

Lebensmittelhaltbarmachung durch neuere thermische und nichtthermische Verfahren

Gerald Muschiolik

Die Erzeugung hochwertiger hitzekonservierter Lebensmittel (hoher Erhaltungsgrad qualitätsbestimmender Inhaltsstoffe, ansprechende sensorische Qualität, mikrobiologisch sicher) erfordert die Einhaltung bestimmter Temperatur-Zeit-Regime. So sind aufgrund der unterschiedlichen Kinetik der Mikroorganismenabtötung (z.B. z-Wert ~ 6-10) und der Inhaltsstoffveränderungen (z.B. z-Wert ~ 20-30) bei niedrigviskosen Lebensmitteln die Qualitätsanforderungen durch Ultrahochtemperatur(UHT)-Erhitzung und nachfolgende aseptische Abfüllung gut erfüllbar.

Bei hochviskosen, pastösen und stückigen Lebensmitteln, die vor oder nach dem Abfüllen durch Erhitzen haltbar gemacht werden, erfordert deren unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit bei indirekter Erhitzung eine längere Haltezeit zur Erzielung geforderter Sterilisierwerte. Dies kann zu höherer thermischer Belastung und somit zu einem stärkeren Qualitätsverlust führen. Andererseits werden jedoch hierbei unerwünschte hitzestabile Enzyme ausreichend inaktiviert.

Mit der nachfolgenden Abbildung 1 wird verdeutlicht, dass die günstigsten Erhitzungsbedingungen zur Vermeidung einer Inhaltsstoffschädigung von über 10 % (z-Wert 27) bei einem Sterilisierwert (F_0 -Wert bei 121,1 °C) von 1 min bei > 140 °C (< 2 s) betragen würden. Da unerwünschte Enzyme einen hohen z-Wert (20-30) aufweisen können, sind bei der Optimierung der Sterilisationsprozesse neben der Kinetik der Mikroorganismenabtötung (Berechnung überwiegend mit $z = 10$, Inaktivierung > 5 log-Stufen) sowohl die Kinetik des Abbaus der gewünschten Inhaltsstoffe (< 10 %) als auch die Kinetik der Inaktivierung der unerwünschten Enzyme/Inhibitoren (> 99 %) zu beachten.

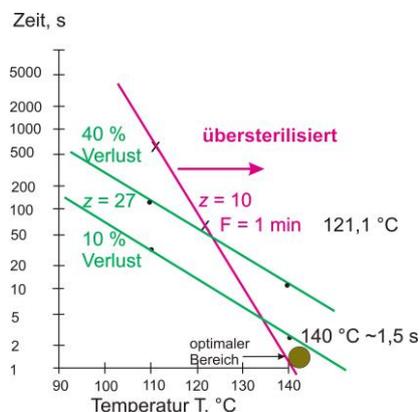


Abb. 1: Temperatur-Zeit-Diagramm mit einem Beispiel für den Inhaltsstoffabbau ($z = 27^*$) bei einem Sterilisierwert $F_0 = 1$ ($z = 10^*$)

*Temperaturbereich (°C), in dem sich der Keimgehalt oder die Stoffkonzentration (oder Qualität) dekadisch ändert (z.B. von 100 auf 10 % oder von 10 auf 1 %)

Aus einer kürzlich publizierten 10-Jahres-Studie (André et al., 2013) geht hervor, dass in gering säurehaltigen Konserven (Gemüse- und Fleischkonserven, Fertiggerichte) bei einem hohen Sterilisierwert ($F_0 > 20$ min) thermophile Sporenbildner (insbesondere *Moorella* und *Geobacillus*) auftreten können (7 Tage bebrütet bei 54 °C). Wird von einem nicht zu hohen Anfangskeimgehalt vor der Hitzeesterilisation ausgegangen, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass entweder die Temperaturkontrolle nicht den kritischen Punkt erfasst hat oder die Hitzebehandlung nicht ausreichend war. Letzteres würde zu einer erhöhten Hitzebehandlung führen und somit zu stärkeren chemischen Veränderungen in der Konserve.

Dieses Ergebnis ist ein Beleg für die Notwendigkeit, geeignete thermische und physikalische Behandlungsmethoden zur Mikroorganismeninaktivierung für die Lebensmittelkonserven auszuwählen, bei denen die Wärmeleitfähigkeit des Produktes die Erreichung des geforderten F-Wertes in kürzerer Behandlungszeit erschwert und die längere thermische Behandlung zu negativen Auswirkungen auf sonstige Produkteigenschaften führt.

Zur Absicherung einer hohen Produktqualität und mikrobiologischen Sicherheit von Lebensmittelkonserven stehen direkte Erhitzungsverfahren zur Verfügung, von denen die nachfolgend aufgeführten erläutert werden:

- verbesserte Dampfinjektion (für Flüssigkeiten, Innovative Steam Injection, **ISI**),
- Ohmsche Erhitzung für höherviskose und stückige Produkte, Ohmic Heating, **OH**),
allein oder kombiniert mit Radiofrequenz-Erhitzung (Radio Frequency, **RF**) oder Mikrowellen-Erhitzung (Microwave Heating, **MH**)
- Mikrowellen-Sterilisation im Autoklaven (Microwave Assisted Thermal Sterilisation, **MATS**)

Weiterhin sei auf physikalische Haltbarmachungsverfahren hingewiesen, die mit einer zusätzlichen geringen Hitze einwirkung zur Sicherung der Enzyminaktivierung (Elektroimpuls-Verfahren, Pulsed Electric Field, **PEF**) oder zur Beschleunigung der Mikroorganismenabtötung (Ultra-Hochdruckbehandlung, High Pressure Processing, **HHP**) kombiniert werden. Hierzu gehört auch die Möglichkeit der Kombination von **HHP** mit **OH** (Pressure-Ohmic-Thermal Sterilization, **POTS**).

1 Verbesserte Dampfinjektion (Innovative Steam Injection, **ISI**)

Während bei flüssigen Lebensmitteln (Milch, Obstsaft) eine begrenzte Haltbarkeit durch indirekte Erhitzung (z.B. Pasteurisation mittels Plattenerhitzer) erzielt werden kann, erfordert eine längere Haltbarkeit bei neutralem pH-Wert (Milch, Gemüsesäfte) eine intensivere Hitzebehandlung. Hierfür wurde die direkte Erhitzung (Dampfinjektion) in der Weise verbessert, dass innerhalb von 0,2 s eine Temperatur von 152,9 °C erreicht werden kann (van Asselt et al., 2008). Diese „Innovative Steam Injection“ (ISI, siehe Abb. 2) erfordert z.B. für die Hitzebehandlung von Milch einen Verfahrensweg, der zur Inaktivierung (> 99 %) des proteolytischen Enzyms Plasmin führt (bildet Bitterpeptide während der Lagerung). Dies wird durch eine Vor- oder Nacherhitzung der Milch bei 80 °C (5 min) erreicht.

Ein Vergleich mit pasteurisierter und ultrahochoerhitzter Milch (Handelsprodukte) ergab, dass mit dem ISI-Verfahren hergestellte Milch im Frische-Geruch die beste Note erhielt und im Frische-Geschmack die pasteurisierte Milch fast erreichte.

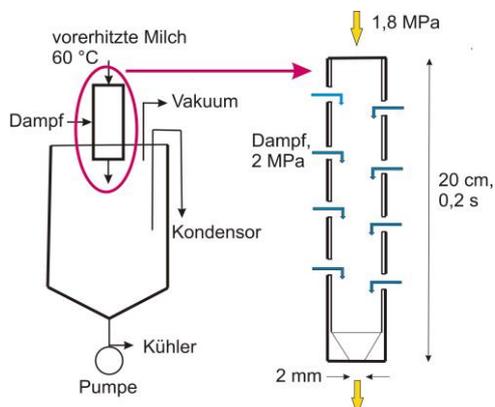


Abb. 2: Prinzip der „Innovative Steam Injection“, Druckverhältnisse und die Düsengeometrie bestimmen die Haltedauer bei 152,9 °C (0,2 s), van Asselt et al., 2008

2 Ohm'sche Erhitzung (Ohmic heating, OH)

Bei der Ohm'schen Erhitzung fließt durch das Lebensmittel ein pulsierender elektrischer Strom (z.B. 60 A, 500 V, Frequenz 200 kHz, Shynkaryk and Sastry, 2012). Die Elektroden haben einen direkten Kontakt mit dem Lebensmittel, das eine bestimmte elektrische Leitfähigkeit aufweist und durch den eigenen elektrischen Widerstand bei hoher Spannung und Stromstärke aufgeheizt wird. Industrieanlagen weisen Leistungen zwischen 10 bis 300 kW Leistung auf (Lyng u. McKenna, 2006).

Während bei der kontinuierlichen Erhitzung die Elektroden in ein innen elektrisch isoliertes Rohrsystem (z.B. Keramikrohre) integriert sind, können sich die Elektroden bei der chargenweisen Erhitzung in teflonbeschichteten Metallbehältern (Kastenformen, Röhrenbehälter) z.B. für die Garung von Fleischbrät (Lyng u. McKenna, 2006) oder auch in PP-Folienbeutel für Fertiggerichte befinden (Abb. 3a-d). Die PP-Beutel mit den integrierten Elektroden (Abb. 3d) ermöglichen neben der Hitzekonservierung (in etwa 5 min werden 227 g Tomatensuppe unter Gegendruck auf 130 °C aufgeheizt) auch das Erwärmen auf Verzehrstemperatur (Raumfahrtverpflegung, Somavat et al., 2012).

OH zur Garung und Pasteurisation

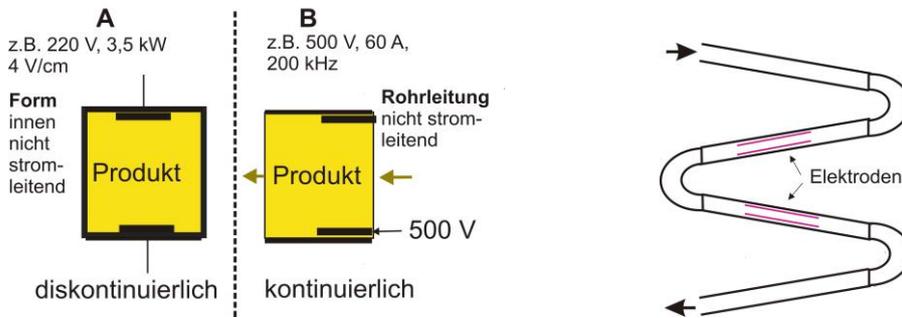


Abb. 3a: Varianten der Ohm'schen Erhitzung (OH) **Abb. 3b:** Erhitzung im isolierten Röhrensystem mit Temperaturzonen (Vorwärm- und Haltezone)

OH-Sterilisation und Erwärmung Fertiggericht

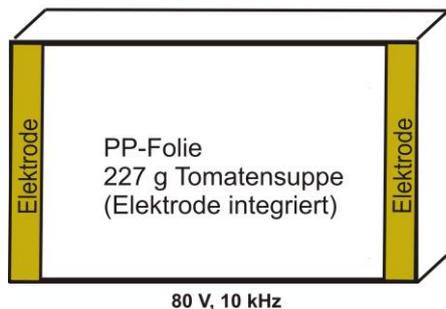


Abb. 3c: Ohm'sche Erhitzung in PP-Beutel mit integrierten Elektroden (Somavat et al., 2012)

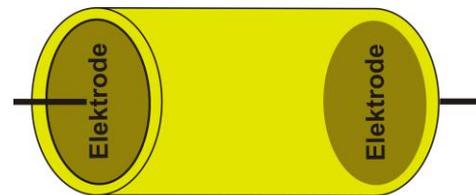


Abb. 3d: Ohm'sche Erhitzung in isolierter Metallröhre mit Elektroden an Enden der Röhre (z.B. Brätgarung (Lyng u. McKenna, 2006)

Die Leitfähigkeit von Lebensmitteln, beträgt etwa 0,2 bis 1,3 S/m (z.B. grüne Erbsen ~ 0,25 S/m bei pH 6,1, Tomatensaft ~ 1,25 S/m bei pH 4,1, Park et al., 2013). Mit höherem Salzgehalt führt die erhöhte Leitfähigkeit zum schnelleren Temperaturanstieg (Tab. 1). Der Temperaturanstieg beeinflusst die Leitfähigkeit ebenfalls positiv.

Tab. 1: Einfluss des Salzgehaltes in Modellbrät¹⁾ auf die Leitfähigkeit, Aufheizrate und Aufheizdauer von 15 auf 80 °C, Ohm'sche Erhitzung mit 4 V/cm (50 Hz), Shirsat et al., 2004a

NaCl %	Leitfähigkeit S/m	Aufheizrate °C/min	Aufheizdauer min
0,00	0,37	0,38	160
1,96	1,27	2,77	24
2,60	1,80	4,07	16
3,85	1,88	4,39	15

¹⁾ Modellbrät: 50 % mageres Schweinefleisch, 25 % Schweinefett, 25 % Wasser
Leitfähigkeit mageres Schweinefleisch 0,76-0,64 S/m (Shirsat et al., 2004b)

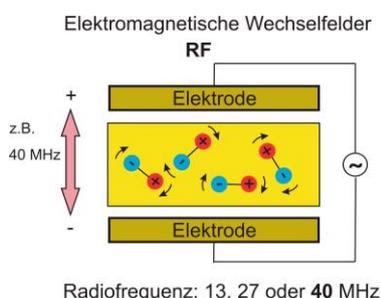
OH eignet sich insbesondere zum schnellen Garen von Fleischbrät (bis zu 50 °C/min, Lyng u. McKenna, 2006) sowie zum kontinuierlichen Hitzekonservieren von Fruchtzubereitungen und Soßen. Vorteile bieten sich auch zum schonenden Blanchieren von Gemüse (bessere Qualitätserhaltung). So können Peroxidase und Phenoloxidase in Artischocken mittels OH (24 V/cm) im Vergleich zum herkömmlichen Blanchieren in kürzerer Zeit (360 s bei 80 °C) inaktiviert werden (Guida et al., 2013).

Der Nachteil von OH besteht darin, dass Fleischpartikel mit größeren Fettinseln oder auch unterschiedlich gewürfelte Gemüse oder Obststücke nicht gleichmäßig aufgeheizt werden. Dieser Nachteil kann durch Kombination der Ohm'schen Erhitzung mit der Erhitzung durch elektromagnetische Wechselfelder ausgeglichen werden (siehe Kap. 3.3).

3 Elektromagnetische Wechselfelder

Bei der Einwirkung elektromagnetischer Felder erfolgt die Erwärmung des Produktes durch Dipol-Reibungswärme der Wassermoleküle (Rotation, erzeugt durch elektromagnetisches Wechselfeld bei hoher Frequenz, Abb. 4) und durch Oszillation geladener Partikel und Kollision freier Ionen (www.foodtech-portal.eu).

Der Wasseranteil im Lebensmittel und die Eindringtiefe der Strahlung, abhängig von der Wellenlänge sowie vom Salzgehalt des Lebensmittels, bestimmen den Temperaturanstieg. Die Radiofrequenz (Radio Frequency, RF) weist gegenüber der Mikrowelle (Microwave Heating, MW) eine größere Wellenlänge (RF: 10-30 m, MW: 10-30 cm) und somit eine höhere Eindringtiefe auf (Eindringtiefe RF: 20-50 cm, MW: 1-4 cm, www.foodtech-portal.eu). Die Radiofrequenz wird daher zum Aufheizen von Produkten mit höherer Schichtdicke bevorzugt. Zur Vermeidung einer Überhitzung erfolgt die Herstellung von Sterilkonserven (in Folienverpackungen, Assietten) in unterschiedlich temperierten Wasserbädern unter Gegendruck.

**Abb. 4:** Elektromagnetische Wechselfelder und Dipoleffekte der Wassermoleküle (Reibungswärme durch Rotation), www.radiofrequency.com

Tab. 2: Kalkulierte Eindringtiefe (mm) für RF- und MW-Erhitzung bei der Erreichung von 100 °C und 121,1 °C in Fleischklops¹⁾ in Abhängigkeit von der Frequenz (Wang et al., 2012)

Produkt-Innentemperatur	RF ²⁾ 27 MHz	RF ²⁾ 40 MHz	MW 915 MHz	MW 1800 MHz
100 °C	32,7	27	7,1	5,6
121,1 °C	32,1	26,5	6,7	5,3

¹⁾ 12 % Fett, 18 % Protein, ²⁾ 6 kW

3.1 Radiofrequenz (Radio Frequency, RF)

Gemäß Tabelle 2 wird mit RF bei 27 MHz die höchste Eindringtiefe bei der Aufheizung von Fleischklops erreicht.

Zur Erzielung einer gleichmäßigen Erhitzung von Fertiggerichten in Weichverpackungen erfolgt die RF-Behandlung im Autoklaven unter Gegendruck, die umgebende Wassertemperatur wird z.B. auf 125 °C eingestellt. Das vorgewärmte Produkt (z.B. auf 80 °C) wird unter Einsatz der RF auf 121 °C aufgeheizt und bei dieser Temperatur zur Erreichung des geforderten F_0 -Wertes gehalten, danach erfolgt die Abkühlung auf 80 °C mit Kühlwasser (Luechpattanaporn et al., 2005). Unter diesen Bedingungen wird z.B. Rührei in 2,6-kg-Verpackungen (kaschierte Al-Folie, 245 x 235 x 45 mm) innerhalb von 20 min auf 121 °C aufgeheizt. Erfolgt das Aufheizen im Autoklaven ohne zusätzliche RF-Erhitzung, beträgt die Aufheizdauer von 80 °C auf 121 °C mindestens 80 min.

RF-Erhitzung wird zur Haltbarmachung viskoser, breiförmiger und stückiger Produkte (in Aufguss) und zur Insektenabtötung in Trockenprodukten (Nährmittel, Nüsse, Gewürze) eingesetzt. Aufgrund höherer Schichtdicken von größeren Abpackungen (z.B. 4,5 cm bei Weichverpackungen mit 2,6 kg Inhalt) bietet sich die RF-Erhitzung zur Sterilisation von Fertiggerichten an (kombiniert mit Vorerhitzung und Abkühlung unter Überdruck, Abb. 5).

Mit der elektrischen Leitfähigkeit der umgebenden Wasserphase im Autoklaven und mit Anstieg des Kochsalzgehaltes im Lebensmittel nimmt die Geschwindigkeit des Temperaturanstieges ab. So werden 2,6 kg Kartoffelbrei (in Assietten) mit 0,8 % NaCl in 100 s um 15 °C und mit 1,3 % NaCl nur um 9 °C aufgeheizt (Leitfähigkeit des umgebenden Wassers 20 μ S/cm). Mit dem Anstieg der Leitfähigkeit des Wassers im Wasserbad verlangsamt sich die Aufheizgeschwindigkeit erheblich (Wang et al., 2008).

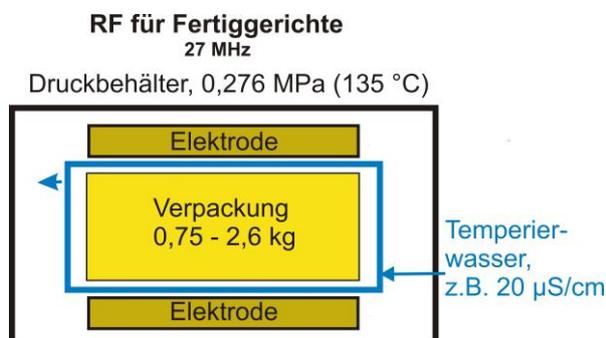


Abb. 5: RF-Sterilisation im Druckbehälter, ausgelegt z.B. für Temperaturen bis 135 °C, Vermeidung der Überhitzung in Randzonen durch eine umgebende wässrige Phase mit bestimmter elektrischer Leitfähigkeit

3.2 Mikrowellenerhitzung

Industriell werden zur Erzielung einer höheren Eindringtiefe überwiegend Anlagen mit einer Frequenz von 915 MHz (Leistung bis zu 300 kW/h) eingesetzt, je nach Anwendungszweck sind auch Anlagen mit einer Frequenz von 2.450 MHz üblich (z.B. GIGATHERM AG, CH).

Ebenso wie bei der RF-Erhitzung bietet sich die Kombination mit einem temperierten Wasserbad zum Vorheizen der konfektionierten Produkte (Packstoffe: Folienbeutel, Assietten), während der Haltezeit bei 121°C und zur Abkühlung unter Gegendruck an (Microwave Assisted Thermal Sterilisation, MATS, Abb. 6).

Als Beispiel für MATS wird nachfolgend die Sterilisation von Roastbeef-Scheiben (12 mm dick, vorgegart in Soße) in 200-g-Assietten beschrieben (Tang et al., 2008). Die Assietten werden im Wasserbad in 5 min auf 60 °C vorgewärmt und danach im Wasserbad bei 280 kPa (122 °C) kombiniert mit 2,7 kW Mikrowellenenergie innerhalb 7 min auf 121 °C Kerntemperatur aufgeheizt. Danach wird je nach Vorgabe des F_0 -Wertes z.B. weitere 3 oder 6 min gehalten und unter Gegendruck innerhalb 5 min mit Leitungswasser auf 75 °C abgekühlt. Beimpfte Proben mit $1,3 \times 10^6$ *Cl. sporogenes* PA 3679 waren bei $F_0 = 6$ steril (3 Monate bei 32 °C bebrütet).

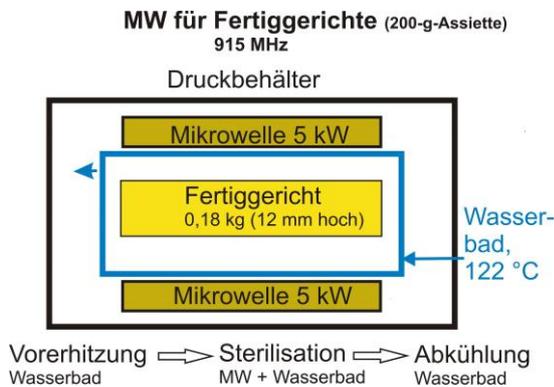


Abb. 6: Mikrowellensterilisation (MATS) von Fertiggerichten (in Assietten), Tang et al., 2008

3.3 Kombination elektromagnetische Wechselfelder mit Ohm'scher Erhitzung (OH)

RF kombiniert mit OH

Fruchtzubereitungen, stückige Marmeladen, Schokoladensauce, Fertiggerichte mit Gemüse und Fleisch (hochviskose oder stückige bzw. pumpfähige Produkte) können mittels OH in Rohrleitungen durch Kombination mit RF innerhalb von 90 s auf 140 °C aufgeheizt werden (INDAG High Power Heating System, IPS, www.wild-indag.de). Ein derartiges System bietet sich zur kontinuierlichen Pasteurisation oder Sterilisation mit nachfolgender aseptischer Abfüllung an (z.B. in Großverpackungen).

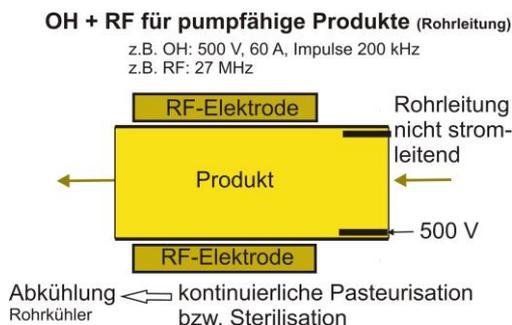


Abb. 7: Mögliche Kombination von OH mit RF für die kontinuierliche Erhitzung

MW kombiniert mit OH

Zur gleichmäßigeren Temperaturverteilung beim kontinuierlichen OH-Blanchieren (70-80 °C) pumpfähiger stückiger Produkte mit kleinerer Partikelgröße (z.B. Möhrenwürfel, 6,4 mm Kantenlänge) trägt auch die Kombination mit der MW-Erhitzung bei (OH: 226-310 V, 1-2,5 A bei 20 kHz; MW: 2.450 MHz, 1.500-1.960 W, Nguyen et al., 2013). Während mittels OH-Pasteurisation (70-80 °C) die wässrige Phase eine 6,5-8 °C höhere Temperatur aufwies, war bei der MW-Erhitzung gegenüber der wässrigen Phase die Temperatur der Möhren 4-8,1 °C höher (wässrige Phase: 0,2 oder 0,5 % NaCl, 1,5 % Na-CMC als Dickungsmittel). Durch die kombinierte OH-MW-Erhitzung konnte der Temperaturunterschied auf 0,5-0,6 °C ausgeglichen werden.

4 Pulsierende elektrische Felder (Pulsed Electric Field, PEF)

Das Wirkprinzip von PEF beruht auf Membranschädigung der Mikroorganismen infolge eines pulsierenden elektrischen Feldes (Energieeintrag z.B. 10-45 kV/cm, Puls 1-15 µs, Behandlungsdauer 12-360 µs, Abb. 8). Das Verfahren kann zur kontinuierlichen Haltbarmachung von Fruchtsäften (Sampedro et al., 2013, Bi et al., 2013) und zur Haltbarkeitsverlängerung von Milch (Pasteurisation bei 72 °C, 15 s, 78 Tage haltbar bei 4 °C, Sepulveda et al., 2005) eingesetzt werden. Ein zusätzliches Erhitzen der Säfte (z.B. 65 °C) erhöht die Enzyminaktivierung während der Pasteurisation.

PEF: Inaktivierung Mikroorganismen und Enzyme

z.B. 10 - 45 kV/cm,
Puls 1 - 15 µs, Dauer 12 - 360 µs
< 65 °C



Abb. 8: Prinzip der kontinuierlichen Keimreduktion mittels pulsierender elektrischer Felder

Es gibt PEF-Anlagen mit einer Kapazität bis 10 000 l/h und Leistung bis zu 240 kW (www.foodtech-portal.eu).

Tab. 3 zeigt den Einfluss der elektrischen Feldstärke und der Impulsdauer bei 30 kV/cm auf die Inaktivierung von *E. coli* in Milch. Hiernach kann durch eine PEF-Behandlung von Milch (30 kV/cm, Impuls 2 µs, Behandlungsdauer 200 µs) eine Keiminaktivierung von 5 log-Stufen erreicht werden (Zhao et al., 2013 b).

Tab. 3: Einfluss pulsierender elektrischer Felder auf die Inaktivierung von *Escherichia coli* in Milch¹⁾ (Zhao et al., 2013b)

Mikroorganismeninaktivierung (log)			
Dauer 200 µs mit 2 µs Puls		30 kV/cm	
Feldstärke		Dauer	
15 kV/cm	0.5	200 µs	1.0
30 kV/cm	3.0	600 µs	5.0

Leitfähigkeit Milch: 4,8 mS/cm; Temperatur < 35 °C

Es ist jedoch zu beachten, dass Mikroorganismen bei der PEF-Behandlung unterschiedliche Abtötungsraten aufweisen, z.B. zwischen *Staphylococcus aureus* und *Listeria monocytogenes* (grampositiv) und *E. coli* (gramnegativ). *L. monocytogenes* sind bei PEF gegenüber *E. coli* stabiler (Zhao et al., 2013b).

Die PEF-Behandlung führt sowohl bei pflanzlichem als auch tierischem Gewebe zur Gewebeporation, dadurch ist ein höherer Stoffverlust in die umgebende wässrige Phase möglich. Somit ist PEF eher zur Pasteurisation von flüssigen Lebensmitteln geeignet. Dieser Effekt wird andererseits zur Beschleunigung der Trocknung von biologischem Gewebe (Lebovka et al., 2007) und zur Extraktion bioaktiver Stoffe aus pflanzlichem Gewebe (Luengo et al., 2013, Puertolas et al., 2013) genutzt.

5 Ultra-Hochdruckbehandlung (High Pressure Processing, HHP)

5.1 HHP

HHP führt bei einem Druck über 300 MPa zur Volumenverringering der wässrigen Phase, hierdurch wird die Enzymaktivität der Mikroorganismen behindert und mit weiterer Druckerhöhung sogar gestoppt. Weiterhin führt HHP zur Makromolekülveränderung (z.B. Proteindenaturierung), die sich bei ≥ 550 MPa und ≥ 60 °C in der Schädigung der Membran bei Sporenbildnern äußert (Reineke et al., 2013).

Praktisch erfolgt die Behandlung vakuumverpackter oder in Folienbehältern abgefüllter Lebensmittel diskontinuierlich in speziellen Behältern (bis zu 420 l Füllvolumen verfügbar, www.foodtech-portal.eu) mit umgebender Wasserphase bei etwa 300 bis 600 MPa (Abb. 9). Die Druckbehandlung ermöglicht eine Keimreduktion, zusätzlich unterstützt durch Temperaturerhöhung (z.B. 30-50 °C). Nachstehend erfolgt hierzu eine kleine Auswahl aktueller Publikationen.

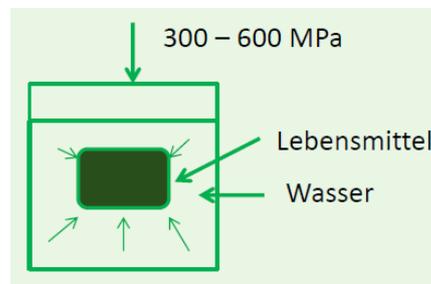


Abb. 9: Grundprinzip der Ultra-Hochdruckbehandlung, das abgepackte Lebensmittel ist zur Druckübertragung mit einer Wasserphase umgeben

Da bestimmte Biopolymere (z.B. Milchproteine, Eiweiß, Stärke) gegenüber HHP sensibel reagieren (Strukturänderung) und Lebensmittel nach HHP keine negativen Texturveränderungen aufweisen sollten, konzentriert sich der Einsatz bisher insbesondere auf die Keimreduktion bzw. Pasteurisation von Fleischerzeugnissen ohne zusätzliche Wärmebehandlung (z.B. Schinkenscheiben, Beletti et al., 2013; fermentierte Dauerwurst Fuet, Rubio et al., 2013) und mit integrierter Wärmebehandlung (z.B. Fleischpastete bei 308 MPa, 43 °C, 5 min, Gogus et al., 2012; Geflügelbrust, 300 MPa, 35 °C, 1 min, Tananuwong et al., 2012).

Eine weitere Anwendung ist die Verlängerung der Haltbarkeit von Frischfisch (vakuumverpacktes Fischfilet, Matejkova et al., 2013) und die Haltbarkeitsverlängerung von Gurkensaft (Zhao et al., 2013a), Sauerkraut (Penas et al., 2013) und Erdbeermark (Bodelon et al., 2013, Huang et al., 2013).

5.2 HHP kombiniert mit OH (Pressure-Ohmic-Thermal Sterilization, POTS)

Während eine geringe Temperaturerhöhung bei HHP die Keimreduktion beschleunigt, kann durch eine Kombination von HHP (600 MPa) mit Ohm'scher Erhitzung (50 V/cm, 60 Hz) bei 105 °C (30 min) eine Keimreduktion um 4.6 bis 5.6 log-Stufen in Gemüsepüree (Erbsen, Möhren) und Tomatensaft erzielt werden. Der Test erfolgte mit den Sporenbildnern *B. amyloliquefaciens* und *B. stearothermophilus* (Park et al., 2013). Die Kombination von HHP mit gleichzeitiger thermischer Behandlung bei 105 °C (bisher Laborversuche) eröffnet weitere Möglichkeiten zur Inaktivierung thermophiler Sporenbildner in neutralen und säurehaltigen Lebensmitteln bei reduzierter Hitzebelastung.

6 Einflussgrößen der Haltbarmachungsverfahren

In der nachstehenden Tabelle 4 werden von den hier vorgestellten Verfahren zur Keimreduktion die wichtigsten äußeren Parameter und in Tabelle 5 die wichtigsten inneren Parameter gegenübergestellt. Hieraus geht hervor, dass gegenüber der herkömmlichen indirekten Erhitzung zusätzliche Parameter zur Erzielung der angestrebten Keiminaktivierung von Bedeutung sind. Neben einer guten Kenntnis verschiedener Produktparameter (z.B. elektrische Leitfähigkeit, Partikelgröße und Partikelanteil, pH-Wert, Wasseranteil, Schichtdicke) sind weitere äußere Parameter zu beachten, die den Produkten anzupassen und gesondert zu ermitteln sind (z.B. Spannungsgradient, Frequenz, Energieeintrag, Pulsdauer und Ultra-Hochdruck-Temperatur-Bedingungen).

Es ist zu wünschen, dass zur Findung optimaler Prozessbedingungen für diese Verfahren (Herstellung mikrobiologisch sicherer und zugleich qualitativ hochwertiger Lebensmittel), repräsentative kinetische Modelle entwickelt werden (Valdramidis et al., 2012), die in bereits hierfür vorliegende Softwareprogramme (Halder et al., 2011) integriert werden können.

Hierzu gehört auch, dass die Auswahl geeigneter Verpackungsmaterialien zur Vermeidung negativen Wechselwirkungen mit dem Füllgut sowie Möglichkeiten zur Energieeinsparung Berücksichtigung finden.

Tab. 4: Bedeutsame äußere Parameter bei der Durchführung verschiedener Verfahren zur Lebensmittel-Haltbarmachung (nach Valdramidis et al., 2012, ergänzt), Angabe ausgewählter Prozessbedingungen (fett)

ISI	OH	RF/MW	PEF	HHP
Temp., °C	Temp., °C	Temp., °C	Temp., °C	Temp., °C
Druck, MPa	Druck, MPa	Druck, MPa		Druck, MPa
Zeit, s	Zeit, min	Zeit, min	Pulsform, Pulsdauer, µs Behandlungsdauer, µs	Halte-, Kompressions-, u. Dekompressions- Dauer, min
	Spannungs- gradient, V/cm	Frequenz, MHz	Elektrische Feldstärke, W/cm	
	Partikelgröße	Schichtdicke, cm		
153 °C, 0,2 s	4 V/cm (60 A, 500 V, 200 kHz)	27 MHz/915 MHz, 0,28 MPa	30 kV/cm, 2 µs, 600 µs	300-600 MPa, 10-45 °C, 5-15 min

Tab. 5: Ausgewählte innere Parameter, die den Effekt verschiedener Haltbarmachungsverfahren beeinflussen (nach Valdramidis et al., 2012, ergänzt)

ISI	OH	RF/MW	PEF	HHP
Viskosität			Viskosität	
pH	pH		pH	pH
Wassergehalt		Wassergehalt	a_w -Wert	a_w -Wert
	Fettgehalt	Fettgehalt	Fettgehalt	
	Partikelanteil	Dichte	Dichte	
	Salzgehalt		Salzgehalt	Zusammensetzung
	elektr. Leitfähigkeit	Ionendichte		Art der Biopolymere

7 Zusammenfassung

- Es gibt erhebliche technische Fortschritte bei der thermischen Haltbarmachung von Lebensmitteln unter reduzierter Hitzebelastung mittels direktem Aufheizen, geeignet für dünnflüssige, viskose und stückige bzw. kompakte Lebensmittel. Dies wird durch verschiedene Verfahren möglich, zu denen die innovative Dampfinkjektion, Ohm'sche Erhitzung, die Anwendung elektromagnetischer Felder (Radiofrequenz, Mikrowellen), pulsierender elektrische Felder und die Ultra-Hochdruckbehandlung gehören, letztere durchführbar ohne und mit zusätzlicher Wärmezufuhr.
- Gegenüber den herkömmlichen indirekten Erhitzungsverfahren, deren Effektivität insbesondere von der Wärmeleitfähigkeit des Gutes und der Konvektion abhängig ist (hier wichtig für das Vorwärmen und Abkühlen der Produkte), hängt die Effektivität der vorgestellten Verfahren von weiteren Stoffparametern ab, zu denen bei der Anwendung elektromagnetischer Wellen, Spannungsimpulsen oder von elektrischem Strom die elektrische Leitfähigkeit und die Produktzusammensetzung von Bedeutung sind.
- Die Kombination der vorgestellten Verfahren (z.B. OH mit RF/MW) ermöglicht eine weitere Erhöhung der Effektivität der Verfahren hinsichtlich Verkürzung der thermischen Behandlung, Erzielung eines gleichmäßigen Aufheizprofils unterschiedlich stückiger Produkte und somit Erweiterung der Anwendungsbreite.
- Die vorgestellten direkten Erhitzungsverfahren bzw. die nicht-thermische LM-Behandlungen in Kombination mit geringer Hitzebelastung erleichtern die Herstellung hochwertiger und mikrobiologisch sicherer Lebensmittel.

Literatur

- André S., Zuber F., Remize F., Thermophilic spore-forming bacteria isolated from spoiled canned food and their heat resistance. Results of a French ten-year survey, *International Journal of Food Microbiology*, doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2013.04.019.
- Bi X., Liu F., Rao L., Li J., Liu B., Liao X., Wu J., Effects of Electric Field Strength and Pulse Rise Time on Physicochemical and Sensory Properties of Apple Juice by Pulsed Electric Field, *Innov. Food Sci. and Emerging Technol.* 17 (2013) 85-92.
- Bodelón O.G., Avizcuri J.-M., Fernández-Zurbano P., Dizy M., Préstamo G., Pressurization and cold storage of strawberry purée: Colour, anthocyanins, ascorbic acid and pectin methylesterase, *LWT - Food Science and Technology* 52 (2013) 123-130.
- Gogus U., Effects of Pressurization on Some Contamination Flora in Beef Pate, *J. of Food Sci.* 77 (2012) M550-M559.
- Guida V., Ferrari G., Pataro G., Chambery A., Di Maro A., Parente A., The effects of ohmic and conventional blanching on the nutritional, bioactive compounds and quality parameters of artichoke heads, *LWT - Food Science and Technology* 53 (2013) 569-579.

- Halder A., Dhall A, Datta A. K., Black D.G., Davidson P.M., Li J., Zivanovic S., A user-friendly general-purpose predictive software package for food safety, *J. of Food Engineering* 104 (2011) 173–185.
- Huang Y., Ye M., Chen H., Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in strawberry puree by high hydrostatic pressure with/without subsequent frozen storage, *Int. J. of Food Microbiology* 160 (2013) 337-343.
- Lebovka N.I., Shynkaryk N.V., Vorobiev E., Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue, *J. of Food Engin.* 78 (2007) 606-613.
- Luengo E., Álvarez I., Raso J., Improving the pressing extraction of polyphenols of orange peel by pulsed electric fields, *Innov. Food Sci. and Emerging Technol.* 17 (2013) 79-84.
- Lyng J., McKenna B., Ohmic heating of liquid foods, Vortrag ANUGA FoodTec Köln, 2006.
- Matějková K., Křížek M., František F., Dadáková E., Effect of high-pressure treatment on biogenic amines formation in vacuum-packed trout flesh (*Oncorhynchus mykiss*), *Food Chemistry* 137 (2013) 31-36.
- Nguyen L.T., Choi W., Lee S. H., Jun S., Exploring the heating patterns of multiphase foods in a continuous flow, simultaneous microwave and ohmic combination heater, *J. of Food Engin.* 116 (2013) 65-71.
- Park S. H., Balasubramaniam V.M., Sastry S. K., Lee J., Pressure-Ohmic Thermal Sterilization: a feasible approach for the inactivation of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Geobacillus stearothermophilus* spores, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, doi: 10.1016/j.ifset.2013.03.005.
- Peñas E., Limón R.I., Concepción V.-V., Frias J., Effect of storage on the content of indole-glucosinolate breakdown products and vitamin C of sauerkrauts treated by high hydrostatic pressure, *LWT - Food Science and Technology* 53 (2013) 285-289.
- Puértolas E., Cregenzán O., Luengo E., Álvarez I., Raso J., Pulsed-electric-field-assisted extraction of anthocyanins from purple-fleshed Potato, *Food Chemistry* 136 (2013) 1330-1336.
- Reineke K., Ellinger E., Berger D., Baier D., Mathys A., Setlow P., Knorr D., Structural analysis of high pressure treated *Bacillus subtilis* spores, *Innov. Food Sci. and Emerging Technol.* 17 (2013) 43-53.
- Rubio R., Bover-Cid S., Martin B., Garriga M., Aymerich T., Assessment of safe enterococci as bioprotective cultures in low-acid fermented sausages combined with high hydrostatic pressure, *Food Microbiology* 33 (2013) 158-165.
- Sampedro F., McAloon A., Yee W., Fan X., Zhang H.Q., Geveke D.J., Cost analysis of commercial pasteurization of orange juice by pulsed electric fields, *Innov. Food Sci. and Emerging Technol.* 17 (2013) 72-78.
- Sepulveda D.R., Góngora-Nieto M.M., Guerrero J.A., Barbosa-Cánovas G.V., Production of extended-shelf life milk by processing pasteurized milk with pulsed electric fields, *J. of Food Engin.* 67 (2005) 81-86.
- Shirsat N., Lang J.G., Brunton N.P., McKenna B.M., Conductivities and ohmic heating of meat emulsion batters, *J. Muscle Foods* 15 (2004a) 121-137.
- Shirsat N., Lyng J.G., Brunton N.P., McKenna B., Ohmic processing: Electrical conductivities of pork cuts, *Meat Science* 67 (2004b) 507-514.
- Shynkaryk M., Sastry S.K., Simulation and optimization of the ohmic processing of highly viscous food product in chambers with sidewise parallel electrodes, *J. of Food Engin.* 110 (2012) 448-456.
- Somavat R., Kamonpatana P., Mohamed H.M.H., Sastry S.K., Ohmic Sterilization inside a Multi-Layered Laminate Pouch for Long-Duration Space Missions, *J. of Food Engin.* 112 (2012) 134-143.
- Tananuwong K., Chitsakun Th., Tattiyakul J., Effects of High-Pressure Processing on Inactivation of *Salmonella typhimurium*, Eating Quality, and Microstructure of Raw Chicken Breast Fillets, *J. of Food Sci.* 77 (2012) E321-E327.
- Tang Z., Mikhaylenko G., Liu F., Mah J.-H., Pandit R., Younce F., Tang J, Microwave sterilization of sliced beef in gravy in 7-oz trays, *J. of Food Engin.* 89 (2008) 375-383.
- Valdramidis V.P., Taoukis P.S., Stoforos N.G., Van Impe J.F.M., Modeling the Kinetics of Microbial and Quality Attributes of Fluid Food During Novel Thermal and Non-Thermal

- Processes, in Novel Thermal and Non-Thermal Technologies for Fluid Foods, Elsevier Inc. **2012**, doi: 10.1016/B978-0-12-381470-8.00014-1.
- van Asselt A.J., Sweere A.P.J., Rollema H.S, de Jong P., Extreme high-temperature treatment of milk with respect to plasmin inactivation, Intern. Dairy J. 18 (**2008**) 531-538.
- Wang J., Olsen R.G., Tang J., Tang Z., Influence of mashed potato dielectric properties and water electric conductivity on radio frequency heating at 27 MHz, J. Microwave Power & Electromagnetic Energy ONLINE 42 (**2008**) 31-46.
- www.foodtech-portal.eu, Stand 16.06.2013
- www.wild-indag.de, Stand 21.6.2013
- www.radiofrequency.com, Stand 21.06.2013
- Zhao W., Yang R., Shen X., Zhang S., Chen X., Lethal and sublethal injury and kinetics of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* in milk by pulsed electric fields, Food Control 32 (**2013a**) 6-12.
- Zhao L., Wang S., Liu F., Dong P., Huang W., Xiong L., Liao X., Comparing effects of high hydrostatic pressure and thermal pasteurization combined with nisin on the quality of cucumber juice drinks, Innov. Food Sci. and Emerging Technol. 17 (**2013b**) 27-36.

Kontakt:

Prof. Dr. habil. Gerald Muschiolik
Food Innovation Consultant, Potsdam
www.muschiolik.de