

DFG Senate Commission
on Food Safety

SKLM



Stellungnahme zum Einsatz Ohmschen Erhitzens zur Behandlung von Lebensmitteln

Endfassung vom: 22. Juni 2015

Mitglieder und Gäste der DFG Senatskommission zur gesundheitlichen Bewertung von Lebensmitteln 2014-1016

Mitglieder:

Prof. Dr. Pablo Steinberg (Vorsitzender), Prof. Dr. Patrick Diel, Prof. Dr. Gerhard Eisenbrand, Prof. Dr. Karl-Heinz Engel, Prof. Dr. Bernd Epe, Dr. Ing. Volker Heinz, Prof. Dr. Hans-Ulrich Humpf, Prof. Dr. Hans-Georg Joost, Prof. Dr. Dietrich Knorr, Prof. Dr. Theo de Kok, Prof. Dr. Doris Marko, Prof. Dr. ir. Ivonne Rietjens (Mitglied bis 31.3.2015), Prof. Dr. Rudi Vogel

Ständige Gäste:

Prof. Dr. Peter Fürst, Prof. Dr. Sabine Kulling, Prof. Dr. Alfonso Lampen, Prof. Dr. Gerhard Rechkemmer, Dr. Richard H. Stadler, Prof. Dr. Stefan Vieths

Die Kommission dankt der Arbeitsgruppe „Lebensmitteltechnologie und –sicherheit“:

Prof. Dr. Dietrich Knorr (AG Vorsitzender), Dr. Niels Bandick, Prof. Dr. Karl-Heinz Engel, Dr. Ing. Volker Heinz, Dr. Thomas Holzhauser, Prof. Dr. Henry Jäger, Prof. Dr. Sabine Kulling, Prof. Dr. Stefan Töpfl, Herrn Quasigroch, Prof. Dr. Rudi Vogel und den SKLM Mitarbeiterinnen Dr. Angelika Roth, Dr. Stephanie Vogel und Dr. Sabine Guth für die wissenschaftliche Unterstützung.

SKLM Kommissionssekretariat

Institut für Lebensmitteltoxikologie und Chemische Analytik, Stiftung Tierärztliche Hochschule

Hannover, Bischofsholer Damm 15, 30173 Hannover, Germany

E-Mail: SKLM@tiho-hannover.de • Tel.: +49 511 8567227 • Fax: +49 511 856 82 7227

Die AG „Lebensmitteltechnologie und –sicherheit“ der DFG-Senatskommission zur gesundheitlichen Bewertung von Lebensmitteln (SKLM) befasst sich mit neuen Technologien, die für die Behandlung von Lebensmitteln entwickelt werden bzw. in Anwendung kommen. Ein neues Verfahren ist das Ohmsche Erhitzen zur Erwärmung von Lebensmitteln mittels direkter Anwendung von Strom am Lebensmittel. Die SKLM hat am 22.06.2015 eine erste Beurteilung des Ohmschen Erhitzens von Lebensmitteln vorgenommen. Ziel der Stellungnahme ist, den Forschungsstand zu beschreiben, auf kritische Punkte bei der Anwendung und der wissenschaftlich basierten Weiterentwicklung des Verfahrens hinzuweisen und den Forschungsbedarf zu definieren.

Stellungnahme zum Einsatz Ohmschen Erhitzens zur Behandlung von Lebensmitteln

Zusammenfassung

Das Ohmsche Erhitzen stellt ein Verfahren zur Hitzebehandlung von Lebensmitteln dar. Bei der Durchleitung von elektrischem Strom kommt es aufgrund des Ohmschen Widerstandes im Lebensmittel zu dessen Erwärmung. Im Vergleich zu konventionellen Erhitzungsverfahren können damit kürzere Erhitzungszeiten unter Vermeidung heißer Oberflächen und eine Verringerung von Temperaturgradienten erreicht werden. Elektrische, thermophysikalische und rheologische Eigenschaften des Produktes spielen für das Erreichen einer homogenen Erhitzung eine wichtige Rolle. Neben den Produktparametern sind auch Prozessparameter wie die eingesetzte Stromfrequenz, das Elektrodenmaterial sowie die Geometrie der Behandlungszelle relevant.

Wie bei anderen Verarbeitungsverfahren auch, kann es während des Ohmschen Erhitzens zu Veränderungen des Lebensmittels, z.B. in Bezug auf dessen Struktur sowie auf die Konzentration von Inhaltsstoffen und Kontaminanten kommen. Neben den thermischen Effekten des Ohmschen Erhitzens sind mögliche elektrochemische Reaktionen an der Kontaktfläche zwischen Elektroden und Lebensmittel sowie mögliche nicht-thermische Effekte des elektrischen Feldes in Abhängigkeit von den Prozessbedingungen zusätzlich zu beachten. Der Prozesskontrolle kommt somit eine besondere Bedeutung bei der Vermeidung solcher teilweise unerwünschten Effekte zu.

Die Wirksamkeit des Ohmschen Erhitzens als Verfahren zur Haltbarmachung beruht wie bei der konventionellen Erhitzung darauf, dass eine zur Inaktivierung von Mikroorganismen ausreichende Temperatur an jeder Stelle des Lebensmittels erreicht und ausreichend lang gehalten wird. Die physikochemischen Produkteigenschaften sind zur Verwirklichung möglichst homogener

Erhitzungsbedingungen von außerordentlicher Bedeutung. Üblicherweise sind die angewendeten, elektrischen Feldstärken niedrig, so dass überwiegend thermische Effekte zum Tragen kommen. Einige Studien diskutieren mögliche, zusätzliche synergistische oder nicht-thermische Inaktivierungseffekte des elektrischen Feldes.

Eine Evaluierung des Ohmschen Erhitzens erfordert im Vergleich zu konventionellen Erhitzungsmethoden vor allem eine standardisierte Erfassung von Parametern der Prozesskontrolle. Dazu gehört in erster Linie eine orts- und zeitaufgelöste Temperaturmessung unter Berücksichtigung der Produkteigenschaften und der elektrischen Feldeigenschaften. Die Durchführung von systematischen Studien unter Beachtung der Vergleichbarkeit hinsichtlich Produkt- und Prozessparametern sowie der Anlagengestaltung ist unbedingt notwendig. Die bisher lückenhafte Datenlage ist teilweise auf die mangelnde Vergleichbarkeit der verfügbaren Studien zurückzuführen.

Darüber hinaus sind thermische und nicht-thermische sowie zusätzliche prozessinduzierte Veränderungen des Lebensmittels und seiner Inhaltsstoffe zu analysieren. Dies gilt besonders für den Einfluss auf die potentielle Allergenität der Lebensmittelinhaltsstoffe.

In Simulationsmodellen können thermische und nicht thermische Effekte differenziert untersucht werden. Dies gilt als vielversprechender Ansatz, auch Kombinationsprozesse modellhaft zu beschreiben und Prozessbedingungen zu optimieren.

1 Einführung

Konventionelle thermische Verfahren zur Pasteurisierung und Sterilisation von Lebensmitteln basieren auf Wärmeübertragung, wobei Wärmeübergang und Wärmeleitung limitierende Faktoren für eine schnelle Erhitzung des Produktes darstellen. Insbesondere für viskose und partikuläre Lebensmittel resultiert daraus eine Verlängerung der Erhitzungszeiten mit einer möglichen Überbehandlung einzelner Produktfraktionen und einem damit verbundenen Qualitätsverlust. Zudem kann bei indirekten Erhitzungsverfahren die Wärmeübertragung über heiße Oberflächen zu unerwünschten Temperaturspitzen im Produkt führen [1]. Alternative thermische Verfahren zur Pasteurisierung und Sterilisation, die lange Erhitzungszeiten, Überbehandlung und unerwünschte Temperaturspitzen vermeiden,

gewinnen zunehmend an Interesse, dazu gehört insbesondere die Anwendung des Ohmschen Erhitzens [1-4].

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts begannen mit der kommerziellen Verfügbarkeit von elektrischer Energie Forschungsarbeiten zur Haltbarmachung von Lebensmitteln durch direkte Anwendung elektrischen Stromes [5]. Erste industrielle Anwendungen des Ohmschen Erhitzens zur thermischen Behandlung erfolgten ab 1920 mit dem 'Electropure'-Prozess [6-8]. Hierbei wurde Milch in einem kontinuierlichen Verfahren unter Verwendung von Kohlenstoff-Elektroden und einer 220 V Wechselspannung mit einer Frequenz von 60 Hz erhitzt. Dieses Verfahren wurde in sechs US-Bundesstaaten zur Pasteurisierung von Milch zugelassen und bis 1950 in 50 Anlagen zur Versorgung von ca. 50.000 Konsumenten eingesetzt. Frühzeitig wurden weitere Verfahren des Ohmschen Erhitzens u.a. zur direkten elektrischen Erhitzung von Würstchen [9, 10] und Mitte des 20. Jahrhunderts zum Blanchieren von Gemüse [11] patentiert. Steigende Kosten für Elektrizität und die Entwicklung alternativer thermischer Verfahren zur Haltbarmachung wie die Ultraheißerhitzung führten nachfolgend zu einer verminderten Nutzung des Ohmschen Erhitzens [12]. Dies hatte zur Folge, dass das Ohmsche Erhitzen im Wesentlichen nur zum Auftauen von Lebensmitteln weiterentwickelt wurde [13].

In den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts setzte in Europa das Interesse am Ohmschen Erhitzen zur Haltbarmachung von Lebensmitteln wieder ein, und industrielle Anlagen kamen zum Einsatz [14]. Das Ohmsche Erhitzen wird zurzeit als thermisches Verfahren zur Vorwärmung, zum Blanchieren sowie zur Pasteurisierung und Sterilisation von Gemüseprodukten, Fruchtzubereitungen und Fleischwaren genutzt [15, 16]. Das Verfahren basiert auf der Nutzung des elektrischen Widerstandes des behandelten Lebensmittels. Die Dissipation der elektrischen Energie beim Auftreten eines elektrischen Stromflusses im Lebensmittel führt zur Freisetzung von Wärme (Joule Effekt). Die Wärmemenge steht in direkter Beziehung zur angelegten elektrischen Spannung und zur elektrischen Leitfähigkeit des Produktes bzw. einzelner Produktfraktionen (Ohmsches Gesetz) [12, 17].

Als nachteilig bei früheren Anwendungen erwies sich die Nutzung niedriger Wechselspannungsfrequenzen im Bereich von 50-60 Hz, die insbesondere in Verbindung mit metallischen Elektroden zu verstärkten elektrochemischen Reaktionen und Elektrodenerosion führten [3]. Der direkte Kontakt des Lebensmittels

mit den Elektroden gilt als kritischer Aspekt der Anwendung. Nachfolgende technische Verbesserungen des Verfahrens im Hinblick auf verwendete Elektrodenmaterialien (u.a. Titan) und optimierte Wechselspannungsfrequenzen im Kilohertzbereich führten zu einer weiteren Verbreitung der Technologie [18-20].

Die Vorteile des Ohmschen Erhitzens liegen in der im Idealfall homogenen Erwärmung des Produktvolumens [3]. Je nach Leitfähigkeit einzelner Produktfraktionen, der Konfiguration der Behandlungszelle sowie den Strömungseigenschaften des Lebensmittels erfolgt eine Erwärmung mit relativ geringen Temperaturgradienten. Da Erhitzungszeiten wesentlich verkürzt werden, ist bei gleichem Sterilisationseffekt (F_0 -Wert) die Kochbelastung des Lebensmittels (C -Wert) und damit die prozessbedingte Qualitätsveränderung vermindert [21, 22].

Vorteilhaft ist weiterhin, dass das Lebensmittel nicht mit heißen Oberflächen in Kontakt kommt. Durch geeignete Gestaltung der Elektrodenkonfiguration kann auch die Ausbildung unerwünschter Schichten biologischer, organischer oder anorganischer Zusammensetzung (Fouling) weitgehend vermieden werden [1, 23].

Das wachsende Interesse an der industriellen Nutzung des Ohmschen Erhitzens macht eine Betrachtung der kritischen Verfahrensaspekte notwendig, um die gesundheitliche Unbedenklichkeit des Verfahrens zu gewährleisten. Obwohl die Wirkung des Ohmschen Erhitzens am Produkt primär als thermisch eingestuft wird, können zusätzliche, elektrische Effekte, die die Qualität und die Sicherheit des behandelten Lebensmittels mitbeeinflussen, nicht ausgeschlossen werden.

Konzepte für eine Erhitzung in der Verpackung befinden sich in der Entwicklung [24-26]. Diese sind jedoch nicht Bestandteil der Stellungnahme.

2 Verfahrensgrundlagen und technische Aspekte

Beim Ohmschen Erhitzen erfolgt eine **Energieumwandlung von elektrischer in thermische Energie**. Grundsätzlich können Lebensmittel mit einer elektrischen Leitfähigkeit im Bereich von 0,1-10 S/m mittels Ohmschen Erhitzens erwärmt werden. Die zu erhitzenden Produkte werden innerhalb einer Anordnung zweier oder mehrerer Elektroden einem elektrischen Feld ausgesetzt. Sie stehen dabei in direktem Kontakt mit den Elektroden oder werden über ein elektrisch leitfähiges Medium an diese gekoppelt. Die Behandlung kann als diskontinuierlicher Batch-

Prozess oder aber in einem kontinuierlichen Durchflusssystem erfolgen. In Abhängigkeit von der Feldstärke, der Elektrodenkonfiguration und der Leitfähigkeit der Produkte tritt ein Stromfluss auf, der aufgrund des Ohmschen Gesetzes zu einem Energieeintrag führt, der durch nahezu vollständige Umwandlung der elektrischen Energie in Wärme, hohe Energiedichte und kurze Aufheizzeiten charakterisiert ist. Die eingesetzten Spannungen liegen bei 400 bis 4000 V. Bei den genutzten Elektrodenabständen von 10 bis 50 cm resultieren Feldstärken im Bereich von 20 bis 400 V/cm. Die erreichten **Heizraten** sind von der Leistung der Energieversorgung, der Gestaltung der Behandlungseinrichtungen und den Produkteigenschaften (u.a. Leitfähigkeit, Viskosität und spezifische Wärmekapazität) abhängig. Die benötigte elektrische Leistung kann anhand des Produkts aus Massenstrom, Temperaturerhöhung und spezifischer Wärmekapazität errechnet werden, wobei auch die Produkteigenschaften zu berücksichtigen sind.

Ohmsches Erhitzen ist mit Gleich- oder Wechselspannung möglich; zur **Vermeidung elektrochemischer und elektrolytischer Effekte** und der Bildung unerwünschter Reaktionsprodukte werden jedoch meist Wechselströme eingesetzt. Für das Ausmaß möglicher **elektrochemischer Reaktionen an den Elektroden**, die zur Elektrolyse des Produktes und zum Elektrodenabtrag führen, sind insbesondere die Stromdichte (abhängig von der Elektrodengeometrie), die Frequenz und das Elektrodenmaterial (mit spezifischer Oxidationsneigung) von Bedeutung. Bei den derzeit eingesetzten Anlagen werden Stromstärken im Bereich einiger hundert Ampere erreicht. An den Elektroden treten Stromdichten im Bereich $0,5\text{-}20\text{ A/cm}^2$ auf, die unspezifische, elektrochemische Reaktionen der beteiligten Materialien begünstigen. Um Oxidationsreaktionen und Metalleintrag in das Produkt zu verringern, wird Wechselspannung bei Frequenzen, die größer als 20 kHz sind, eingesetzt. Bei Verwendung von Wechselspannung treten aufgrund der Umkehr der Feldwirkung elektrochemische Reaktionen vermindert auf. Bei Frequenzwerten, die größer als 20 kHz sind, wird aufgrund der Hemmung von Faraday'schen Reaktionen der Elektrodenabtrag verringert. Das Elektrodenmaterial ist üblicherweise Edelstahl aufgrund der geringen Oxidationsneigung.

Ein weiteres Verfahren mit direkter Anwendung elektrischer Felder am Lebensmittel wird unter dem Begriff „Pulsed Electric Field“ (PEF) eingeordnet [27, 28]. Ohmsches Erhitzen und PEF-Anwendungen werden durch die eingesetzten Prozessparameter abgegrenzt und durch ihre **thermischen und nicht-thermischen (elektrischen)**

Effekte am Produkt definiert. Beim Ohmschen Erhitzen liegt der Schwerpunkt auf der Generierung thermischer Effekte, während bei der PEF-Behandlung die Generierung elektrischer Effekte und die Minimierung thermischer Effekte angestrebt werden. Der Zellaufschluss erfolgt durch Porenbildung in der Membran mittels eines elektrischen Feldes (Elektroporation). Da im Gegensatz zur PEF-Behandlung beim Ohmschen Erhitzen mit 20-400 V/cm deutlich geringere Feldstärken angewendet werden als zur Elektroporation mikrobieller Zellen nötig sind (10 kV/cm) [29-32], kann davon ausgegangen werden, dass das Ohmsche Erhitzen Mikroorganismen überwiegend thermisch inaktiviert. Bei pflanzlichen Zellen kann die Elektroporation allerdings schon bei elektrischen Feldstärken unter 1 kV/cm auftreten [33-40]. Der Zellaufschluss durch Ohmsches Erhitzen kann hier sowohl durch thermische Permeabilisierung der Pflanzenzellmembran als auch, wie bei der PEF Behandlung, elektrisch durch Elektroporation der Zellmembran bedingt sein [41].

Lokale Über- bzw. Unterbehandlungen aufgrund des Aufbaus der Behandlungskammer stellen insbesondere bei wechselnden Produkteigenschaften eine wesentliche Herausforderung bei der Prozessgestaltung dar. Überbehandlung kann zu einer verstärkten thermischen Belastung und zur Bildung thermisch bedingter Verbindungen mit einhergehendem Qualitätsverlust führen, Unterbehandlung beeinflusst neben der Qualität auch die Haltbarkeit des Produktes. Um eine möglichst **homogene Erwärmung** zu erreichen, werden in der Regel an die **Produkteigenschaften angepasste Elektrodengeometrien** eingesetzt. Dies ist bei der Anwendung des Ohmschen Erhitzens als kontinuierliches Durchflussverfahren von Bedeutung, da hier Aspekte der **Produktströmung** zu berücksichtigen sind. Durch eine Simulation des Strömungsprofils auf Basis der Fließfunktion kann die Gestaltung der Behandlungskammer im Hinblick auf das Verweilzeitverhalten optimiert werden. In Kombination mit einer Simulation der Anordnung des elektrischen Feldes sowie des Energieeintrags und der Rückwirkung auf die Viskosität und Leitfähigkeit des Produkts kann die Behandlungshomogenität erhöht werden.

Besonders in wandnahen Schichten sowohl an der Elektrode als auch am Isolator ist oftmals eine deutliche, lokale **Überbehandlung** zu beobachten, da hier die Strömungsgeschwindigkeit des Produktes geringer ist und durch die längere Verweilzeit ein höherer Energieeintrag resultiert. Diesen Effekten kann je nach Produkteigenschaften teilweise durch den Einsatz von Schabern, durch höhere

Strömungsgeschwindigkeiten oder durch Nutzung gekühlter Elektrodenmaterialien entgegengewirkt werden.

Unterbehandlung tritt beim kontinuierlichen Durchflussverfahren oftmals im zentralen Bereich der Behandlungstrecke parallel zum Produktstrom auf, da dort eine hohe Strömungsgeschwindigkeit bei geringer elektrischer Feldstärke vorliegt. Die Nutzung hintereinander geschalteter Behandlungstrecken kann zu einer Verringerung der Inhomogenität der Temperaturverteilung führen. Auch die kombinierte Nutzung des Ohmschen Erhitzens mit anderen volumetrischen Erhitzungsverfahren, wie z.B. der Radiofrequenzerwärmung, wird zu einer Verbesserung der Homogenität der Erwärmung eingesetzt.

Inhomogenitäten der Erhitzung mit der Bildung von **lokal hohen (sog. Hot Spots) bzw. lokal niedrigen Temperaturen (sog. Cold Spots)** treten bei konventionellen Verfahren in Abhängigkeit der Produkt- und Prozessgeometrie sowie der Koeffizienten der Wärmeübertragung auf. Beim Ohmschen Erhitzen führen unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten einzelner Produktfraktionen bzw. eine ungleichmäßige Verteilung des elektrischen Feldes unabhängig von Parametern der Produktgeometrie zu Inhomogenitäten mit Hot Spots und Cold Spots. Die Cold Spots werden durch die Fraktion mit der geringsten elektrischen Leitfähigkeit in Verbindung mit der geringsten elektrischen Feldstärke bei einem inhomogenen elektrischen Feld, Hot Spots durch die Fraktion mit hoher elektrischer Leitfähigkeit verbunden mit einer hohen elektrischen Feldstärke bestimmt. Besonders **disperse Systeme mit wässrigen, ölhaltigen oder partikulären Fraktionen** weisen Unterschiede in der Leitfähigkeit auf, die zu deutlichen Unterschieden in der Temperaturerhöhung der jeweiligen Phase führen. Anders als bei konventionellen Verfahren ist es beim Ohmschen Erhitzen eines komplexen partikulären Lebensmittels daher möglich, dass sich der Cold Spot in der Flüssigphase befindet, während sich die Partikel wesentlich schneller erhitzen. Während der anschließenden Haltezeit kommt es durch Wärmeabgabe zu einer Nacherwärmung der Flüssigphase [42]. Ist jedoch die Flüssigphase die Fraktion mit der höchsten elektrischen Leitfähigkeit, kommt es hier zu einer schnelleren Erhitzung mit einer nachfolgenden Wärmeabgabe an die partikuläre Fraktion. Da die Leitfähigkeit wässriger Medien bei einer Temperaturerhöhung temperaturabhängig zunimmt, können Inhomogenitäten während der Erhitzung ausgeglichen oder verstärkt werden. Sowohl die Leitfähigkeit als auch die Viskosität des Produktes können zusätzlich durch ebenfalls

temperaturinduzierte Vorgänge wie Gelierung von Stärke und Proteinen, Denaturierung von Proteinen oder Freisetzung von leitfähigen Komponenten durch Zerstörung von Zellstrukturen während des Prozesses maßgeblich verändert werden.

Die Wirksamkeit des Ohmschen Erhitzens als **thermisches Verfahren zur Inaktivierung von Keimen** ist, wie beim konventionellen Erhitzen, abhängig von der in jedem Punkt des Lebensmittels erreichten Temperatur und der entsprechenden Haltezeit [43]. Somit stellen Unterbehandlung, bedingt durch den Aufbau der Behandlungskammer, und Cold Spots, bedingt durch die Leitfähigkeit der Produktfraktionen, ein Risiko für die **mikrobiologische Sicherheit** des Produktes dar [44, 45].

Kombinierte Anwendungen mit konventionellem Vorheizen und anschließendem Ohmschen Erhitzen haben zunehmende Beachtung gefunden. Aus Sicht der Produktsicherheit weisen solche Kombinationsverfahren Vorteile auf. Durch eine Vorerhitzung wird eine gleichmäßigere Temperaturverteilung und Verteilung der temperaturabhängigen Leitfähigkeit erreicht. Der nachfolgende Temperatursprung durch Ohmsches Erhitzen ist geringer, und die Homogenität der Behandlung wird im Vergleich zur alleinigen Anwendung des Ohmschen Erhitzens ohne Vorerhitzung verbessert.

3 Einfluss auf Lebensmittel

Beim Ohmschen Erhitzen kann es, wie bei anderen Verarbeitungsverfahren auch, zu Veränderungen des Lebensmittels kommen, die dessen Konsistenz, Geschmack und Farbe betreffen [46-54].

Da das Lebensmittel bei Anwendung des Verfahrens in direktem Kontakt mit den Elektroden steht oder über ein elektrisch leitfähiges Medium mit diesen gekoppelt ist, besteht die Möglichkeit, dass unter bestimmten Prozessbedingungen durch elektrochemische Reaktionen unerwünschte Ionen in das Lebensmittel gelangen und eine Elektrodenkorrosion stattfindet [55-57].

Die elektrische Leitfähigkeit ist eine für das Ohmsche Erhitzen wichtige Eigenschaft des Lebensmittels, da sie die Voraussetzung für die entsprechende Wärmeentwicklung ist [58, 59]. Da die Leitfähigkeit temperaturabhängig ist, ändert sie sich im Verlauf der Erhitzung. Durch Hitzeeinwirkung lysierte Zellstrukturen

setzen Ionen frei, die ihrerseits zu einer signifikanten Veränderung der Leitfähigkeit des Lebensmittels führen und damit den Verlauf des Ohmschen Erhitzen beeinflussen [60-66].

3.1. Wechselwirkungen mit der Lebensmittelmatrix

Neben elektrochemischen Reaktionen an den Elektroden und der hitzebedingten Veränderung der Leitfähigkeit des behandelten Lebensmittels gibt es weitere Wechselwirkungen des Ohmschen Erhitzen mit dem behandelten Lebensmittel. Inhalts- und Zusatzstoffe haben einen Einfluss auf Struktur und Leitfähigkeit des Lebensmittels. So beeinflussen Hydrokolloide wie Stärke, Pektin oder Gelatine je nach Anteil im Lebensmittel und je nach Hydratationsgrad das Ohmsche Erhitzen. Stärkelösungen zeigten mit zunehmender Temperatur einen Anstieg der Leitfähigkeit, die mit steigendem Gelierungsgrad wieder abnahm. Dies wurde auf eine veränderte Struktur bzw. eine erhöhte Bindung von Wasser zurückgeführt [67]. Der Ovomucingehalt im Eiklar des Hühnereis beeinflusste die elektrische Leitfähigkeit und die Wärmeleitung [68, 69]. Dies wurde auch für Surimi (Krebsfleischimitat) nach Zugabe von Stärke beschrieben [70]. Ohmsches Erhitzen erhöhte die Viskosität von Surimi stärker als konventionelles Erhitzen bei gleichen Temperaturen. Dies wurde auf einen reduzierten Abbau von Myosin und Aktin zurückgeführt, der die durchgängige Netzstruktur und damit die Gelqualität erhöhte [71-73]. Fettgehalt und Faserdichte bei Fleisch und Wurst wirkten sich ebenfalls auf die Leitfähigkeit und die Wärmeleitung aus [74, 75].

Grundsätzlich kann bei der Anwendung des Ohmschen Erhitzen zum Blanchieren von Gemüse mit größeren Gemüsestücken gearbeitet werden als bei herkömmlichen Erhitzungsmethoden, bei denen die Wärmeleitung einen limitierenden Faktor darstellt. Da größere Stücke im Vergleich zu kleineren Stücken ein anderes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen aufweisen, wird der Verlust an löslichen Stoffen vermindert [46]. Im Gegensatz dazu nahm bei weißem Rettich unter bestimmten Niedrigfrequenzbedingungen der Anteil an freien löslichen Komponenten zu, was auf einen erhöhten Aufschluss von Zellen zurückgeführt wurde, der auch die schnellere Anfangserwärmung bei niedrigen Frequenzen erklären würde [76]. Bei Pfirsichstücken zeigte sich bei niedriger Frequenz eine stärkere Lyse der Zellmembranen mit einer daraus resultierenden Erhöhung der Leitfähigkeit und einer

Beeinträchtigung der Textur. Höhere Frequenzen führten zu einer Verringerung dieser Effekte, jedoch verlängerte sich die Zeit zum Erreichen der gewünschten Endtemperatur [77]. Auch bei Kartoffeln und Äpfeln wurde Zellaufschluss beobachtet, der bei einem moderaten elektrischen Feld und einer elektrischen Feldstärke unter 100 V/cm mit höherer Temperatur zunahm [78]. Ähnliche Effekte wurden beim Blanchieren von Champignons beobachtet [79]. Saft aus Quitten, einer Frucht reich an Pektin, zeigte bezüglich seiner Fließeigenschaft keine Unterschiede, wenn er durch Ohmsches oder konventionelles Erhitzen gewonnen wurde [80]. Das Ohmsche Erhitzen wurde auch als Vorbehandlung (50°C) zur Erhöhung der Extraktausbeute geschnittener Zuckerrüben in Kombination mit nachfolgender Hochspannungsimpulsbehandlung untersucht. Die Saftausbeute ließ sich deutlich erhöhen, was auf die thermische Lockerung der Gewebematrix in Kombination mit der Elektropermeabilisation der Zellmembranen zurückgeführt wurde [81].

3.2. Einfluss auf Lebensmittelinhaltsstoffe

Die Stabilität von wertgebenden Bestandteilen im Lebensmittel ist abhängig von den Prozessbedingungen. Es wurde berichtet, dass die Aromastoffe Decanal, Octanal, Limonen, Pinen und Myrcen beim Ohmschen Erhitzen weniger stark abgebaut wurden als bei konventionellen Erhitzungsmethoden [21]. Die Kinetik des Abbaus von Anthocyanen in Acerola-Püree zeigte bei beiden Verfahren keinen Unterschied [82], wohingegen der Abbau von Vitamin C in Acerola-Püree von den Bedingungen des Ohmschen Erhitzens abhängig war und durch Anstieg der elektrischen Spannung erhöht wurde. Bei niedrigen Spannungsgradienten war der Abbau von Vitamin C mit konventionellen Erhitzungsmethoden vergleichbar [83]. Diese Abhängigkeit von der eingesetzten Höhe der Spannung wird auch für den Anthocyan-Abbau beschrieben [84]. Der Vitamin C-Abbau sowie die Bräunung in Säuglingsnahrung waren beim Ohmschen Erhitzen geringer ausgeprägt als bei der Sterilisation mittels Direktampfinjektion [85].

Untersuchungen zur Phenoloxidase-Aktivität in Grapefruitsaft zeigten, dass bei Anstieg der Temperatur während des Ohmschen Erhitzens die Enzymaktivität anstieg, bis ein kritischer Temperaturpunkt erreicht war, ab dem die Enzymaktivität sank. Dieser Temperaturpunkt war abhängig vom Spannungsgradienten [86]. Die Autoren folgerten aus diesen Ergebnissen, dass es einen Unterschied bei der

Inaktivierung der Phenoloxidasen zwischen konventionellem und Ohmschem Erhitzen gibt.

Im Fall von Orangensaft wurde berichtet, dass sowohl das konventionelle als auch das Ohmsche Erhitzen zu einer vergleichbaren Inaktivierung der Pektinesterasen (um 90 bis 98 %) führten [21]. Eine weitere Untersuchung an Orangensaft zeigte, dass das Ohmsche Erhitzen die Pektinesterase stärker inhibiert als das konventionelle Erhitzen [87].

Untersuchungen mit Erbsenpüree wiesen darauf hin, dass unter bestimmten Bedingungen beim Ohmschen Erhitzen die Aktivität der Peroxidasen in kürzeren Prozesszeiten reduziert wurde als beim konventionellen Erhitzen [88]. Karottenstücke zeigten keinen Unterschied bei der Inaktivierung der Peroxidasen in Abhängigkeit von der Erhitzungsmethode [89]. Für viele der untersuchten Lebensmittel ist die Datenlage widersprüchlich (Tab. 1). Bei der Mehrzahl der Untersuchungen fehlen aber exakte Temperatur-Zeit-Profile zum Vergleich der Behandlungsbedingungen.

3.3. Bildung von Prozesskontaminanten

Die Sterilisation von Säuglingsmilchnahrung unter Nutzung des kontinuierlichen Ohmschen Erhitzens im Vergleich zum etablierten Dampf injektionsverfahren zeigte keine Unterschiede im Gehalt an löslichen Proteinen, Furosin und Carboxymethyllysin sowie im Gehalt an fluoreszierenden Maillard-Reaktionsprodukten [85]. Im EU-Forschungsprojekt Prometheus wurde u.a. die Bildung von Furan in pürierter Babynahrung nach Sterilisation mittels Ohmscher Erhitzung im Vergleich zur konventionellen Autoklaventechnologie untersucht [90]. Produkte, die mit Hilfe des Ohmschen Erhitzens sterilisiert wurden, enthielten 3 bis 7 mal weniger Furan als diejenigen, die in der Verpackung im Autoklaven erhitzt wurden. Allerdings wurden die Flüchtigkeit von Furan und die Auswirkung der Verpackung auf den Furanverlust nicht berücksichtigt. Eine Abhängigkeit des Furangehaltes vom Fo-Wert wurde nur für die autoklavierten Proben gefunden.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über Lebensmittel, bei denen Ohmsches Erhitzen angewendet wurde, und fasst genutzte Prozessparameter und beobachtete Effekte zusammen.

Tab. 1: Anwendungen und Parameter des Ohmschen Erhitzens mit jeweiligem Einfluss auf die Qualität unterschiedlich behandelte Produkte (OH – Ohmic heating/Ohmsches Erhitzen, PEF – Pulsed Electric Field)

Produkt und Prozessziel ⁽¹⁾ Erwärmen / Auftauen ⁽²⁾ Blanchieren ⁽³⁾ Pasteurisierung ⁽⁴⁾ Sterilisation ⁽⁵⁾ Zellaufschluss	Bedingungen des Ohmschen Erhitzens	Effekte	Referenz
Gemüse			
Japanischer, weißer Rettich ⁽¹⁾	40 V/cm, 50 Hz-10 kHz	Freisetzung flüssiger Bestandteile nach raschem Erhitzen bei niedriger Frequenz aufgrund von Elektroporation des Gewebes, Reduzierung des elektrischen Widerstandes	[76]
Rüben in Salzwasser ⁽²⁾	Elektroden nicht im direkten Kontakt mit Rüben sondern Leitung über Salzlösung, Wechselspannung bei 300 V, nach weniger als 30 sec Siedepunkt erreicht	Größere Rübenstücke konnten in kürzerer Zeit erhitzt werden, Verlust löslicher Stoffe um Faktor 10 reduziert	[46]
Kartoffelstücke in Salzwasser ⁽⁴⁾	60 min vorkochen bei 55-60°C, anschließend OH	Struktur blieb besser erhalten	[48]
Kartoffelstücke in Salzwasser ⁽⁴⁾	Blanchieren bei 90-95°C für 1-4 min, anschließend OH bei 135°C für 2-4 min	Vorheriges Blanchieren verkürzte Haltezeit des OH und erhöhte die Festigkeit der Kartoffelstückchen	[47]
Blumenkohl in Salzwasser ⁽⁴⁾	30 min vorkochen bei 40-50°C, anschließend OH 30 sec bei 135°C	Struktur blieb besser erhalten	[49]
Blumenkohl ⁽⁴⁾	Kontinuierliche Anlage, 10 kW, 130 kg/h, Vorbehandlung mit 50-60°C, 20-30 min, OH-Behandlung 130-131°C, um die 22 sec, Austrittstemperatur 36-40°C	Vorkochen bei niedrigen Temperaturen, schnelle Durchflussrate und ausreichende elektrische Leitfähigkeit erhalten Stabilität und Struktur des Blumenkohls	[91]
Süßkartoffelstücke ^(1,5)	50-90 V/cm, 30-90°C	Verringerung der Zeit zum Vakuumtrocknen	[92]
Champignons ⁽²⁾	Blanchieren, 212 V; 7,3 cm Elektrodenabstand; 15-180 sec, 70°C	Champignons mit 50% fester Pilzsubstanz in Wasser, Erhitzung auf 70°C innerhalb von 40 sec (im Vergleich zu konventionellem Blanchieren mit üblicherweise weniger als 25% fester Pilzsubstanz), Hinweise auf nicht-thermische Permeabilisierung	[79]
Zuckerrüben ^(1,5)	60 V/cm, 50 Hz, 30-70°C, 10-30 min	Kombination von PEF und OH, 85-87% Saftextraktion, Hinweis auf Elektroporenbildung und thermische Erweichung des Zuckerrübenorgans	[81]
Erbsenpüree ⁽²⁾	20-50 V/cm, 100°C	schnellere Peroxidase-Inaktivierung als bei konventionellem Erhitzen, bessere Farberhaltung	[88]
Rote Bohnen als Fertiggericht in Tomatensoße ⁽³⁾	250 V, 20 cm Elektrodenabstand, 30 A, 50 Hz, 20-80°C, kontinuierlicher OH Prozess	Elektrische Leitfähigkeit abhängig von Temperatur und Partikelkonzentration, sowohl die Überhitzung der flüssigen Phase als auch die Heterogenität der Suspension führen zur Instabilität der elektrischen Parameter	[60]
Kartoffelscheiben ⁽¹⁾	35 V/cm, bis 75°C	Kartoffelstücke, die mit OH mit direktem Elektrodenkontakt ohne Flüssigkeit vorbehandelt wurden, nahmen beim anschließenden Frittieren weniger Öl auf als solche, die mit OH in Salzlösung behandelt wurden	[93]
Artischocke, Gewinnung von Nebenprodukten ⁽²⁾	25 und 40 V/cm, 85°C, 5 min	Ohmsches Blanchieren zur Vorbehandlung vor Lufttrocknung, gleiche Peroxidase-Inaktivierung wie beim Blanchieren mit Wasser bei 100°C in der gleichen Zeit, höherer Gehalt an Vitamin C und Gesamtgehalt an phenolischen Verbindungen (Polyphenole)	[94]
Karottenstücke ⁽²⁾	50 Hz, 60-90°C, 1-40 min	Im Vergleich zur Mikrowelle und zum konventionellen Erhitzen keine signifikanten Unterschiede in der Peroxidase- und Pektinmethylesterase-Aktivität, im Methoxylierungsgrad und im β -Karotin Gehalt	[89]
Spinatpüree ⁽¹⁾	Erhitzung von 30 auf 60, 70, 80 oder 90°C, 4 verschiedene Spannungsgradienten zwischen 10-40 V/cm	Spannungsgradienten beeinflussten Chlorophyllgehalt, Carotingehalt und Farbwerte nicht, Farbeigenschaften blieben besser erhalten als beim konventionellen Erhitzen, Zeit zur Erhitzung von 30 auf 70°C bei 20 V/cm gleich zum konventionellen Erhitzen, bei 30 V/cm doppelt so schnell, Bräunung durch OH im gleichen Temperaturbereich höher	[53]

Produkt und Prozessziel (1) Erwärmen / Auftauen (2) Blanchieren (3) Pasteurisierung (4) Sterilisation (5) Zellaufschluss	Bedingungen des Ohmschen Erhitzens	Effekte	Referenz
Rote Beete, Karotten ⁽¹⁾	220 und 380 V, 51 cm Elektrodenabstand, 50 Hz; 1,5-19 min	Mit OH schnelleres Weichwerden, am Ende weichere Struktur	[95]
Fruchtsaft / Früchte			
Orangensaft ⁽³⁾	18,2 V/cm; 65-90°C	Gleicher Temperaturverlauf wie bei konventionellem Erhitzen, gleicher Abbau von Vitamin C	[96]
Apfelsaft ⁽⁵⁾	20-70 V/cm, 4 Hz und 60 Hz	Ohmsche Vorbehandlung zur Saftgewinnung, bei 4 Hz bessere Saftgewinnung, höhere Leitfähigkeit, höhere Erwärmungsgeschwindigkeit und kürzere Vorbehandlung als bei höheren Frequenzen	[97]
Apfelsaft, Sauerkirschsafte, Orangensaft ⁽³⁾	20-60 V/cm	Änderung der elektrischen Leitfähigkeit mit der Temperatur, dem Spannungsgradienten und der Konzentration des Saftes	[61, 62]
Orangensaft ⁽³⁾	90, 120 und 150°C; 0,68-1,13 sec; 50 Hz; Spannungsmaximum von 8 kV; 20 cm Elektrodenabstand	Reduktion der Pektin-Esterase-Aktivität um 98% und des Vitamin C-Gehaltes um 15%, kein Unterschied im Geschmack zu frischem Orangensaft	[21, 98]
Grapefruitsaft ⁽³⁾	20, 30 und 40 V/cm, 60-90°C	Optimierung der Inaktivierung von Polyphenol-Oxidasen	[86]
Granatapfelsaft ⁽³⁾	10-40 V/cm 90°C für 3-12 min	Während der Aufwärmphase Veränderung rheologischer Eigenschaften, der Farbe und des Phenolgehaltes, vergleichbar mit konventionellem Erhitzen, keine weiteren Veränderungen während der Haltephase bei 90°C, daraus wird geschlossen: keine elektrischen Effekte	[54]
Quittensaft ⁽³⁾	10-40 V/cm, 0, 10, 15, 20 und 30 min, 65-75°C	Kein Unterschied in rheologischen Untersuchungen, gleiches pseudoplastisches (strukturviskoses) Verhalten daraus wird geschlossen: keine elektrochemischen Reaktionen beim Ohmschen Erhitzen	[80]
Granatapfelsaft ⁽³⁾	30-55 V/cm, 60 Hz, 20-85°C	Die Ohmsche Erhitzungsrate und der pH-Wert sinken mit dem Ansteigen des Spannungsgradienten, elektrische Leitfähigkeit steigt mit der Temperatur	[63]
Erdbeerprodukte ⁽³⁾	25-100 V/cm, 100°C	Feldstärke beeinflusst nicht die Leitfähigkeit des Produktes außer bei Erdbeerbrei (Erhöhung der Feldstärke um 40%, Erhöhung der Leitfähigkeit um 30%), konventionelle oder Ohmsche Vorerhitzung führt zu unterschiedlicher Leitfähigkeit, niedrige elektrische Feldstärken führten nicht zu einem verringerten Vitamin C-Abbau, Abbau bei konventionellem und Ohmschem Erhitzen gleich	[64]
Aprikosenpüree, Pfirsichpüree ⁽³⁾	20-70 V/cm, 50 Hz, 70°	Elektrische Leitfähigkeit abhängig von der Temperatur, der Ionenkonzentration und dem Fruchtfleischanteil	[99]
Pfirsichstücke ⁽³⁾	60 V/cm, 200 kHz, 65°C	Über 100 kHz Verringerung der Elektroporation	[77]
Aprikosenstücke in Sirup ⁽³⁾	90°C, 113 sec, kontinuierlicher Ohmic Heater (30 kW)	Ein Jahr Lagerung bei 25°C, mikrobiologisch stabil, Erhalt der Qualitätsmerkmale	[100]
Fruchtdessert aus Apfelbrei und Pfirsichstücken ⁽⁵⁾	Ohmsches Erhitzen: Pasteurisierung bei 105°C vor der Verpackung in Beutel, konventionelles Erhitzen: im Behälter bei 121°C	Bildung von 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF), Furfural (F), 3-Hydroxy-2-pyron und 2-Furonsäure bei konventionellem und Ohmschem Erhitzen vergleichbar, 5-HMF und F-Bildung abhängig von Stärke und Dauer der Erhitzung	[101]
Birnen ⁽³⁾	13 V/cm, 50/60 Hz, 100 V, mit Vakuumimprägnierung kombiniert zur bedingten Haltbarmachung	OH nach Vakuumimprägnierung verwendet, Permeabilität der Zellen erhöht	[102]
Erdbeeren ^(1,5)	9,7-17 V/cm; 70-130 V; mit Vakuumimprägnierung kombiniert zur bedingten Haltbarmachung	Kombination von Vakuumimprägnierung und OH bei 13 V/cm ergibt beste Dehydratisierung der Erdbeeren	[103, 104]
Acerola ⁽³⁾	120-200 V, Elektrodenabstand nicht angegeben	Abbau von Vitamin C bei OH Behandlung mit niedrigem Spannungsgradienten mit konventionellem Erhitzen vergleichbar, Hinweis auf elektrochemische Reaktionen	[82, 83]
Blaubeeren Fruchtpaste ⁽³⁾	Bis 240 V, Elektrodenabstand nicht angegeben, bis 90°C	Abbau von Anthocyanen bei OH-Behandlung mit niedrigem Spannungsgradienten gleich oder niedriger als bei konventionellem Erhitzen, bei höheren Spannungsgradienten erhöht, mit steigendem Gehalt an festem Material bei OH Behandlung ebenfalls höher	[84]

Produkt und Prozessziel (1) Erwärmen / Auftauen (2) Blanchieren (3) Pasteurisierung (4) Sterilisation (5) Zellaufschluss	Bedingungen des Ohmschen Erhitzens	Effekte	Referenz
Fleisch / Fisch			
Wurstbrät ⁽¹⁾	230 V; 50 Hz; 3,5-7 V/cm	Höherer Salzgehalt nötig, höherer Fettgehalt senkt die Leitfähigkeit, im Vergleich zum Dampfkochen: in der Textur kein Unterschied, Elastizität geringer, Farbe unterschiedlich, im Geschmack kein Unterschied, mikroskopisch: Zellen stärker zerrissen	[52, 58, 105]
Schweinefleischstücke ⁽¹⁾	5-7 V/cm	Kein Unterschied in der Textur, leichter Unterschied in der Elastizität und in der Farbbestimmung, kein Unterschied beim sensorischen Test	[75]
Fleischbratling ⁽¹⁾ (Hamburger)	Konstant 50 V und bis zu 13 A, Elektrodenabstand nicht angegeben	In Kombination mit konventionellem Erhitzen keine Einbußen in verschiedenen Qualitätsmerkmalen, deutlich geringere Kochzeit als bei alleiniger Anwendung von konventionellem Erhitzen	[106]
Rindfleisch ⁽¹⁾	10, 20 und 30 V/cm, 25°C	Ohmsches Auftauen, weniger histologische und strukturelle Änderungen als durch konventionelle Erwärmung	[107]
Rindfleisch ⁽¹⁾	Bis 250 V, 50 Hz, 15 A, 9 cm Elektrodenabstand	Hellere Oberflächenfarbe, keine signifikant veränderte Textur	[50, 108]
Putenfleisch ⁽¹⁾	8,33 V/cm; 100 V a) Low temperature long time (LTLT) 72°C 4 min, 80° 3 min b) High temperature short time (HTST) 95°C 5 min	Schnellere Erwärmung als beim konventionellen Erhitzen, Qualität bei LTLT höher, Geschmacksentwicklung bei HTST besser	[51]
Gehacktes Rindfleisch mit unterschiedlichem Fettgehalt ⁽¹⁾	20, 30 und 40 V/cm, 50 Hz, 80°C	Anfangsfettgehalt und Temperatur aber nicht das Spannungsgefälle beeinflussen die elektrische Leitfähigkeit	[74]
Rindfleisch ⁽¹⁾	20, 30 und 40 V/cm	Erhitzung schneller, Proben fester, Fettverlust gleich	[109]
Surimi ⁽¹⁾	Höher als 13,3 V/cm; 55°C; bis 5 min	Verringerung des Myosin- und Aktin-Abbaus, Erhalt der Struktur	[71, 110]
Surimi ⁽¹⁾	6,7-16,7 V/cm; 90°C; 40-180 sec ⁽¹⁾	Rückhalt von Wasser höher, Farbe blieb besser erhalten, höhere Konzentration an Sulfanyl-Verbindungen	[111]
Sonstiges			
Lösungen aus Weizenstärke, Kartoffelstärke und Getreidestärke ⁽¹⁾	20 V/cm, 60 Hz, bis 90°C	Elektrische Leitfähigkeit stieg mit der Temperatur und sank mit dem Grad der Gelierung, bedingt durch Strukturänderungen und Anstieg des gebundenen Wassers	[67]
Lösungen aus Weizenstärke und Mungbohnenstärke ⁽¹⁾	100 V; 3,5 cm Elektrodenabstand; 50 Hz; bis 90°C	Leitfähigkeit sank, vermutlich aufgrund verringerter Bewegung geladener Teilchen wegen des Quellens der Stärkekörner	[112]
Reiskleie ^(1,5)	100 V/cm, 1-60 Hz	nicht-thermische Effekte auf die Lipase-Aktivität durch OH-Behandlung, Ausbeute an Lipiden bis zu 98%, Verringerung der Frequenz führt zum Anstieg der Ausbeute an Ölen, Hinweis auf Elektroporation	[113]
Milch ⁽³⁾	50 Hz-10 kHz	Oberflächenhitze geringer als bei konventionellem Erhitzen, je höher die Frequenz, desto niedriger die Korrosion und das Fouling	[114]
Milch ⁽³⁾	2083-3030 A/m ² , 65-75°C	Elektroden von besonderer Bedeutung, keine Korrosion mit Graphit- und Edelstahlelektroden	[115]
Molkelösung ⁽³⁾	20-40 V/cm, 30-80°C	elektrische Leitfähigkeit abhängig von Temperatur und Konzentration der Lösung, weniger empfindlich gegenüber Temperatur und Temperaturänderungen	[116]
Flüssige Säuglingsnahrung ⁽⁴⁾	Keine Angaben	Kein Unterschied zum konventionellen Erhitzen bezüglich gelöster Proteine, FAST-Index und anderer Marker wie Furosine, Carboxymethyllysin und Farbe	[117]
Flüssige Säuglingsnahrung ⁽⁴⁾	Keine Angaben	Kein Unterschied zum konventionellen Erhitzen: Gehalt an löslichen Proteinen, Furosin und Carboxymethyllysin, sowie an fluoreszierenden Maillard-Reaktionsprodukten, Vitamin C-Abbau und Bräunung geringer	[85]

Produkt und Prozessziel ⁽¹⁾ Erwärmen / Auftauen ⁽²⁾ Blanchieren ⁽³⁾ Pasteurisierung ⁽⁴⁾ Sterilisation ⁽⁵⁾ Zellaufschluss	Bedingungen des Ohmschen Erhitzens	Effekte	Referenz
Gemüsepüree mit und ohne Hühnerfleischanteilen (Babynahrung)	Keine Angaben	3-7 mal weniger Furan bei OH als beim Autoklavieren in der Verpackung; bei OH mit steigendem Fo-Wert kein Anstieg von Furan; bei Zugabe von Zucker und Vitamin C Anstieg von Furfural, Hydroxymethylfurfural und Furan, bei OH aber geringer, natürlicher Vitamin C Gehalt (auf Grund der Rezeptur sehr niedrig) bei beiden Methoden vollständig abgebaut, Carotinoide und Polyphenole blieben bei OH stärker erhalten	[90]
Flüssiges Vollei ⁽¹⁾	20 V/cm 20-60°C	Fließeigenschaften gleich, kein signifikanter Unterschied in der scheinbaren Viskosität, kein signifikanter Unterschied der Aktivierungsenergie und der scheinbaren Viskosität in den verschiedenen rheologischen Modellen, jedoch Unterschiede in der Aktivierungsenergie für Ohmsches Erhitzen	[118]
Ei-Albumin-Lösung ⁽¹⁾ Frisches Eiweiß	10 V/cm, 50 Hz-10 kHz	Albuminlösung: Übergang zu einem Gel bei 75°C, ab dieser Temperatur stieg die Geschwindigkeit der Erhitzung unabhängig von der Frequenz, bei Konzentrationen von Albumin unter 2 w/v % keine Gelbildung frisches Eiweiß: keine Erhöhung der Geschwindigkeit der Erhitzung bis 90°C; Hinweis, dass gelatinöse Komponenten des Eiweißes Hitzetransfer verhindern	[68, 69]
Thymian-Öle durch Wasserdestillation ⁽¹⁾	220 V, Elektrodenabstand nicht angegeben, 50 Hz, 4 h wie bei konventioneller Wasserdestillation	Energieersparnis auf Grund kürzerer Extraktionszeiten	[119]
Enzyme aus Apfelsaft, Moltebeerenmarmelade, Gemüsebrei aus Karotten, Brokkoli und Kartoffeln, Milch ^(2,3)	50 Hz, bis 70°C	Untersuchungen zur Aktivität von Alkalischer Phosphatase, Pektin-Methylesterase und Peroxidase: Inaktivierungsmechanismen gleich, kinetische Parameter der Enzyme unterschiedlich stark verändert, Hinweis darauf, dass die Tertiärstruktur der Enzyme durch das elektrische Feld nicht verändert wird, sondern dass die Umgebung der Enzymmoleküle durch Anstieg der Ionenkonzentration und unterschiedlicher Ionenverteilung verändert wird	[120]

Die Vielzahl an untersuchten Lebensmitteln, die mit Hilfe des Ohmschen Erhitzens prozessiert wurden, und die Darstellung der verwendeten Prozessparameter sowie der erzielten Prozesseffekte verdeutlichen den breiten Anwendungsbereich sowie die komplexen Wechselwirkungen zwischen Prozess und Produktmatrix. Gleichzeitig begrenzen breite Parameterbereiche innerhalb der Studien aber auch zwischen unterschiedlichen Studien sowie das Fehlen systematischer Untersuchungen mit präziser Angabe von Prozessbedingungen Vergleichbarkeit und allgemein gültige Aussagekraft der Ergebnisse.

4 Inaktivierung von Mikroorganismen durch Ohmsches Erhitzen

Beim Ohmschen Erhitzen werden wie bei konventionellen Erhitzungsmethoden Keime im Lebensmittel durch Erhöhung der Temperatur abgetötet.

Die Inaktivierung von Mikroorganismen durch das Ohmsche Erhitzen im Vergleich zur konventionellen Erhitzung ist in Tabelle 2 gezeigt. Sie wurde primär thermischen Effekten zugeordnet. Versuche mit der Hefe *Zygosaccharomyces bailii* zeigten keine Unterschiede in der Inaktivierung zwischen Ohmschem und konventionellem Erhitzen, was auf rein thermische Effekte schließen lässt [121]. Versuche mit dem Gram-negativen Bakterium *Escherichia coli* unter speziellen Bedingungen [121] sowie mit Sporen der Gram-positiven Bakterien *Bacillus subtilis* [122] und *Bacillus licheniformis* [123] zeigten, dass eine stärkere Inaktivierung durch das Ohmsche Erhitzen im Vergleich zum konventionellen Erhitzen unter gleichen Temperaturbedingungen erzielt werden kann. Die beobachteten Effekte konnten unter den gewählten Versuchsbedingungen nicht weiter differenziert werden. Ein Vergleich der Temperatur-Zeit-Profile beider Erhitzungsmethoden ist aufgrund der vorliegenden Daten nicht möglich.

In Versuchen mit *Alicyclobacillus acidoterrestris*- Sporen wurde neben der verbesserten Inaktivierung durch das Ohmsche Erhitzen eine temperatur-unabhängige Korrelation zwischen der verwendeten Spannung und der erzielten Inaktivierung gefunden [22]. Ähnliche Abhängigkeiten von Parametern des elektrischen Feldes wurden für die elektrische Feldstärke [124, 125] sowie für die Frequenz [126] während des Ohmschen Erhitzens gezeigt.

In Versuchen mit *Escherichia coli* O157:H7 und *Salmonella typhimurium*, beide Gram-negativ, und *Listeria monocytogenes*, einem Gram-positiven Bakterium, wurde die Inaktivierung durch Ohmsches Erhitzen bei subletalen Temperaturen (siehe Tab. 2) untersucht. Insbesondere in sauren Matrices wurde von einer Inaktivierung berichtet, die auf eine Erhöhung der Zellpermeabilität zurückgeführt, aber nicht weiter differenziert wurde [127]. Der Einfluss der Lebensmittelmatrix, insbesondere des pH-Wertes, auf die Inaktivierung durch Ohmsches Erhitzen wurde unter anderem auch bei *Bacillus*- und *Geobacillus*- Endosporen gezeigt [128].

In einem Modellsystem unter Verwendung von Kapillaren wurde bei der Behandlung von *Geobacillus stearothermophilus*- Sporen [129] sowie *Bacillus coagulans*- Sporen

[130] über eine beschleunigte Inaktivierung der Sporen im Fall des Ohmschen Erhitzens berichtet. Die zu Grunde liegenden Mechanismen sind noch ungeklärt.

Tab. 2: Studien zur Inaktivierung von Mikroorganismen durch die Behandlung mit Ohmschem Erhitzen im Vergleich zu konventionellen Erhitzungsbedingungen (OH – Ohmic heating/Ohmsches Erhitzen, D- und z-Wert – siehe Glossar)

Spezies	Matrix	Bedingungen des konventionellen Erhitzens	Bedingungen des Ohmschen Erhitzens	Effekte	Referenz
<i>Zygosaccharomyces bailii</i>	Phosphatpufferlösung	Erhitzen durch zirkulierendes Wasser im Mantel der OH-Kammer	keine Angabe	Kein Unterschied	[121]
<i>Escherichia coli</i>	Phosphatpufferlösung		Elektrische Vorbehandlung	Stärkere Abtötung	
<i>Bacillus subtilis</i> -Sporen	0,1%ige NaCl Lösung, Nährlösung	Erhitzen durch zirkulierendes Wasser im Mantel der OH-Kammer	60 Hz; 88,0; 92,3; 95,5 und 99,1°C; bis zu 35 min	Überlebensrate erniedrigt, D-Werte erhöht, Inaktivierung um maximal 4 Log-Einheiten	[122]
<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> -Sporen	Orangensaft	kein Zugriff auf Daten	30 V/cm, 70, 80, und 90°C, bis zu 30 min	Schnellere Inaktivierung, Inaktivierung um 5 Log-Einheiten, bei 70°C abhängig von angelegter Spannung	[22]
<i>Escherichia coli</i>	Ziegenmilch	Erhitzen von Aliquots der zum Animpfen verwendeten Bakterien- bzw. Sporenlösung in Eppendorf-Röhrchen	20 bis 54 V/cm, 55-65°C, bis zu 10 min	D-Werte und z-Werte niedriger	[123]
<i>Bacillus licheniformis</i> Sporen	Moltebeerenmarmelade		20-54 V/cm bis, 70-80°C, bis zu 50 min	D-Werte niedriger, bei z-Werten kein signifikanter Unterschied	
<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella typhimurium</i> , <i>Listeria monocytogenes</i>	Peptonwasser (pH 7,2), Apfelsaft (pH 3,5)	Behälter in Wasserbad mit konstanter Temperatur	30 und 60 V/cm, 55 und 60°C, 10 und 30 sec	Stärkere Inaktivierung im Vergleich zum konventionellen Erhitzen, stärker bei niedrigerem pH-Wert	[127]
<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella typhimurium</i> , <i>Listeria monocytogenes</i>	Orangensaft, Tomatensaft	Offener Behälter in Ölbad mit gleichem Temperaturverlauf wie bei OH, umrühren per Hand	10-20 V/cm, 2-9 min	Inaktivierung um 5 Log-Einheiten, Inaktivierung in Tomatensaft stärker als in Orangensaft, Inaktivierung von <i>E. coli</i> schwächer im Vergleich zu <i>S. typhimurium</i> und <i>L. monocytogenes</i>	[124, 125]
<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella enterica</i>	Salsa (stückige Tomatenbasis, Zwiebeln, Chili, Essig, pasteurisiert, Gesamt pH- Wert 4,16)	Kein Vergleich zum konventionellen Erhitzen	25-40 V/cm, 1-3 min	Mit 25 V/cm und 30 sec Inaktivierung um 5 Log-Einheiten für <i>E.coli</i>	[126]
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> und <i>Geobacillus stearothermophilus</i> - Sporen	0,1% NaCl Lösung, grünes Erbsenpüree, Karottenpüree, Tomatensaft	Kein Vergleich zum konventionellen Erhitzen	unter Druck: 50 V/cm, 105°C, 10-30 min, 600 MPa	in Tomatensaft Inaktivierung um 3,1 bis 4,8 Log-Einheiten nach 10 min, in 0.1% NaCl-Lösung um 4,6 bis 5,6 Log-Einheiten nach 30 min, pH-Wert-abhängig	[128]
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Phosphatpufferlösung	Gleicher Temperaturverlauf	10-20 V/cm	schnellere Freisetzung cytoplasmatischer Proteine als beim konventionellen Erhitzen	[131]

Das Spektrum und die Variabilität der in Tabelle 2 zusammengefassten Daten und Prozessparameter verdeutlichen deren begrenzte Aussagekraft und Vergleichbarkeit. Sowohl die genutzte Anlagentechnik und die eingesetzten Prozessparameter als auch die verwendeten Versuchsprotokolle inklusive der Prozessdatenerfassung der einzelnen Studien sind sehr unterschiedlich. Zudem kann nur auf wenige systematische Untersuchungen zurückgegriffen werden, die sich mit Produkt- und Prozessfaktoren und deren Einfluss auf die Inaktivierung befassen.

5 Aspekte der Allergenität

Die Allergenität beschreibt die Eigenschaft eines Stoffes, das Immunsystem gegen diesen Stoff zunächst zu sensibilisieren (Sensibilisierungspotenzial) und bei erneutem Kontakt eine allergische Reaktion auszulösen (Allergieauslösungspotenzial). Im Zusammenhang mit Lebensmitteln als Allergene stehen vor allem IgE-vermittelte Soforttyp-Reaktionen im Fokus klinischer und wissenschaftlicher Untersuchungen [132]. Dabei werden vorwiegend die im Lebensmittel enthaltenen Proteine untersucht und bewertet, da sie die wichtigsten Auslöser allergischer Reaktionen gegen Lebensmittel darstellen. In einem aktuellen Übersichtsartikel der European Food Safety Authority (EFSA) [133] zum Einfluss der Prozessierung auf die Allergenität von Lebensmitteln wird für die Bewertung der Allergenität (Allergieauslösung) die doppel-blind/Placebo kontrollierte orale Lebensmittelprovokation von allergischen Probanden als Methode der Wahl genannt. Allerdings werden humane Provokationsstudien aufgrund ethischer Bedenken und ökonomischer Zwänge nur selten durchgeführt, so dass Humandaten zum Einfluss der Lebensmittelprozessierung auf das Allergieauslösungspotential nur in wenigen Fällen vorliegen [133, 134]. Weiterhin verbieten sich aus ethischen Gründen humane Studien zur Untersuchung des Einflusses der Prozessierung auf das Sensibilisierungspotenzial von Allergenen. Daher resultieren die meisten Daten zum Allergieauslösungs- oder Sensibilisierungspotenzial aus Tierstudien [134, 135], *in vitro*-Modellen [136] oder häufiger noch aus Bindungsstudien mit humanen IgE-Antikörpern. Allerdings verringert sich die prädiktive Aussagekraft für die Bewertung der Allergenität je weiter sich die Untersuchungen von der humanen Situation entfernen.

Beim Ohmschen Erhitzen von Lebensmitteln treten thermische und elektrische Effekte auf, die einen Einfluss auf die Allergenität haben können. Die potentielle Allergenität von Lebensmitteln, die durch Ohmsches Erhitzen behandelt wurden, könnte im Vergleich zu Lebensmitteln, die durch konventionelle, thermische Verfahren prozessiert wurden, verändert sein. Damit wären Lebensmittel nach Ohmschem Erhitzen nicht automatisch thermisch behandelten Lebensmitteln gleichzusetzen und müssten demnach neu beurteilt werden. Zum direkten Einfluss des Ohmschen Erhitzens auf die Allergenität (Sensibilisierungs- oder Allergieauslösungspotenzial) von Lebensmitteln liegen keine publizierten Untersuchungen vor. Da Unterschiede im Abbau bzw. Erhalt einiger Stoffe zwischen dem Ohmschen Erhitzen und dem konventionellen Erhitzen festgestellt wurden (siehe Kapitel 3: beispielhafte Referenzen [21, 53, 71], ist vorstellbar, dass neoallergene Strukturen gebildet oder endogen vorhandene Allergene unterschiedlich abgebaut werden. Beispielsweise ist Myosin in Schalentieren als Allergen beschrieben und könnte durch das Ohmsche Erhitzen im Vergleich zum konventionellen Erhitzen verringert abgebaut werden [71].

Thermische Effekte könnten eine Senkung oder Erhöhung der Allergenität zur Folge haben. Als sekundärer Effekt thermischer Reaktionen sind auch Änderungen der Allergenität durch den Einfluss von Maillard-Reaktionen zu berücksichtigen. Hierdurch könnten sich neoallergene Strukturen bilden. Elektrisch bedingte Effekte könnten zu einer erhöhten Freisetzung von Allergenen führen. Die skizzierten möglichen Veränderungen werden im Folgenden näher erläutert.

Hitzebedingte Veränderungen

Man kann zunächst annehmen, dass bei konventionellem und Ohmschem Erhitzen prinzipiell gleiche oder ähnliche hitzebedingte Effekte auftreten, die dann in Abhängigkeit der Höhe der thermischen Gesamtbelastung die Allergenität des Lebensmittels ähnlich oder unterschiedlich beeinflussen. In einer Übersicht der EFSA zum Einfluss der Prozessierung auf die Allergenität (Auslösungspotential) von Lebensmitteln werden verschiedene klinische Studien zu Sellerie, Kuhmilch, Hühnerei, Baumnüssen, Weizen und Erdnuss zusammengefasst und diskutiert [133]. Die Autoren schlussfolgern, dass der Einfluss des Erhitzens einerseits die Allergenität von Ei, Milch, Sellerie und Haselnuss reduziert. Andererseits variierte die Verringerung in Abhängigkeit der Personen und der studierten Lebensmittel. Zu

ähnlichen Ergebnissen kommt ein anderer Übersichtsartikel über den Einfluss der thermischen Prozessierung auf die Allergenität von Baumüssen [137]. Demnach reduzierte sich die mit *in vitro* Tests untersuchte potentielle Allergenität von sogenannten "pathogenesis-related" Proteinen der PR-10 Familie, welche pollenassoziierte Nahrungsmittelallergien auslösen können, in Haselnuss und Mandel. Demgegenüber zeigte sich eine stabile potentielle Allergenität von sogenannten nicht-spezifischen Lipidtransferproteinen und Speicherproteinen in verschiedenen Nüssen. Die Beispiele verdeutlichen den unterschiedlichen thermischen Einfluss auf die Allergenität in Abhängigkeit des allergenen Lebensmittels, des Sensibilisierungsprofils der Betroffenen sowie der Struktur der verschiedenen allergenen Proteine.

In Zusammenhang mit dem Erhitzen wurden thermisch beschleunigte, nicht-enzymatische Bräunungsreaktionen zwischen reduzierenden Zuckern und Proteinen, die sogenannte Maillard-Reaktion, als mögliche Ursache zur Bildung von neoallergenischen Strukturen beispielsweise bei Pecannüssen [138], Sojabohnen-Hülsen [139] und Erdnüssen [140] beschrieben. Zudem gibt es Hinweise, dass bestimmte Reaktionsprodukte der Maillard-Reaktion zusätzliche immunmodulatorische Eigenschaften besitzen [141].

Da das Ohmsche Erhitzen als schonendes Verfahren im Vergleich zu konventionellen Verfahren mit verkürzten Aufheizzeiten verbunden ist, ergibt sich eine geringere thermische Gesamtbelastung des Lebensmittels (geringerer C-Wert bei gleichem Fo-Wert). Diese geringere thermische Gesamtbelastung würde einerseits vermutlich eine geringere Reduzierung der Allergenität von vorhandenen allergenen Strukturen und andererseits vermutlich eine geringere Bildung von neoallergenischen Strukturen im Vergleich zum konventionellen Erhitzen zur Folge haben.

Elektrisch bedingte Veränderungen

Eine mögliche Elektroporation der Zellmembranen könnte zur Freisetzung größerer Mengen von Allergenen oder Bildung stress-induzierbarer Allergene führen. Wie bereits in der Stellungnahme der SKLM zur Plasmabehandlung von Lebensmitteln mit pflanzlichen Bestandteilen dargestellt, könnte das pflanzliche Abwehrsystem die Bildung von stressinduzierbaren sekundären Metaboliten und „pathogenesis-related“ Proteinen, von denen einige ein hohes allergenes Potenzial besitzen, auslösen [142].

Die Prozesssteuerung beim Ohmschen Erhitzen sollte derart gestaltet sein, dass die Neubildung solcher Stoffe so weit wie möglich vermieden wird.

6 Aspekte der Prozesskontrolle

Die notwendige **Prozesskontrolle** kann durch Festlegung eines kritischen Kontrollparameters, vorzugsweise die **Temperaturmessung**, erreicht werden. Hierbei ist das mögliche Auftreten von **Hot bzw. Cold Spots** zu berücksichtigen und neben der Ermittlung einer mittleren Temperatur der Einsatz räumlich verteilter Messsensoren von wesentlicher Bedeutung. Neben der anlagentechnischen Gestaltung sind insbesondere Inhomogenitäten in der **Leitfähigkeit** die Ursache einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Produkt. Der Leitfähigkeit des Produkts kommt bei der Prozessgestaltung im Hinblick auf die **Prozesshomogenität** daher eine zentrale Bedeutung zu. Durch eine entsprechende Produktrezeptur kann die Leitfähigkeit der einzelnen Komponenten angeglichen werden.

Für die **Prozessgestaltung und -überwachung** können die in der thermischen Haltbarmachung etablierten Konzepte herangezogen werden. Dazu gehört die Ermittlung der **Inaktivierungskinetiken mit D- und z-Werten** unerwünschter, insbesondere pathogener Mikroorganismen. Dies gilt ebenso für die Enzyminaktivierung. Zur Prozessgestaltung mit **Gewährleistung der mikrobiologischen Sicherheit** des Produktes ist die Bestimmung der Cold Spots durch Kenntnis der Material- und Prozesseigenschaften eine wesentliche Bedingung. Techniken zum Nachweis der Inaktivierung von Mikroorganismen sowie zur Modellierung und Simulation können zur Prozessvalidierung herangezogen werden [4, 143-146].

Um die **Inaktivierung von Mikroorganismen** bzw. deren D- und z-Werte durch Ohmsches Erhitzen mit konventionellen thermischen Verfahren vergleichen zu können, sind eine adäquate **Kontrolle der Temperatur** und des pH-Wertes sowie ein **identischer Temperaturverlauf** für die beiden Erhitzungsverfahren notwendig.

Im Fall des **Nachweises nicht-thermischer Effekte** auf Mikroorganismen und Lebensmittel beim Ohmschen Erhitzen ist es schwierig, eine systematische Versuchsanordnung zu finden, die es ermöglicht, die Ergebnisse zu vergleichen, da die schnelle, volumetrische Erhitzung während des Ohmschen Erhitzens nur unzureichend auf die konventionelle Erhitzung übertragen werden kann. Zum

Verfahrensvergleich ist die Angabe der **Temperatur-Zeit-Profile** und der daraus ermittelten Fo- und C-Werte (s. Glossar) notwendig, um die Unterschiede eindeutig benennen und nicht-thermische Effekte des Ohmschen Erhitzens identifizieren zu können.

Bezüglich der Abgrenzung thermischer Effekte von möglicherweise zusätzlich auftretenden **elektrischen Effekten (Elektroporation)** sind die für die jeweiligen pflanzlichen Zellen oder die Mikroorganismen relevanten kritischen Werte der elektrischen Feldstärke zu beachten, deren Überschreitung die Wahrscheinlichkeit eines Auftretens nicht-thermischer Effekte erhöht. In diesem Fall sind elektrische Effekte zu berücksichtigen, da diese zusätzlich zu den Aspekten des Ohmschen Erhitzens als thermisches Verfahren für die Prozessauslegung und eine darauf basierende Sicherheitsbewertung relevant sein können. Ohmsches Erhitzen in einem **Kapillarmodellsystem** erlaubt die Kontrolle des Temperatur-Zeit-Profils und damit den Vergleich zum konventionellen Erhitzen und die Möglichkeit zur Differenzierung thermischer und nicht thermischer Effekte [129].

Für flüssige, niedrigviskose Lebensmittel sind mit den Verfahren der **Direktampfinjektion oder –infusion** meist ähnliche Erhitzungsraten wie beim Ohmschen Erhitzen realisierbar. Deshalb sind diese Verfahren bzgl. der Temperatur-Zeit-Profile gut für einen Vergleich zum Ohmschen Erhitzen geeignet. Konventionelle Verfahren zur Sterilisation stückhaltiger, hochviskoser Produkte, wie beispielsweise das Autoklavieren, weisen hingegen aufgrund der Verpackungsgeometrie, der Produkteigenschaften sowie aufgrund der Limitierungen der Wärmeübertragung deutlich geringere Erhitzungsraten auf, so dass sie für einen Vergleich nur bedingt geeignet sind.

Um **Prozessbedingungen des Ohmschen Erhitzens** vergleichen zu können, muss bei der Angabe von Behandlungsbedingungen bzw. Versuchsergebnissen ein möglichst standardisiertes Protokoll angewendet werden. Dazu gehört die Angabe von Anlagenparametern (elektrische Leistung, Feldstärke, Charakteristik der Wechselspannung, Elektrodengeometrie und –anzahl, Strömungsgeschwindigkeit und Haltezeit), Produktparametern (Phasen, Partikelgehalt, Leitfähigkeit, Dichte, Viskosität und Wärmekapazität) sowie ermittelter Minimal- und Maximaltemperatur des Produktes. Die Optimierung der Behandlungskammern sollte durch **Simulationen** des Strömungsprofils, der Verteilung des elektrischen Feldes und des

Energieeintrages unter Berücksichtigung der Viskosität und Leitfähigkeit des Produktes erfolgen.

Jede Prozesskombination des Ohmschen Erhitzens mit anderen Verfahren bedarf der zusätzlichen Beachtung entsprechender Prozess- und Produktparameter mit Relevanz für das Erhitzungsverhalten und die Temperaturverteilung und verlangt daher eine Re-Evaluierung des eigentlichen Ohmschen Erhitzungsprozesses nach den vorher genannten Aspekten.

7 Forschungsbedarf

Für die Anwendung des Ohmschen Erhitzens zur Herstellung sicherer Lebensmittel besteht Forschungsbedarf zu folgenden Aspekten:

- Sicherstellung der Homogenität der Erhitzung
- Inaktivierungskinetiken relevanter Mikroorganismen (Referenzkeime)
- Differenzierung thermischer und nicht-thermischer Effekte
- Einfluss der physikochemischen Produkteigenschaften
- Untersuchungen zu prozessinduzierten chemischen Veränderungen
- Untersuchungen zur Beeinflussung des allergenen Potentials
- Aufbau von Prozess- und Systemmodellen
- Entwicklung von Simulationsmodellen
- Bewertung von Kombinationsverfahren
- Systematische Studien unter Beachtung der Vergleichbarkeit

Inhomogenitäten in der Temperaturverteilung wurden als kritischer Punkt bzgl. der Lebensmittelsicherheit und Lebensmittelqualität identifiziert. Der **Sicherstellung einer homogenen Erhitzung** kommt daher besondere Bedeutung zu. Hierbei besteht Forschungsbedarf zur Entwicklung verfahrensangepasster Rezepturen. Die Eignung des Verfahrens für verschiedene Produktgruppen ist zu untersuchen. Zur Reduzierung von Inhomogenitäten in der elektrischen Leitfähigkeit ist u.a. die Angleichung relevanter Materialkennwerte einzelner Produktfraktionen wesentlich. Methoden zur Erfassung von Temperatur-Zeit-Profilen an unterschiedlichen Stellen der Behandlungszelle, die Cold und Hot Spots im Produkt detektieren und den Vergleich verschiedener Verfahren ermöglichen, müssen entwickelt werden.

Die Identifizierung von Cold Spots ist für die **mikrobiologische Sicherheit** von großer Bedeutung. Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf zur **Erfassung der Inaktivierungskinetiken** für Einzelfractionen eines Produkts. Es sind Grenzbereiche für das Auftreten nicht-thermischer Effekte bei der mikrobiellen Inaktivierung zu definieren. Notwendig zur Aufklärung zugrunde liegender Mechanismen der Inaktivierung ist die Berücksichtigung von Elektrodenreaktionen und auftretenden elektrischen Feldstärken. Forschungsbedarf ist bzgl. der **Differenzierung thermischer und nicht-thermischer Effekte** gegeben. Hierbei sind nicht-thermische Effekte bei der Inaktivierung von Mikroorganismen unter Berücksichtigung des Auftretens subletaler Schädigungen sowie der möglichen Erholung inaktivierter Zellen zu überprüfen. Andernfalls kann die Gefahr einer Unterbehandlung bestehen, wenn der Prozess basierend auf potentiellen, nicht-thermischen Effekten unter den rein thermischen Anforderungen an die Inaktivierung von Mikroorganismen ausgelegt wird.

Umfassende Kenntnis der **physikochemischen Eigenschaften der Lebensmittel** und Lebensmittelbestandteile ist die Grundlage für eine adäquate Verfahrensbeschreibung. Untersuchungen für den gesamten prozessrelevanten Temperaturbereich, vor allem aber für Temperaturen über 100°C, für die die Datenlage lückenhaft ist, sind erforderlich. Der Einfluss der Rezeptur auf die physikochemischen Eigenschaften und deren Optimierung ist zu untersuchen.

Weiterführend müssen **prozessinduzierte chemische Veränderungen** am Produkt inklusive der Veränderung der Allergenität auf molekularer Ebene untersucht werden. Die Entwicklung entsprechender Indikatoren ist zur Verbesserung der Datenlage notwendig. Zur Vermeidung unerwünschter Prozesseffekte einschließlich auftretender Elektrodenreaktionen sind **Prozessfenster** zu definieren und bestimmte Bereiche der **Prozessvariablen** (z.B. niedrige Frequenzen) auszuschließen. Für diese Prozessfenster sind geeignete Indikatoren als Grundlage der Validierungskonzepte erforderlich.

Daten zum Einfluss des Ohmschen Erhitzens auf das **allergene Potential** von Lebensmitteln gibt es nicht, so dass hier Forschungsbedarf besteht. Es muss untersucht werden, ob sich Allergene bilden oder nur unzureichend inaktiviert werden. Es sind mögliche nicht-thermische Effekte auf die Bildung oder Reduzierung der Allergene zu untersuchen. Die Identifizierung von Cold Spots und

Unterbehandlung ist auch in Bezug auf die hitzebedingte Reduzierung von Allergenen durchzuführen. Des Weiteren könnten kürzere Prozesszeiten beim Ohmschen Erhitzen eine nicht ausreichend lange Hitzeeinwirkung bedeuten. Wie bei der Inaktivierung von Mikroorganismen ist die Kontrolle der Temperatur-Zeit-Profile notwendig.

Der Aufbau von **Prozess- und Systemmodellen** ist anzustreben. Diese sollten relevante Einflussgrößen definieren, z.B. die Geometrie und das Material der Behandlungszelle, die Zusammensetzung des Produktes einschließlich Größe und Dichte von vorhandenen Partikeln sowie die elektrische Leitfähigkeit einzelner Fraktionen.

Die Entwicklung und Etablierung von **Simulationsmodellen zur allgemein gültigen Bewertung** der Geometrie der Behandlungszelle, der elektrischen Feldverteilung sowie der Strömungsverhältnisse in Abhängigkeit der Produkteigenschaften ist erforderlich, um im Vorfeld einer experimentellen Prozessvalidierung entsprechende Verfahrensoptimierungen zu realisieren. Dabei muss überprüft werden, ob die zurzeit genutzte, lückenhafte Verwendung produktspezifischer Daten durch generische Ansätze zur Beschreibung von Produkt- und Verfahrensparametern ersetzt werden kann. Zur strukturierten Entwicklung von Modellsystemen sind daher weitere systematische Arbeiten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Produkt- und Prozessbedingungen sowie eine Differenzierung der Prozesseffekte erforderlich. Dies gilt auch für die Anwendung thermisch-thermischer **Kombinationsverfahren**, z.B. Ohmsches Erhitzen in Kombination mit Radiofrequenzerwärmung.

Daten zur mikrobiologischen Sicherheit, zu prozessinduzierten chemischen Veränderungen und zum Einfluss auf die Allergenität von Lebensmitteln sind unzureichend. Die lückenhafte Datenlage ist u.a. auf die mangelnde Vergleichbarkeit der vorhandenen Studien zurückzuführen. **Systematische Studien unter Sicherstellung der Vergleichbarkeit** von Produkt- und Prozessparametern sowie der Anlagengestaltung sollten als Basis für einen Verfahrenvergleich und für die wissenschaftlich basierte Weiterentwicklung des Ohmschen Erhitzens dienen.

Glossar

Blanchieren: Kurzzeitige thermische Behandlung von Lebensmitteln, v.a. Gemüse, in heißem Wasser oder Wasserdampf mit dem Ziel der Reduzierung der Keimbelastung und der Enzymaktivität.

Cold Spot: Auftreten lokal niedrigerer Temperaturen (engl. Cold Spot – kalter Punkt) im Vergleich zur mittleren Produkttemperatur aufgrund einer ungleichmäßigen Erwärmung des Produktes und der Ausbildung einer Temperaturverteilung. Cold Spots tragen ein Risiko für eine unzureichende Erhitzung im Hinblick auf die mikrobiologische Sicherheit (Unterbehandlung).

C-Wert: Cooking value (Äquivalenzzeit einer Erhitzung bezogen auf 100°C und einem Referenz z-Wert von üblicherweise 30 °C).

D-Wert (Dezimalreduktionszeit): Der D-Wert gibt die Zeit an, die zur Reduktion der Keimzahl um den Faktor 10 (eine Log-Einheit) bei einem spezifischen Inaktivierungsverfahren notwendig ist. Dies entspricht einer Abtötung von 90 %.

Elektrische Feldstärke: Maß für die auf eine elektrische Ladung wirkende Kraft im elektrischen Feld. Für ein homogenes elektrisches Feld zwischen parallelen Platten ist die elektrische Feldstärke proportional zur angelegten Spannung und umgekehrt proportional zum Abstand der Platten.

Fouling: Ausbildung unerwünschter Schichten biologischer, organischer oder anorganischer Zusammensetzung während der Prozessierung.

Fo-Wert: Sterilisation Value (Äquivalenzzeit einer Erhitzung bezogen auf 121°C und einen Referenz z-Wert von üblicherweise 10°C).

Hot Spot: Auftreten lokal höherer Temperaturen (engl. Hot Spot – heißer Punkt) im Vergleich zur mittleren Produkttemperatur aufgrund einer ungleichmäßigen Erwärmung des Produktes und der Ausbildung einer Temperaturverteilung. Hot

Spots können eine Überbehandlung mit einer zusätzlichen Schädigung der Qualität zur Folge haben.

Joule Effekt: Erwärmung eines Mediums durch einen elektrischen Stromfluss aufgrund des im Medium vorhandenen elektrischen Widerstandes, wobei die erzeugte Wärme proportional zur umgesetzten elektrischen Leistung und der Dauer des Stromflusses ist.

Ohmsches Gesetz: Wird an ein Medium eine elektrische Spannung angelegt, so fließt proportional zur Höhe der Spannung ein elektrischer Strom.

Pasteurisierung: Üblicherweise durch Erhitzung eines Lebensmittels erzielte Inaktivierung vegetativer Mikroorganismen im Temperaturbereich $<100^{\circ}\text{C}$.

Pulsed electric field (PEF): Anwendung elektrischer Felder im Bereich über 1000 V/cm mit dem vorrangigen Ziel der Elektroporation unter Vermeidung von Ohmschen Erhitzungseffekten.

Radiofrequenzerwärmung: Erhitzungsprozess, bei dem die Temperaturerhöhung durch die Absorption von elektromagnetischen Wellen im Radiofrequenzbereich (üblicherweise 10-100 MHz) erfolgt. Die damit verbundene Dissipation von Energie ist abhängig von den dielektrischen Eigenschaften des Produktes bzw. einzelner Produktfraktionen.

Sterilisation: Inaktivierung bakterieller Endosporen. Bei Lebensmitteln üblicherweise durch Erhitzung im Temperaturbereich $>121^{\circ}\text{C}$ durchgeführt.

Stromdichte: Die Stromdichte ist definiert als das Verhältnis der Stromstärke I zu einer dem Strom zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche A , durch die der Strom senkrecht hindurchtritt, SI-Einheit: Am^{-2} .

Temperatur-Zeit-Profil: Darstellung des Temperaturverlaufes in einem Zeitfenster.

UHT: Ultrahoherhitzung.

z-Wert: Der z-Wert gibt die Temperaturänderung in Grad Celsius an, die erforderlich ist, den D-Wert um den Faktor 10 zu ändern, z.B. die Temperaturerhöhung, die notwendig ist, um den D-Wert auf 1/10 zu verringern bzw. die Temperaturniedrigung, die notwendig ist, um den D-Wert um den Faktor 10 zu erhöhen.

Literatur

1. Goullieux, A. and J.P. Pain, *Ohmic heating*. Emerging Technologies for Food Processing. 2005, London: Elsevier Ed. 469-505.
2. Yildiz-Turp, G., et al., *Effect of ohmic treatment on quality characteristic of meat: a review*. Meat Sci, 2013. **93**(3): p. 441-8.
3. Ruan, R., et al., *Ohmic heating*. Thermal Technologies in Food Processing. 2001, Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
4. Zareifard, M.R., et al., *Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems*. Innovative Food Science and Emerging Technologies 2003. **4**(1): p. 45-55.
5. Jones, F., *Apparatus for electrically treating liquids*, D.W.a.T. Office, Editor. 1897: USA.
6. Anderson, A.K. and R. Finkelstein, *A study of the electro-pure process of treating milk*. Journal of Dairy Science, 1919. **2**(5): p. 374-406.
7. Fellows, P.J., *Processing Using Electric Fields, High Hydrostatic Pressure, Light or Ultrasound in: Food Processing Technology Principles and Practices*. Woodhead Publishing in Food Science and Technology Ser. . 2000, : CRC Press.
8. Toepfl, S., V. Heinz, and D. Knorr, *Food preservation by pulsed electric fields*. Food Preservation by Pulsed Electric Fields: From Research to Application. 2007, Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
9. Kohn, S., *Electric Frankfurter Grill*. US Patent 1974715 A. 1933.
10. McConnell, S.V. and R.P. Oisson, *Wiener Vending Machine*. US Patent 2139690 A. 1938.
11. Schade, A.L., *Prevention of enzymatic discoloration of potatoes*. US Patent 2569075 A. 1951.
12. Kessler, H.G., *Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik - Molkereitechnologie*. 1996, München: Verlag A. Kessler.
13. Naveh, D., I.J. Kopelman, and S. Mizrahi, *Electroconductive Thawing by Liquid Contact*. Journal of Food Technology, 1983. **18**(2): p. 171-176.
14. Skudder, P.J., *Ohmic heating: new alternative for aseptic processing of viscous foods*. Food Engineering Reviews, 1988. **60**: p. 99-101.
15. Knirsch, M.C., et al., *Ohmic heating - a review*. Trends in Food Science & Technology, 2010. **21**(9): p. 436-441.
16. Marcotte, M., H.S. Ramaswamy, and S. Sastry, *Ohmic Heating in Food Processing (Electro-Technologies for Food Processing)*. 2014.
17. Varghese, K.S., et al., *Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review*. J Food Sci Technol, 2014. **51**(10): p. 2304-17.

18. Samaranayake, C.P. and S.K. Sastry, *Electrode and pH effects on electrochemical reactions during ohmic heating*. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2005. **577**(1): p. 125-135.
19. Samaranayake, C.P., S.K. Sastry, and H. Zhang, *Pulsed ohmic heating - A novel technique for minimization of electrochemical reactions during processing*. J Food Sci, 2005. **70**(8): p. E460-E465.
20. Pataro, G., et al., *Quantification of metal release from stainless steel electrodes during conventional and pulsed ohmic heating*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014. **21**: p. 66-73.
21. Leizeron, S. and E. Shimoni, *Stability and sensory shelf life of orange juice pasteurized by continuous ohmic heating*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005. **53**(10): p. 4012-4018.
22. Baysal, A.H. and F. Icier, *Inactivation kinetics of Alicyclobacillus acidoterrestris spores in orange juice by ohmic heating: effects of voltage gradient and temperature on inactivation*. J Food Prot, 2010. **73**(2): p. 299-304.
23. Ayadi, M.A., et al., *Thermal performance of a flat ohmic cell under non-fouling and whey protein fouling conditions*. Lwt-Food Science and Technology, 2008. **41**(6): p. 1073-1081.
24. Jun, S. and S. Sastry, *Modeling and optimization of ohmic heating of foods inside a flexible package*. Journal of Food Process Engineering, 2005. **28**(4): p. 417-436.
25. Somavat, R., et al., *Ohmic sterilization inside a multi-layered laminate pouch for long-duration space missions*. Journal of Food Engineering, 2012. **112**(3): p. 134-143.
26. Ito, R., M. Fukuoka, and N. Hamada-Sato, *Innovative food processing technology using ohmic heating and aseptic packaging for meat*. Meat Science, 2014. **96**(2): p. 675-681.
27. SKLM, *Stellungnahme zur Hochspannungsimpulsbehandlung von Lebensmitteln*. 2007:
http://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/reden_stellungnahmen/2007/sklm_hochspannungsimpulsbehandlung.pdf.
28. Knorr, D., et al., *Statement on the treatment of food using a pulsed electric field. Opinion of the Senate Commission on Food Safety (SKLM) of the German Research Foundation (DFG)*. Mol Nutr Food Res, 2008. **52**(12): p. 1539-42.
29. Zimmermann, U. and G.A. Neil, *Electromanipulation of Cells*. 1996, Boca Raton, Florida: CRC Press.
30. Zimmermann, U., et al., *Effects of External Electrical Fields on Cell-Membranes*. Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1976. **3**(1): p. 58-83.
31. Dimitrov, D.S., *Electric Field-Induced Breakdown of Lipid Bilayers and Cell-Membranes - a Thin Viscoelastic Film Model*. Journal of Membrane Biology, 1984. **78**(1): p. 53-60.
32. Teissie, J., M. Golzio, and M.P. Rols, *Mechanisms of cell membrane electropermeabilization: A minireview of our present (lack of ?) knowledge*. Biochimica Et Biophysica Acta-General Subjects, 2005. **1724**(3): p. 270-280.
33. Kulshrestha, S. and S. Sastry, *Frequency and voltage effects on enhanced diffusion during moderate electric field (MEF) treatment*. Innov Food Sci Emerg Technol, 2003. **4**: p. 189- 194.
34. Kulshrestha, S.A. and S.K. Sastry, *Changes in permeability of moderate electric field (MEF) treated vegetable tissue over time*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010. **11**(1): p. 78-83.
35. Wang, W.C. and S.K. Sastry, *Effects of moderate electrothermal treatments on juice yield from cellular tissue*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2002. **3**(4): p. 371-377.

36. Wang, W.C. and S.K. Sastry, *Effects of thermal and electrothermal pretreatments on hot air drying rate of vegetable tissue*. Journal of Food Process Engineering, 2000. **23**(4): p. 299-319.
37. Sensoy, I. and S.K. Sastry, *Extraction using moderate electric fields*. Journal of Food Science, 2004. **69**(1): p. E7-E13.
38. Wegner, L.H., et al., *A patch clamp study on the electro-permeabilization of higher plant cells: Supra-physiological voltages induce a high-conductance, K⁺ selective state of the plasma membrane*. Biochim Biophys Acta, 2011. **1808**(6): p. 1728-36.
39. Angersbach, A., V. Heinz, and D. Knorr, *Effects of pulsed electric fields on cell membranes in real food systems*. Innovative Food Science and Emerging Technologies 2000. **1**: p. 135-149.
40. Lebovka, N.I., M.I. Bazhal, and E. Vorobiev, *Simulation and experimental investigation of food material breakage using pulsed electric field treatment*. Journal of Food Engineering, 2000. **44**(4): p. 213-223.
41. Gonzalez, M.E. and D.M. Barrett, *Thermal, High Pressure, and Electric Field Processing Effects on Plant Cell Membrane Integrity and Relevance to Fruit and Vegetable Quality*. Journal of Food Science, 2010. **75**(7): p. R121-R130.
42. Salengke, S. and S.K. Sastry, *Models for ohmic heating of solid-liquid mixtures under worst-case heating scenarios*. Journal of Food Engineering, 2007. **83**(3): p. 337-355.
43. FDA, *Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies - Ohmic and Inductive Heating*, D.o.H.a.h. Services, Editor. 2011.
44. Marra, F., et al., *Analysis of heat transfer during ohmic processing of a solid food*. Journal of Food Engineering, 2009. **91**(1): p. 56-63.
45. Shim, J., S.H. Lee, and S. Jun, *Modeling of ohmic heating patterns of multiphase food products using computational fluid dynamics codes*. Journal of Food Engineering, 2010. **99**(2): p. 136-141.
46. Mizrahi, S., *Leaching of soluble solids during blanching of vegetables by ohmic heating*. Journal of Food Engineering, 1996. **29**(2): p. 153-166.
47. Eliot, S.C., A. Goullieux, and J.P. Pain, *Combined effects of blanching pretreatments and ohmic heating on the texture of potato cubes*. Sciences Des Aliments, 1999. **19**(1): p. 111-117.
48. Eliot, S.C. and A. Goullieux, *Application of the firming effect of low-temperature long-time pre-cooking to ohmic heating of potatoes*. Sciences Des Aliments, 2000. **20**(2): p. 265-280.
49. Eliot, S.C., A. Goullieux, and J.P. Pain, *Processing of cauliflower by ohmic heating: influence of pre-cooking on firmness*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999. **79**(11): p. 1406-1412.
50. Zell, M., et al., *Ohmic cooking of whole beef muscle - Evaluation of the impact of a novel rapid ohmic cooking method on product quality*. Meat Sci, 2010. **86**(2): p. 258-263.
51. Zell, M., et al., *Ohmic cooking of whole turkey meat - Effect of rapid ohmic heating on selected product parameters*. Food Chemistry, 2010. **120**(3): p. 724-729.
52. Shirsat, N., et al., *Texture, colour and sensory evaluation of a conventionally and ohmically cooked meat emulsion batter*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2004. **84**(14): p. 1861-1870.
53. Yildiz, H., F. Icier, and T. Baysal, *Changes in beta-Carotene, Chlorophyll and Color of Spinach Puree during Ohmic Heating*. Journal of Food Process Engineering, 2010. **33**(4): p. 763-779.
54. Yildiz, H., H. Bozkurt, and F. Icier, *Ohmic and Conventional Heating of Pomegranate Juice: Effects on Rheology, Color, and Total Phenolics*. Food Science and Technology International, 2009. **15**(5): p. 503-512.

55. Herting, G., I.O. Wallinder, and C. Leygraf, *Corrosion-induced release of chromium and iron from ferritic stainless steel grade AISI 430 in simulated food contact*. Journal of Food Engineering, 2008. **87**(2): p. 291-300.
56. Zhao, Y.Y., E. Kolbe, and B. Flugstad, *A method to characterize electrode corrosion during ohmic heating*. Journal of Food Process Engineering, 1999. **22**(1): p. 81-89.
57. Wu, H., et al., *Electrical properties of fish mince during multi-frequency ohmic heating*. J Food Sci, 1998. **63**(6): p. 1028-1032.
58. Shirsat, N., et al., *Conductivities and ohmic heating of meat emulsion batters*. Journal of Muscle Foods, 2004. **15**(2): p. 121-137.
59. Wang, W.C. and S.K. Sastry, *Salt Diffusion into Vegetable Tissue as a Pretreatment for Ohmic Heating - Electrical-Conductivity Profiles and Vacuum Infusion Studies*. Journal of Food Engineering, 1993. **20**(4): p. 299-309.
60. Legrand, A., et al., *Physical, mechanical, thermal and electrical properties of cooked red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for continuous ohmic heating process*. Journal of Food Engineering, 2007. **81**(2): p. 447-458.
61. Icier, F. and C. Ilicali, *Electrical conductivity of apple and sourcherry juice concentrates during ohmic heating*. Journal of Food Process Engineering, 2004. **27**(3): p. 159-180.
62. Icier, F. and C. Ilicali, *The effects of concentration on electrical conductivity of orange juice concentrates during ohmic heating*. European Food Research and Technology, 2005. **220**(3-4): p. 406-414.
63. Darvishi, H., M.H. Khoshtaghaza, and G. Najafi, *Ohmic heating of pomegranate juice: Electrical conductivity and pH change*. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2013. **12**: p. 101-108.
64. Castro, I., et al., *The influence of field strength, sugar and solid content on electrical conductivity of strawberry products*. Journal of Food Process Engineering, 2003. **26**(1): p. 17-29.
65. Wang, W.C. and S.K. Sastry, *Changes in electrical conductivity of selected vegetables during multiple thermal treatments (vol 20, pg 499, 1997)*. Journal of Food Process Engineering, 1998. **21**(1): p. 89-89.
66. Wang, W.C. and S.K. Sastry, *Changes in electrical conductivity of selected vegetables during multiple thermal treatments*. Journal of Food Process Engineering, 1997. **20**(6): p. 499-516.
67. Wang, W.C. and S.K. Sastry, *Starch gelatinization in ohmic heating*. Journal of Food Engineering, 1997. **34**(3): p. 225-242.
68. Imai, T., et al., *Changes in heating rate of egg albumin solution during ohmic heating*. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology-Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 1996. **43**(12): p. 1249-1255.
69. Imai, T., K. Uemura, and A. Noguchi, *Heating rate of egg albumin solution and its change during ohmic heating*. Process-Induced Chemical Changes in Food, 1998. **434**: p. 101-108.
70. Pongviratchai, P. and J.W. Park, *Electrical conductivity and physical properties of surimi-potato starch under ohmic heating*. J Food Sci, 2007. **72**(9): p. E503-E507.
71. Yongsawatdigul, J., et al., *Ohmic Heating Maximizes Gel Functionality of Pacific Whiting Surimi*. J Food Sci, 1995. **60**(1): p. 10-14.
72. Park, J.W., J. Yongsawatdigul, and E. Kolbe, *Proteolysis and gelation of fish proteins under ohmic heating*. Process-Induced Chemical Changes in Food, 1998. **434**: p. 25-34.
73. Park, J.W. and J. Yongsawatdigul, *Gelation properties of fish proteins under ohmic heating*. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 1998. **215**: p. U19-U19.

74. Bozkurt, H. and F. Icier, *Electrical conductivity changes of minced beef-fat blends during ohmic cooking*. Journal of Food Engineering, 2010. **96**(1): p. 86-92.
75. Shirsat, N., et al., *Ohmic processing: Electrical conductivities of pork cuts*. Meat Sci, 2004. **67**(3): p. 507-514.
76. Imai, T., et al., *Ohmic heating of Japanese white radish *Rhaphanus sativus* L.* International Journal of Food Science and Technology, 1995. **30**(4): p. 461-472.
77. Shynkaryk, M.V., et al., *Ohmic Heating of Peaches in the Wide Range of Frequencies (50 Hz to 1 MHz)*. J Food Sci, 2010. **75**(7): p. E493-E500.
78. Lebovka, N.I., et al., *Does electroporation occur during the ohmic heating of food?* J Food Sci, 2005. **70**(5): p. E308-E311.
79. Sensoy, I. and S.K. Sastry, *Ohmic blanching of mushrooms*. Journal of Food Process Engineering, 2004. **27**(1): p. 1-15.
80. Bozkurt, H. and F. Icier, *Rheological Characteristics of Quince Nectar during Ohmic Heating*. International Journal of Food Properties, 2009. **12**(4): p. 844-859.
81. Praporscic, I., S. Ghnimi, and E. Vorobiev, *Enhancement of pressing of sugar beet cuts by combined ohmic heating and pulsed electric field treatment*. Journal of Food Processing and Preservation, 2005. **29**(5-6): p. 378-389.
82. Mercali, G.D., et al., *Degradation kinetics of anthocyanins in acerola pulp: Comparison between ohmic and conventional heat treatment*. Food Chemistry, 2013. **136**(2): p. 853-857.
83. Mercali, G.D., et al., *Study of vitamin C degradation in acerola pulp during ohmic and conventional heat treatment*. Lwt-Food Science and Technology, 2012. **47**(1): p. 91-95.
84. Sarkis, J.R., et al., *Effects of ohmic and conventional heating on anthocyanin degradation during the processing of blueberry pulp*. Lwt-Food Science and Technology, 2013. **51**(1): p. 79-85.
85. Courel, M., et al., *Comparison of continuous ohmic heating and steam injection for the sterilization of infant formula*, in *IDF World Dairs Summit*. 2011: Parma, Italy.
86. Icier, F., H. Yildiz, and T. Baysal, *Polyphenoloxidase deactivation kinetics during ohmic heating of grape juice*. Journal of Food Engineering, 2008. **85**(3): p. 410-417.
87. Demirdoven, A. and T. Baysal, *Optimization of ohmic heating applications for pectin methylesterase inactivation in orange juice*. J Food Sci Technol, 2014. **51**(9): p. 1817-26.
88. Icier, F., H. Yildiz, and T. Baysal, *Peroxidase inactivation and colour changes during ohmic blanching of pea puree*. Journal of Food Engineering, 2006. **74**(3): p. 424-429.
89. Lemmens, L., et al., *Thermal pretreatments of carrot pieces using different heating techniques: Effect on quality related aspects*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009. **10**(4): p. 522-529.
90. Prometheus, *Process contaminants: mitigation and elimination techniques for high-quality food and their evaluation using sensors and simulation, Projekt Completion Report, EU FP7 project, Grant agreement number 265558*. 2014: <http://processing-contaminants-prometheus.com>.
91. Eliot-Godereaux, S.C., F. Zuber, and A. Goullieux, *Processing and stabilisation of cauliflower by ohmic heating technology*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2001. **2**: p. 279-287.
92. Zhong, T. and M. Lima, *The effect of ohmic heating on vacuum drying rate of sweet potato tissue*. Bioresour Technol, 2003. **87**(3): p. 215-20.
93. Salengke, S. and S.K. Sastry, *Effects of ohmic pretreatment on oil uptake of potato slices during frying and subsequent cooling*. Journal of Food Process Engineering, 2007. **30**(1): p. 1-12.

94. Icier, F., *Ohmic Blanching Effects on Drying of Vegetable Byproduct*. Journal of Food Process Engineering, 2010. **33**(4): p. 661-683.
95. Farahnaky, A., R. Azizi, and M. Gavahian, *Accelerated texture softening of some root vegetables by Ohmic heating*. Journal of Food Engineering, 2012. **113**(2): p. 275-280.
96. Lima, M., et al., *Ascorbic acid degradation kinetics during conventional and ohmic heating*. Journal of Food Processing and Preservation, 1999. **23**(5): p. 421-434.
97. Lima, M. and S.K. Sastry, *The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield*. Journal of Food Engineering, 1999. **41**(2): p. 115-119.
98. Leizeron, S. and E. Shimoni, *Effect of ultrahigh-temperature continuous ohmic heating treatment on fresh orange juice*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005. **53**(9): p. 3519-3524.
99. Icier, F. and C. Ilicali, *Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating*. Food Research International, 2005. **38**(10): p. 1135-1142.
100. Pataro, G., G. Donsi, and G. Ferrari, *Aseptic processing of apricots in syrup by means of a continuous pilot scale ohmic unit*. Lwt-Food Science and Technology, 2011. **44**(6): p. 1546-1554.
101. Louarme, L. and C. Billaud, *Evaluation of ascorbic acid and sugar degradation products during fruit dessert processing under conventional or ohmic heating treatment*. Lwt-Food Science and Technology, 2012. **49**(2): p. 184-187.
102. Moreno, J., et al., *Influence of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of pears (cv. Packham's Triumph)*. Journal of Food Engineering, 2011. **104**(4): p. 621-627.
103. Moreno, J., et al., *Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmodehydration kinetics and microstructure of strawberries (cv. Camarosa)*. Lwt-Food Science and Technology, 2012. **45**(2): p. 148-154.
104. Moreno, J., et al., *Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the quality and microbial stability of osmotically dehydrated strawberries (cv. Camarosa)*. Journal of Food Engineering, 2012. **110**(2): p. 310-316.
105. Shirsat, N., et al., *Water holding capacity, dielectric properties and light microscopy of conventionally and ohmically cooked meat emulsion batter*. European Food Research and Technology, 2004. **219**(1): p. 1-5.
106. Ozkan, N., I. Ho, and M. Farid, *Combined ohmic and plate heating of hamburger patties: quality of cooked patties*. Journal of Food Engineering, 2004. **63**(2): p. 141-145.
107. Icier, F., et al., *Effects of ohmic thawing on histological and textural properties of beef cuts*. Journal of Food Engineering, 2010. **99**(3): p. 360-365.
108. Zell, M., et al., *Ohmic cooking of whole beef muscle - Optimisation of meat preparation*. Meat Sci, 2009. **81**(4): p. 693-8.
109. Bozkurt, H. and F. Icier, *Ohmic cooking of ground beef: Effects on quality*. Journal of Food Engineering, 2010. **96**(4): p. 481-490.
110. Yongsawatdigul, J., J.W. Park, and E. Kolbe, *Electrical-Conductivity of Pacific Whiting Surimi Paste during Ohmic Heating*. J Food Sci, 1995. **60**(5): p. 922-&.
111. Tadpitchayangkoon, P., J.W. Park, and J. Yongsawatdigul, *Gelation characteristics of tropical surimi under water bath and ohmic heating*. Lwt-Food Science and Technology, 2012. **46**(1): p. 97-103.
112. Li, F.D., et al., *Determination of starch gelatinization temperature by ohmic heating*. Journal of Food Engineering, 2004. **62**(2): p. 113-120.
113. Lakkakula, N.R., M. Lima, and T. Walker, *Rice bran stabilization and rice bran oil extraction using ohmic heating*. Bioresource Technology, 2004. **92**(2): p. 157-161.
114. Bansal, B. and X.D. Chen, *Effect of temperature and power frequency on milk fouling in an ohmic heater*. Food and Bioproducts Processing, 2006. **84**(C4): p. 286-291.

115. Stancl, J. and R. Zitny, *Milk fouling at direct ohmic heating*. Journal of Food Engineering, 2010. **99**(4): p. 437-444.
116. Icier, F., *Influence of ohmic heating on rheological and electrical properties of reconstituted whey solutions*. Food and Bioproducts Processing, 2009. **87**(C4): p. 308-316.
117. Roux, S., et al., *Comparison of continuous ohmic heating and steam injection for the sterilization of infant formula*. in: Conference on Novel Technologies for Sustainable Dairy Products. IDF World Dairy Summit, Parma Italy, 2011.
118. Bozkurt, H. and F. Icier, *The Change of Apparent Viscosity of Liquid Whole Egg during Ohmic and Conventional Heating*. Journal of Food Process Engineering, 2012. **35**(1): p. 120-133.
119. Gavahian, M., et al., *Comparison of ohmic-assisted hydrodistillation with traditional hydrodistillation for the extraction of essential oils from Thymus vulgaris L*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012. **14**: p. 85-91.
120. Jakob, A., et al., *Inactivation kinetics of food enzymes during ohmic heating*. Food Chemistry, 2010. **123**(2): p. 369-376.
121. Palaniappan, S., S.K. Sastry, and E.R. Richter, *Effects of electroconductive heat treatment and electrical pretreatment on thermal death kinetics of selected microorganisms*. Biotechnol Bioeng, 1992. **39**(2): p. 225-32.
122. Cho, H.Y., A.E. Yousef, and S.K. Sastry, *Kinetics of inactivation of Bacillus subtilis spores by continuous or intermittent ohmic and conventional heating*. Biotechnol Bioeng, 1999. **62**(3): p. 368-72.
123. Pereira, R., et al., *Death kinetics of Escherichia coli in goat milk and Bacillus licheniformis in cloudberry jam treated by ohmic heating*. Chemical Papers, 2007. **61**(2): p. 121-126.
124. Sagong, H.G., et al., *Inactivation of Escherichia coli O157:H7, Salmonella Typhimurium, and Listeria monocytogenes in orange and tomato juice using ohmic heating*. J Food Prot, 2011. **74**(6): p. 899-904.
125. Lee, S.Y., et al., *Effect of continuous ohmic heating to inactivate Escherichia coli O157:H7, Salmonella Typhimurium and Listeria monocytogenes in orange juice and tomato juice*. J Appl Microbiol, 2012. **112**(4): p. 723-31.
126. Lee, S.Y., S. Ryu, and D.H. Kang, *Effect of frequency and waveform on inactivation of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella enterica Serovar Typhimurium in salsa by ohmic heating*. Appl Environ Microbiol, 2013. **79**(1): p. 10-7.
127. Park, I.K. and D.H. Kang, *Effect of Electroporation by Ohmic heating for Inactivation of E. coli O157:H7, Salmonella enterica Serovar Typhimurium and Listeria monocytogenes in Buffered Peptone Water and Apple juice*. Appl Environ Microbiol, 2013.
128. Park, S.H., et al., *Pressure-ohmic-thermal sterilization: A feasible approach for the inactivation of Bacillus amyloliquefaciens and Geobacillus stearothermophilus spores*. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013. **19**: p. 115-123.
129. Somavat, R., et al., *Accelerated inactivation of Geobacillus stearothermophilus spores by ohmic heating*. Journal of Food Engineering, 2012. **108**(1): p. 69-76.
130. Somavat, R., H.M.H. Mohamed, and S.K. Sastry, *Inactivation kinetics of Bacillus coagulans spores under ohmic and conventional heating*. Lwt-Food Science and Technology, 2013. **54**(1): p. 194-198.
131. Yoon, S.W., et al., *Leakage of cellular materials from Saccharomyces cerevisiae by ohmic heating*. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2002. **12**(2): p. 183-188.
132. EAACI, *European Academy of Allergy and Clinical Immunology "Food Allergy and Anaphylaxis Guidelines"*. 2014, A. Muraro and G. Roberts: Zurich. p. 276 pp.

133. EFSA, *European Food Safety Authority*. " *University of Portsmouth; Literature searches and reviews related to the prevalence of food allergy in Europe*. EFSA supporting publication 2013. p. 343 pp.
134. Thomas, K., et al., *Evaluating the effect of food processing on the potential human allergenicity of novel proteins: international workshop report*. Food and Chemical Toxicology, 2007. **45**(7): p. 1116-1122.
135. Dearman, R.J. and I. Kimber, *Animal models of protein allergenicity: potential benefits, pitfalls and challenges*. Clin Exp Allergy, 2009. **39**(4): p. 458-68.
136. Vogel, L., T. Holzhauser, and S. Vieths, *Development of a biological assay to determine the allergenic potential of foods*. Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2006. **1**: p. 317-324.
137. Masthoff, L.J., et al., *A systematic review of the effect of thermal processing on the allergenicity of tree nuts*. Allergy, 2013. **68**(8): p. 983-93.
138. Malanin, K., M. Lundberg, and S.G. Johansson, *Anaphylactic reaction caused by neoallergens in heated pecan nut*. Allergy, 1995. **50**(12): p. 988-91.
139. Codina, R., A.G. Oehling, Jr., and R.F. Lockey, *Neoallergens in heated soybean hull*. Int Arch Allergy Immunol, 1998. **117**(2): p. 120-5.
140. Maleki, S.J., et al., *The effects of roasting on the allergenic properties of peanut proteins*. J Allergy Clin Immunol, 2000. **106**(4): p. 763-8.
141. Toda, M., et al., *The Maillard reaction and food allergies: is there a link?* Clin Chem Lab Med, 2014. **52**(1): p. 61-7.
142. Schluter, O., et al., *Opinion on the use of plasma processes for treatment of foods*. Mol Nutr Food Res, 2013. **57**(5): p. 920-7.
143. Zhu, S.M., et al., *Electrical conductivity of particle-fluid mixtures in ohmic heating: Measurement and simulation*. Food Research International, 2010. **43**(6): p. 1666-1672.
144. Tumpantuvatr, T. and W. Jittanit, *Mathematical models for electrical conductivities of fresh juices, concentrated juices and purees undergoing ohmic heating*. Thai Journal of Agricultural Science 2011. **44**(5): p. 312-318.
145. Kamonpatana, P., et al., *Mathematical modeling and microbiological verification of ohmic heating of a solid-liquid mixture in a continuous flow ohmic heater system with electric field perpendicular to flow*. Journal of Food Engineering, 2013. **118**(3): p. 312-325.
146. Kamonpatana, P., et al., *Mathematical Modeling and Microbiological Verification of Ohmic Heating of a Multicomponent Mixture of Particles in a Continuous Flow Ohmic Heater System with Electric Field Parallel to Flow*. Journal of Food Science, 2013. **78**(11): p. E1721-E1734.