifische Wärme beim Feuchtegrad X des Stoffes, bezogen auf die Masse der Trockensubstanz
- c_W spezifische Wärme von freiem Wasser
- c_{WB} spezifische Wärme von gebundenem Wasser
- f_i Fehlergrenze
- f_s wahrscheinlicher Ablesefehler
- m Gesamtmasse
- m_S Trockenmasse
- m_W Feuchtemasse
- r Korrelationskoeffizient
- K_{Kal} Wärmekapazität des Kalorimeters
- K_G Wärmekapazität des Probenbehälters
- Q Wärmemenge
- U Feuchtegehalt
- X Feuchtegrad
- ϑ Proben temperatur
- ϑ_a Mischungsendtemperatur
- ϑ_e Badtemperatur
- $\Delta \vartheta$ Differenztemperatur
- ϵ Hohlraumanteil
- λ Wärmeleitfähigkeit
- ρ Dichte

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Moote, I.*: The effect of moisture on the thermal properties of wheat. Can.J.Techn. 31 (1953), S. 57/62.
- [2] *Maltry, W.*: Ermittlung einiger trocknungsphysikalischer Eigenschaften von Weizen und deren Auswertung in einem i, x-Trocknungsdiagramm. Diss. TU Dresden, 1961.
- [3] ● *Roth, W.A. u. F. Becker*: Kalorimetrische Methoden zur Bestimmung chemischer Reaktionswärmen. Braunschweig: Vieweg 1956

- [4] *Leidenfrost, W.*: Messung der spezifischen Wärme. Allgemeines und Verfahren zur Messung der mittleren spezifischen Wärme fester Körper. Archiv für Techn. Messen, 1955, V 9212-1.
- [5] *Babitt, E.A.*: The thermal properties of grain in bulk. Can.J.Res. F 23 (1945), S. 388/401.
- [6] *Disney, R.W.*: The specific heat of some cereal grains. Cereal Chemistry 31 (1954) 3, S. 229/234.
- [7] ● *Schäfer, W. u. L. Altrogge*: Getreidekonditionierung-Getreidetrocknung. Detmold: Schäfer 1960.
- [8] *Kazarian, E.A. u. C.W. Hall*: The thermal properties of grain. Trans. ASAE 8 (1965) 1, S. 33/38.
- [9] ● *Hall, C.W.*: Drying farm crops. Ann Arbor, Michigan: 1957. Edwards Broth, Inc..
- [10] *Pfalzner, P.M.*: The specific heat of wheat. Can.J.Techn. 29 (1951), S. 261/264.
- [11] *Muir, W.E. u. S. Viravanichai*: Specific heat of wheat. J.agr.Eng.Res. 17 (1972), S. 338/342.
- [12] *Haswell, G.A.*: A note on the specific heat of rice, oats and their products. Cereal Chemistry 31 (1954), S. 341/342.
- [13] *Pabis, S. u. S.M. Henderson*: Grain drying theory. III. The air/grain temperature relationship. J.agr.Eng.Res.6 (1961) 2, S. 169/174.
- [14] *Wienecke, F.*: Verfahrenstechnik der Halmfutterproduktion. Univ. Göttingen, 1972.
- [15] ● *Hirsch, M.*: Die Trocknungstechnik. Berlin: Springer 1932.
- [16] ● *Bekasov, A.G. u. N.T. Denissow*: Handbuch der Körner-trocknung. Berlin: VEB-Verlag Technik 1955.
- [17] ● *Filonenko, G.K. u. P.V. Lebedev*: Einführung in die Trocknungstechnik. Leipzig: VEB-Verlag 1950.
- [18] *Stöckmann, K.*: Die Bedeutung der spezifischen Wärme des Getreides. Mühle 88 (1951) 4, S. 571.
- [19] *Leidenfrost, W.*: Messung der wahren spezifischen Wärme fester Körper. Archiv für Techn. Messen, 1956, V. 9212-2.
- [20] ● *Kellner, O. u. M. Becker*: Grundzüge der Fütterungslehre. Hamburg/Berlin: Parey 1971.
- [21] Trocknungstechnische Grundbegriffe. VDMA-Einheitsblätter, Nr. 243551. Berlin: Beuth-Vertrieb 1963.

Neue Erkenntnisse bei der Entkörnung von Mais – Eigenschaften der Trennzone –

Von Ewald Graeber, Gottmadingen

DK 631.561.2 : 634.004.12

Für das technische Entkörnen, also das Dreschen oder Reibeln, von Mais ist der Abreiß- oder Trennwiderstand der Verbindung Korn-Spindel von entscheidender Bedeutung. Mit einer am Lehrstuhl für Landtechnik der Universität Hohenheim durchgeführten Untersuchung [1] wurde versucht, die biophysikalischen Zusammenhänge bei der Trennung der Verbindung Korn-Spindel zu erfassen. Es ergab sich, daß die Größe des Trennwiderstandes von der Beanspruchungsart, den physikalischen Gegebenheiten und dem durch Umwelteinflüsse, biologische Vorgänge und Erbanlagen geprägten Gutzustand abhängt.

1. Die potentiellen Trennstellen der Verbindung Korn-Spindel

Unter sonst gleichen Bedingungen sind Abmessungen und Form der Verbindung zwischen Korn und Spindel maßgebend für den Trennvorgang. Der Gewebestrang zwischen Korn und Spindel kann kurz und dick, oder lang und schlank sein. *Brown* [2] weist bereits darauf hin, daß Körner an einem langen schlanken Gewebestrang leichter zu dreschen sind als solche an einem kurzen dicken.

Dipl.-Ing. Ewald Graeber ist bei der Fa. Maschinenfabrik Fahr, Gottmadingen, tätig. Die vorliegende Arbeit wurde am Lehrstuhl für Landtechnik der Universität Hohenheim (Prof.Dr.-Ing. G. Segler) mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft durchgeführt.

Betrachtet man gedroschene Körner, so stellt man im wesentlichen zwei Arten in der Ausbildung der Trennfläche fest, **Bild 1**. Eine genauere Untersuchung fördert zwei durch Querschnittsverminderung und eine Art Kerbwirkung bedingte Schwächezonen als potentielle Trennstellen der Verbindung Korn-Spindel zutage. Eine erste Zone bildet der Übergang vom Gewebestrang zum Korn, eine zweite der Übergang zur Spindel.

Bei einer Trennung im Bereich der ersten Zone bleibt der Strang meist ganz an der Spindel zurück und es tritt der untere, durch eine Trennschicht dunkelgefärbte Abschnitt des Keimes hervor, umgeben von einem ringförmigen Abbruch der etwa 0,05 mm starken Samenschale.

Bei der Trennung in der zweiten Zone (am Übergang zur Spindel) verbleibt ein Teil des Gewebestranges am Korn, der Keim wird so vor mechanischer Beschädigung und vor dem Eindringen von Bakterien oder Pilzen geschützt. Der Strang hemmt und filtert zutretendes Wasser, behindert jedoch auch den Stoffaustausch bei der Trocknung. Der Kornertrag liegt bis zu 0,7 % hö-

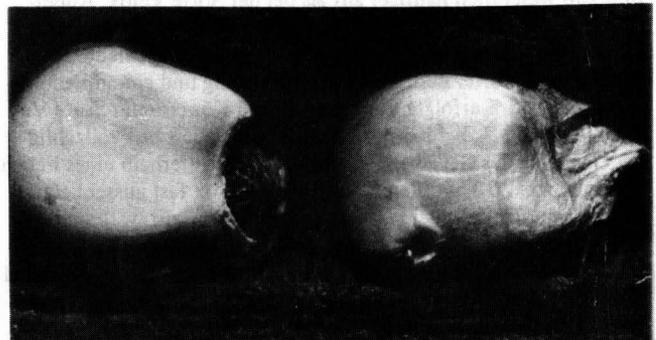


Bild 1. Unterschiedlich ausgebildete Trennstellen an Körnern.