

Einflussfaktoren bei der Abkühlung von Backwaren Influencing factors at cooling of bakery products

Yvonne Ringelspacher, Oliver Litfin, Antonio Delgado

Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Cauerstr. 4, D-91058 Erlangen

Schlagworte: Backtechnologie, Abkühlung, Wärmeübergänge, Stofftransport
Keywords: Baking technology, Cooling, Heat transfer, Mass transfer

Zusammenfassung

Industrielle Kühlung von Backwaren ist ein zeit- und energieintensiver Prozess. Mithilfe numerischer Simulationen können dafür Temperaturverteilungen und Abkühlzeiten ermittelt und so Prozessparameter und Luftführung optimiert werden. Das angestrebte Ziel ist es, Abkühlzeit und somit Energiekosten einzusparen. Bei der Betrachtung der Kühlung von Backwaren müssen außer den Wärmeübergängen (Konvektion, Wärmeleitung und Strahlung) zusätzlich Stofftransporte berücksichtigt werden, da Wasser aus dem Produkt verdampft. Die Verdampfung führt einerseits zu einem Kühleffekt durch die latente Wärme und andererseits zu einem Massenverlust mit gleichzeitiger Verringerung der spezifischen Wärmekapazität der Backware. Bisher ist nur wenig Literatur über die genaue physikalische Beschreibung dieser Effekte zu finden. Pastukhov und Danin beschreiben dazu ein Modell, bei dem Modellparameter wie der Wärmeübergangskoeffizient an experimentelle Abkühlkurven angepasst werden (Pastukhov und Danin, 2011; Pastukhov, 2015, 2016).

In der vorliegenden Arbeit werden numerisch und experimentell bestimmte Abkühlkurven miteinander verglichen. Die Abkühlung von Brötchen wurde in einer 1 m³ Testkammer untersucht, wobei die Kerntemperatur (an vier Messstellen) und das Gewicht des Bleches mit den Brötchen aufgezeichnet wurden. Luftströmung und Wärmeübergänge wurden mit ANSYS CFX simuliert, wobei die Turbulenz über das Shear Stress Transportmodell und der Wärmeübergang durch Konvektion, Wärmeleitung und -strahlung durch in CFX integrierte Modelle berücksichtigt wurden. Die Menge an verdampftem Wasser wurde dabei über zuvor aufgenommene Gewichtskurven ermittelt. Bei im Vergleich zur Literatur (Rask, 1989; Zanoni et al., 1995; Sablani et al., 2002) höher angenommenen Temperaturleitfähigkeiten für Brötchen verlief die Abkühlung in Simulationen langsamer als im Experiment. Mögliche Gründe hierfür werden diskutiert.

Einleitung

Die industrielle Abkühlung von Backwaren kann je nach Produkt und Verfahren zu einem großen Teil der Energiekosten der Bäckerei beitragen. Beispielsweise kann die Abkühlzeit von Schnittbrot je nach Jahreszeit 6-12 h betragen. Dies ist in diesem Fall für Bäckereien besonders kritisch, da das Brot erst nach der Abkühlung weiter verarbeitet werden kann. Aus Platz- und Zeitgründen werden häufig Kältemaschinen eingesetzt (Lösche, 2003). Um den Abkühlprozess zu optimieren, muss dieser verstanden und mathematisch beschrieben werden.

Werden Lebensmittel auf über 100°C erhitzt (z.B. beim Backen, Frittieren, Grillen), beginnt ein Teil des nicht gebundenen Wassers zu verdampfen. Die Verdampfung trägt entscheidend zu Wärmeübergängen bei. Für Wärmeübergänge von Backprozessen werden einige Modelle in der Literatur diskutiert (Fahloul et al., 1994; Zanoni et al., 1994; Broyart und Trystram, 2002).

Beim Abkühlprozess ist die Menge an verdampfendem Wasser zwar geringer, jedoch ist der Effekt, den das verdampfende Wasser auf die Abkühlung hat, nicht zu vernachlässigen. Modelle zur Abkühlung von Backwaren sind in der Literatur nur wenige zu finden. Pastukhov und Danin (2011), Pastukhov (2015) und Pastukhov (2016) beschreiben Modelle, die die Abkühlung unter Berücksichtigung der Verdampfung von Wasser beschreiben. Dabei werden Modellparameter an experimentelle Temperaturkurven angepasst, d.h. sie eignen sich nicht, um Temperaturkurven eines Prozesses mit sich verändernden Bedingungen z.B. in Temperatur, Luftvolumenstrom, relativer Luftfeuchte oder Produkt darzustellen. Im Folgenden werden experimentelle und durch Strömungssimulation ermittelte Kerntemperaturkurven von Brötchen verglichen und diskutiert, welche Effekte bei der Abkühlung eine Rolle spielen.

Material und Methoden

Temperatur- und Gewichtskurven von Kaiserbrötchen wurden experimentell ermittelt und der Abkühlvorgang in einer Strömungssimulation dargestellt. Ergebnisse von Experimenten und Simulationen wurden miteinander verglichen.

Durchführung der Experimente

Aus Weizenmehl derselben Mehcharge, 60 % Trinkwasser, 4 % Backmittel, 2 % Kochsalz, 1 % Trockenhefe und 1 % Tafelöl (Prozentangaben bezogen auf die Mehleinwaage) wurde ein Teig erstellt, Kaiserbrötchen mit je $61 \pm 1,5$ g mit typischer Prägung geformt und zwei Lochbleche mit je 12 Teiglingen nach zwei Stunden Teigruhe mit einem definierten Temperaturprogramm unter Schwadenzugabe gebacken. Unmittelbar nach Beenden des Backvorganges

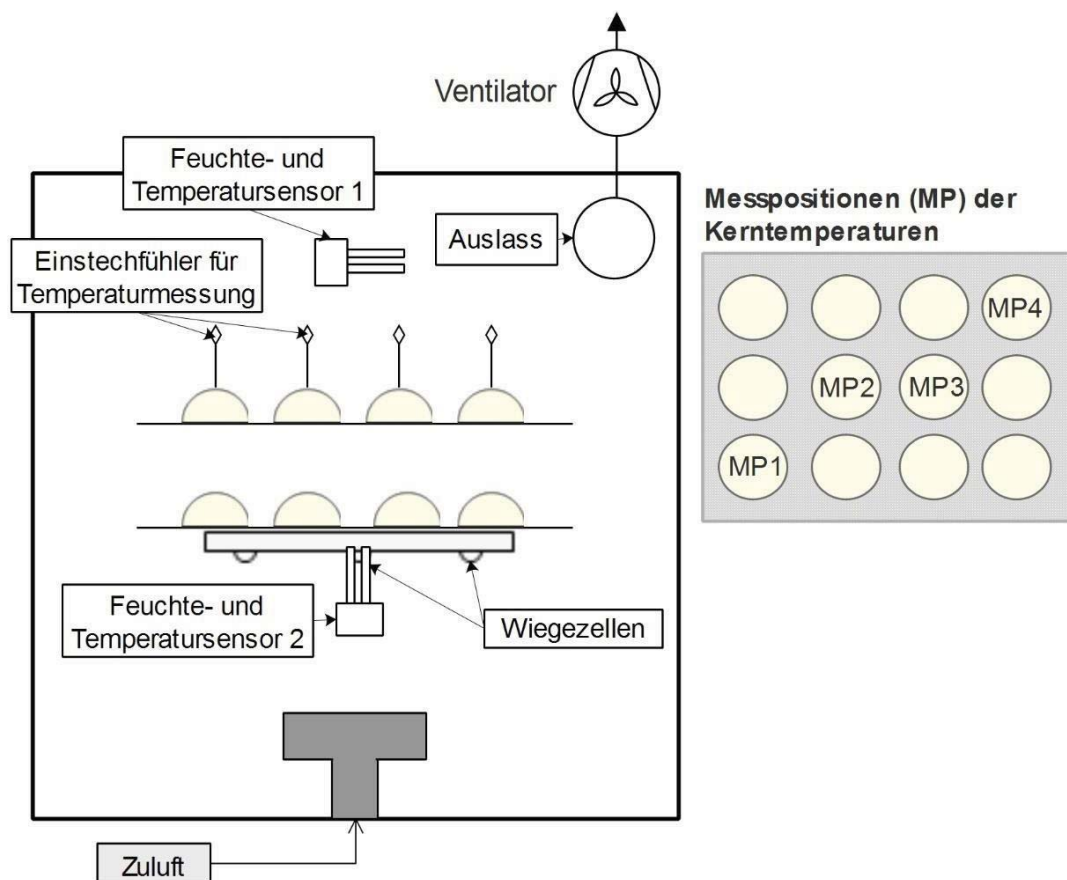


Abb. 1: Schematische Darstellung der Versuchskammer

wurden die Bleche in einer Kammer bei einem Luftstrom von etwa $65 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ abgekühlt, wobei Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchte überwacht wurden. Während des Abkühlvorgangs wurde das Gewicht des unteren Bleches mit Wiegezellen und Kerntemperaturen von vier Stichproben auf dem oberen Blech mit Einstechfühlern aufgezeichnet (Versuchsaufbau siehe Abb. 1).

Der Versuch wurde insgesamt 7-mal wiederholt.

Strömungssimulation

Geometrie und Rechennetz

Das Rechennetz wurde mithilfe des Vernetzers der ANSYS Workbench generiert (siehe Abb. 2), wobei die Grenzschicht zwischen Brötchen/Blech und Luft feiner aufgelöst wurde. Simulationen mit einem feineren Netz führten zu ähnlichen Rechenergebnissen.

Das Volumen der Brötchengeometrie wurde so angepasst, dass das Gewicht unter Annahme einer Dichte von 210 kg m^{-3} , entsprechend dem Gewicht eines Brötchens, 55 g betrug.

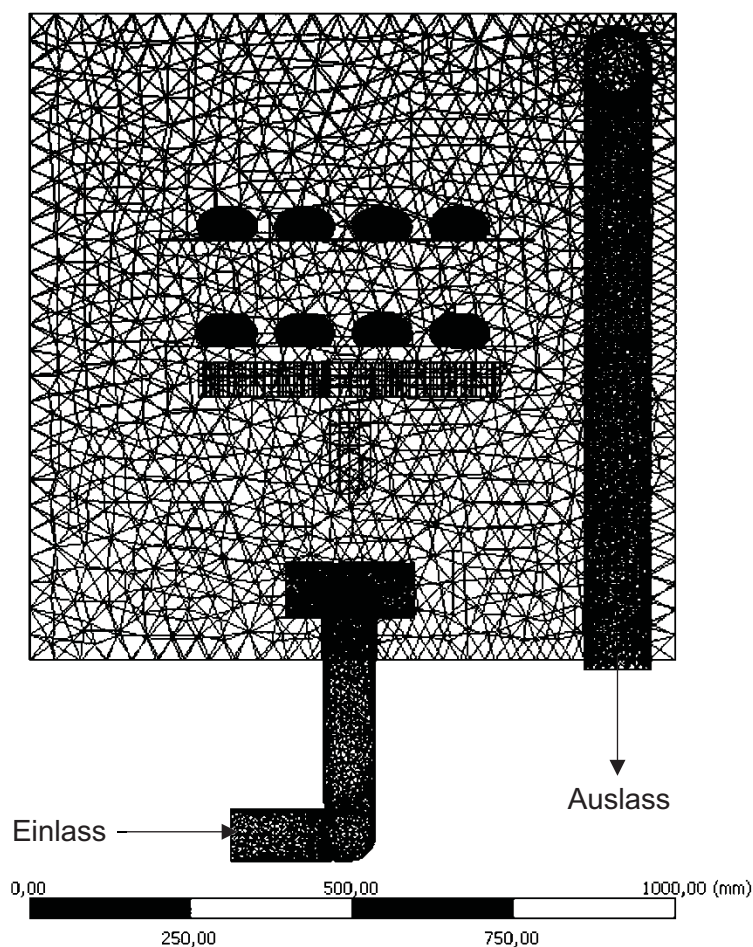


Abb. 2: Darstellung des Rechennetzes

Modellierung

Die Strömungssimulation wurde mit der kommerziellen Software ANSYS CFX durchgeführt. Die Geschwindigkeit wurde am Einlass vorgegeben, sodass der Volumenstrom $65 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ betrug. Am Auslass wurde ein Relativdruck von 0 Pa vorgegeben.

Als Turbulenzmodell diente das Shear Stress Transportmodell. Natürliche Konvektion und Gravitation wurden mit dem Buoyancy-Modell beschrieben.

Als Materialeigenschaften für Brötchen wurden eine spezifische Wärmekapazität von $2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, eine Wärmeleitfähigkeit von $0,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und eine Dichte von 210 kg m^{-3} angenommen.

Wärmestrahlung wurde mit dem Monte Carlo-Modell beschrieben, wobei der Emissionskoeffizient der Brötchen als 0,9 und der Bleche als 0,2 angenommen wurde.

Die Bleche besaßen die Materialeigenschaften von Aluminium, wobei die Dichte so angepasst wurde, dass das Gewicht eines Bleches, entsprechend den im Versuch verwendeten Lochblechen, 0,7 kg betrug.

Lufttemperatur wurde mit 25°C (entsprach Raumlufttemperatur bei Versuchen), Brötchen- und Blechtemperatur mit 100°C initialisiert. In einer ersten Simulation wurden nur Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion berücksichtigt und der Massentransport von Wasser aus den Brötchen vernachlässigt.

In einer weiteren Berechnung wurde die latente Wärme der Menge Wasser, die während der Abkühlung verloren geht, an der Oberfläche der Brötchen abgeführt.

Der zeitliche Gewichtsverlauf $w(t)$ wurde durch eine Modellkurve der Form

$$w(t) = w_{end} + (w_0 - w_{end}) \cdot e^{-a \cdot t} \quad \text{Gl. 1}$$

beschrieben. Der Parameter a wurde durch Anpassung an eine aus sieben Versuchen gemittelte Gewichtskurve mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt. Als w_{end} wurde vereinfacht das Gewicht zum Ende der Abkühlung, und als w_0 das Gewicht zu Beginn der Gewichtsaufzeichnung angenommen. Es wurde angenommen, dass jedes Brötchen während der Abkühlung den gleichen Gewichtsverlust erfährt. Die zeitliche Gewichtsänderung ergibt sich aus der zeitlichen Ableitung der Modellfunktion. Die Verdampfungswärme ΔH_v , die zu jedem Zeitschritt Δt abgeführt wird, ergibt sich zu:

$$\Delta H_v = \frac{a w}{dt} \cdot \Delta h_v \quad \text{Gl. 2}$$

Als spezifische Verdampfungswärme Δh_v wurde ein konstanter Wert von 2256 kJ kg^{-1} angenommen. Die Verdampfungswärme ΔH_v wurde als Wärmequelle an der Oberfläche der Brötchen eingefügt.

Der Zeitschritt betrug zu Beginn der Simulation 0,1 s und wurde dann stetig vergrößert (1/3 s bis zur 10ten Sekunde, 1 s bis zur 50ten Sekunde und 2 s nach Ablauf von 50 s).

Ergebnisse und Diskussion

Abb. 3 zeigt mittlere Kerntemperaturen von vier Brötchen (Messpositionen siehe Abb. 1), die experimentell bestimmt (Mittelwertskurve aus 7 Versuchen) und aus Simulationen berechnet wurden. Da im Experiment vom Herausnehmen des Bleches aus dem Backofen bis zum Versuchsstart eine gewisse Zeit vergeht, startet die experimentell bestimmte Kurve bei $t = 1,5 \text{ min}$, während die durch Simulation bestimmten Kurven bei $t = 0$ beginnen.

Durch Simulationen ermittelte Temperaturverläufe zeigen in allen dargestellten Fällen eine langsamere Abkühlung als in Experimenten gemessen.

Dies ist der Fall, obwohl die Temperaturleitfähigkeit der Brötchen, spezifische Wärmekapazität c_p mit $2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, Wärmeleitfähigkeit λ mit $0,8 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und Dichte mit 210 kg m^{-3} , höher angenommen wurde als in der Literatur angegeben. Spezifische Wärmekapazitäten für Weizenbrote/ Brotkrumen werden, je nach Literaturquelle und Brotsorte zwischen $1950\text{-}3190 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,055\text{-}0,37 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ angegeben (Unklesbay et al., 1982; Rask, 1989; Zaroni et al., 1995; Sablani et al., 2002).

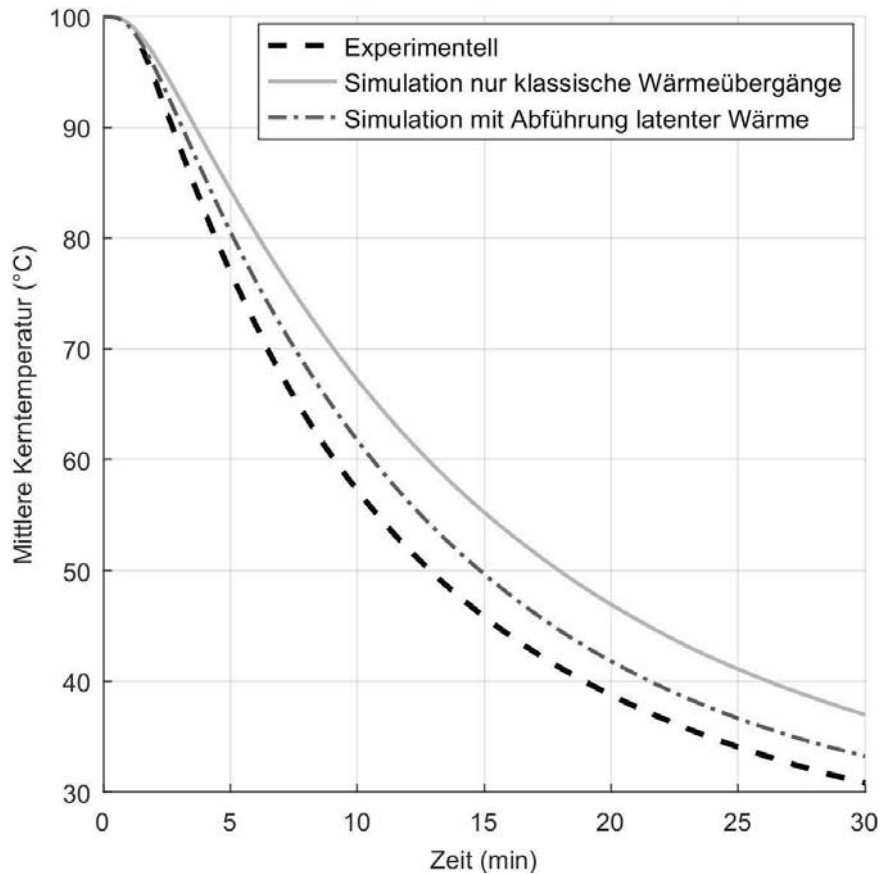


Abb. 3: Experimentell und simulativ bestimmte Abkühlkurven

Bei Vernachlässigung der latenten Wärme ergeben sich starke Unterschiede in den Temperaturkurven, woraus sich schließen lässt, dass die Verdampfung von Wasser einen starken Einfluss auf die Abkühlung hat.

Die Verdampfung von Wasser hat noch weitere Effekte, die den Wärmeübergang beeinflussen, die in der Simulation nicht berücksichtigt wurden. Da sich während der Abkühlung die Masse ohne Volumenänderung der Brötchen ändert, ändert sich die Dichte. Zudem verringert sich die spezifische Wärmekapazität der Brötchen, da die spezifische Wärmekapazität von Wasser höher ist als die der Trockensubstanz.

Die Änderung der spezifischen Wärmekapazität Δc_p beträgt theoretisch:

$$\Delta c_p = \left(\frac{m_{H_2O,0}}{m_{ges,0}} - \frac{m_{H_2O,0} - \Delta m_W}{m_{ges,0} - \Delta m_W} \right) \cdot c_{p,W} + \left(\frac{m_{DS}}{m_{ges,0}} - \frac{m_{DS}}{m_{ges,0} - \Delta m_W} \right) \cdot c_{p,DS} \quad \text{Gl. 3}$$

$m_{H_2O,0}$ Masse an Wasser, die zum Zeitpunkt 0 im Brötchen enthalten ist

$m_{ges,0}$ Gesamtmasse des Brötchens zum Zeitpunkt 0

Δm_W Masse an verlorenem Wasser

$c_{p,W}$ Spezifische Wärmekapazität von Wasser

m_{DS} Masse an Trockensubstanz, die im Brötchen enthalten ist

$c_{p,DS}$ Spezifische Wärmekapazität der Trockensubstanz

Geht man beispielsweise von einer Gesamtwärmekapazität von $2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, einem Anfangswassergehalt von 35 % (w/w), einem Anfangsgewicht von 55 g einem Gewichtsverlust von 1 g pro Brötchen aus, so ergibt sich eine Verringerung der spezifischen Wärmekapazität um etwa $31 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ während des gesamten Prozesses. Die Dichte würde sich in diesem Fall von 210 kg m^{-3} auf $206,2 \text{ kg m}^{-3}$ reduzieren.

Des Weiteren können Unsicherheiten in Experiment und Simulation zu Fehlern und Abweichungen führen. In der Simulation wurde als Kerntemperatur die maximale Temperatur angenommen, wohingegen bei der Messung mit Einstechfühlern die Temperatur möglichst in der Mitte eines Brötchens gemessen wird. Dabei ist nicht garantiert, dass sich der Messpunkt immer genau in der Mitte befindet. Das Positionieren des Einstechfühlers verändert zudem die Temperatur, da der Fühler nicht vortemperiert wurde, sowie die Wärmeleitung an der Messstelle.

Schlussfolgerungen

Bei der Modellierung der Abkühlung können Stofftransporte (Verdampfung von Wasser) aus den Brötchen nicht vernachlässigt werden. Dies hat sich dadurch gezeigt, dass sich Temperaturverläufe sehr stark unterscheiden, wenn die latente Verdampfungswärme von den Brötchen abgeführt wird. Auch unter Berücksichtigung dieses Effektes konnte der Prozess noch nicht genau modelliert werden. Zwar sind Abweichungen zwischen Temperaturverläufen aus Simulation und Experiment nicht sehr groß und ließen sich auch durch Messunsicherheiten und Unsicherheiten in der Berechnung erklären, jedoch wurde die Temperaturleitfähigkeit in den Simulationen wesentlich höher angenommen als in der Literatur angegeben. Zudem wurden Modelle noch nicht experimentell verifiziert. Weitere Einflüsse, die Massentransporte auf die Abkühlung haben können, wurden diskutiert, aber noch nicht in die CFD Simulation implementiert. Um abschätzen zu können, ob diese Effekte die Unterschiede erklären, sind noch weitere Untersuchungen nötig. Hierzu können in der Literatur beschriebene Modelle zum Backprozess hilfreich sein und für den Abkühlprozess angepasst werden.

Bei bisherigen Überlegungen und Modellen muss der Gewichtsverlust während der Abkühlung erfasst werden. Um Temperaturverläufe von Prozessen, bei denen der Gewichtsverlust noch nicht bekannt ist, vorherzusagen, müssen Modelle noch weiter entwickelt werden.

Literatur

- Broyart, B., G. Trystram, 2002:** Modelling heat and mass transfer during the continuous baking of biscuits. *Journal of Food Engineering* 51 (1), 47–57.
- Fahloul, D., G. Trystram, A. Duquenoy, I. Barbotteau, 1994:** Modelling heat and mass transfer in band oven biscuit baking. *LWT-Food science and Technology* 27 (2), 119–124.
- Lösche, K., 2003:** Kältetechnologie in der Bäckerei. Bobingen, B. Behr's Verlag.
- Pastukhov, A., 2015:** Automatic control and maintaining of cooling process of bakery products. *Agronomy Research* 4 (13), 1031–1039.
- Pastukhov, A., 2016:** The influence of heat transfer coefficient on moisture evaporation rate during the cooling of fresh baked white pan bread. *Agronomy Research* (14), 1427–1433.
- Pastukhov, A., V. Danin, 2011:** Model development for fresh baked bread natural and forced cooling. *Foodbalt*.
- Rask, C., 1989:** Thermal properties of dough and bakery products: A review of published data. *Journal of Food Engineering* 9 (3), 167–193, DOI:10.1016/0260-8774(89)90039-3.
- Sablani, S.S., O.-D. Baik, M. Marcotte, 2002:** Neural networks for predicting thermal conductivity of bakery products. *Journal of Food Engineering* 52 (3), 299–304.
- Unklesbay, N., K. Unklesbay, M. Nahaisi, G. Krause, 1982:** Thermal conductivity of white bread during convective heat processing. *Journal of Food Science* 47 (1), 249–253.

- Zanoni, B., C. Peri, R. Gianotti, 1995:** Determination of the thermal diffusivity of bread as a function of porosity. *Journal of Food Engineering* 26 (4), 497–510.
- Zanoni, B., S. Pierucci, C. Peri, 1994:** Study of the bread baking process—II. Mathematical modelling. *Journal of Food Engineering* 23 (3), 321–336.