



Anhaltswerte für die Temperaturleitfähigkeit von Lebensmitteln

A. E. Kostaropoulos, W. E. L. Spiess und W. Wolf

Institut für Lebensmittelverfahrenstechnik der Universität Karlsruhe
und Bundesforschungsanstalt für Ernährung, Institut für Chemie
und Technologie, D-75 Karlsruhe 1 (Deutschland)
(Eingegangen 16. Dezember 1974, Angenommen 10. Januar 1975, Iwt 303)

Die Temperaturleitfähigkeit ist ein Stoffwert, dessen Kenntnis in der Lebensmitteltechnologie – zur Berechnung instationärer Wärmetransportvorgänge wie Erwärmung und Abkühlung – von grosser Bedeutung ist. In der vorliegenden Arbeit werden eine Systematisierung von Messmethoden sowie Anhaltswerte für verschiedene Lebensmittelgruppen gegeben. Die mittleren Temperaturleitfähigkeitswerte einer Reihe von Lebensmitteln mit dem zugehörigen Gültigkeitsbereich und einer umfangreichen Quellenangabe sind in einer Tabelle zusammengestellt.

Reference values for the thermal diffusivity of foodstuffs

The thermal diffusivity represents a specific parameter which is of great importance in food technology for the computation of non-stationary processes of heat transfer such as heating and cooling. The present study provides a systematic survey of measuring methods and reference values for various categories of foods. The mean thermal diffusivity values for several kinds of food with pertinent temperatures and extensive references have been compiled in a table.

1.0 Einleitung

Die Temperaturleitfähigkeit ist ein Stoffwert, der die Geschwindigkeit der Ausbreitung eines Temperaturfeldes in einem Körper ohne innere Wärmequelle charakterisiert. Sie ist um so höher, je grösser die Wärmeleitfähigkeit ist und je geringer die spezifische Wärmekapazität und die Dichte des Körpers sind. Die Temperaturleitfähigkeit ist dementsprechend definiert als

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad [\text{Eqn. 1}]$$

wobei ρ die Dichte, λ die Wärmeleitfähigkeit und c die spezifische Wärmekapazität des Körpers darstellen. Die Kenntnis der Temperaturleitfähigkeit a ist für die Berechnung instationärer Wärmetransportvorgänge, wie Erwärmung und Abkühlung, von grosser Bedeutung, da entsprechend der Fourierschen Differentialgleichung für den instationären Wärmetransport durch Leitung folgende Beziehung gilt:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \nabla^2 \vartheta = a \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \right) \quad [\text{Eqn. 2}]$$

2.0 Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit eines Stoffes kann auf direktem und indirektem Wege bestimmt werden.

2.1 Die direkte Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit

Die Messmethoden zur direkten Messung der Temperaturleitfähigkeit lassen sich bezüglich der Wärmequelle wie folgt unterteilen (1):

- A. Punkt- oder linienförmige Wärmequellen
- B. Flächenförmige Wärmequellen
- C. Sonstige Wärmequellen

Die direkte Bestimmung erfolgt über die Darstellung instationärer Wärmetransportvorgänge durch die Fouriersche Differentialgleichung. Die praktische Berechnung der Temperaturleitfähigkeit gestaltet sich dabei in der Regel schwierig. Für die Berechnung von Abkühlvorgängen einfacher Körper, wie Platte, Zylinder und Kugel, liegen jedoch in der Literatur Werte-Tafeln vor (33, 34), die die Berechnungen stark vereinfachen. Die Ergebnisse derartiger Berechnungen sind im Vergleich zu den mit indirekten Methoden gewonnenen Werten aus stationären Untersuchungen wegen der meist nicht exakten Erfüllung der Randbedingungen der jeweiligen Differentialgleichung ungenauer.

2.2 Die indirekte Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit

Die indirekte Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit erfolgt entsprechend [Eqn. 1]; hierbei ist die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit, der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität eines Stoffes Voraussetzung. In der Regel sind die letztgenannten Grössen bekannt bzw. durch Messungen zugänglich. Die Wärmeleitfähigkeit muss im allgemeinen durch relativ aufwendige Messmethoden bestimmt werden. Die Genauigkeit der indirekten Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit hängt von der Genauigkeit ab, mit der die in [Eqn. 1] enthaltenen Stoffwerte angegeben sind. Massgebend dürfte in jedem Fall sein, mit welcher Genauigkeit die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden kann. Normalerweise lassen sich durch die indirekte Bestimmung Genauigkeiten von $\pm 5\%$ erreichen, während die direkten Methoden mit einem Fehler zwischen 5 und 12% behaftet sind.

Tab. 1 Mittlere Temperaturleitfähigkeiten von Lebensmitteln

	Lebensmittel	Temperaturleitfähigkeit [m ² /h] · 10 ⁻⁴	Temperaturbereich (°C)	Literaturquelle	Bemerkungen
Fette und Fleisch	Fett	3,7 2,2	0./.-30 20./. 30	5 5, 6	Rind, Schwein
	Fleisch	16,3 4,7	-10./.-65 -5./. 65	5, 7 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	Rind, Schwein, Hammel, Hähnchen
	Fisch	4,1	-10	3	Schwein: $\rho = 250 \text{ kg/m}^3$, $\text{H}_2\text{O} = 5\%$
		13,3 4,6	-10./.-20 0./. 60	16 15, 16	
Tierische Erzeugnisse	Butter	5,2 2,4	-10./.-35 -5./. 17	18 17, 18, 19	
	Eier	4,9	5./. 65	15	Eiklar
	Honig	4,0	-5./. 35	20	$\rho = 1000 - 1400 \text{ kg/m}^3$
	Käse	4,8		20	fett
	Milch/allg. Milch/Rahm	4,5 3,5	15./. 20 0./. 22	17, 19, 20, 21 22	
	Speiseeis	14,0	-4./.-16	23	Fett: 3,5% ./.. 10%
Getreide	Brot	6,0 2,9		24	$\rho = 545 \text{ kg/m}^3$ $\rho = 420 \text{ kg/m}^3$
	Reis	2,4		25	$\text{H}_2\text{O} = 13\% \text{ ./.. } 21\%$
	Teig	6,9		24	$\text{H}_2\text{O} = 45\%$ (Weizenmehl)
	Weizen	3,9		26, 27	$\text{H}_2\text{O} = 1,5\% \text{ ./.. } 15\%$
Obst und Obsterzeugnisse	Apfelmus	4,0	5./. 65	15	$\text{H}_2\text{O} = 40\% - 50\%$
	Marmelade	4,0	5./. 65	15	$\text{H}_2\text{O} = 45\%$
	Äpfel	5,0		28, 29	
	Erdbeeren	5,4		29	
	Orangen	4,7		28	
Gemüse und sonstige pflanzliche Erzeugnisse	Bohnen	4,5			
	Erbsen	4,5		29	
	Karotten	6,1		30, 31, 32	
	Kartoffel	5,6		30, 32	
	Rüben	5,7		30, 32	
	Tomaten	4,5	25./. 65	33	$\text{H}_2\text{O} = 60\% \text{ bis } 70\%$ (Konzentr.)
	Margarine	2,5	15./. 60	34	
	Zucker	3,9	15./. 85	20	
	Kaffee	5,6	20	3	$\rho = 260 \text{ kg/m}^3$, $\text{H}_2\text{O} = 5\%$ (gefr. getr.)
	Kartoffel	4,9	20	3	$\rho = 250 \text{ kg/m}^3$, $\text{H}_2\text{O} = 5\%$ (gefr. getr.)

3.0 Durchschnittswerte von Temperaturleitfähigkeiten bei Lebensmitteln

Wie im Falle der Wärmeleitfähigkeit (2) können auch für die Temperaturleitfähigkeit von Lebensmitteln gewisse Orientierungswerte angegeben werden. Da die Temperaturleitfähigkeit eines Produktes in erster Linie von seiner Zusammensetzung abhängig ist, können 3 Hauptgruppen definiert werden:

1. Feuchte Lebensmittel
 - 1.a) Feuchte Lebensmittel in nichtgefrorenem Zustand
 - 1.b) Feuchte Lebensmittel in gefrorenem Zustand
2. Trockene Lebensmittel
3. Fettreiche Lebensmittel bzw. Fette

Die Temperaturleitfähigkeit feuchter Lebensmittel liegt im allgemeinen bei einem Wert von $5 \cdot 10^{-4}$ [m²/h], während die Werte für gefrorene, feuchte Lebensmittel in der Größenordnung von $15 \cdot 10^{-4}$ [m²/h] liegen. Bei der Gruppe der gefrorenen Lebensmittel macht sich insbesondere der Einfluss der gegenüber nichtgefrorenen Lebensmitteln veränderten Wärmeleitfähigkeit und Dichte bemerkbar. Ähnliches gilt für Fette, wo die gegenüber flüssigen Lebensmitteln veränderte Wärmeleitfähigkeit ebenfalls von Bedeutung ist. Die Werte für Fette liegen in der Größenordnung von $3 \cdot 10^{-4}$ [m²/h]. Die Temperaturleitfähigkeit getrockneter Lebensmittel wird in erster Linie von deren Porosität bestimmt. Diese Tatsache ist auf die grossen Unterschiede zwischen dem Produkt aus $\rho \cdot c$ für Wasser und für Luft zurückzuführen. Der Wert für Wasser ist um den Faktor 4000 grösser als der für Luft (4). Für getrocknete Produkte in körnigem Zustand ($\rho = 250$ kg/m³, $t = 20^\circ\text{C}$) kann als Richtwert eine Temperaturleitfähigkeit von $4 \cdot 10^{-4}$ [m²/h] angenommen werden.

In Tab. 1 sind die Werte von Temperaturleitfähigkeiten für verschiedene Lebensmittel dargestellt. Die hierin angegebenen Werte sind arithmetische Mittelwerte von eigenen Messungen (3) sowie von Werten aus dem internationalen Schrifttum. Für die Bildung des arithmetischen Mittelwertes wurden die Werte aus der Literatur ausgewählt, die unter weitgehend gleichen Messbedingungen ermittelt worden waren. Nach der Bildung eines ersten Mittelwertes wurden zur Bestimmung des endgültigen Mittelwertes nur diejenigen Daten beibehalten, die nicht mehr als $\pm 35\%$ um den ersten Mittelwert streuten. Die Wahl dieses Bereiches ist damit begründet, dass

- a) die Stoffeigenschaften der Lebensmittel eine beträchtliche natürliche Streuung aufweisen und
- b) die Temperatur, der Wasser- und Fettgehalt der einzelnen Substanzen einer Messreihe bis zu 30% von den diesbezüglichen arithmetischen Mittelwerten abweichen.

Wegen der erwähnten Streuung können die in Tab. 1 angegebenen Werte nur als Anhaltspunkte für die Praxis dienen; für diesen Zweck dürfte ihre Genauigkeit jedoch ausreichen.

Literaturverzeichnis

- 1 KOSTAROPOULOS, A. E., Wärmeleitfähigkeiten von Lebensmitteln und Methoden zu deren Bestimmung. Berichtsheft der Fachgemeinschaft Lufttechnische u. Trocknungsanlagen im VDMA. Heft 16 (1971)
- 2 KOSTAROPOULOS, A. E. und VOGELPOHL, A., Wichtig aber schwierig zu bestimmen – Wärmeleitfähigkeit von Lebensmitteln. Maschinenmarkt Industriejournal 78 (1972), Nr. 88, S. 2047/2048
- 3 KOSTAROPOULOS, A. E., Die Wärme und Temperaturleitfähigkeit getrockneter Lebensmittel. Diss. Uni. Karlsruhe (1971)
- 4 VDI-Wärmeatlas, DB 1/4
- 5 KOBULASCHWILI, SCH. N., Hrsg.: Cholodilnaja Techn.-Enzyklop. Handbuch Bd. 2. Kälteanwendung in der Industrie und beim Transport (Orig. russ.), Moskau, Gostorgizdat (1961)
- 6 LAPSCHIN, A. A., Untersuchung des Wärmeaustausches in einem röhrenförmigen Apparat mit drehbarem Vertreiber (Orig. russ.). Mjasnaja Industr. SSSR 30 (1959), Nr. 3
- 7 RJUTOW, D. G., Das schnelle Gefrieren von Fleisch (Orig. russ.). Moskau: Pistschepromizdat (1936)
- 8 PELEEVA, A., BRAZNIKOW, A., A thermophysical substantiation of parameters of sansage thermal treatment with purpose the automatization (Orig. russ.). Mjasnaja Industr. SSSR 38 (1967), Nr. 10, S. 30/33
- 9 RIEDEL, L., Zur Theorie der Hitzesterilisierung von Dosen. Mitteil. des Kältetechn. Inst., Bundesforsch. Anstalt f. Lebensmittelrisikoforschung Nr. 1 Karlsruhe, C. F. Müller-Verl. (1947)
- 10 BAEHR, H. D., Wärmeleitung. In Handbuch der Kältetechnik Hrsg. R. Plank, Bd. 3; Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer Verlag (1959)
- 11 DICKERSON, R. W., An Apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. Food Technology 19 (1965), Nr. 5, S. 198/204
- 12 EARLE, R., FLEMING, A., Cooling and freezing of lamb and mutton carcass. Food Technology 21 (1967)
- 13 WAZNIK, L., MAZUR, P., Abhängigkeit der wärmephysikalischen Schweinefleischeigenschaften von dessen Feuchtigkeit und Sorte beim Pökeln (Orig. russ.). Mjasnaja Industr. SSSR 40 (1969), Nr. 11, S. 41/42
- 14 RUBANIK, W., BABYNOW, G., TSCHERNIJIJ, A., Wärme-physikalische Charakteristika des Wurstbräters. Mjasnaja Industr. SSSR 40 (1969), Nr. 7, S. 33/35
- 15 RIEDEL, L., Temperaturleitfähigkeitsmessungen an wasserreichen Lebensmitteln. Kältetechnik 21 (1969), Nr. 11, S. 315/316
- 16 ZEITSEV, V. P., Preservation of food products by refrigeration. London: Oldbourne Press-Verlag (1965)
- 17 INICHOW, G. Ss., Biochemie der Milch und der Milchprodukte. Berlin: Technik-Verlag (1959)
- 18 OLENEW, J. A., Eine Untersuchung der Eigenschaften von Rahmbutter in niedrigen Temperaturen, um das Rationalisieren seiner Bearbeitung auf tieferen Temperaturen und Lagerung zu erforschen (Orig. russ.). Awtoreferat Kandidatschii L. (1959)
- 19 DANILOWA, G. N., Sammlung von Aufgaben und Berechnung über die Wärmeübertragung (Orig. russ.). Moskau, Gostorgizdat (1961)
- 20 TSCUBIK, I. A., MASLOW, A. M., Handbuch über wärme-physikalische Konstanten von Lebensmittelerzeugnissen und Halbfabrikaten (Orig. russ.). Moskau: Izdatelstwo «Pistschewaja Promischlenost» (1965)
- 21 Physikalische Stoffwerte von Milch. Welt der Milch 16 (1962), Nr. 51–52, S. 1670
- 22 KUK, G. A., Prozesse und Apparate der Milchindustrie (Orig. russ.), Bd. 1, Moskau: Pistschepromizdat (1955)
- 23 DEZENT, G. M., BONSCHEW, T. A., Einrichtungen und automatische Linien für die Produktion von Speiseeis (Orig. russ.). Moskau: Gostorgizdat (1961)
- 24 GINZBURG, A. C., Die Trocknung von Lebensmitteln (Orig. russ.). Moskau: Pistschepromizdat (1960)
- 25 KORATEJEW, I., SERICH, G. M., Wärmephysikalische Stoffwerte von rohem Reis (Orig. russ.). Pistschewaja Techn. 62 (1967), Nr. 1, S. 82/83
- 26 MOSTE, I., The effect of moisture on the thermal properties of wheat. Can. J. of Techn. 31 (1953), Nr. 1, S. 57/69
- 27 BABBIT, J. D., Thermal properties of wheat in bulk. Can. J. Res., Sec. F. 23 (1945), S. 388/401
- 28 GANE, R., The thermal conductivity of the tissue of fruits. Report of the Food Invest. Broad. Gr. Brit. 5 (1935–1936), S. 211/214
- 29 KETHLEY, T. W., et al., Estimate of thermal conductivities of fruits and vegetables. Refr. Eng. 58 (1950), Nr. 1, S. 49/50
- 30 GROMOW, M. A., KRASOWSKAJA, G. I., Die wärme-physikalischen Stoffwerte von Kartoffel und Gemüse (Orig. russ.). Konserv. i. Owostsches. Pomischl. 22 (1967), Nr. 9, S. 13/16
- 31 KRETOV, J. T., PLESCHKOW, A. I., Änderungen der wärme-physikal. Stoffwerte bei der Trocknung von Gemüse (Orig. russ.). Pistschew. Techn. 61 (1966), Nr. 4, S. 144/146
- 32 WISCHELESKIJI, A. N., GROMOW, M. A., Wärmephysikalische Eigenschaften von Kartoffeln und Gemüse. Konserv. i. Owostsches. Pomischl. 18 (1963), Nr. 11
- 33 GRÖBER, H. und ERK, S., Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Berlin, Springer, 1933
- 34 BUCHMANN, H., Tafeln über Abkühlvorgänge einfacher Körper. Berlin, Springer, 1938