

Die spezifische Wärme von Körnerfrüchten

Von Werner Mühlbauer und Reinhold Scherer,
Stuttgart-Hohenheim*)

Mitteilung aus dem Sonderforschungsbereich 140 – Landtechnik "Verfahrenstechnik der Körnerfruchtproduktion" der Universität Hohenheim

DK 536.63:633.1.004.12

Die Berechnung von gekoppelten Wärme- und Stoffaustauschvorgängen, wie sie bei der Trocknung, Kühlung, Konditionierung, Gärung und Lagerung von Körnerfrüchten auftreten, ist nur dann mit ausreichender Genauigkeit möglich, wenn deren thermische und mechanische Stoffkennwerte bekannt sind. In einer systematischen Untersuchung wird die spezifische Wärme von Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Raps und Mais in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt der Körner, von der Temperatur und von der Sorte mit einem Mischungs-kalorimeter bestimmt und der Zusammenhang zwischen der spezifischen Wärme und dem Feuchtegehalt der Körner formelmäßig dargestellt. In einer theoretischen Betrachtung wird die Mischungsregel auf ihre Anwendbarkeit zur Berechnung der spezifischen Wärme von Körnerfrüchten überprüft. Ausführlich wird auf die spezifische Wärme des gebundenen Wassers bei Körnerfrüchten eingegangen.

1. Einleitung

Die analytische Behandlung von Wärme- und Stoffaustauschvorgängen, wie sie bei der Trocknung, Kühlung, Konditionierung und Lagerung von Körnerfrüchten auftreten, führt zu Systemen von Differentialgleichungen, deren Lösung bislang nur für spezielle Anfangs- und Randbedingungen möglich ist [1 bis 3]. Eine Optimierung der Anlagen für die Konservierung, Konditionierung und Lagerung im Hinblick auf Leistung, Energiebedarf und Qualität des Gutes darf sich nicht nur auf die Lösung der thermodynamischen Aufgabenstellung beschränken, sondern es müssen auch die je nach Konservierungsart auftretenden qualitativen und quantitativen Veränderungen der Inhaltsstoffe der Körnerfrüchte in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Die thermodynamischen und biologischen Vorgänge sind nur dann mit ausreichender Genauigkeit rechnerisch zu erfassen, wenn die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Körnerfrüchte wie Kornabmessungen, Korndichte, Schüttdichte, spezifische Wärme, Atmungswärme, Wärme- und Temperaturleitfähigkeit, Bindungswärme und Gleichgewichtsfeuchtegrad bekannt sind.

Besondere Bedeutung kommt dabei der spezifischen Wärme zu. Sowohl zur Berechnung von Enthalpiewerten bei der Aufstellung von Energiebilanzen als auch zur Bestimmung der Bindungs- und Atmungswärme sowie der Korntemperatur muß ihr zahlenmäßiger Wert vorliegen. Weiter kann bei bekannter spezifischer Wärme der Wirkungsgrad von Maschinen zum Zerkleinern von Körnerfrüchten berechnet werden [4].

Wie bei allen inhomogenen organischen Stoffen ist es auch bei den Körnerfrüchten recht schwierig repräsentative Werte zu ermitteln, da morphologischer Aufbau und chemische Zusammensetzung von der Bodenbeschaffenheit, der Düngung, vom Standort, von den klimatischen Verhältnissen innerhalb eines Vegetationszeitraums und von einer Reihe weiterer Faktoren abhängen. Für die quantitative Bestimmung wirkt sich erschwerend aus, daß die Feuchte an den festen Stoff in unterschiedlicher Form gebunden ist und daß insbesondere bei feuchten Körnern exotherme Reaktionen während der Versuchsdauer auftreten können, die von Atmungsreaktionen und der Tätigkeit von Mikroorganismen herrühren.

Die Verfasser danken der landwirtschaftlich-technischen Assistentin Fräulein Dorothe Dörner für die sorgfältige Durchführung der Messungen.

*) Dr.-Ing. Werner Mühlbauer ist Obergeringieur am Institut für Agrartechnik, Dipl.-Ing. Reinhold Scherer wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 140 (Fachgebiet: Grundlagen der Landtechnik, Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Heinz Dieter Kutzbach) der Universität Hohenheim.

Gutart	Art, Sorte	Untersuchter Bereich			Mathematische Beziehung	Bestimmungsmethode	Verfasser
		Feuchtegehalt U %	Korntemperatur ϑ °C	spez. Wärme c kJ/kg K			
Weizen	Hard Wheat	9,2	25–50	1,55		indirekt	<i>Babbitt</i> [5]
Weizen	Northern Grade	0 –16	2–20	1,21–1,76	$c = 1,21 + 0,035 U$	Mischungs-kalorimeter	<i>Pfalzner</i> [6]
Weizen	Northern Manitoba	1,4–13,7		1,34–1,93		indirekt	<i>Moote</i> [7]
Weizen	Northern Manitoba	1,3–17,5	0	1,30–1,87	$c = 1,10 + 0,043 U$	Eiskalorimeter	<i>Disney</i> [8]
Weizen	Carsten V	0 –20	20–70	1,13–2,22	$c = 0,075 + 0,046 U + 0,0084 \vartheta$	Mischungs-kalorimeter	<i>Schäfer</i> [9]
Weizen	Rimpaus Bastard II	4,8–14	20–22	1,48–1,81		Mischungs-kalorimeter	<i>Maltry</i> [10]
Weizen	Soft White Wheat	0,7–20,3	10–32	1,45–2,19	$c = 1,4 + 0,041 U$	Mischungs-kalorimeter	<i>Kazarian</i> [11]
Weizen	Spring Manitou	0,6–29,6	-34 bis+22	1,09–4,1		Mischungs-kalorimeter	<i>Muir</i> [12]
Mais	Yellow Dent				$c = 2,03 + 0,042 U$		<i>Pabis</i> [13]
Mais	Yellow Dent	0,9–30,2	10–30	1,53–2,46	$c = 1,47 + 0,036 U$	Mischungs-kalorimeter	<i>Kazarian</i> [11]
Mais	Inra 258	0 –60	15–60	0,90–3,02	$c = 1,37 + 0,027 U$	Mischungs-kalorimeter	<i>Koschatzky</i> [14]
Gerste	Malting Barley	9,4–16,5	0	1,50–1,83		Eiskalorimeter	<i>Disney</i> [8]
Hafer	Sun II	11,7–17,8	0	1,66–1,86	$c = 1,28 + 0,033 U$	Eiskalorimeter	<i>Haswell</i> [15]
Reis	Long Rice	10,2–17	0	1,58–1,88	$c = 1,12 + 0,045 U$	Eiskalorimeter	<i>Haswell</i> [15]
Reis	Saturn	12 –20		1,66–1,98	$c = 0,92 + 0,054 U$	Mischungs-kalorimeter	<i>Wratten</i> [16]

Tafel 1. Übersicht über bisherige Untersuchungen zur Bestimmung der spezifischen Wärme von Körnerfrüchten.

2. Bisherige Arbeiten

Experimentelle Untersuchungen über die spez. Wärme von Körnerfrüchten liegen von verschiedenen Autoren vor [5 bis 16]. Eine Zusammenstellung zeigt **Tafel 1**.

Die in der Literatur für die spezifische Wärme von Weizen [5 bis 12] und Mais [11, 13, 14] angegebenen Werte differieren zum Teil sehr stark, so daß eine Überprüfung der Werte notwendig ist. *Disney* [8] und *Maltry* [10] fanden bei Weizen unterschiedliche Werte für die spezifische Wärme des freien und des gebundenen Wassers. Nach *Disney* [8] ist die spezifische Wärme von Weizen nicht im gesamten Feuchtebereich eine lineare Funktion des Feuchtegehalts, sondern es treten 3 Knickpunkte auf, die er auf den Einfluß der unterschiedlichen Feuchtebindung zurückführt. *Disney* gibt Werte für die spezifische Wärme der gebundenen Feuchte an, die zwischen -0,40 und 5,20 kJ/kg K liegen, wobei der Wert -0,40 kJ/kg K physikalisch nicht gedeutet werden kann. Die von *Disney* angegebenen 3 Knickpunkte sind statistisch jedoch nicht gesichert. Eine mit seinen Werten durchgeführte Regressionsanalyse mit linearem Ansatz ergab einen Korrelationskoeffizienten von 0,998. Vom statistischen Standpunkt aus besteht damit ein linearer Zusammenhang zwischen der spezifischen Wärme und dem Feuchtegehalt der Körner über den gesamten Feuchtebereich. *Koschatzky* [14] geht bei der Untersuchung der spezifischen Wärme von Mais davon aus, daß die spezifische Wärme der gebundenen Feuchte über den gesamten Feuchtebereich konstant ist, eine Annahme, die nach Untersuchungen von *Riedel* [17 bis 19] an Lebensmitteln nicht zutreffend ist.

3. Aufgabenstellung

Ziel der Untersuchung ist die experimentelle Bestimmung der spezifischen Wärme von Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Raps und Mais in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt der Körner, wobei die Kornfeuchte bei Ährengetreide im Bereich $0 \leq U \leq 30\%$ und bei Mais zwischen $0 \leq U \leq 45\%$ variiert werden soll. Oberhalb dieses Feuchtebereichs ist eine Untersuchung wenig sinnvoll, da hier die physiologische Reife der Körner noch nicht erreicht und damit auch die Nährstoffeinlagerung nicht abgeschlossen ist. Weiter soll der Einfluß der Temperatur und der Kornsorte auf die spezifische Wärme geklärt werden. Die Ergebnisse sollen formelmäßig dargestellt und mit denen anderer Verfasser verglichen werden. In einer theoretischen Untersuchung soll die Mischungsregel auf ihre Anwendbarkeit zur Berechnung der spezifischen Wärme von Körnerfrüchten hin überprüft und die Genauigkeit dieses Näherungsverfahrens bestimmt werden. Da die in der Literatur angegebenen Werte der spezifischen Wärme für die Kornbestandteile Stärke, Protein, Fett usw. stark differieren, sind eigene Messungen erforderlich.

Weiter soll geklärt werden, inwieweit die von *Disney* [8] und *Maltry* [10] angegebenen Werte für die spezifische Wärme des gebundenen Wassers gesichert sind.

Über erste Ergebnisse von bereits früher am Institut für Agrartechnik durchgeführten Untersuchungen zur Bestimmung der spezifischen Wärme von Mais wurde von *Koschatzky* [14] berichtet. Im folgenden werden die Ergebnisse der sich hieran anschließenden Untersuchungen der Verfasser zusammengestellt. Auf methodische Grundlagen sowie Versuchsaufbau- und Versuchsdurchführung wird nur soweit eingegangen, wie dies für das bessere Verständnis notwendig ist.

4. Theoretische Grundlagen

Die spezifische Wärme oder Wärmekapazität ist eine Stoffeigenschaft, die angibt, welche Wärmemenge erforderlich ist, um 1 Kilogramm eines Stoffes um 1 Grad zu erwärmen, sofern im untersuchten Temperaturbereich keine Phasenumwandlung stattfindet.

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

Da die spezifische Wärme sich mit der Temperatur ändert, kann für größere Temperaturbereiche nur die mittlere spezifische Wärme zwischen einer unteren und einer oberen Bereichsgrenze angegeben werden.

Die Feuchte liegt in Körnerfrüchten sowohl in freier als auch in gebundener Form vor, wobei der Anteil der gebundenen Feuchte an der gesamten im Korn enthaltenen Feuchte mit zunehmendem Feuchtegehalt abnimmt. Die gebundene Feuchte friert im Gegensatz zur freien Feuchte bei tiefen Temperaturen nicht aus und benötigt zum Verdampfen infolge der zusätzlich erforderlichen Bindungswärme einen höheren Energiebedarf. Die spezifische Wärme der gebundenen Feuchte c_B ist aufgrund einer Verminderung der Bewegungsfreiheit der Wassermoleküle (Translation, Rotation) durch die Bindung an Kohlenhydrate und Proteine kleiner als die der freien Feuchte c_W .

Die experimentelle Bestimmung des Anteils der gebundenen Feuchte an der gesamten im Korn enthaltenen Feuchte mittels Kernresonanz-Spektroskopie oder nach einer von *Riedel* [17] entwickelten kalorimetrischen Methode ist mit erheblichem Aufwand verbunden. Für eine näherungsweise Berechnung genügt es, die maximal an Proteine und Kohlenhydrate bindbaren Feuchtemengen additiv zu bestimmen. Nach *Riedel* [18, 19] können bei der Feuchte-Protein-Bindung 0,4 kg Wasser an 1 kg Protein, bei der Feuchte-Kohlenhydrat-Bindung 0,3 kg Wasser an 1 kg Kohlenhydrate maximal gebunden werden.

Gutart	Kohlenhydrate	Rohprotein	Rohfett	Rohfaser	Asche
Weizen	79,0	14,0	2,0	2,5	2,5
Roggen	80,0	13,0	2,0	2,5	2,5
Hafer	67,0	13,0	5,5	11,0	3,5
Gerste	79,0	12,0	2,5	4,0	2,5
Reis	88,0	8,0	1,5	1,0	1,5
Mais	79,0	12,0	5,0	2,5	1,5
Raps	19,0	22,5	45,0	9,0	4,5
Ackerbohnen	56,0	30,0	2,0	8,0	4,0

Tafel 2. Zusammensetzung von Körnerfrüchten nach der Weender-Analyse (in Prozent) [20, 21].

Mit den von *Riedel* [18, 19] angegebenen Werten und den Protein- und Kohlenhydratgehalten für die verschiedenen Körnerfrüchte aus Tafel 2 kann die maximal an 1 kg Trockenmasse bindbare Feuchte berechnet werden, siehe Tafel 3. In Tafel 3 sind zusätzlich die Grenzfeuchtegehalte zusammengestellt. Als Grenzfeuchtegehalt wird der Feuchtegehalt definiert, bis zu dem die gesamte im Korn enthaltene Feuchte in gebundener Form vorliegt. Eine andere Möglichkeit der Bestimmung des Grenzfeuchtegehalts von Körnerfrüchten besteht darin, die Bindungswärme aus den Sorptionsisothermen zu berechnen [22].

Gutart	gebundene Feuchtemasse m_B kg/kg	Grenzfeuchtegehalt U_G %
Weizen	0,293	22,7
Roggen	0,292	22,6
Hafer	0,246	19,7
Gerste	0,285	22,2
Mais	0,285	22,2
Raps	0,147	12,8
Ackerbohnen	0,288	22,4

Tafel 3. Berechnete Feuchtemasse m_B , die maximal an 1 kg Trockenmasse gebunden werden kann, und Grenzfeuchtegehalt U_G bei verschiedenen Körnerfrüchten.

In Bild 1 ist die Bindungswärme des Wassers in Maiskörnern in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt für zwei verschiedene Temperaturen dargestellt. Aus dem Bild ist ersichtlich, daß oberhalb $U = 22\%$ die Bindungswärme gegen Null strebt, das bedeutet, daß die Feuchte oberhalb $U = 22\%$ überwiegend in freier Form vorliegt. Dies bestätigt die Annahme, daß die von *Riedel* [18, 19] angegebenen Werte für die Protein-Wasser- bzw. Kohlenhydrat-Wasser-Bindung bei Lebensmitteln auch mit guter Näherung auf Körnerfrüchte übertragen werden können, vgl. Tafel 3.

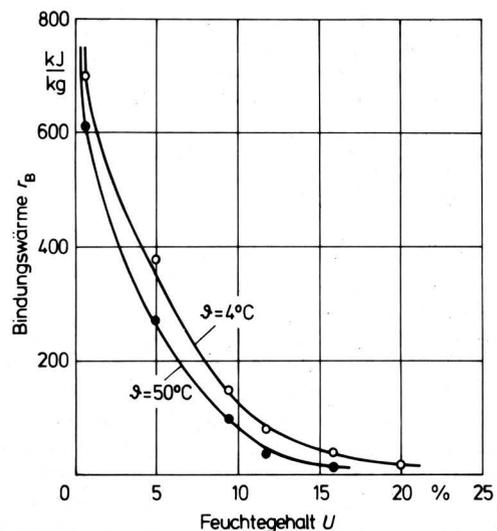


Bild 1. Bindungswärme des Wassers in Maiskörnern in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt nach [22].

Bei feuchten Stoffen kann die spezifische Wärme sowohl auf die Trockenmasse m_S als auch auf die Gesamtmasse ($m_W + m_S$) bezogen werden

$$c_{KX} = \frac{1}{m_S} \frac{dQ}{d\vartheta} \quad (2)$$

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

Dividiert man Gl. (2) durch Gl. (3) und bezeichnet das Verhältnis von Feuchtemasse m_W zur Trockenmasse m_S , wie in der Trocknungstechnik üblich, als Feuchtegrad X , so ergibt sich zwischen c_{KX} und c_{KU} folgender Zusammenhang:

$$c_{KX} = c_{KU} (1 + X) \quad (4)$$

Um den bei der experimentellen Bestimmung der spezifischen Wärme notwendigen Zeitaufwand zu umgehen, wurde verschiedentlich versucht, die spezifische Wärme c_{K0} der Trockenmasse nach der Mischungsregel als Summe der Produkte aus den Massenanteilen ξ_i des Stoffgemisches und den spezifischen Wärmen c_i der einzelnen Bestandteile theoretisch zu bestimmen:

$$c_{K0} = \sum \xi_i c_i \quad (5)$$

Nimmt man an, daß die gesamte im Korn enthaltene Feuchte in freier Form vorliegt, so kann die spezifische Wärme der feuchten Körner c_{KX} bezogen auf die Trockenmasse aus der spezifischen Wärme der Trockenmasse c_{K0} und aus dem Produkt von spezifischer Wärme des freien Wassers c_W und Feuchtegrad X rechnerisch ermittelt werden:

$$c_{KX} = c_{K0} + c_W X \quad (6)$$

In der Praxis ist es üblich, den Feuchtegehalt U eines Stoffes als Verhältnis der Feuchtemasse zur Gesamtmasse anzugeben. Setzt man in Gl. (6) für den Feuchtegrad

$$X = \frac{U}{100 - U} \quad (7)$$

und für $c_{KX} = c_{KU} (1 + X)$ nach Gl. (4) ein, so besteht zwischen der spezifischen Wärme c_{KU} bezogen auf die Gesamtmasse und dem Feuchtegehalt U folgender Zusammenhang

$$c_{KU} = c_{K0} + (c_W - c_{K0}) U \cdot 10^{-2} \quad (8)$$

Wie Gl. (8) zeigt, besteht zwischen der spezifischen Wärme bezogen auf die Gesamtmasse und dem Feuchtegehalt U eine lineare Abhängigkeit unter der Voraussetzung, daß die oben getroffenen Annahmen zulässig sind.

Die spezifische Wärme würde dann, ausgehend von der spezifischen Wärme c_{K0} der Trockenmasse bei $U = 0$ linear auf den Wert der freien Feuchte c_W bei $U = 100\%$ ansteigen, siehe Gerade a in Bild 2.

Durch die Bindung des Wassers an Proteine und Kohlenhydrate liegt die gesamte Feuchte unterhalb des Grenzfeuchtegehalts U_G bei Körnerfrüchten in gebundener Form vor. Nach Riedel [19] müßte deshalb im Bereich $0 \leq U \leq U_G$ ein linearer Zusammenhang zwischen der spezifischen Wärme und dem Feuchtegehalt bestehen, wobei infolge der geringeren spezifischen Wärme der gebundenen Feuchte die Gerade b, Bild 2, eine geringere Steigung haben müßte als die nach der Mischungsregel berechnete Gerade a. Verlängert man die Gerade b über den Grenzfeuchtegehalt hinaus, so ergibt sich beim Feuchtegehalt $U = 100\%$ der Wert der spezifischen Wärme der gebundenen Feuchte c_B . Im einfachsten Fall, wenn oberhalb des Grenzfeuchtegehalts die gesamte Feuchte in freier Form vorliegt, ergibt sich für den Verlauf der spezifischen Wärme die Gerade c, Bild 2. Da bei Körnerfrüchten oberhalb des Grenzfeuchtegehalts die Feuchte sowohl in gebundener als auch

in freier Form vorliegt und der Anteil der gebundenen Feuchte an der Gesamtfeuchte mit zunehmendem Feuchtegehalt geringer wird, müßte sich theoretisch der in Bild 2 gestrichelt eingezeichnete Kurvenverlauf ergeben.

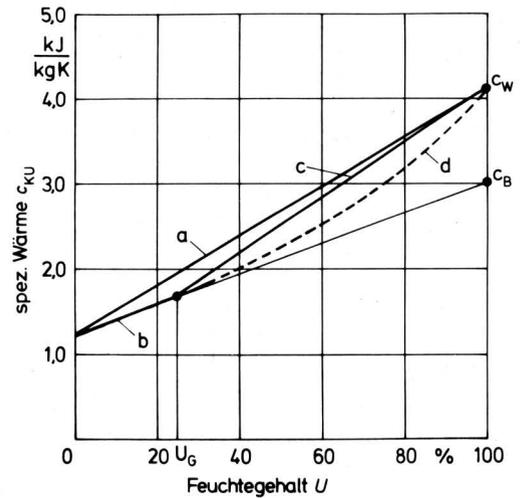


Bild 2. Theoretischer Verlauf der spezifischen Wärme von Körnerfrüchten in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt (nach Riedel [19] geändert).

Die spezifische Wärme von Körnerfrüchten hängt neben dem Feuchtegehalt der Körner auch von der Temperatur und der Sorte ab. Die Temperatur kann die spezifische Wärme dadurch beeinflussen, daß zwischen den Molekülkomplexen eine Änderung der Bindung stattfindet und die potentielle Energie der Einzelbestandteile dadurch erhöht wird. Die spezifische Wärme nimmt daher mit steigender Temperatur zu.

Ein Einfluß der Sorte auf die spezifische Wärme ist nur dann zu erwarten, wenn die chemische Zusammensetzung der Körner bei den verschiedenen Sorten erheblich differiert, da die Inhaltsstoffe von Körnerfrüchten unterschiedliche spezifische Wärmen aufweisen.

5. Versuchsaufbau, -durchführung und -auswertung

Die verschiedenen Verfahren zur Messung der spezifischen Wärme im Hinblick auf ihre Eignung für Körnerfrüchte wurden bereits von Koschatzky [14] ausführlich diskutiert. Dabei zeigte es sich, daß für Körnerfrüchte das Verhältnis von meßtechnischem Aufwand und Meßgenauigkeit bei der Bestimmung mit einem Mischungskalorimeter am günstigsten ist. Die Versuchstemperatur kann über einen ausreichenden Bereich variiert werden und exotherme Reaktionen und Feuchtebewegungen innerhalb der Körnerschüttung können in ihrem Einfluß auf das Meßergebnis aufgrund der kurzen Meßzeiten minimal gehalten werden.

Bei dem Mischungsverfahren wird das Versuchsgut erwärmt und anschließend mit einer Flüssigkeit mit bekannter Wärmekapazität in Berührung gebracht und die sich einstellende Mischungstemperatur gemessen.

Die spezifische Wärme des Versuchsgutes kann aus der Wärmebilanz nach der Beziehung

$$c = \frac{1}{m} \left(\frac{\vartheta_m - \vartheta_2}{\vartheta_1 - \vartheta_m} K_{Kal} - K_G \right) \quad (9)$$

berechnet werden. Die Gerätekonstanten K_{Kal} und K_G müssen in zwei Vorversuchen ermittelt werden. Zuerst wird die Wärmekapazität des Kalorimetergefäßes K_{Kal} durch Einbringen eines Stoffes bekannter Wärmekapazität in das Mischungsgefäß bestimmt. An-

schließlich ermittelt man die Wärmekapazität des Versuchsbehälters K_G . Die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = \vartheta_m - \vartheta_2$ wird graphisch nach den in [23, 24] ausführlich beschriebenen Methoden der Kalorimetrie ermittelt. Das Verhältnis der Massen von Versuchsgut und Kalorimetersubstanz ist so zu wählen, daß der Temperaturanstieg der Kalorimetersubstanz im Mischungsgefäß zwischen 1 und 3 Grad beträgt, da in diesem Bereich die höchste Meßgenauigkeit erzielt werden kann [23]. Bei der gewählten Meßanordnung zur Bestimmung der spezifischen Wärme können bei der Messung der einzelnen Größen folgende maximale absolute Fehler auftreten:

Masse des Versuchsgutes	$\Delta m = \pm 0,0005 \text{ kg}$
Obere Grenztemperatur (Korntemperatur)	$\Delta\vartheta_1 = \pm 0,05 \text{ K}$
Untere Grenztemperatur (Wasserbadtemperatur)	$\Delta\vartheta_2 = \pm 0,005 \text{ K}$
Mischungstemperatur	$\Delta\vartheta_m = \pm 0,01 \text{ K}$
Wärmekapazität des Kalorimeters	$\Delta K_{\text{Kal}} = \pm 0,04 \text{ kJ/K}$
Wärmekapazität des Versuchsbehälters	$\Delta K_G = \pm 0,0006 \text{ kJ/K}$

Bildet man das totale Differential der Gl. (9), so kann damit unter Verwendung der Daten für die maximalen Fehler der Variablen der maximale absolute Fehler zu $\Delta c = \pm 0,026$ und der maximale relative Fehler zu $\Delta c/c = 5\%$ berechnet werden. Berücksichtigt man, daß es sich bei dem Versuchsgut um biologische Stoffe handelt, deren morphologischer Aufbau und chemische Zusammensetzung starken Schwankungen unterworfen sind, so ist die Meßanordnung in der gewählten Form als ausreichend genau zu bezeichnen. Kontrollversuche mit destilliertem Wasser als Versuchsgut ergaben Werte für die spezifische Wärme, die maximal um 1% von den in der Literatur angegebenen Werten abweichen. Eine weitere Verbesserung der Meßgenauigkeit ist nur durch einen erheblich höheren meßtechnischen Aufwand zu erreichen, der allerdings bei der vorliegenden Fragestellung nicht gerechtfertigt erscheint.

6. Versuchsergebnisse

In **Bild 3 bis 9** sind die experimentell ermittelten Werte für die mittlere spezifische Wärme von Weizen, Roggen, Hafer, Gerste, Mais, Raps und Ackerbohnen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt der Körner aufgetragen. Die Werte gelten für den Temperaturbereich zwischen 10 und 50 °C mit Ausnahme der in **Bild 7** dargestellten Ergebnisse von *Koschitzky* [14], denen die Temperaturspanne 10 bis 60 °C zugrunde liegt. Die Streuung der einzelnen Meßwerte ist sowohl auf die Meßgenauigkeit der Versuchseinrichtung als auch auf Unterschiede im Versuchsmaterial zurückzuführen, wie dies bei biologischen Stoffen stets der Fall ist. Die Untersuchung beschränkte sich mit Ausnahme von Mais und Raps auf den Feuchtebereich unterhalb des in **Tafel 3** angegebenen Grenzfeuchtegehaltes, in dem nach den theoretischen Überlegungen ein linearer Zusammenhang zwischen der mittleren spezifischen Wärme und dem Feuchtegehalt angenommen werden kann. Berechnet man mittels Regressionsanalyse die Konstanten der Geradengleichung, so ergeben sich für die verschiedenen Körnerfrüchte die in **Tafel 4** zusammengestellten Gleichungen. Da die Korrelationskoeffizienten nahe beim Idealwert 1,0 liegen, besteht vom statistischen Standpunkt aus eine gute Übereinstimmung zwischen den Gleichungen und den Meßwerten.

Extrapoliert man die experimentell ermittelten Werte über den untersuchten Feuchtebereich hinaus, so ergeben sich für die spezifische Wärme beim Feuchtegehalt $U = 100\%$ Werte von 4,91 bis 5,03 kJ/kg K, die erheblich höher liegen als die des freien Wassers ($c_w = 4,186 \text{ kJ/kg K}$). Der Unterschied zu den theoretisch erwarteten Werten, die unterhalb derjenigen für das freie Wasser liegen müßten, läßt sich damit erklären, daß sich im untersuchten Temperaturbereich zwischen 10 und 50 °C die Protein-Wasser- bzw. Kohlenhydrat-Wasser-Bindung mit steigender Temperatur zunehmend lockert und zusätzlich zur Wärmemenge zur Erhöhung der Translations- und Rotationsenergie ein Wärmeanteil für die Lösung der Wasserbindung aufgebracht werden muß [19]. Die Genauigkeit der in **Tafel 4** zusammengestellten Gleichungen ist für

die Berechnung von Wärme- und Stoffaustauschvorgängen, wie sie bei der Trocknung, Kühlung und Lagerung von Körnerfrüchten auftreten, ausreichend. Eine Extrapolation über den untersuchten Feuchtebereich hinaus ist nicht zulässig, da bei Körnerfrüchten oberhalb des in **Tafel 4** angegebenen Feuchtebereichs die Nährstoffeinlagerung noch nicht abgeschlossen ist.

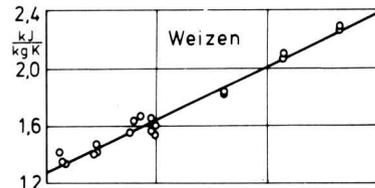


Bild 3.

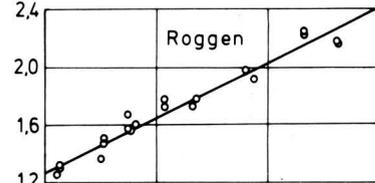


Bild 4.

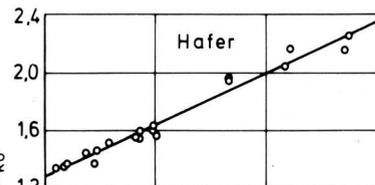


Bild 5.

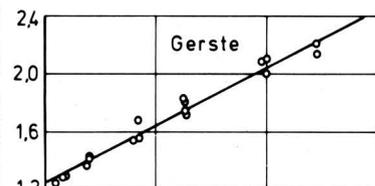


Bild 6.

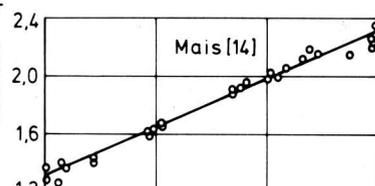


Bild 7.

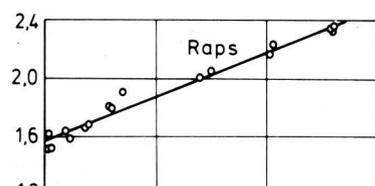


Bild 8.

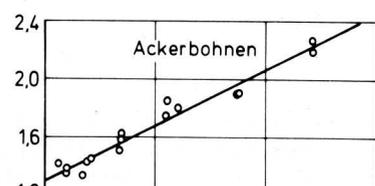


Bild 9.

Bild 3 bis 9. Mittlere spezifische Wärme von Weizen, Roggen, Hafer, Gerste, Mais, Raps und Ackerbohnen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Gutes. Temperaturbereich 10 bis 50 °C, für **Bild 7** 10 bis 60 °C [14]. Die eingezeichneten Geraden wurden durch Regressionsanalyse bestimmt.

Versuchsgut	Sorte	Gleichung zur Berechnung der mittleren spezifischen Wärme	Korrelationskoeffizient	Temperaturbereich	Gutfeuchtebereich
		kJ/kg K		°C	%
Weizen	Caribo	$c_{KU} = 1,276 + 3,64 \cdot 10^{-2} U$	0,984	$\vartheta_1 = 50; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 27$
Roggen	Tero	$c_{KU} = 1,272 + 3,76 \cdot 10^{-2} U$	0,977	$\vartheta_1 = 50; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 27$
Gerste	Carina	$c_{KU} = 1,245 + 3,97 \cdot 10^{-2} U$	0,987	$\vartheta_1 = 50; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 25$
Hafer	Tiger	$c_{KU} = 1,282 + 3,55 \cdot 10^{-2} U$	0,985	$\vartheta_1 = 50; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 29$
Raps	Zollerngold	$c_{KU} = 1,553 + 2,88 \cdot 10^{-2} U$	0,968	$\vartheta_1 = 50; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 27$
	Rapol	$c_{KU} = 1,569 + 3,01 \cdot 10^{-2} U$	0,987	$\vartheta_1 = 50; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 26$
Mais ¹⁾	Velox	$c_{KU} = 1,294 + 3,44 \cdot 10^{-2} U$	0,989	$\vartheta_1 = 60; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 50$
	Brillant	$c_{KU} = 1,247 + 3,28 \cdot 10^{-2} U$	0,986	$\vartheta_1 = 60; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 50$
	Inrakorn	$c_{KU} = 1,369 + 2,72 \cdot 10^{-2} U$	0,991	$\vartheta_1 = 60; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 60$
Ackerbohnen	Herz Freya	$c_{KU} = 1,293 + 3,26 \cdot 10^{-2} U$	0,970	$\vartheta_1 = 50; \vartheta_2 = 10$	$0 \leq U \leq 25$

¹⁾ nach Koschatzky [14]

Tafel 4. Gleichungen zur Berechnung der mittleren spezifischen Wärme von Körnerfrüchten als Funktion des Feuchtegehaltes U.

Den Einfluß der Temperatur auf die mittlere spezifische Wärme von Weizen und Mais (nach [14]) zeigt Bild 10. In dem untersuchten Temperaturbereich steigt die spezifische Wärme linear mit der Temperatur an. Der Einfluß der Temperatur auf die spezifische Wärme ist jedoch wesentlich geringer als der Einfluß des Feuchtegehalts der Körner und kann durch eine teilweise Aufhebung der verschiedenen Bindungsarten innerhalb des Korns infolge der steigenden Temperatur erklärt werden.

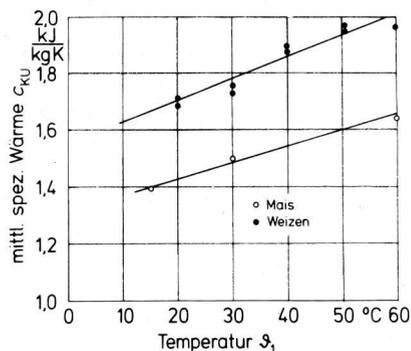


Bild 10. Mittlere spezifische Wärme von Weizen und von Mais (nach [14]) in Abhängigkeit von der oberen Grenztemperatur ϑ_1 bei konstanter unterer Grenztemperatur $\vartheta_2 = 10$ °C. Feuchtegehalt U = 15,8 %.

In Bild 11 ist der Einfluß der Gutart am Beispiel von Mais, Weizen, Hafer und Raps dargestellt. Für die Versuche wurden Weizen und Roggen als die am häufigsten angebauten unbespelzten und Gerste und Hafer als Vertreter der bespelzten Ährengetreidearten ausgewählt. Mais wird speziell als Stärketräger angebaut, während Raps eine Ölfrucht mit hohem Fettgehalt ist. Zur Ergänzung des Versuchsprogramms wurden Ackerbohnen als ausgesprochene Proteinträger in die Untersuchungen aufgenommen. Bild 11 zeigt, daß sich die Werte für die spezifische Wärme von Weizen und Hafer nur geringfügig unterscheiden. Trotz des gegenüber den übrigen Körnerfrüchten wesentlich höheren Proteingehaltes unterscheidet sich die spezifische Wärme von Ackerbohnen nur unwesentlich von der des Hafers und Weizens. Dies läßt sich damit erklären, daß

sich die spezifische Wärme von Protein kaum von der für Stärke unterscheidet. Eine Ausnahme bildet lediglich Raps, der aufgrund seines hohen Fettgehaltes, vgl. Tafel 2, und bedingt durch den hohen Wert der spezifischen Wärme des Rapsöls ($c = 2,02$ kJ/kg) eine größere spezifische Wärme aufweist als die anderen Versuchsgüter.

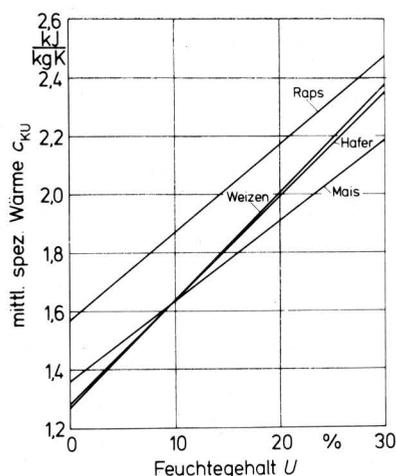


Bild 11. Einfluß der Gutart auf die mittlere spezifische Wärme bei Körnerfrüchten in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Gutes, Temperaturbereich 10 bis 50 °C. Die Geraden wurden mit den in Tafel 3 zusammengestellten Gleichungen berechnet.

Zur Untersuchung des Einflusses der Sorte auf die spezifische Wärme wurde von 5 verschiedenen Weizen- und 4 Maissorten die spezifische Wärme bei konstantem Feuchtegehalt ermittelt. Bei Weizen wurden dabei die Sommerweizenarten Romeo und Bali sowie die Winterweizensorten Kormoran, Caribo und Frühgold untersucht, bei Mais die Sorten Prior, Brillant und Inrakorn, die sich in ihrer Reifegruppe unterscheiden. Außerdem wurde die Maissorte Opaque ausgewählt, die gegenüber den anderen Sorten einen wesentlich höheren Proteingehalt aufweist. Wie die Ergebnisse in Tafel 5 zeigen, konnte weder bei Weizen noch bei Mais, einschließlich der proteinreichen Sorte Opaque, ein deutlicher

Einfluß der Sorte auf die spezifische Wärme festgestellt werden. Die geringfügigen Abweichungen der Werte können nicht als sortenbedingt gedeutet werden, da die Unterschiede innerhalb der Meßgenauigkeit der Versuchsapparatur liegen.

Versuchsgut	Sorte	mittlere spez. Wärme kJ/kg K
Weizen	Romeo	1,66
	Bali	1,60
	Kormoran	1,68
	Caribo	1,71
	Frühgold	1,71
Mais	Prior	1,64
	Brillant	1,65
	Inrakorn	1,64
	Opaque	1,64

Tafel 5. Mittlere spezifische Wärme von verschiedenen Weizen- und Maissorten bei konstantem Feuchtegehalt. Weizen: $U = 10\%$; Mais: $U = 8\%$.

Zur Prüfung, inwieweit die Mischungsregel zur Berechnung der spezifischen Wärme von Körnerfrüchten anwendbar ist, wurde die spezifische Wärme der Korninhaltsstoffe der Körner experimentell bestimmt. Die Ergebnisse sind in **Tafel 6** zusammengestellt. Die Werte für Maisprotein, Maisstärke und Cellulose wurden im absolut trockenen Zustand ermittelt. Für die Untersuchung der spezifischen Wärme von Mais-, Raps- und Weizenkeimöl wurden unraffinierte Öle verwendet. Die nach der Mischungsregel berechneten Werte der spezifischen Wärme der Korntrockenmasse liegen 6 bis 10 % höher als die experimentell ermittelten. Die höheren Werte erklären sich dadurch, daß im Korn die chemischen Bestandteile in gebundener Form vorliegen, wodurch die spezifische Wärme geringer wird.

Versuchsgut	mittl. spez. Wärme kJ/kg K
Maisprotein	1,416
Maisstärke	1,385
Cellulose	1,325
Asche	0,830
Maisöl ¹⁾	2,011
Rapsöl ¹⁾	2,052
Weizenkeimöl	2,083
Wasser	4,186

¹⁾ unraffiniert

Tafel 6. Mittlere spezifische Wärme der Inhaltsstoffe von Körnerfrüchten im Temperaturbereich $\vartheta_2 = 10\text{ °C}$ bis $\vartheta_1 = 50\text{ °C}$.

Berücksichtigt man den Einfluß der Feuchte auf die spezifische Wärme nach Gl. (8) und setzt voraus, daß die gesamte Feuchte im Korn in freier Form vorliegt, so ergeben sich die in **Bild 12** am Beispiel von Weizen und Raps dargestellten Kurven. In **Bild 12**

sind zum Vergleich die experimentell ermittelten Kurven eingezeichnet. Wie das Bild zeigt, weichen die berechneten von den experimentell ermittelten Kurven in dem untersuchten Feuchtebereich um maximal nur 10 % voneinander ab. Die spezifische Wärme von Körnerfrüchten, für die keine Messungen vorliegen, kann daher mit guter Näherung mit Hilfe der Mischungsregel berechnet werden.

Ein Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit denen anderer Autoren zeigt, daß die Ergebnisse von *Haswell* [15] für Hafer, von *Disney* [8] für Gerste und *Maltry* [10] für Weizen mit den eigenen sehr gut übereinstimmen. Gegenüber den Werten der übrigen Autoren für die Gutarten Weizen und Mais sind zum Teil erhebliche Differenzen zu beobachten, die auf die unterschiedlichen Meßverfahren zurückgeführt werden können.

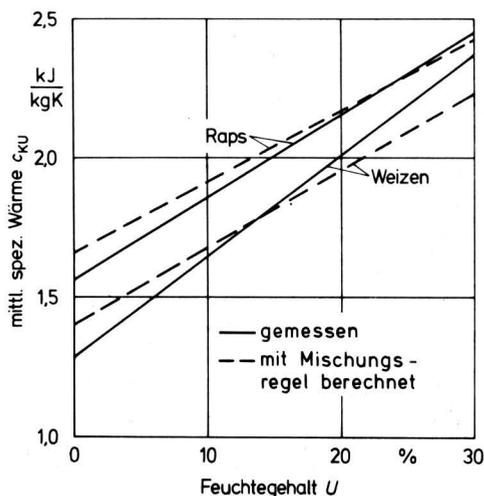


Bild 12. Vergleich von experimentell ermittelten Werten für die mittlere spezifische Wärme von Weizen und Raps mit Werten, die nach der Mischungsregel berechnet wurden. Die durchgezogenen Geraden wurden mit den Gleichungen in **Tafel 3** berechnet, denen die experimentell ermittelten Ergebnisse zugrunde liegen.

7. Zusammenfassung

In einer systematischen Untersuchung wurde die mittlere spezifische Wärme von Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Raps, Mais und Ackerbohnen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt der Körner mit einem Mischungsregalimeter ermittelt. Dabei konnte bei allen Gutarten in dem untersuchten Feuchtebereich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt der Körner und der mittleren spezifischen Wärme festgestellt werden. Die spezifische Wärme von Körnerfrüchten nimmt mit zunehmender Temperatur zu. Die Werte für die spezifische Wärme von Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Mais und Ackerbohnen weichen nur geringfügig voneinander ab. Lediglich Raps, dessen spezifische Wärme aufgrund des hohen Fettgehalts wesentlich höher liegt als die der anderen Körnerfrüchte, macht dabei eine Ausnahme. Ein Einfluß der Sorte auf die spezifische Wärme konnte nicht festgestellt werden.

Die mit der Mischungsregel berechneten Werte für die spezifische Wärme der Körnerfrüchte unterscheiden sich lediglich um 6 bis 10 % von den experimentell ermittelten. Die Mischungsregel kann daher als Näherungslösung zur Berechnung der spezifischen Wärme von Körnerfrüchten, für die keine Meßwerte vorliegen, herangezogen werden.

Verwendete Formelzeichen

c	spezifische Wärme
c_B	spezifische Wärme der gebundenen Feuchte
c_{K0}	spezifische Wärme der Trockenmasse
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 Trockenmasse
c_W	spezifische Wärme der freien Feuchte
m	Gesamtmasse
m_B	Masse der gebundenen Feuchte
m_F	Masse der freien Feuchte
m_S	Trockenmasse
m_W	gesamte Feuchtemasse
r	Korrelationskoeffizient
r_B	Bindungswärme
K_{Kal}	Wärmekapazität des Kalorimeters
K_G	Wärmekapazität des Versuchsbehälters
Q	Wärmemenge
U	Feuchtegehalt
X	Feuchtegrad
ϑ	Temperatur
ϑ_1	obere Grenztemperatur
ϑ_2	untere Grenztemperatur
ϑ_m	Mischungstemperatur
ξ	Massenanteil

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] • **Klapp, E.:** Ein Beitrag zur analytischen Behandlung von gekoppelten Wärme- und Stoffaustauschvorgängen in durchströmten Schüttgütern. Diss. Univ. Bonn, 1961.
- [2] **Bakker-Arkema, F.W., W.G. Bickert u. R.V. Morey:** Gekoppelter Wärme- und Stoffaustausch während des Trocknungsvorgangs in einem Behälter mit Getreide. Landt. Forsch. Bd. 17 (1967) Nr. 6, S. 175/80.
- [3] • **Meiering, A.G.:** Der gekoppelte Wärme- und Stoffaustausch bei der Verarbeitung von Nahrungsmitteln unter besonderer Berücksichtigung der Trocknung von Körnerfrüchten. Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 14 Düsseldorf: VDI-Verlag 1971.
- [4] **Stöckmann, K.:** Die Bedeutung der spezifischen Wärme des Getreides. Die Mühle Bd. 88 (1951) Nr. 1, S. 57/58.
- [5] **Babbitt, E.A.:** The thermal properties of grain in bulk. Can.J.Res. F.23 (1945) S. 388/401.
- [6] **Pfalzner, P.M.:** The specific heat of wheat. Can.J.Tech. 29 (1951) Nr. 6, S. 261/68.
- [7] **Moote, I.:** The effect of moisture on the thermal properties of wheat. Can.J.Tech. Vol. 31 (1953) S. 57/62.
- [8] **Disney, R.W.:** The specific heat of some cereal grains. Cereal Chem. Bd. 31 (1954) Nr. 3, S. 229/39.
- [9] • **Schäfer, W. u. L. Altrogge:** Die spezifische Wärme des Weizens. In: Getreidekonditionierung – Getreidetrocknung. S. 132/44. Detmold: Verlag Schäfer 1960.
- [10] • **Maltry, W.:** Ermittlung einiger trocknungsphysikalischer Eigenschaften von Weizen und deren Auswertung in einem i, x -Trocknungsdiagramm. Diss. TU Dresden, 1961.
- [11] **Kazarian, E.A. u. C.W. Hall:** The thermal properties of grain. Trans. ASAE Bd. 8 (1965) Nr. 1, S. 33/37, 48 und ASAE-paper Nr. 63-825, Chicago 1963.
- [12] **Muir, W.E. u. S. Viravanichai:** Specific heat of wheat. J.agr.Eng.Res. Bd. 17 (1972) Nr. 4, S. 338/42.
- [13] **Pabis, S. u. S.M. Henderson:** Grain drying theory. III. The air/grain temperature relationship. J.agr.Eng.Res. Bd. 6 (1961) Nr. 2, S. 169/74.
- [14] **Koschitzky, R.:** Experimentelle Untersuchungen über die spezifische Wärme von Körnermais, Gräsern und Leguminosen. Grundl. Landtechnik Bd. 23 (1973) Nr. 4, S. 99/105.
- [15] **Haswell, G.A.:** A note on the specific heat of rice, oats and their products. Cereal Chem. Bd. 31 (1954) Nr. 4, S. 341/43.
- [16] **Wratten, F.T. et.al.:** Physical and thermal properties of rough rice. Trans. ASAE Bd. 12 (1969) Nr. 6, S. 801/03.
- [17] **Riedel, L.:** Kalorimetrische Untersuchungen über das Gefrieren von Weißbrot und anderen Mehlprodukten. Kältetechnik Bd. 11 (1959) Nr. 2, S. 41/43.
- [18] **Riedel, L.:** Zum Problem des gebundenen Wassers in Fleisch. Kältetechnik Bd. 13 (1961) Nr. 3, S. 122/28.
- [19] **Riedel, L.:** Versuche zur Bestimmung der spezifischen Wärme des gebundenen Wassers. Kältetechnik-Klimatisierung Bd. 18 (1966) Nr. 5, S. 193/95.
- [20] • **Neumann u. Pelshenke:** Brotgetreide und Brot. Berlin u. Hamburg: Paul Parey-Verlag 1954.
- [21] • **Becker, M. u. K. Nehring:** Handbuch der Futtermittelkunde. Berlin u. Hamburg: Paul Parey-Verlag 1969.
- [22] • **Mühlbauer, W.:** Untersuchungen über die Trocknung von Körnermais unter besonderer Berücksichtigung des Gleichstromverfahrens. Schriftenreihe des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft. Heft 1, 1974. Im Selbstverlag des Verfassers. Lehrstuhl für Landtechnik der Universität Hohenheim.
- [23] • **Roth, W.A. u. F. Becker:** Kalorimetrische Methoden zur Bestimmung chemischer Reaktionswärmen. Braunschweig: Vieweg-Verlag 1956.
- [24] **Leidenfrost, W.:** Messung der spezifischen Wärme. Archiv für Technisches Messen. V 9212-1; V 9212-2, 1955.