

# Die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Körnerfrüchten

Von Reinhold Scherer und Heinz Dieter Kutzbach,  
Stuttgart-Hohenheim\*)

Mitteilung aus dem Sonderforschungsbereich 140 – Landtechnik "Verfahrenstechnik der Körnerfruchtproduktion" der Universität Hohenheim<sup>1)</sup>

DK 633.004.12:536.36

Durch die steigende Mechanisierung der Arbeitsprozesse und die Einführung neuer Verfahren bei der Konservierung und Lagerung von Körnerfrüchten kommt der Vorausberechnung der Wärmeaustauschvorgänge zunehmende Bedeutung zu. Die Berechnung ist nur dann mit ausreichender Genauigkeit möglich, wenn die Stoffeigenschaften bekannt sind [2]. Von besonderer Bedeutung für die bei der Lagerung und Konservierung von Körnerfrüchten auftretenden Wärmeaustauschvorgänge sind die thermophysikalischen Eigenschaften Wärme- und Temperaturleitfähigkeit, die in der vorliegenden Arbeit für die Körnerfrüchte Mais, Weizen, Gerste, Hafer, Roggen und Raps angegeben werden.

## 1. Einleitung

Für die Verfahren der Konservierung und Lagerung von Körnerfrüchten ist die Vorausberechnung der Wärmeaustauschvorgänge von großer Bedeutung. Bei biologischen Stoffen – wie sie die Körnerfrüchte darstellen – besteht die Gefahr einer Schädigung bei den verschiedenen Prozessen in weit größerem Maße als bei den anorganischen Stoffen. Um eine Schädigung der Kornstruktur und der Korninhaltsstoffe ausschließen zu können, muß deshalb sehr genau bekannt sein, wie groß die Verweilzeiten bei konstant vorgegebenen Betriebsbedingungen und Gutzuständen sind oder wie diese bei variablen Betriebsbedingungen zu bemessen sind. Der während der Prozesse übertragene Wärmestrom und der Temperaturverlauf im Gut sollten vorausberechnet werden können. Hierfür müssen die Werte für die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit vorliegen.

## 2. Bisherige Arbeiten

Experimentelle Untersuchungen über die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Körnerfrüchten liegen von verschiedenen Autoren vor [3 bis 20]. Eine Übersicht über die aus dem Schrifttum bekannten Untersuchungen enthält [1]. Die Werte der Autoren unter-

<sup>1)</sup> Auszug aus der vom Fachbereich Energietechnik der Universität Stuttgart genehmigten Dissertation [1]. Die Verfasser gedenken mit Dankbarkeit Prof. Dr.-Ing. em. G. Segler †, der diese Untersuchungen angeregt hat.

\*) Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach ist Inhaber des Lehrstuhls für Grundlagen der Landtechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim. Dipl.-Ing. R. Scherer war wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 140, Fachgebiet "Grundlagen der Landtechnik", und ist nun Mitarbeiter der Fa. Mars GmbH, Viersen.

scheiden sich z.T. sehr stark; so betragen die Unterschiede für die angegebenen Werte der Wärmeleitfähigkeit bei demselben Feuchtegehalt und derselben Sorte im Mittel  $\pm 30\%$ , in Einzelfällen sogar über  $100\%$ . Noch gravierender sind die Unterschiede bei den Angaben für die Temperaturleitfähigkeit. Für hohe Feuchtegehalte liegen keine Untersuchungen vor. Desgleichen sind für Körnerfrüchte aus dem Schrifttum keine experimentellen Untersuchungen über den Einfluß der Porosität der Schüttung und der Temperatur auf die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit bekannt. Direkte Messungen an Einzelkörnern wurden bislang nicht durchgeführt.

## 3. Aufgabenstellung

Da die von den verschiedenen Autoren ermittelten Werte für die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit der Körnerschüttung sich z.T. sehr stark unterscheiden und nicht alle Einflußgrößen berücksichtigt wurden, können sie für eine gesicherte Berechnung nicht herangezogen werden. Aus diesem Grunde wurden in eigenen Untersuchungen mit Hilfe eines Meßverfahrens, das die gleichzeitige Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit in Abhängigkeit von Feuchtegehalt, Temperatur und Porosität der Schüttung gestattet, Werte ermittelt, die eine für die Praxis befriedigende Genauigkeit besitzen.

Mit Hilfe eines geeigneten Meßverfahrens werden auch die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Einzelkorns, für die bislang keine Werte vorliegen, für Mais in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußgrößen bestimmt. Diese Werte für das Einzelkorn sind insbesondere für die Kontaktphase im Trommeltrockner, die Vakuumtrocknung und die Aufheiz- und Abkühlvorgänge in Trocknungs- und Kühlanlagen mit Luft als Wärmeträger von Bedeutung.

## 4. Experimentelle Untersuchungen

### 4.1 Charakterisierung des Versuchsgutes

Bei der Bestimmung der Stoffeigenschaften von biologischen Stoffen ist die genaue Charakterisierung der untersuchten Proben unerlässlich, da im Gegensatz zu homogenen anorganischen Stoffen die spezifischen Eigenschaften organischer Stoffe starken Schwankungen unterworfen sind. Bei den nachstehenden Untersuchungen wurden deshalb zur Charakterisierung des Versuchsgutes bei den Messungen der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Einzelkorns die maßgeblichen Korneigenschaften bestimmt, für die Messungen der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit der Körnerschüttung wurde darüber hinaus eine Siebanalyse mit quadratischen Maschensieben nach DIN 4188 durchgeführt und der Anteil an ganzen Körnern, Bruchkorn und Verunreinigungen festgestellt. Die Daten können aus dem Archiv für landwirtschaftliche Stoffe des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim abgerufen werden.

## 4.2 Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Einzelkorns

### 4.2.1 Meßverfahren zur Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Einzelkorns

Die Messungen an Einzelkörnern bleiben auf Mais beschränkt, da die übrigen Körnerfrüchte aufgrund ihrer zu geringen Korngröße einer Messung bislang nicht zugänglich sind. Die Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Einzelkorns wurde mit einem instationären Verfahren, dem von *Kostaropoulos* [21] als "Heizdrahtsonden-Methode" bezeichneten Meßverfahren, durchgeführt. Das als "Sonde"<sup>2)</sup> bezeichnete Meßinstrument besteht aus einem Heizdraht, in dessen Nähe ein Thermoelement angebracht ist. Von einem Zeitpunkt  $t = 0$  an wird dem Heizdraht eine konstante Heizleistung zugeführt und der Temperatur-Zeit-Verlauf registriert. Der Methode liegt die Lösung der Differentialgleichung der Wärmeleitung für eine fadenförmige Wärmequelle innerhalb eines homogenen Stoffes zugrunde, so daß sich aus den Temperaturwerten für zwei Zeitpunkte sehr leicht die Wärmeleitfähigkeit des Versuchsmediums mit der Formel

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \ln t_2/t_1}{4\pi(\vartheta_2 - \vartheta_1)} \quad (1)$$

bestimmen läßt.

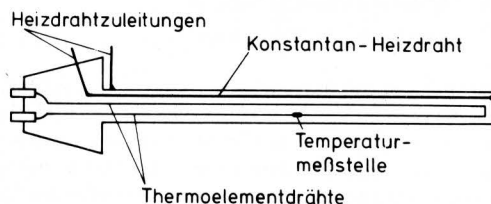
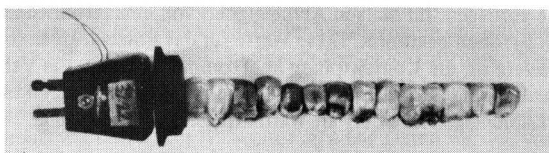
Liegen die Werte für die spezifische Wärme und die Dichte des Versuchsgutes vor, so kann dann über die Beziehung

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2)$$

auch die Temperaturleitfähigkeit berechnet werden.

Die theoretischen Grundlagen des Verfahrens und die Grenzen seiner Anwendung sowie die möglichen Fehlerquellen sind bereits von zahlreichen Autoren erörtert worden [22 bis 27], so daß hier darauf verzichtet werden darf. In jüngster Zeit hat sich dieses Verfahren besonders in der Lebensmitteltechnik eingeführt. Von *Dickerson u. Read* [28] und vor allem von *Sweat, Haugh u. Stadelmann* [29] und *Sweat* [30, 31] liegen Ergebnisse für zahlreiche pflanzliche und tierische Produkte vor.

Die Apparatur zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Einzelkorns besteht aus der "Sonde" selbst, **Bild 1**, und Gleichspannungsspeisegeräten in Verbindung mit Schiebewiderständen zur Versorgung des Thermospannungsverstärkers und des Heizdrahtes der "Sonde". Die Temperaturmessung erfolgt mit einem in der Mitte der Sonde platzierten Chromel-Konstantan-Thermoelement von 0,05 mm Dicke.



**Bild 1.** Sonde für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Einzelkorns.

- a) mit aufgereihten Maiskörnern
- b) schematisch

<sup>2)</sup> Die Wärmeleitfähigkeits-Meßsonden können von Prof. V.E. Sweat, Texas A. M. University, Department of Agricultural Engineering, College Station, Texas 77843 bezogen werden.

Zur Durchführung der Messungen an Mais wurden mehrere Körner im feuchten Zustand durchbohrt und anschließend auf die Sonde aufgereiht und gegeneinander gepreßt, wobei auf guten Formschluß zwischen den Kornbohrungen und der Sonde geachtet wurde, um Luftpolster zwischen Bohrung und Sonde auszuschließen.

Die Messungen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt des Versuchsgutes wurden stets mit denselben anfangs im feuchten Zustand aufgereihten Maiskörnern durchgeführt.

Um die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit von Endosperm und Embryo ermitteln zu können, wurden die Maiskörner zum einen im Endosperm und zum anderen im Embryo durchbohrt.

Zur Messung wurde nach Einschalten des Heizstroms, Zeit und zugehörige Thermospannung in Zeitabständen von 1 s registriert und die Heizstromstärke kontrolliert.

Mit den durch  $\vartheta$  und  $\ln t$  definierten Wertepaaren wurde eine lineare Regression durchgerechnet. Die dabei ermittelte Steigung der Ausgleichsgeraden wird zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit herangezogen:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4\pi M} \quad (3)$$

wobei M die Steigung der Ausgleichsgeraden ist.

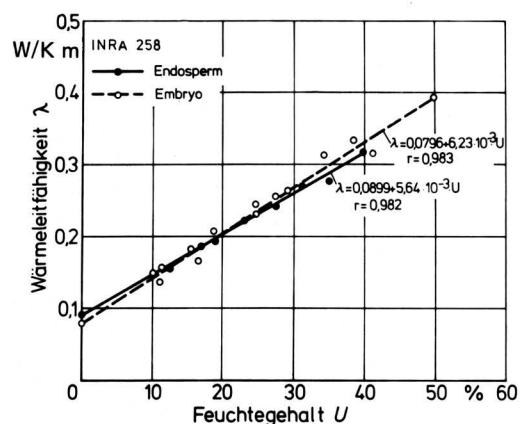
Die zugeführte Heizleistung wurde aus der Heizstromstärke und dem elektrischen Widerstand des Heizdrahtes berechnet.

### 4.2.2 Einfluß des Feuchtegehaltes und der Temperatur auf die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit

In **Bild 2** ist der Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit der Kornbestandteile Endosperm und Embryo dargestellt. Für beide Kornbestandteile ergibt sich eine lineare Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt: die Wärmeleitfähigkeit steigt sehr stark mit dem Feuchtegehalt an.

Der lineare Verlauf in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt auch bei höheren Temperaturen läßt darauf schließen, daß im Maiskorn keine Dampfdiffusion auftrat und der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit dem Feuchtegehalt in der zunehmenden Ausbildung von Wärmebrücken innerhalb des Systems Luft-Feststoff begründet ist.

Endosperm und Embryo unterscheiden sich bei demselben Feuchtegehalt in ihren Werten für die Wärmeleitfähigkeit nur unerheblich. Bei der Übertragung der Werte auf das Gesamtkorn ist jedoch zu berücksichtigen, daß bei einem bestimmten Feuchtegehalt des Gesamtkorns das Endosperm einen wesentlich niedrigeren Wert für den Feuchtegehalt aufweist als der Embryo. Die Beziehungen



**Bild 2.** Wärmeleitfähigkeit von Endosperm und Embryo des Maiskorns in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt ( $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ ).

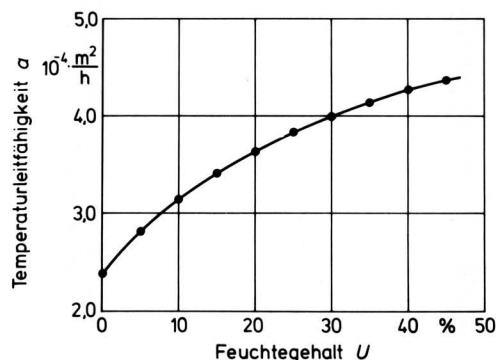
zwischen Feuchtegehalt, Massen- und Volumenanteil sowie Reindichte der Komponenten Embryo und Endosperm und dem Feuchtegehalt des gesamten Maiskorns geben die in **Tafel 1** aufgeführten Gleichungen wieder. Für die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Kornbestandteile von der Temperatur ergibt sich ebenfalls ein linearer Zusammenhang. Der Einfluß der Temperatur ist jedoch wesentlich geringer als der des Feuchtegehaltes. Die Wärmeleitfähigkeit des Maiskorns läßt sich mit der Gleichung für  $\lambda$  in **Tafel 2** berechnen.

Mit den in eigenen Untersuchungen mit Hilfe eines Luftpyknometers ermittelten Dichtewerten und den von *Mühlbauer u. Scherer* [32] gemessenen Werten für die spez. Wärme kann die Temperaturleitfähigkeit des Einzelkorns berechnet werden; es ergeben sich die in **Bild 3** und **Tafel 2** dargestellten Zusammenhänge.

Ein ausgeprägter Sorten- oder Jahreseinfluß auf die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit konnte bei den untersuchten Maissorten Inra 258, Brillant, Anjou, Limac und der proteinreichen amerikanischen, 1976 in Stuttgart-Hohenheim angebauten Sorte XL 22 nicht festgestellt werden; die registrierten Unterschiede zwischen den Werten lagen innerhalb der Meßunsicherheit.

*Kostaropoulos* [21] gibt als Anhaltswert für die Wärmeleitfähigkeit von fettfreier organischer Trockensubstanz (Kohlenhydrate, Proteine) 0,27 W/K m und für die Wärmeleitfähigkeit von Fett 0,15 W/K m an. Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Maiskorns liegen unter diesen Werten und im Bereich derjeni-

gen einiger Isolierstoffe. Die geringen Werte lassen sich damit erklären, daß im trockenen Maiskorn Interzellularen (Luftzwischenräume) vorhanden sind [33], die aufgrund der kleinen Wärmeleitfähigkeit der Luft die Wärmeleitfähigkeit des Korns maßgeblich vermindern. Die in **Tafel 2** aufgeführte Gleichung für die Wärmeleitfähigkeit des Maiskorns liefert für  $U = 100\%$ , also reines Wasser, für die verschiedenen Temperaturen Werte, die den im Schrifttum genannten Werten sehr nahekommen. In **Tafel 2** wurde die Gültigkeit der Gleichung dennoch auf den Feuchtebereich  $8\% \leq U \leq 45\%$  beschränkt, da die Untersuchungen in diesem Feuchtebereich durchgeführt wurden. Außerdem ist bei Mais mit einem höheren Feuchtegehalt der physiologische Reifezustand noch nicht erreicht.



**Bild 3.** Temperaturleitfähigkeit des Maiskorns in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt ( $\vartheta = 20\text{ °C}$ ).

Physikalische Größe	Gleichung	Korrelationskoeffizient r	Einheit	Gültigkeitsbereich
Feuchtegehalt d. Endosperms	$U_{\text{Endosp.}} = 0,911 U + 0,239$	$r = 0,997$	%	$8\% \leq U \leq 45\%$
Feuchtegehalt d. Embryos	$U_{\text{Embryo}} = 1,433 U - 0,598$	$r = 0,991$	%	"
Volumenanteil d. Endosperms am Gesamtkorn	$V_{\text{Endosp.}} = 81,4; s_r = 1,2\%$		%	"
Massenanteil d. Endosperms am Gesamtkorn	$m_{\text{Endosp.}} = -0,121 U + 86,59$	$r = 0,763$	%	"
Reindichte d. Endosperms	$\rho_{\text{Endosp.}} = -3,921 U + 1431,2$	$r = 0,966$	kg/m <sup>3</sup>	"
Reindichte d. Embryos	$\rho_{\text{Embryo}} = -3,726 U + 1324,8$	$r = 0,833$	kg/m <sup>3</sup>	"

**Tafel 1.** Beziehungen zwischen Feuchtegehalt, Massen- und Volumenanteil sowie Reindichte der Komponenten Endosperm und Embryo und dem Feuchtegehalt des Gesamtkorns (Sorte Anjou, Erntejahr 1976).

Gleichung	Korrelationskoeffizient r	Einheit
$\lambda = 0,080 + 5,843 \cdot 10^{-3} U + 4,43 \cdot 10^{-4} \vartheta$	0,982	W/K m
$a = \frac{(0,288 + 2,1 \cdot 10^{-2} U)}{(0,904 + 2,939 \cdot 10^{-2} U) \cdot (1340,6 - 1,76 U)} + 8,83 \cdot 10^{-8} \vartheta$	0,963	m <sup>2</sup> /h

**Tafel 2.** Gleichungen zur Berechnung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Maiskorns in Abhängigkeit von Feuchtegehalt und Temperatur (Gültigkeitsbereich:  $8\% \leq U \leq 45\%$ ;  $5\text{ °C} \leq \vartheta \leq 60\text{ °C}$ ).

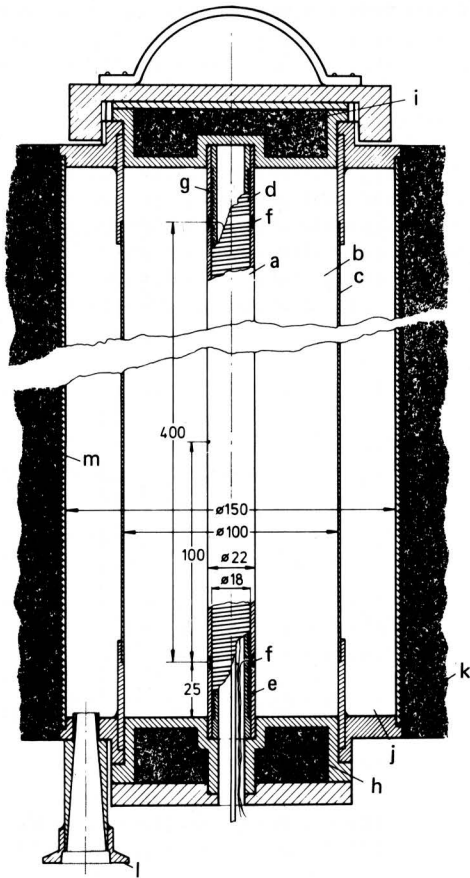
### 4.3 Wärme- und Temperaturleitfähigkeit des Haufwerks

Die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit der Schüttungen von Körnern (für die Körnerfrüchte Mais, Weizen, Gerste, Hafer, Roggen, Raps) sowie von Maisspindelteilen, Maisstengelteilen, Weizenspreu und Weizenkurzstroh wurde mit einem quasistationär arbeitenden Hohlzylinderverfahren bestimmt. Quasistationäre Verfahren vereinigen ideal die Meßgenauigkeit stationärer Verfahren und die kurze Meßdauer instationärer Verfahren.

#### 4.3.1 Beschreibung der Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung

Die Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit der Körnerschüttung besteht aus dem Meßzylinder, den Meß- und Regeleinrichtungen, der elektrischen Energiezufuhr und der Temperaturmeß- und Registriereinrichtung.

Der Meßzylinder ist in **Bild 4** mit seinen wichtigsten Abmessungen dargestellt. Durch die Zylinderform sind die Thermolemente zur Temperaturmessung auf Isothermenzonen angebracht. Meßfehler, hervorgerufen durch Wärmeleitung in den Thermolementen, können so vernachlässigbar klein gehalten werden. Die Apparatur wurde stehend betrieben, da senkrecht stehende Zylinder wegen des geringeren Konvektionseinflusses günstiger sind als waagrechte, weil die Konvektionsbewegung längs der Isothermenflächen stattfindet.



**Bild 4.** Meßzylinder der Wärmeleitfähigkeitsapparatur.

- |   |  |
|---|--|
| a Heizrohr  | g Heizwicklung                             |
| b Ringspalt (Probenraum)  | h Boden                                    |
| c Außenrohr   | i Deckel                                   |
| d oberer Schutzheizungsabschnitt                                      | j Vakuumraum                               |
| e unterer Schutzheizungsabschnitt                                     | k PU-Schaum-Isolierung                     |
| f Thermoelemente an den Übergangsstellen Hauptheizung – Schutzheizung | l Flansch für den Anschluß der Vakuumpumpe |
|   | m Heizwicklung des Außenzylinders          |

Der Meßzylinder mußte einerseits so klein wie möglich gebaut werden, um die erforderliche Probenmenge klein zu halten, die Handhabung zu erleichtern und vor allem um die Meßzeit so kurz wie möglich zu machen; andererseits konnten die Abmessungen nicht beliebig reduziert werden, da ein allzu kleiner Ringspalt (Probenraum) bei den untersuchten Körnerfrüchten die Wandeffekte vergrößert hätte und eine exakte Bestimmung des Hohlraumvolumens nicht möglich gewesen wäre.

Nach dem Füllen und Verschließen des Meßzylinders wurde der Temperaturengleich abgewartet und danach der Heizstrom der drei Heizwicklungen eingeschaltet und so geregelt, daß beiderseits der Übergangsstellen zwischen der Hauptheizung und den Schutzheizungen gleiche Temperatur herrschte. Hierdurch ließ sich der Wärmefluß in axialer Richtung verhindern. Nach dem Erreichen des quasistationären Zustandes wird die Stromstärke im Hauptheizungsabschnitt und die Temperatur an den Randflächen der Zylinderapparatur registriert.

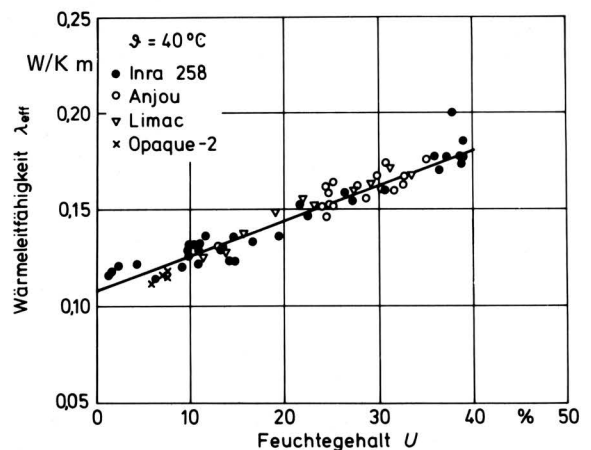
Für die Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit der untersuchten Proben ist neben der Betriebsstromstärke die Temperaturdifferenz zwischen den Randflächen  $r = r_i$  und  $r = r_a$  im quasistationären Abschnitt und die Steigung der Temperatur-Zeit-Geraden notwendig. Beide Größen lassen sich sehr einfach graphisch aus einem Meßschrieb bestimmen. Wie sich jedoch bei der Auswertung von Vorversuchen gezeigt hat, ergibt sich bei graphischer Auswertung ein nicht unerheblicher Fehler. Deshalb wurde mit digital registrierten Wertepaaren im quasistationären Abschnitt

eine Regressionsanalyse für die Temperatur-Zeit-Gerade durchgeführt und die damit ermittelte Temperaturdifferenz und Steigung der Temperatur-Zeit-Geraden unmittelbar für die Berechnung von Wärme- und Temperaturleitfähigkeit verwendet, wodurch der Fehler bei der Meßwerterfassung und -auswertung erheblich reduziert wurde.

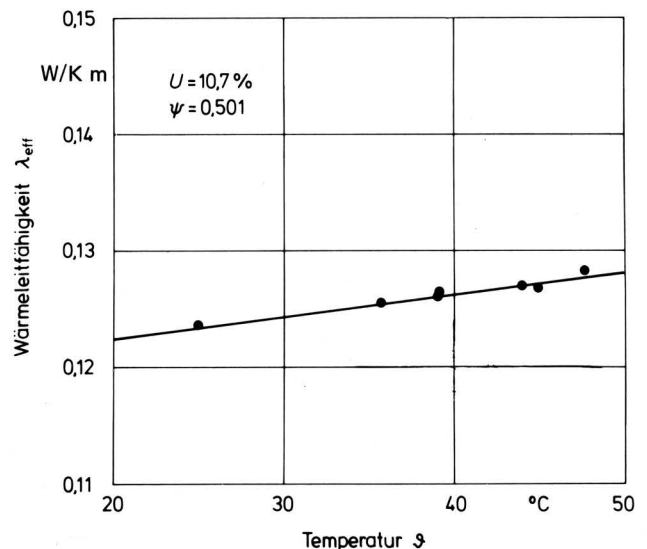
Die endliche Wärmekapazität von Innen- und Außenrohr werden bei der Berechnung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit in Form eines Korrekturfaktors berücksichtigt.

#### 4.3.2 Wärme- und Temperaturleitfähigkeit in Abhängigkeit von Feuchtegehalt, Temperatur und Porosität der Schüttung

Die experimentell ermittelten Werte für die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit der Körnerschüttung in Abhängigkeit von Feuchtegehalt, Temperatur und Porosität der Schüttung sind in den Bildern 5 bis 10 dargestellt und in den Tafeln 3 und 4 aufgeführt. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden lediglich die Werte für Mais graphisch dargestellt.



**Bild 5.** Wärmeleitfähigkeit von Körnermaisschüttungen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.



**Bild 6.** Wärmeleitfähigkeit einer Körnermaisschüttung in Abhängigkeit von der Temperatur.

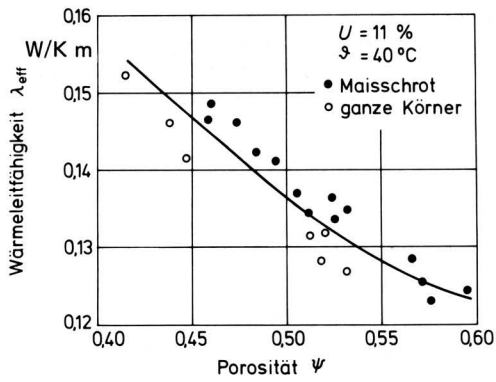


Bild 7. Wärmeleitfähigkeit für Schüttungen von Mais und Maisschrot in Abhängigkeit von der Porosität.

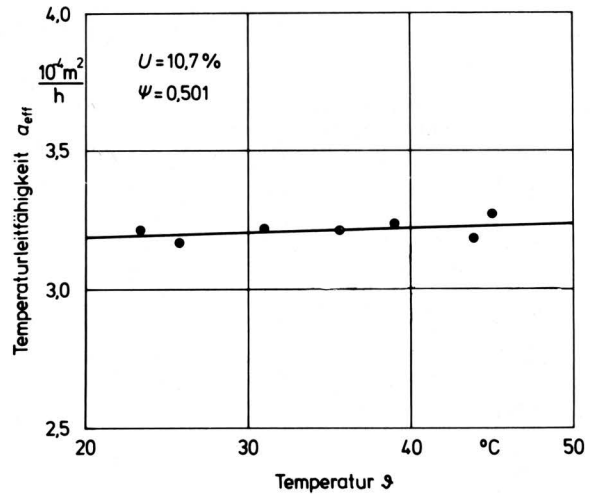


Bild 9. Temperaturleitfähigkeit einer Körnermaisschüttung in Abhängigkeit von der Temperatur.

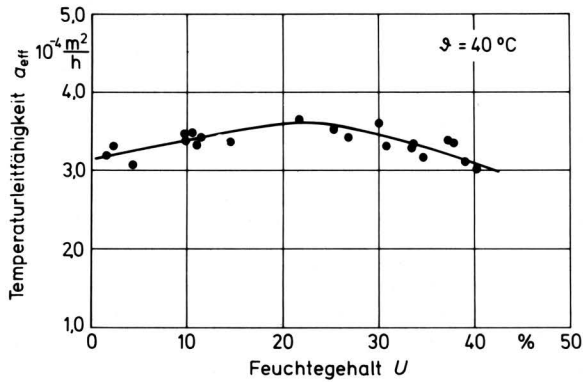


Bild 8. Temperaturleitfähigkeit einer Körnermaisschüttung in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

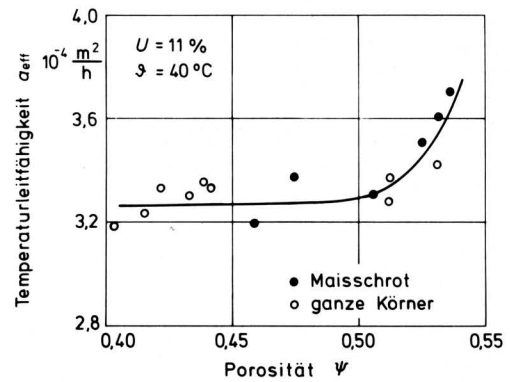


Bild 10. Temperaturleitfähigkeit für Schüttungen von Mais und Maisschrot in Abhängigkeit von der Porosität

Gutart	Gleichung	Korrel.- koeff. r	Einheit	Gültigkeitsbereich
Mais	$\lambda_{\text{eff}} = 0,108 + 1,80 \cdot 10^{-3} U + 1,79 \cdot 10^{-4} \vartheta$	0,97	W/K m	$5\% \leq U \leq 45\%$ $5^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 50^\circ\text{C}$
	$a_{\text{eff}} = 3,095 + 4,22 \cdot 10^{-6} U - 1,06 \cdot 10^{-7} U^2 + 2,15 \cdot 10^{-7} \vartheta$	0,83	$\text{m}^2/\text{h}$	"
Weizen	$\lambda_{\text{eff}} = 0,133 + 1,70 \cdot 10^{-3} U + 1,69 \cdot 10^{-4} \vartheta$	0,89	W/K m	$5\% \leq U \leq 22\%$ $5^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 50^\circ\text{C}$
	$a_{\text{eff}} = 3,01 \cdot 10^{-4} + 2,35 \cdot 10^{-6} U + 2,05 \cdot 10^{-7} \vartheta$	0,55	$\text{m}^2/\text{h}$	"
Gerste	$\lambda_{\text{eff}} = 0,125 + 1,28 \cdot 10^{-3} U + 1,76 \cdot 10^{-4} \vartheta$	0,89	W/K m	"
	$a_{\text{eff}} = 3,09 \cdot 10^{-4} + 1,84 \cdot 10^{-6} U + 1,98 \cdot 10^{-7} \vartheta$	0,58	$\text{m}^2/\text{h}$	"
Hafer	$\lambda_{\text{eff}} = 0,104 + 2,21 \cdot 10^{-3} U + 1,82 \cdot 10^{-4} \vartheta$	0,98	W/K m	"
	$a_{\text{eff}} = 3,44 \cdot 10^{-4} + 1,55 \cdot 10^{-6} U + 1,97 \cdot 10^{-7} \vartheta$	0,56	$\text{m}^2/\text{h}$	"
Roggen	$\lambda_{\text{eff}} = 0,131 + 9,29 \cdot 10^{-4} U + 1,72 \cdot 10^{-4} \vartheta$	0,81	W/K m	"
	$a_{\text{eff}} = 3,05 \cdot 10^{-4} + 1,42 \cdot 10^{-6} U + 2,01 \cdot 10^{-7} \vartheta$	0,39	$\text{m}^2/\text{h}$	"
Raps	$\lambda_{\text{eff}} = 0,110 + 2,15 \cdot 10^{-3} U + 1,57 \cdot 10^{-4} \vartheta$	0,94	W/K m	"
	$a_{\text{eff}} = 1,89 \cdot 10^{-4} + 7,06 \cdot 10^{-6} U + 2,69 \cdot 10^{-7} \vartheta$	0,68	$\text{m}^2/\text{h}$	"

Tafel 3. Gleichungen zur Berechnung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Körnerschüttungen.



Gutart	Feuchtegehalt U %	Porosität d. Schüttung $\psi$	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{eff}}$ W/K m	Temperaturleitfähigkeit $10^{-4} a_{\text{eff}}$ m <sup>2</sup> /h
Spindelteile	8,8	0,8199	0,0952	7,9696
	12,4	0,8217	0,0975	6,3249
	18,9	0,8213	0,1094	7,0880
	31,5	0,8595	0,1208	4,7585
	31,7	0,8171	0,1203	5,6039
	62,8	0,7605	0,1307	3,2225
	63,1	0,7451	0,1303	3,5722
	64,2	0,7172	0,1467	4,1113
Spreu	6,8	0,9689	0,0734	2,1966
	7,8	0,9492	0,0735	2,7890
Kurzstroh	6,6	0,9295	0,0782	2,6998
	7,0	0,9309	0,0747	2,7988
	10,7	0,9368	0,0834	3,1242

Tafel 4. Werte für Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Mais-spindelteilen, Weizenspreu und Weizen-Kurzstroh.

Die Ergebnisse werden im folgenden auch nur für Mais ausführlich diskutiert, da sich für die übrigen Körnerfrüchte im entsprechenden Feuchtebereich dieselben Gesetzmäßigkeiten ergeben haben.

Die für die Wärmeleitfähigkeit des Einzelkorns experimentell ermittelten Werte liegen im Feuchtebereich 8 bis 45 % zwischen 0,13 und 0,40 W/K m. Demgegenüber betragen die Werte für die Schüttung nur 0,10 bis 0,20 W/K m. Die kleineren Werte für die Wärmeleitfähigkeit der Schüttung resultieren aus den zwischen den Körnern befindlichen Luftvolumina, die eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzen als der Feststoff Mais. Während die Wärmeleitfähigkeit des Einzelkorns durch einen Anstieg des Feuchtegehaltes von 8 % auf 45 % sich etwa auf das 3fache vergrößert, Bild 2, wird der Wert bei der Körnerschüttung nur knapp verdoppelt, Bild 5. Dies steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von *Krischer* [34, 35], der einen um so geringeren Einfluß der Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes auf die effektive Wärmeleitfähigkeit feststellt, je größer die Porosität der Schüttung und je kleiner der Feuchtegehalt war.

Die Wärmeleitfähigkeit der Körnermaisschüttung steigt im untersuchten Temperaturbereich abweichend vom Verhalten feuchter poröser mineralischer Stoffe über den gesamten Feuchtebereich linear mit dem Feuchtegehalt an. Der Unterschied läßt sich erklären, wenn man bedenkt, daß beim Mais Korn nicht – wie bei den mineralischen Stoffen – das Feststoffgerüst über den gesamten Feuchtebereich nahezu unverändert bleibt und eine kontinuierliche Füllung der Poren mit Flüssigkeit stattfindet, sondern aufgrund des kolloidalen Verhaltens eine annähernd lineare Zunahme des Feststoffvolumens mit dem Feuchtegehalt sowohl unterhalb als auch oberhalb des hygroskopischen Punktes mit dem Feuchtegehalt erfolgt. Darüber hinaus ist der Anteil der Dampfdiffusion am Wärmetransport in einer Körnermaisschüttung durch eine festere Bindung des Wassers an die organische Substanz und einen weitgehend auf die fluide Phase beschränkten Wasserdampftransport gegenüber den feuchten porösen mineralischen Stoffen wesentlich geringer.

Die Wärmeleitfähigkeit steigt im untersuchten Temperaturbereich – ebenso wie beim Einzelkorn – linear mit der Temperatur an, Bild 6.

Mit zunehmender Porosität der Schüttung nimmt die Wärmeleitfähigkeit ab, Bild 7, da zum einen die Anzahl der Kontaktstellen zwischen den Partikeln abnimmt und zum anderen der Luftanteil in der Schüttung (mit einer wesentlich geringeren Wärmeleitfähigkeit als der Feststoff) größer wird. Die Porosität einer Körnermaiss-

schüttung läßt sich nur in engen Grenzen variieren (lose Schüttdichte – Rütteldichte), weshalb auch eine geringere Bandbreite der Werte für unterschiedliche Packungsdichten vorliegt als für feinkörnige Stoffe, wie beispielsweise Pulverkaffee oder Mehl, wo die Wärmeleitfähigkeit bei dichtester Packung gegenüber lockerster Packung um bis zu 30 % höhere Werte aufweist. Um die Porosität der Schüttung bei Mais stärker verändern zu können, wurde der Mais geschrotet. Wie Bild 7 zeigt, bestehen nur geringe Unterschiede zwischen den Werten für Schrot und Maiskörner bei derselben Porosität der Schüttung. Hieraus läßt sich ableiten, daß die Korngröße keinen nennenswerten Einfluß auf die Wärmeleitfähigkeit hat. Dies erklärt auch, daß die Werte für die Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen untersuchten Sorten keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

Die Temperaturleitfähigkeit nimmt zunächst bis zu einem Maximum bei  $U = 25\%$  zu und sinkt dann oberhalb dieses Wertes wieder ab, Bild 8. Dieser Verlauf läßt sich damit erklären, daß Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärme linear mit dem Feuchtegehalt ansteigen, Schüttdichte und Porosität aber bei  $U = 25\%$  ein Minimum bzw. Maximum besitzen. Durch die Zunahme der Schüttdichte oberhalb eines Feuchtegehaltes von  $U = 25\%$  wird das Verhältnis von Wärmekapazität zu Wärmeleitfähigkeit des Haufwerks größer, wodurch sich eine geringere Temperaturleitfähigkeit ergibt.

Ebenso wie die Wärmeleitfähigkeit steigt auch die Temperaturleitfähigkeit mit der Temperatur linear an, jedoch aufgrund der starken Abhängigkeit der Wärmekapazität von der Temperatur mit kleinerem Temperaturkoeffizienten, Bild 9.

Im Gegensatz zur Wärmeleitfähigkeit nimmt die Temperaturleitfähigkeit wegen der gegenüber dem Feststoff höheren Temperaturleitfähigkeit der Luft mit der Porosität der Schüttung zu, Bild 10.

Vergleicht man die verschiedenen Gutarten untereinander, s.a. Tafel 3, so weisen Weizen und Roggen die höchsten Werte für die Wärmeleitfähigkeit und Mais und Hafer die niedrigsten Werte auf. Die Ölfrucht Raps und Gerste liegen dazwischen. Die umgekehrte Reihenfolge gilt für die Temperaturleitfähigkeit. Signifikante Unterschiede in der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit zwischen den untersuchten Sorten wurden nicht festgestellt. Ebenso zeigte sich kein ausgeprägter Einfluß des Erntejahres.

Die Werte der Temperaturleitfähigkeit von Mais-Spindelteilen, Weizenspreu und Weizen-Kurzstroh, die in Tafel 4 aufgeführt sind, liegen im Bereich derjenigen für die Schüttung der Körnerfrüchte. Die Wärmeleitfähigkeit hingegen weist Werte auf, wie sie einige Isolierstoffe besitzen. Vergleicht man die hier ermittelten Werte mit den Angaben im Schrifttum, so weisen die von *Kazarian u. Hall* [4] ermittelten Werte die geringsten Abweichungen hierzu von maximal 20 % auf. Gegenüber den Werten der übrigen Autoren sind erhebliche Differenzen zu beobachten, die bei *Pabis, Bilovitska u. Gadai* [14] bis zu 100 % und bei *Egorov* [16] gar bis zu 240 % betragen.

## 5. Zusammenfassung

Um die bei der Konservierung und Lagerung von Körnerfrüchten auftretenden Wärmeaustauschvorgänge vorausberechnen zu können, müssen die Werte für die thermophysikalischen Eigenschaften Wärme- und Temperaturleitfähigkeit bekannt sein. In der vorliegenden Arbeit werden Wärme- und Temperaturleitfähigkeit von Einzelkörnern und Haufwerken in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußgrößen bestimmt und damit eine wesentliche Lücke auf dem Gebiet der Stoffe-Forschung geschlossen. Die Wärmeleitfähigkeit des Einzelkorns wird mit der Hitzdrahtsonden-Methode ermittelt. Wärme- und Temperaturleitfähigkeit der Schüttung werden mit einem quasistationär arbeitenden Hohlzylinderverfahren bestimmt. Den größten Einfluß auf die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit hat der Feuchtegehalt des Gutes. Der Einfluß der Temperatur ist im Vergleich zu demjenigen des Feuchtegehaltes von untergeordneter Bedeutung und ist bei der Schüttung geringer als derjenige der Porosität.

## Verwendete Formelzeichen

a	m <sup>2</sup> /h	Temperaturleitfähigkeit
a <sub>eff</sub>	m <sup>2</sup> /h	effektive Temperaturleitfähigkeit der Schüttung
c	kJ/kg K	spez. Wärme
m	%	Massenanteil eines Kornbestandteils
M		Steigung der Ausgleichsgeraden
Q̇	W/kg	Wärmestrom (massebezogen)
r		Korrelationskoeffizient
s <sub>r</sub>	%	relative Standardabweichung
t	s	Zeit
U	%	Feuchtegehalt; $U = m_{H_2O}/(m_{TS} + m_{H_2O})$
V	%	Volumenanteil eines Kornbestandteils
ϑ	°C	Temperatur
λ	W/K m	Wärmeleitfähigkeit des Einzelkorns
λ <sub>eff</sub>	W/K m	effektive Wärmeleitfähigkeit der Schüttung
ρ	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
ψ		Porosität (Volumenanteil des Hohlraums) der Schüttung

## Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] Scherer, R.: Die Ermittlung thermophysikalischer Eigenschaften von Körnerfrüchten, dargestellt am Beispiel von Mais, und die Bedeutung dieser Größen für die thermische Konservierung und Lagerung. Diss. Univ. Stuttgart 1979.
- [ 2 ] Segler, G.: Verfahrenstechnik in der Landwirtschaft. VDI-Z. Bd. 109 (1967) Nr. 9, S. 394/400.
- [ 3 ] Oxley, T.A.: The properties of grain in bulk. III. The thermal conductivity of wheat, maize and oats. Trans. Soc. Chem. Industr. Bd. 63 (1944) Nr. 2, S. 53/55.
- [ 4 ] Kazarian, E.A. u. C.W. Hall: Thermal properties of grain. Trans. ASAE Bd. 8 (1965) Nr. 1, S. 33/38.
- [ 5 ] Babbitt, E.A.: The thermal properties of grain in bulk. Can. J. Research Bd. 23 F (1945) S. 388/401.
- [ 6 ] Moote, I.: The effect of moisture on the thermal properties of wheat. Can. J. Techn. Bd. 31 (1953) Nr. 2 u. 3, S. 57/69.
- [ 7 ] Hooper, F.C. u. S.C. Chang: Development of the thermal conductivity probe. Trans. ASHVE Bd. 59 (1953) S. 463/72.
- [ 8 ] Chandra, S. u. W.E. Muir: Thermal conductivity of spring wheat at low temperatures. Trans. ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 4, S. 644/46.
- [ 9 ] Bakke, A.L. u. H. Stiles: Thermal conductivity of stored oats with different moisture content. Plant Physiology Bd. 10 (1935) S. 521/27.
- [ 10 ] Dua, K.K. u. T.P. Ojha: Measurement of thermal conductivity of paddy grains and its byproducts. J. agric. Engng. Res. Bd. 14 (1969) Nr. 1, S. 11/17.
- [ 11 ] Wratten, F.T. et al.: Physical and thermal properties of rough rice. Trans. ASAE Bd. 12 (1969) Nr. 6, S. 801/803.
- [ 12 ] Sharma, D.K. u. T.L. Thompson: Specific heat and thermal conductivity of sorghum. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 1, S. 114/17.
- [ 13 ] Komysnik, L.D., A.P. Zuravlev, R.G. Tasibekova, u.a.: Die Wärmeleitfähigkeit einer Weizen-, Hirse-, Reis- und Buchweizenschicht (Orig. russ.) Piscevaja tehnologija Bd. 107 (1975) Nr. 4, S. 126/28.
- [ 14 ] Pabis, S., E. Bilovitska u. S.P. Gadai: Thermal conductivity and thermal diffusivity in grain layers of some agricultural produces. J. Engng. Phys. Bd. 19 (1970) Nr. 3, S. 1150/54.
- [ 15 ] Timbers, G.E.: Properties of rapeseed. 1. Thermal conductivity and specific heat. Can. Agric. Engng. Bd. 17 (1975) Nr. 2, S. 81/84.
- [ 16 ] Egorov, G.A.: Untersuchung der wärmephysikalischen Eigenschaften pulveriger Lebensmittel (Orig. russ.) Hochschulnachr. Lebensmittelind. (1960) Nr. 2, S. 14/16.
- [ 17 ] Jasansky, A. u. W.K. Bilanski: Thermal conductivity of whole and ground soybeans. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 1, S. 100/103.
- [ 18 ] Watts, K.C. u. W.K. Bilanski: Method for estimating the thermal diffusivity of whole soybeans. Trans. ASAE Bd. 16 (1973) Nr. 6, S. 1143/45.
- [ 19 ] Bilanski, W.K. u. D.R. Fisher: Thermal conductivity of rapeseed. Trans. ASAE Bd. 19 (1976) Nr. 4, S. 788/91.
- [ 20 ] Moysey, E.B., J.T. Shaw u. W.P. Lampman: The effect of temperature and moisture on the thermal properties of rapeseed. Trans. ASAE Bd. 20 (1977) Nr. 3, S. 461/64.
- [ 21 ] ●Kostaropoulos, A.E.: Wärmeleitzahlen von Lebensmitteln und Methoden zu deren Bestimmung. Frankf.: VDMA, 1971.
- [ 22 ] Hooper, F.C. u. F.R. Lepper: Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivity. Trans. ASHVE Bd. 56 (1950) S. 309/324.
- [ 23 ] Lentz, C.P.: A transient heat flow method of determining thermal conductivity; application to insulating materials. Can. J. Techn. Bd. 30 (1952) S. 153/66.
- [ 24 ] Vos, B.H.: Measurements of thermal conductivity by a non-steady state method. Applied Scientific Research A 5, (1955) S. 425/38.
- [ 25 ] Underwood, W.M. u. R.B. McTaggart: The thermal conductivity of several plastics, measured by an unsteady state method. Heat Transfer, Chemical Engineering Progress Symposium Series Bd. 56 (1960) Nr. 30, S. 262/68.
- [ 26 ] Van der Held, E.F.M. u. F.G. Van Drunen: A method of measuring the thermal conductivity of liquids. Physica Bd. 15 (1949) Nr. 10, S. 865/81.
- [ 27 ] ●Nix, G.H., G.W. Lowery, R.I. Vachon u. G.E. Tanger: Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source technique. Progress in Aeronautics and Astronautics: Thermophysics of Spacecraft and Planetary Bodies Bd. 20 (1967) S. 865/78. New York: Academic Press, 1967.
- [ 28 ] Dickerson, R.W. u. R.B. Read: Calculation and measurement of heat transfer in foods. Food Technology Bd. 22 (1968) S. 1533/38.
- [ 29 ] Sweat, V.E., C.G. Haugh u. W.J. Stadelmann: Thermal conductivity of chicken meat at temperatures between - 75 and 20 °C. J. Food Science Bd. 38 (1973) S. 158/60.
- [ 30 ] Sweat, V.E.: Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. J. Food Science Bd. 39 (1974) S. 1080/83.
- [ 31 ] Sweat, V.E.: Experimental measurement of the thermal conductivity of a yellow cake. 13th Annual Conference on Thermal Conductivity, Rolla, Missouri, November 1973.
- [ 32 ] Mühlbauer, W. u. R. Scherer: Die spezifische Wärme von Körnerfrüchten. Grundl. Landtechnik Bd. 27 (1977) Nr. 2, S. 33/40.
- [ 33 ] Mühlbauer, W.: Untersuchungen über die Trocknung von Körnermais unter besonderer Berücksichtigung des Gleichstromverfahrens. Forschungsbericht des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft zur Förderung der Agrartechnik, Frankfurt. Heft 1, 1974. Im Selbstverlag des Verfassers, Lehrstuhl für Landtechnik, Uni Hohenheim.
- [ 34 ] ●Krischer, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Bd. 1, 2. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1963.
- [ 35 ] Krischer, O.: Der Einfluß der Feuchtigkeit, Körnung und Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit körniger Stoffe. Habilitationsschrift TH Darmstadt, 1934.