Kurzfassung

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Materialeigenschaft, welche für die Berechnung von stationären als auch transienten Wärmetransportprozessen notwendig ist. Die theoretische Modellbildung der richtungsabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Mehrkomponentenwerkstoffen, die in dem zu betrachtenden Temperaturbereich einen Phasenübergang einer oder mehrerer Komponenten aufweisen, ist Gegenstand der Forschung.
Trotz beachtlicher Aufwände bleibt die theoretische Modellbildung für jede Werkstoffklasse aufgrund seiner geometrischen Struktur, seiner Zusammensetzung und Verteilung sowie der physikalischen Eigenschaften der Komponenten eine individuelle Aufgabenstellung. Mit der theoretischen Modellbildung soll das Verständnis der physikalischen Mechanismen, welche den Wärmetransport beeinflussen und damit die Wärmeleitfähigkeit bestimmen, gefördert werden. Mit einem Modell, das diese Zusammenhänge erfasst, können zuverlässige Werkstoffkennwerte geschätzt werden, wenn Messdaten fehlen oder schwierig zu beschaffen sind. Das Ziel der Arbeit ist, ein theoretisches Modell für die Wärmeleitfähigkeit von Fleisch im Temperaturbereich von $-40\,°\mathrm{C}$ bis $40\,°\mathrm{C}$ zu entwickeln, welches die Makronährstoffe Wasser, Protein und Fett sowie die Summe aus Mineralstoffen und Milchsäure als Komponenten verwendet und den Gefrierverlauf und die Dehydration der Muskelfasern berücksichtigt. Ausgehend von Messdaten aus der Literatur und eigener experimenteller Beobachtungen von gefrorenem Fleisch werden theoretische Modelle aufgebaut, in denen die geometrische Struktur und deren temperaturabhängige Veränderung, die Mechanismen des Wärmetransportes und die physikalischen Prozesse des Gefrierens miteinander gekoppelt werden.

Zur experimentellen Gewinnung von Erkenntnissen der Struktur von gefrorenem Fleisch wurden Untersuchungen mit Computertomografie an gefrorenen Proben durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Langfaserstruktur des Fleisches eine Richtungsabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit besteht. Für diese Gewebe-Eis-Struktur wird ein geometrisches Modell entwickelt.

Dieses Modell unterscheidet zwischen Gewebefaser und Eis. Das Eis bildet sich beim Gefrieren zwischen den Gewebefasern. Durch die Eisbildung entstehen Verschiebungen in den Richtungen quer (transversal) und längs (longitudinal) zu den Gewebefasern. Für diese Verschiebungen wird ein lineares Verschiebungsmodell angesetzt, das einen freien Parameter enthält, welcher die Möglichkeit bietet, das Modell an Messdaten anzupassen.

Durch die Struktur unterscheidet sich die transversale Wärmeleitfähigkeit von der in longitudinaler Richtung. Basierend auf dem geometrischen Modell wird für jede Richtung

ein Widerstandsnetzwerkmodell hergeleitet. Um die effektive Wärmeleitfähigkeit für jede Richtung zu bestimmen, werden die Widerstandsnetzwerke schrittweise reduziert.

Für die Anwendung der Modelle der Wärmeleitfähigkeit auf Fleisch müssen der Gefrierpunkt und die mit fallender Temperatur zunehmende Eismenge bekannt sein. Beides kann mit Modellen aus der physikalischen Chemie beschrieben werden. Unter Hinzunahme der Eisphase ist gefrorenes Fleisch ein Werkstoff, der aus sechs Komponenten besteht. Da die Modelle der Wärmeleitfähigkeiten für zwei Komponenten, Eis und Gewebefaser, formuliert sind, wird für die Gewebefaser eine Komponentenreduktion durchgeführt. Dann können für eine gegebene Zusammensetzung die Modelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit ausgewertet werden.

Die Modelle werden anhand von Messwerten aus der Literatur validiert. Bei Anwendung der gleichen Methode zur Komponentenreduktion für die bisherigen Modelle aus der Literatur, welche ebenfalls mit Widerstandsnetzwerken entwickelt wurden, zeigt sich, dass diese die Messdaten nicht mehr abzubilden vermögen.

Verschiedene statistische Methoden werden angewendet zur Abschätzung der Fehlerfortpflanzung, der Streuung der Messwerte und zur Bestimmung der Vorhersageintervalle zu den Modellen der Wärmeleitfähigkeit.

Neben dem Wissensgewinn zum Wärmetransport in gefrorenem Fleisch können die Modelle der Dichte, der scheinbaren spezifischen Wärmekapazität und der effektiven Wärmeleitfähigkeit auch zur Simulation des Wärmetransportes während des Gefrierens von Fleisch eingesetzt werden. Es werden zu diesem Zweck Simulationsmodelle für Anwendungsfälle aufgebaut und gelöst. Die Ergebnisse werden auf Plausibilität hin analysiert und zeigen das erwartete physikalische Verhalten. Mit den neuen Modellen kann erstmalig für mageres Rindfleisch der Unterschied in der effektiven Wärmeleitfähigkeit von 30 % bei −40 °C in transversaler und longitudinaler Richtung abgebildet werden. Die Modelle unterscheiden sich von den bisher publizierten Modellen dadurch, dass es Rückschlüsse auf die strukturellen Eigenschaften von gefrorenem Fleisch zulässt und Ansatzpunkte zur Erweiterung einer Kühlratenabhängigkeit der Eisbildung und daraus folgenden Strukturänderung eröffnet.