

Neue Konservierungsmethoden

Bericht über eine Auswertung der wissenschaftlichen Literatur

Karin Franke
Staatliches Lebensmitteluntersuchungsamt Oldenburg

Herausgeber:

Niedersächsisches Ministerium für
Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
Calenberger Straße 2
30169 Hannover

Januar 2000

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	2
2. HOCHDRUCK	3
2.1 GRUNDLAGEN	3
2.2 KEIMREDUZIERUNG MITTELS HOCHDRUCK	3
2.3 VERFAHREN	3
2.3.1 <i>Begasung mit Kohlendioxid (CO₂)</i>	3
2.3.2 <i>Hydrostatischer Druck</i>	4
2.3.3 <i>Anwendungsmöglichkeiten: hydrostatischer Druck</i>	4
2.2 REALISIERTE VERFAHREN.....	6
2.3.1 <i>Hyperbar-Kaltpasteurisation</i>	6
2.3.2 <i>Sterilisation von Gewürzen und Kräutern</i>	6
3. IMPULSVERFAHREN	7
3.1 ENTKEIMUNG DURCH ELEKTRISCHE HOCHSPANNUNGSIMPULSE	7
3.1.1 <i>Grundlagen</i>	7
3.1.1 <i>Wirksamkeit elektrischer Hochspannungsimpulse</i>	8
3.1.2 <i>Verfahrensbeschreibung</i>	10
3.2 LICHTIMPULSVERFAHREN.....	12
3.2.1 <i>Grundlagen</i>	13
3.2.2 <i>Wirksamkeit</i>	13
3.2.3 <i>Anwendungsbereich</i>	13
4. ELEKTROTHERMISCHE KONSERVIERUNGSMETHODEN.....	15
4.1 GRUNDLAGEN	15
4.2 VERFAHREN	17
4.2.1 <i>Ohmsche Erhitzung</i>	17
4.2.2 <i>Induktive Erhitzung</i>	18
4.2.3 <i>Mikrowellenerwärmung</i>	18
5. ZUSAMMENFASSUNG	20
6. ANHANG	21
7. LITERATURVERZEICHNIS.....	22

1. Einleitung

Das Hauptaufgabengebiet der Lebensmittelverarbeitung besteht darin, pflanzliche und tierische Produkte über einen längeren Zeitraum mit unverminderter Qualität zu erhalten. Dies ermöglicht, Lebensmittel unabhängig von dem zeitlichen Aufkommen, ganzjährig für Ernährungszwecke zur Verfügung zu stellen.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen bei der Lebensmittelverarbeitung alle schädigenden Einflüsse ausgeschaltet werden. [1]

Die Qualität und Lagerstabilität der Lebensmittel wird durch eine Vielzahl von Faktoren negativ beeinflusst. Zu nennen sind a.) physikalische Vorgänge (Quellen, Austrocknen, Aromaverflüchtigung), b.) thermische Reaktionen: (Bräunungsreaktionen, Fettzersetzung), c.) biochemische Veränderungen und d.) mikrobiologische Vorgänge (Gären, Schimmeln, Faulen, Toxinbildung).

Die Hauptursache für Qualitätseinbußen bis hin zum Verderb von Lebensmittel sind entweder chemische Veränderungen (enzymatische Reaktionen) oder mikrobiologische Vorgänge. [2]

Lebensmittel bieten aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung im allgemeinen gute Voraussetzungen für das Wachstum und die Vermehrung von Mikroorganismen. Obwohl die meisten Lebensmittel mit zahlreichen verschiedenen Bakterien, Hefen und Schimmelpilzen kontaminiert sind, haben jeweils nur wenige spezifische Mikroorganismenarten praktische Bedeutung als Verderbniserreger oder als Lebensmittelvergifter.

Um Lebensmittel vor dem mikrobiellen Verderb zu schützen, werden sogenannte Konservierungsverfahren angewendet. Hierbei ist es nicht in jedem Fall erforderlich,

dass alle im Lebensmittel vorhandenen Mikroorganismen abgetötet werden. Vielfach genügt es, wenn man ihre Vermehrung durch Ausschaltung vermehrungsnotwendiger Bedingungen, wie z. B. durch das Absenken des aw-Wertes unterdrückt, so dass Verbraucher und Produkt nicht geschädigt werden.

Zur Lebensmittelkonservierung stehen eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Zu nennen sind Erwärmen, Kühlen, Konservieren mit biologischen und chemischen Methoden, Trocknen, Bestrahlen etc.. [1]

Die zum Teil seit Jahrtausenden bekannten Konservierungsmethoden, werden durch die sich ständig ändernden Anforderungen an die auf den Markt kommenden Lebensmittel weiterentwickelt.

Neben diesen klassischen Verarbeitungsmethoden, werden derzeit eine Reihe neuer Behandlungsmethoden, die zum Teil aus technischen Einsatzbereichen bekannt sind, wie die Extrusion (Kunststoffindustrie) und Hochdrucktechnik (Pulverpressung) zur Behandlung von Lebensmitteln untersucht. Der Einsatz klassischer und neuer Konservierungsmethoden sollen zur i.) Steigerung der ernährungsphysiologischen, hygienischen und sensorischen Qualität, ii.) Verbesserung der Verarbeitbarkeit der Rohstoffe und Halbprodukte und zur iii.) Steigerung der Produktvielfalt beitragen.

Seit dem Inkrafttreten der Novel Food Verordnung, gibt es eine rechtliche Definition für neuartige Technologien zur Herstellung von Lebensmitteln. Ob die hier vorgestellten Verfahren als neuartig im Sinne der Novel Food Verordnung einzustufen sind, bleibt in dieser Arbeit unberücksichtigt. Vorgestellt werden die Hochdruckbehandlung, die Impulstechnologie und elektrothermische Verfahren. [3]

2. Hochdruck

2.1 Grundlagen

Für eine Hochdruckbehandlung von Lebensmitteln sind zwei Prinzipien, die das Verhalten von Stoffen unter Druck bestimmen, von Bedeutung.

Zum einen das *isostatische Prinzip*, das besagt, dass Druck gleichförmig und unmittelbar auf das gesamte zu behandelnde Lebensmittel wirkt. Zum anderen das Prinzip von *Le Chatelier und Braun* auch bezeichnet als "Flucht vor dem Zwang". Hiernach laufen unter Druck bevorzugt die Reaktionen ab, die zu einer Volumenabnahme führen, während Reaktionen die eine Volumenzunahme zur Folge haben unterdrückt werden, d. h. für die Lage des Gleichgewichtes ist unter Druck das Reaktionsvolumen entscheidend.

Chemische Bindungen sind somit temperatur und druckabhängig. Aufgrund der chemischen Bindung sind *kovalente* Bindungen (Atombindungen mit hoher Bindungsenergie) und *nicht kovalente* Bindungen zu unterscheiden. [4, 5, 6]

Kovalente Bindungen auch Atombindungen sind Bindungen „kleinerer“ Moleküle, die bei einer Behandlung mit Hochdruck weitgehend erhalten bleiben. Der Erhalt niedermolekularer Substanzen, wie z. B. Vitamine, Farb- und Aromastoffe ist ein entscheidender Vorteil der Hochdruckbehandlung gegenüber herkömmlichen Verfahren. Die Bildung von Off- flavours (Kochgeschmack) sowie Farbveränderungen durch Maillard Bräunungsreaktionen, wie sie bei thermischen Verfahren bekannt sind, treten bei einer Behandlung mit Hochdruck nicht auf. [3, 6]

Nicht kovalente Bindungen sind Bindungen „größerer“ Moleküle, die aufgrund der van der Waals Kräfte miteinander in Wechselwirkung treten. Ein Beispiel hierfür ist die Wasserstoffbrückenbindung. Diese Verbindungen haben eine geringe Bindungsenergie und können durch Druckeinwirkung beeinflusst werden. Eine praktische Beispiel hierfür, ist das Inaktivieren von Mikroorganismen unter Druck. Vegetative Bakterien, Hefen und Schimmelpilze oder Enzyme denaturieren unter Druck. [6, 7]

Weitere chemische Reaktionen die unter Hochdruck gefördert werden, sind nach Tauscher [8; 9]:

- die Ionisierung von Wasser, Säuren und Phenolen
- die Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen
- die Radikalkettenreaktionen und
- die Diels- Alder- Reaktionen

2.2 Keimreduzierung mittels Hochdruck

Für die Hochdruckbehandlung werden derzeit in der Literatur zwei Verfahren beschrieben, die Begasung mit CO_2 und die Behandlung mit hohem hydrostatischem Druck.

Der Vorgang der Druckinaktivierung von Mikroorganismen ist ein komplizierter Prozess, an dem mehrere Faktoren beteiligt sind. Ganz allgemein werden mit steigendem Druck im Mikroorganismus verschiedene morphologische

Veränderungen (Strukturveränderungen) und die Störung metabolischer Prozesse (Stoffwechsel Prozesse) hervorgerufen. [7]

Für die Keimreduzierung ist von großer Bedeutung, dass der Wassergehalt der Probe einen bestimmten Mindestsatz nicht unterschreitet (nicht kleiner als 15 %). Trockene Lebensmittel können mittels Druck nicht entkeimt werden. Es ist jedoch denkbar, die Proben vor der Behandlung zu befeuchten. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, dass die Lebensmittel beim Zurücktrocknen auf den Anfangswassergehalt mit Keimträgern aus der Trockenluft erneut kontaminiert werden. [3, 8]

Auch die Art der Verkeimung beeinflusst die Wirksamkeit der Hochdruckbehandlung. Während z. B. vegetative Zellen, Hefen und Schimmelpilze in ihrer Wachstumsphase sehr druckempfindlich sind, zeigen sich bei Sporen Unterschiede zwischen den Behandlungsmethoden.

Während eine CO_2 Behandlung keinen Effekt zeigt, können Sporen mit hydrostatischen Drücken im kombinierten Verfahren inaktiviert werden. Hierbei werden die Sporen zuvor bei niedrigeren Drücken (z. B. 90 MPa) ausgekeimt. Anschließend erfolgt die Abtötung der ausgekeimten Sporen durch Hochdruck- Anwendung (600 MPa). Dieses Verfahren soll mehrmals wiederholt werden. [7]

2.3 Verfahren

2.3.1 Begasung mit Kohlendioxid (CO_2)

Das Prinzip der Keimreduzierung bei der Begasung mit Kohlendioxid (CO_2) beruht auf der Bildung von Kohlensäure und der damit verbundenen Absenkung des pH-Wertes. Die Begasung wird je nach Lebensmittel im Rührautoklaven (flüssige Lebensmittel) oder Durchflußautoklaven (feste Lebensmittel) vorgenommen. [10]

Dabei wird das zu behandelnde Lebensmittel in einen temperierbaren Druckbehälter gegeben. Anschließend wird soviel CO_2 injiziert, bis der gewünschte Arbeitsdruck (liegt zwischen 5 MPa bis 60 MPa) erreicht ist.

Das Lebensmittel bleibt bei konstanten Druck- und Temperaturbedingungen für eine gewisse Haltezeit im Druckbehälter. Während dieser Zeit, diffundiert das CO_2 Gas in die Zellen und reagiert mit dem sowohl im Mikroorganismus sowie im Lebensmittel vorhandenen Wasser. Die so gebildete Kohlensäure führt zur Absenkung des pH- Wertes im Zellinneren und verursacht eine Inaktivierung von Enzymen. Hierdurch kommt es zur Hemmung von Enzymreaktionen, was beim Mikroorganismus zum Zelltod führt. Für das Lebensmittel wirkt sich dieser Vorgang nicht negativ aus. [6]

Je nach Verfahrensbedingungen können weitere Faktoren zur Abtötung der Mikroorganismen beitragen. Eine Erhöhung des keimreduzierenden Effektes bietet z. B. der Einsatz von überkritischem CO_2 (31°C und 73,8 bar). Über-

kritisches CO₂ extrahiert Zellinhaltsstoffe, wie z. B. Lipide oder Sterine, was ebenfalls zur Abtötung von Mikroorganismen führt. [4, 6, 11]

Eine weitere Möglichkeit bietet die Schnellentspannung. Nach Literaturangaben [4] kann hierdurch der keimreduzierende Effekt um bis zu zwei Zehnerpotenzen erhöht werden. Theoretische Grundlage für die Schnellentspannung ist das „Henry Gesetz“, das besagt:

„Der Partialdruck eines gelösten Stoffes über der Lösung ist im Gleichgewicht gleich der Konzentration in der Lösung.“ [12]

D. h., wird biologisches Material einem Gas unter Druck ausgesetzt, so findet eine Anreicherung des Gases in den Zellen statt. Bei plötzlicher Druckentlastung kann das in den Zellen aufgenommene Gas nicht schnell genug entweichen und baut einen Überdruck auf, der zu Zelldefekten oder zur Zellerstörung führen kann. Die Wirksamkeit der Schnellentspannung ist dabei abhängig von der Gasart, der Druckhöhe, der Druckentspannungszeit, der Kontaktzeit, vom Feuchtigkeitsgehalt sowie von der Temperatur und den Eigenschaften des zu behandelnden Gutes.

Die bevorzugte Gasart ist CO₂, da es im lipophilen Medium eine höhere Löslichkeit besitzt als Luft oder Stickstoff.

Bisherige Untersuchungen zur Entkeimung mit CO₂ unter Druck, sind in *Tabelle 1 im Anhang* wiedergegeben. Die Ergebnisdaten wurden aus Literatur [7] ungeprüft übernommen. Diese Daten wurden nach Angaben des Autors aus Patentschriften und Tagungsunterlagen zusammengestellt. Im ersten Teil der Tabelle ist die Wirkung der CO₂ Begasung auf verschiedene Reinkulturen wiedergegeben. Der zweite Teil der Tabelle zeigt erzielte Ergebnisse bei Anwendung auf Lebensmittel.

2.3.2 Hydrostatischer Druck

Die hydrostatische Hochdruckbehandlung wird in einem verschlossenen Druckbehälter durchgeführt. Hierbei wird der zur Behandlung benötigte Druck durch Kraftübertragung auf ein flüssiges Medium erzeugt. Bei flüssigen Lebensmitteln kann die Flüssigkeit selbst als Druckmedium dienen. Feste Lebensmittel dagegen werden verpackt behandelt. Hier wird als Druckmedium in der Regel Wasser eingesetzt.

Das Prinzip der hydrostatischen Hochdruckbehandlung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Durch das Hineintreiben des Kolbens wird in der Flüssigkeit sofort und gleichmäßig ein hydrostatischer Druck erzeugt, der sich auf das zu behandelnde Produkt überträgt. Je nach Lebensmittel und Behandlungstemperatur werden Drücke von 100 MPa bis 1000 MPa angewendet. [7]

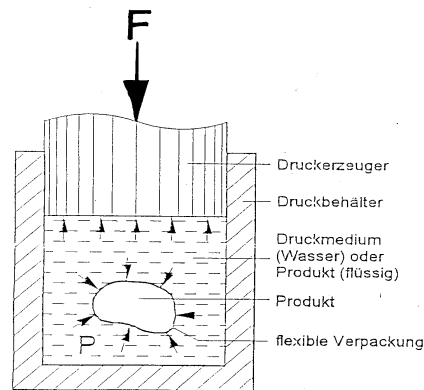


Abbildung 1: Schematische Darstellung der hydrostatischen Hochdruckbehandlung [3]

2.3.3 Anwendungsmöglichkeiten: hydrostatischer Druck

Neben der Konservierung mit hydrostatischem Hochdruck lassen sich nach Angaben der Autoren [11, 13, 14] weitere Einsatzgebiete im Lebensmittelbereich aus der Besonderheit des Wassers ableiten.

Hoher hydrostatischer Druck hat neben der Temperatur einen maßgeblichen Einfluß auf den Phasenübergang von Wasser (Abbildung 2). Wesentliche Beobachtungen sind Gefrierpunktniedrigung, geringe Kristallisationsenthalpie und die Bildung verschiedener Eiskristalle (Abbildung 2), mit geringerem spezifischen Volumen, als dass unter Normaldruck gebildete Eis I (abzuleiten aus dem „Prinzip von Le Chartelier und Braun“).

Im Gegensatz zum unter Normaldruck gebildeten Eis I besitzen die unter Druck gebildeten Eisformen eine höhere Dichte als Wasser, so dass bei deren Bildung keine Volumenzunahme auftritt. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber den unter Normaldruck gebildetem Eis I. Hier kommt es beim Phasenübergang Wasser/ Eis I zur Volumenzunahme, wodurch es im Gefriergut zu Gewebeschädigung kommen kann. [15, 16]

Ebenfalls aus dem „Prinzip von Le Chartelier und Braun“ abzuleiten ist, dass gefrorenes Wasser (Eis) bei Druckerhöhung sein Volumen verringern wird. D. h., Eis wird bei gleicher Temperatur unter Druckeinwirkung schmelzen.

Die zuvor beschriebenen Eigenschaften des Wassers unter Druckeinwirkung werden für praktische Anwendungen in der Lebensmittelverarbeitung getestet. Zu nennen ist das Auftauen unter Druck, das im Japan bereits Anwendung findet sowie das Einfrieren unter Druck und das Gefrieren ohne Eisbildung (ein sehr teures Verfahren). [11]

Gegenüber dem reinen Wasser enthält das im Lebensmittel vorhandene Wasser gelöste Substanzen, wie z. B. Salze und Zucker, die den Verlauf der Phasengrenzlinie beeinflussen. Für Lebensmittel sind daher spezifische Phasengrenzlinien zu erwarten.

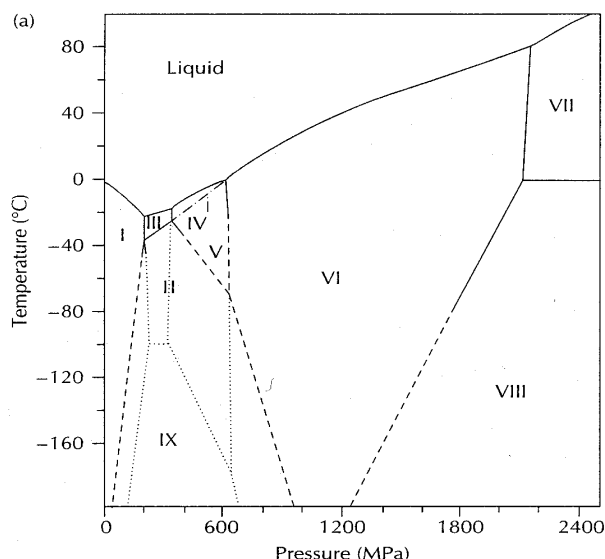


Abbildung 2: Phasendiagramm des Wassers [14]

Gefrieren und Auftauen unter hydrostatischem Druck

Durch das Gefrieren von Lebensmitteln wird die Vermehrung von Mikroorganismen in Lebensmitteln unterbunden und die Bildung von unerwünschten enzymatischen Stoffwechselprodukten stark verlangsamt. Die Nachteile der herkömmlichen Gefrierverfahren liegen neben dem hohen wirtschaftlichen Aufwand, insbesondere in Struktur- und Konsistenzveränderungen, die gefrorene Lebensmittel erleiden.

Auch das Auftauen kann zu Qualitätsverlusten führen. Neben chemischen Veränderungen sind vor allem die mikrobiologischen Reaktionen von Bedeutung. Denn wie beim Gefrieren, läuft auch der Auftauprozess von außen nach innen ab. Das bedeutet, dass beim Gefrieren der Kern und beim Auftauen die Außenschicht lange Zeit im ungefrorenen Zustand sind. Während dieser Zeit können Verderbnisreaktionen ablaufen. Anders ist dies beim Gefrieren und Auftauen unter Hochdruck. [2, 7]

Beim Druckgefrieren wird das Produkt z. B. bei einem hydrostatischen Druck von 200-400 MPa auf eine Temperatur zwischen -12°C bis -20°C heruntergekühlt. Aufgrund des hohen Druckes liegt das Produkt immer noch flüssig vor (Abbildung 3).

Wird der Druck entspannt, so setzt schlagartig die Kristallisation ein. Vorteil dieses Verfahrens gegenüber dem herkömmlichen Gefrieren ist eine gleichmäßige Kristallisation mit kleinen und gleichmäßig geformten Eiskristallen.

Der umgekehrte Fall ist das Auftauen gefrorener Lebensmittel unter Druck. Hier führt die Erhöhung des hydrostatischen Druckes auf z. B. über 300 MPa zu einem

Phasenübergang entlang der Phasengrenzlinie (Eis I - flüssig). Das Lebensmittel wird im temperierten Druckbereich auf eine Temperatur von ca. 7°C gebracht, um den Auftauprozess nach Entspannen des Druckes oberhalb des Gefrierpunktes abzuschließen. Die Auftaugeschwindigkeit wird dabei um das Fünffache erhöht.

Weitere Möglichkeiten des Gefrierens bzw. Auftauens unter Druck ergeben sich aus der Überschreitung der Phasengrenzlinie des Wassers (Abbildung 3). In der Literatur werden den Phasenübergängen unterschiedliche Bezeichnungen zugeordnet (Tabelle 1). [11, 13]

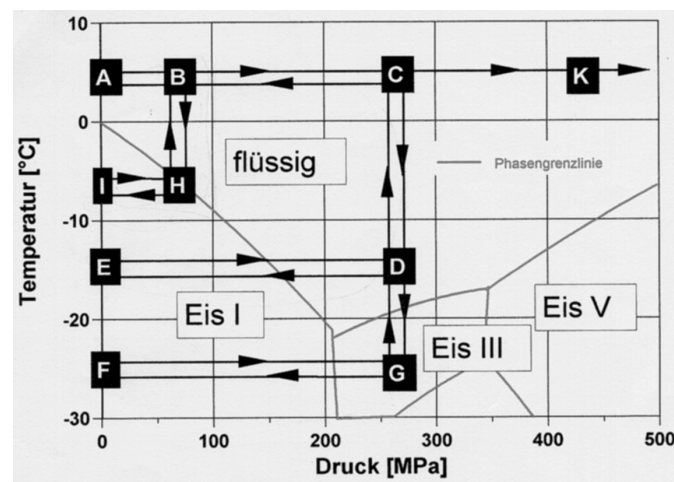


Abbildung 3: Mögliche Phasenübergänge von Wasser unter hydrostatischem Hochdruck [14]

Tabelle 1: Bezeichnung der Verfahren unter Anwendung von hydrostatischem Hochdruck (Teil1) [14]

Phasenübergang beim Gefrieren	Phasenübergang beim Auftauen
A, B, H, I	I, H, B, A
Gefrieren unter Druck	Auftauen unter Druck
Druckaufbau	Druckaufbau bis zur Phasengrenze, Auftauen
Kühlen bis zur Phasengrenze	Temperaturerhöhung
Gefrieren	Entspannen
Entspannen	
A, B, C, D, E	E, D, C, B, A
Druckwechselgefrieren	Druckerzwungendes Auftauen
Druckaufbau	Auftauen mittels Druckaufbau über die Phasengrenze
Kühlen	Temperaturerhöhung
Gefrieren durch schlagartiges Entspannen	Entspannen

Bezeichnung der Verfahren unter Anwendung von hydrostatischem Hochdruck (Teil2) [14]

Phasenübergang beim Gefrieren	Phasenübergang beim Auftauen
A, B, C, D, G, F	F, G, D, C, B, A
Gefrieren über Eis III	Auftauen über Eis III
Druckaufbau	Druckaufbau
Temperaturabsenkung	Umkristallisieren zu Eis III
Gefrieren zu Eis III	Auftauen
Entspannen zu Eis I	Temperaturerhöhung
	Entspannen

A, B, C, K, Eis V oder Eis VI
Gefrieren bei Temperaturen > 0°C
Druckaufbau bis zum Erreichen der Phasengrenze
A, B, C, D, C, B, A
Drucklagerung bei tiefen Temperaturen ohne Eisbildung
Druckaufbau
Kühlen
Halten
Temperaturerhöhung
Entspannen

2.2 realisierte Verfahren

2.3.1 Hyperbar-Kaltpasteurisation

Die Hyperbar-Kaltpasteurisation wurde von dem französischen Anlagenbauer „Alstom Fluides et Mécanique“ entwickelt.

Das Hauptanwendungsgebiet ist die Pasteurisation frisch gepreßter Fruchtsäfte. Diese werden verpackt unter Hinzunahme eines Druckmittels (Wasser) oder direkt bei einem Arbeitsdruck von 4 bis 5 kbar behandelt. Der Aufbau dieser Anlage ist in Abbildung 4 dargestellt. Nach Literaturangaben [17], ist die Testphase abgeschlossen und eine technische Produktionsanlage mit einer Leistung von 300 l/h realisierbar.

Ein weiteres Anwendungsgebiet dieser Produktionsanlage, ist die Behandlung verpackter Fleisch- und Wurstwaren. Hier wird als Druckmedium Wasser eingesetzt. [17]

2.3.2 Sterilisation von Gewürzen und Kräutern

Für die Behandlung von Gewürzen und Kräutern setzt eine holländische Firma auf den Einsatz von gesättigtem Wasserdampf. Nach Firmenangaben wurde bisher eine große Auswahl an Produkten erfolgreich sterilisiert. Verarbeitet wurden ganze und blattförmige Teilchen sowie Pulver.

Nach Literaturangaben [18] entstehen während der Behandlung minimale Farb- und Geschmacksverluste.

Die Sterilisation wird in einem sogenannten „Vrieco-Nauta-Vakuumtrockner mit Rührvorrichtung“ durchgeführt (Abbildung 5). Die Anlage ist für Hochdruck und Vakuum geeignet und ermöglicht die Durchführung aller Verfahrensschritte in einer Anlage.

Bei geschlossener Anlage erfolgt die Homogenisierung des Rohmaterials sowie das Aufheizen der Behälterwand. Das Vorwärmen der Behälterwand verhindert unerwünschte Dampfkondensation im Behälterinneren. Vor Einbringen des Dampfes wird evakuiert, damit der eingelassene Dampf keine Luft heizen und aus dem Behälter verdrängen muss (Schritt 1).

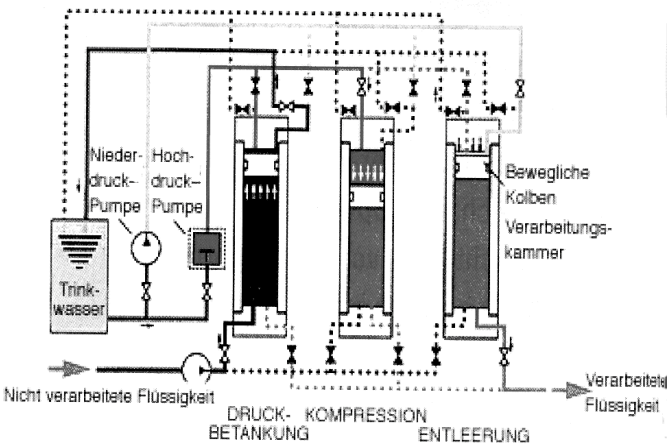


Abbildung 4: Halbkontinuierliche Saftpasteurisation mit direkter Druckbeaufschlagung [17]

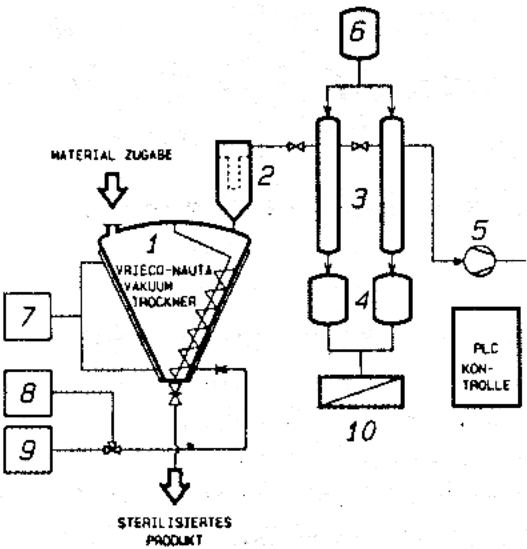


Abbildung 5: Vrieco- Nauta- Vakuumtrockner mit Rührvorrichtung [18]

Insgesamt wird soviel Dampf eingelassen, bis der gewünschte Drucksollwert erreicht ist. Während der Druckbehandlung sorgt ein stetiges Rühren für den Kontakt zwischen Dampf und Produkt, so dass innerhalb weniger Sekunden die Sterilisationstemperatur erreicht wird (*Schritt 2*).

Die Sterilisationszeit ist produktabhängig und wird für jedes Produkt festgelegt und programmiert (*Schritt 3*).

Entspannt wird durch Öffnen der Ventile (*Schritt 4*). Unter abnehmendem absolutem Druck, wird das Produkt vakuumgekühlt und -getrocknet. Die Druckabnahme führt zur Verdampfung der Feuchtigkeit unter Nutzung der latenten Wärme des Produktes und zur schnellen Abkühlung auf die Materialausgangstemperatur. Hierbei werden den Ausgangswerten annähernd entsprechende Temperatur und Feuchtigkeitswerte erzielt (*Schritt 5*). Im letzten Verfahrensschritt, kann das während der Vakuumbehandlung freigesetzte ätherische Öl untergemischt werden (*Schritt 6*). Anschließend erfolgt die Abfüllung (*Schritt 7*). [18]

3. Impulsverfahren

Vielversprechende Vorversuche haben das Interesse am Einsatz von Licht bzw. elektrischen Feldern aus elektrischen Hochspannungsimpulsen zur Entkeimung von Lebensmitteln gesteigert. Ein großer Vorteil dieser Technologie, ist die geringe Temperaturentwicklung während des Behandlungsprozesses. Somit lassen sich insbesondere wärmeempfindliche Produkte schonend konservieren. Die Anwendung wird derzeit von verschiedenen Firmen in Pilotanlagen getestet.

Grundlagen dieser Impulstechnologie, ist der Einsatz hoher elektrischer Energieimpulse. Diese werden mit Hilfe eines Kondensators erzeugt. Im Kondensator wird über einen längeren Zeitraum Energie gespeichert. Durch die schlagartige Entladung des Kondensators entstehen Hochspannungsimpulse, die zur Bildung starker Lichtimpulse bzw. elektrischer Feldimpulse genutzt werden. Durch die hohe Intensität dieser Impulse werden keimreduzierende Effekte beobachtet, die bei kontinuierlichen Wellen gleicher Energie, aber mit niedriger Intensität, nicht festgestellt werden. Obwohl die Impulskraft der einzelnen Impulse sehr hoch ist, ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens aufgrund der geringen Laufzeit gegeben. [19]

3.1 Entkeimung durch elektrische Hochspannungsimpulse

Beim Elektroimpulsverfahren auch bezeichnet als PEF-Verfahren (high Intensity Pulsed electric field) oder Cool Pure® Verfahren werden Mikroorganismen mit Hilfe von Hochspannungsimpulsen inaktiviert bzw. abgetötet. Die Möglichkeit der Anwendung „elektrischer Hochspannungsimpulse“ zur Entkeimung von Lebensmitteln wurde von zahlreichen Wissenschaftlern untersucht und bestätigt. Einen Überblick

über bisher durchgeführte Arbeiten gibt Literatur [20, 21, 22].

Nach Literatur [21] wurde der keimreduzierende Effekt der Anwendung elektrischer Hochspannungsimpulse auf Lebensmittel als erstes von Doeve (1960/61) beschrieben und patentiert. Systematische Untersuchungen hierzu, wurden von Sale und Hamilton (1967/68) durchgeführt.

3.1.1 Grundlagen

Wird von außen an eine Zelle ein elektrisches Feld angelegt, so wird über die Zellmembran der Mikroorganismen ein Potential induziert. Erreicht die Feldstärke einen für die jeweilige Organismenart spezifischen Wert, so verändert sich die Permeabilität der Zelle. Je nach der Höhe der elektrischen Feldstärke kann diese Veränderung reversibel oder irreversibel sein. [22, 23]

Nach den Berechnungen von Sale und Hamilton [23] werden Mikroorganismen geschädigt, sobald die induzierten elektrischen Impulse ein Membranpotential von $> 1 \text{ V}$ bewirken. In einer Zellsuspension muss das Membranpotential von vielen Zellen den kritischen Wert von 1 V überschreiten. Zur Abtötung von z. B. *Escherichia coli* (*E. coli*) wird ein elektrisches Feld von 10 kV/cm benötigt. [22, 23]

Die Potentialdifferenz zwischen extra- und intracellulärer Oberfläche der Zellmembran ist abhängig von der Größe (Länge und Radius) der Zelle. Die mathematische Beschreibung der Potentialdifferenz wird in der Literatur durch zwei Formeln beschrieben, die sich in der Berücksichtigung von Korrekturfaktoren unterscheiden. In der Literatur [22] wird zur Berechnung der Potentialdifferenz einer kugelförmigen Zelle ein membranabhängiger Faktor (K_1) sowie die Ausrichtung der Zelle im elektrischen Feld (K_2) berücksichtigt (Gl. 1).

Gleichung 1:

$$\Delta V = 1,5 \cdot a \cdot E \cdot K_1 \cdot K_2$$

mit:

- ΔV : Potentialdifferenz
- a : Radius
- E : Energie des extern angelegten Feldes
- K_1 : membranabhängiger Korrekturfaktor
- K_2 : Korrekturfaktor, der die Ausrichtung der Zelle im elektrischen Feld berücksichtigt.

Literatur [21, 23, 24] berücksichtigt diese Größen nicht. Hier errechnet sich das induzierte Potential bzw. die Potentialdifferenz für kreisrunde Zellen nach Gl. 2 entsprechend der „Potential-Theorie von Schwan (1977)“.

Für die Berechnung stäbchenförmiger Zellen wurde von Zimmermann ein Korrekturfaktor (F) eingeführt (Gl. 2). Für runde Zellen ist der Faktor ca. $1,5$, da $l = 2 \cdot a$ ist, ansonsten ist $l > a$. In Tabelle 2 sind nach Gleichung 2 berechnete Membranpotentiale aufgeführt.

Gleichung 2:

$$V_m = F \cdot a \cdot E_c$$

mit:

$$F = I / (I - 0,67 \cdot a)$$

- V_m : induzierte Membranpotential bzw. Potentialdifferenz
 E_c : externe Feldstärke
 a : Zellradius
 F : größenabhängiger Faktor

Tabelle 2: Nach Gl.2 errechnete Membranpotential (V_m) [23]

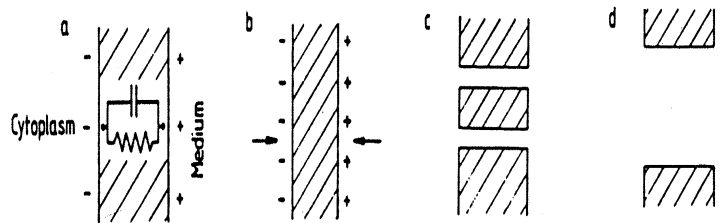
Mikroorganismen	d [µm]	I [µm]	V [µm ³]	f	V _m [V]
E. coli (4h)	1,15	6,9	7,2	1,06	0,26
E.coli (30h)	0,88	2,2	1,4	1,15	1,06
K. pseudomonias	0,83	3,2	1,7	1,09	1,26
P. aeruginosa	0,73	3,9	1,6	1,07	1,25
S. aureus	1,03	-	0,6	1,5	1,00
L. monocytogenes	0,76	1,7	0,8	1,70	0,99
C. albicans	4,15	-	38,0	1,50	2,63

Der Mechanismus der Porenbildung und die Destabilisierung der Membran durch die Hochspannungsimpulsbehandlung ist noch nicht vollständig geklärt. Die Porenbildung ist in verschiedenen Modellen, wie z. B. dem elektromechanischen Modell oder Flüssigkeits-Block Modell beschrieben. Nach Literatur [23, 24] ist das Modell von Zimmermann das am meisten akzeptierte. Dieser beschreibt die Zellmembran als Kondensator, der die extern angelegte Ladung überwiegend auf seiner Oberfläche ansammelt, als Ursache für das wachsende Membranpotential. Die Abnahme der Membranstärke, wird auf entstehende Kompressionsdrücke zurückgeführt. Diese ergeben sich aus der Anziehung gegenüberliegender Ladung auf der Innen- und Außenoberfläche der Zellmembran.

Nach Zimmermann's Abbruch Theorie, zitiert in Literatur [23, 24], induziert ein extern angelegtes Feld zusätzlich über die Zellmembran ein Potential, das größer als das eigentliche Zellpotential ist. Erreicht das gesamte Membranpotential einen kritischen Wert ($\approx 1V$), so findet ein Abbruch statt. Dieser Abbruch führt zur Unordnung in der Membranstruktur. Folgen sind Porenbildung und wachsende Permeabilität. Die entstehende Permeabilität der Zellmembran, kann je nach elektrischer Feldstärke sowie Dauer und Anzahl aufgegebener Impulse reversibel oder irreversibel sein.

Die Abnahme der Membranstruktur (Abbildung 6) ist wie folgt beschrieben [23]: Die doppelte Struktur der Zellmembran ist ein dielektrisches Material mit einer kleinen dielektrischen Konstante (K) in der Größe 2, vergleichbar mit der dielektrischen Konstante 80 für Wasser. Als Ergebnis

kann sich freie Ladung an den beiden Membranoberflächen ansammeln, aber nicht in hoher Konzentration in der Membran, wenigstens nicht innerhalb der Membran Kohlenwasserstoffschicht. Die Aufgabe eines elektrischen Feldimpulses führt zum Anwachsen des transmembranen Potentials (A). Die erzeugte Ladung auf den beiden Membranoberflächen ist entgegengesetzt und führt zur gegenseitigen Anziehung (B). Diese Anziehungskräfte führen zu einem Kompressionsanstieg auf der Membranoberfläche und reduzieren die Dicke der Membran. Hierdurch wird der Abstand zwischen den entgegengesetzten Ladungen der beiden Membranoberflächen reduziert. Als Folge kommt es zum Anwachsen der Kompression. Eine elastische oder viskoelastische Wiederherstellungskraft stellt sich der elektrischen Kompression der Membrandicke entgegen. Wächst die elektrische Kompressionskraft mit Abnahme der Membrandicke schneller an, als die elastische Rücknahmekraft, so kommt es zum Abbruch der Membran (C und D). Dieses erfolgt bei extern aufgegebenen Feldstärken zwischen 2 bis 20 kV/cm.



- a.) Zellmembran mit einem Potential V_m
 b.) Kompressionskräfte
 c.) Porenbildung, reversibler Abbruch
 d.) große Porenbildung, irreversibler Abbruch

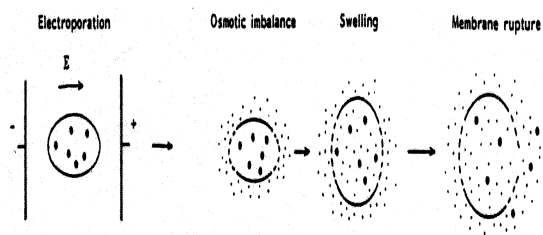


Abbildung 6: Mechanismus der reversiblen und irreversiblen Membranschädigung [19, 23]

3.1.1 Wirksamkeit elektrischer Hochspannungsimpulse

Bisherige Untersuchungen zeigten, dass die Anwendung des Verfahrens zur Behandlung flüssiger und pumpfähiger Lebensmittel geeignet ist. Die Anwendungsmöglichkeit ist begrenzt, da zur Erzeugung hoher elektrischer Feldstärken geringe Elektrodenabstände notwendig sind. [25] Die Wirksamkeit der elektrischen Hochspannungsimpulsbehandlung wurde an verschiedenen Bakterien, Hefen und

Sporen in Pufferlösungen und flüssigen Nahrungsmitteln untersucht. Mit Ausnahme von Endo- und Ascosporen, deren Abtötung nicht erzielt wurde, wurden Keimreduzierungen von größer 10⁴ beobachtet. [21, 26]

Die Abtötungsrate der Mikroorganismen ist von der Höhe der Feldstärke und von der Anzahl der aufgegebenen Impulse abhängig. Ebenfalls Einfluß auf die Wirksamkeit des Verfahrens haben der biologische Zelltyp, der Zelldurchmesser, die Zellform und das Medium. Ein thermischer oder elektrolytischer Abtötungseffekt wurde ausgeschlossen. Versuche zeigten bei Einwirkung eines elektrischen Feldes bis zu 25 kV/cm in Impulsen von 2 bis 20 µs auf eine Suspension von Mikroorganismen Temperaturerhöhungen von maximal 10 °C. [21, 23, 26]

In ist die Überlebensrate von *E. coli* in H-Milch nach unterschiedlichen Behandlungszyklen (ESTERIL- Verfahren) wiedergegeben. Aus der Darstellung geht hervor, dass eine Abtötung der Mikroorganismen erst dann erreicht wird, wenn der Schwellenwert ¹ der Feldstärke überschritten wird. Im aufgeführten Beispiel liegt dieser zwischen 13 und 14 kV/cm. Durch die Höhe der Feldstärke und die Zahl der aufgegebenen Impulse, wird die Abtötungsrate der Zellen bestimmt. Wird der kritische Wert nur wenig überschritten oder sogar unterschritten, so ist die Permeabilität der Zellmembran reversibel und es erfolgt keine Keimabtötung. Die Höhe der anwendbaren Feldstärke wird durch die maximale Durchschlagsfestigkeit des Produktes begrenzt. Die Abtötungskurven müssen experimentell bestimmt werden. [25]

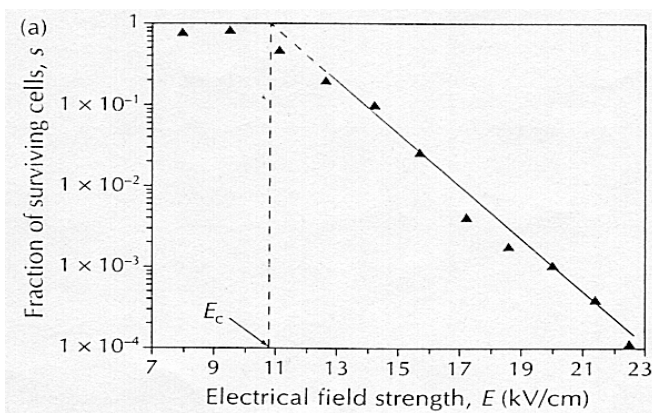


Abbildung 7: Überlebensrate von *E. coli* [25]

Aus den experimentell bestimmten Werten wird der Schwellenwert der Feldstärke (E_c) bzw. der Behandlungszeit (t_c) durch Extrapolation ermittelt. Dieses soll am Beispiel einer Suspension *Pseudomonas fluorescens* in UHT Milch (1,5 % Fett) veranschaulicht werden.

Die Überlebensrate (s) ist a.) in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke (E) (Abbildung 8) und b.) in Abhängigkeit von der Behandlungszeit (t) (Abbildung 9) wiedergegeben. [25]

¹ Schwellenwert: kleinster Wert einer Größe, der als Ursache für eine erkennbare Wirkung (Reaktion) ausreicht. [5]

a) *Bestimmung des Schwellenwertes der elektrischen Feldstärke (E_c) [22]:*

Behandlungsvolumen: 25 ml

Anzahl der aufgegebenen Impulse: 20

elektrische Feldstärke : 7- 22,5 kV/cm

Im aufgeführten Beispiel liegt der Schwellwert der elektrischen Feldstärke bei ca. 10,5 kV/cm.

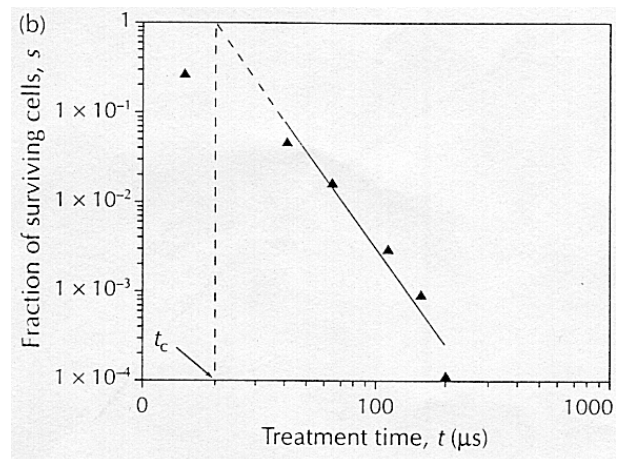


Abbildung 8: Überlebensrate der Mikroorganismen in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke [22]

b) *Bestimmung des Schwellenwertes der Behandlungszeit (t_c) [22]*

Behandlungsvolumen: 25 ml

Anzahl der aufgegebenen Impulse: 1 - 20

elektrische Feldstärke : 22,5 kV/cm

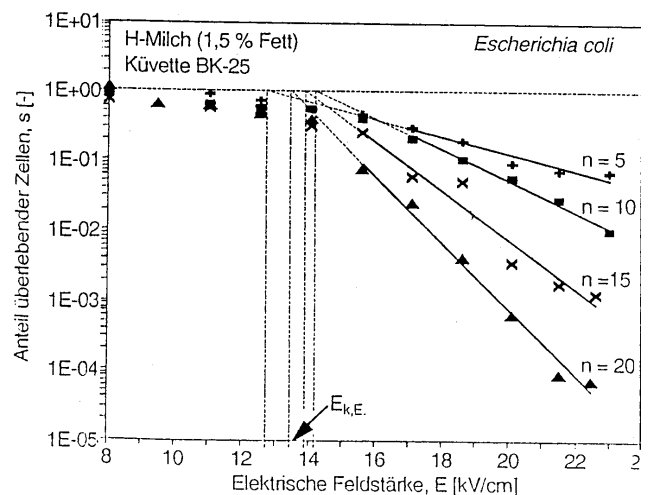


Abbildung 9: Überlebensrate (s) der Mikroorganismen in Abhängigkeit von der Behandlungszeit [22]

Im aufgeführten Beispiel liegt der Schwellwert der Behandlungszeit (t_c) bei ca. 20 µs.

3. Impulsverfahren

Die Behandlungszeit (t) ist ein Produkt aus einer Zeitkonstante des elektrischen Feldimpulses (τ) und der Anzahl (n) induzierter Impulse (n):

Gleichung 3:

$$t = \tau \cdot n$$

c.) Berechnung der Überlebensrate (s) [22]

Die Überlebensrate (s) im elektrisch angelegten Feld läßt sich nach einer empirisch Gleichung von Hülshegger ermitteln: [22]

Gleichung 4

$$s = \left(\frac{t}{t_c} \right)^{\left(\frac{E - E_c}{k} \right)}$$

mit:

- t: Behandlungszeit
- t_c: Schwellwert der Behandlungszeit
- E: elektrische Feldstärke
- E_c: Schwellwert der elektrischen Feldstärke
- k: abhängige Konstante, hängt vom Mikroorganismus und den flüssigem Medium ab

d.) Berechnung der Temperaturerhöhung [23]

Die Temperaturerhöhung während der Behandlung läßt sich nach einer Gleichung von Neumann und Rosenheck (1977) wie folgt berechnen: [23]

Gleichung 5

$$dT = \frac{U^2}{R \cdot C_p \cdot \rho \cdot V} \cdot dt$$

mit:

- U: angelegte Spannung
- dt: Impulsdauer
- R: Widerstand
- V: Behandlungsvolumen
- C_p: spezifische Wärmekapazität der wäßrigen Lösung (C_p= 4,18 J/g*K)
- ρ: Dichte der Lösung (1 g/cm³)

3.1.2 Verfahrensbeschreibung

3.1.2.1 Elcrack Verfahren

Im Elcrack Verfahren werden elektrische Hochspannungsimpulse industriell für die Behandlung von feinzerkleinertem Fisch bzw. Innereien von Schlachthöfen verwendet. Der pumpfähige Brei wird in einer oder mehreren Behandlungskammern Hochspannungsimpulsen ausgesetzt. Die durch die Behandlung geschädigten Zellmembranen tierischer Fettzellen erhöhen während der mechanischen Trennung die Fettwiedergewinnung. Gegenüber herkömmlichen thermischen Prozessen verhindert die Impulsbehandlung die Proteindenaturierung sowie den Abbau der Vitamine. [23]

3.1.2.2 ELSTERIL-Verfahren

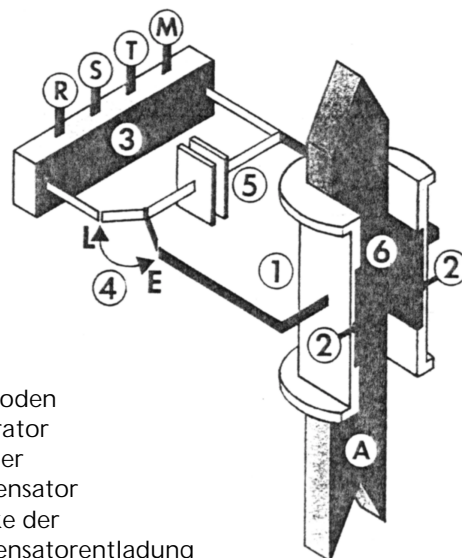
Das ELSTERIL-Verfahren (Abbildung 10) wird in der Literatur [26] wie folgt beschrieben :

Der Produktstrom fließt durch das Rohr (1), an dem außerhalb zwei Kohleelektroden parallel angelegt sind. Die Elektroden sind mit einem Kondensator (5) und mit einem Hochspannungsimpulsgenerator (3) verbunden.

Je nach Schalterstellung (4) erfolgt das Laden (L) bzw. Entladen (E) des Kondensators (5). Der Kondensator entlädt sich innerhalb weniger tausendstel Sekunden über die Elektroden und durch das zu behandelnde Material (6). Als Folge entsteht ein exponentiell abfallender Hochspannungs-Entladungsimpuls. Nach dem Entladen des Kondensators wird der Schalter in Lage (A) gestellt und ein neuer Lade/Entladezyklus beginnt.

Im Anschluß an die Behandlung erfolgt eine Kaltlagerung sowie ein Kalttransport. Hierdurch wird der Wachstum nicht inaktiver Sporen gehemmt. [25]

Nach Literaturangaben [19] ist eine großtechnische Anlage > 500 l/h zur Zeit nicht verfügbar.



- (1) Rohr
- (2) Elektroden
- (3) Generator
- (4) Schalter
- (5) Kondensator
- (6) Strecke der Kondensatorentladung

Abbildung 10: ELSTERIL- Verfahren [26]

Tabelle 3: Elsteril-Verfahren: Technische Angaben

Kondensator Ladung	5 μ F
Kondensator Entladung	5– 15kV
Elektrodenflächen	50 cm ²
Elektrodenabstand	5 oder 12 mm

Kurshals [25] berichtet über mikrobiologische Untersuchungen in Pufferlösungen, H- Milch und Citrussäften. Experimentell bestimmt wurden:

- Escherichia coli (Bakterien)
- Lactobacillus brevis (Milchsäurebakterien)
- Pseudomonas fluorescens- saccharomyces cerevisiae
- Bacillus cereus (Endosporen)
- Byssoschlamys nivea (Ascosporen)

Hierbei wurde ermittelt, dass durch Anwendung des „ELSTERIL Verfahrens“ eine zufriedenstellende Keimabtötung (Pasteurisieren) möglich ist. Zur Abtötung von Bakterien werden dabei mindestens Feldstärken von 20 kV/cm benötigt. Die Abtötung von Hefen, wird schon bei geringeren Feldstärken (< 5 kV/cm) erreicht. Nahezu unversehrt, bleiben Asco- und Endosporen.

Qualitätsuntersuchungen zeigten keine sensorischen und chemischen Veränderungen. Erst hohe Energieeinträge führten zum begrenzten Abbau essentieller Inhaltsstoffe. Milch z. B. zeigte bei hoher Energiezufuhr (> 300 kJ/l) veränderte Lipase und Vitamin C Gehalte. Andere Inhaltsstoffe (Phosphatase, Peroxidase, Vitamin A und Molkenprotein) sowie sensorische Eigenschaften wurden nicht beeinträchtigt. [25, 26]

Schulz [26] berichtet, dass im sauren Medium geringere Feldstärken zur Abtötung von Mikroorganismen notwendig sind. Als Grund wird die Empfindlichkeit der Mikroorganismen bei tiefen pH-Werten aufgeführt. Des weiteren wird durch eine kombinierte Wärme- Elektroimpuls Behandlung (Pasteurisations-temperatur 60 bis 75 °C) die Lagerfähigkeit weiter erhöht.

3.1.1.3 CoolPure Verfahren

Das CoolPulse® Verfahren wurde in den USA für die Konservierung flüssiger Lebensmittel, speziell zur Behandlung von diätetischen Lebensmitteln, Fruchtsäften und Flüssigei patentiert. Das Patent ist in Literatur [19] näher beschrieben.

Die Umsetzung der Patentmethode wurde nach Literaturangaben [19] von Dunn und Pearlman (1987) durchgeführt. Bisher realisiert wurde eine kontinuierliche Versuchsanlage (200 l/h).

Hierbei wird die Erzeugung hoher elektrischer Feldstärken durch eine Apparatur sichergestellt, bestehend aus : i.) zwei 400 k Ω Widerständen, ii.) zwei 50 M Ω Widerständen, iii.) einer Bank mit sechs parallel angebrachten Kondensatoren (je 0,4 μ F), iiiii.) einem Funkenstreckenschalter und einem Kipprelais. [19, 20]

Die Behandlungskammer (Maße 2 cm *10 cm) besitzt zwei rostfreie Stahlelektroden. Eine der Elektroden besitzt

ein Loch, durch das der Produktstrom in die Behandlungskammer fließt und diese füllt. Auf die Behandlungskammer werden hoch intensive elektrische Feldimpulse (20 bis 80 kV/cm) übertragen. Die Dauer der Impulse liegt zwischen 1 bis 10 μ s. [19, 20]

Durch den Behandlungsvorgang wird im Produkt Wärme eingetragen, die über ein Kontrollsystem aufgezeichnet und reguliert wird. Das System enthält Wärmeaustauscher und Temperaturkontrollen zur Regulierung der Produkteingangstemperatur sowie zur Produktkühlung nach der Behandlung. Durch die Kontrolle der Behandlungsparameter, wird eine optimale Abtötung der Mikroorganismen erhalten, ohne Wärmeschädigungen im Produkt hervorzurufen. [20]

Ebenfalls patentiert wurde ein kombiniertes Temperatur/Impuls Verfahren. Gegenüber herkömmlichen Pasteurisationsverfahren wird durch den Einsatz von Hochspannungsimpulsen und Temperatur (Pasteurisationstemperatur: 63 bis 75°C) sowie durch anschließend schnelles Abkühlen (4°C) die Lagerfähigkeit verbessert. [19]

Dunn [19] berichtet, dass durch die Anwendung des Cool Pure® Verfahrens die Möglichkeit besteht, Lebensmittel und Lebensmittelinhaltsstoffe bei niedrigen Temperaturen zu pasteurisieren. Vorteile dieser Anwendung sind:

- verbesserter Geschmack (Aroma)
- verbesserte Farbe- und Ernährungseigenschaften
- verbesserte Proteinfunktionen
- Verringerung der Schädigung von Emulsionen
- Erhöhung der Lagerfähigkeit

und

- bessere Kontrolle der Fermentation.

Von der FDA wurde kein Einwand gegen die Anwendung des Pure Pulse® Verfahrens zur Behandlung von Lebensmitteln erhoben. [20]

3.1.1.4 PEF- Verfahren

Das PEF- Verfahren besteht aus einem Hochspannungsimpulserzeuger und einer Behandlungskammer. Im Impuls Erzeuger wird Netzspannung transformiert und in einem Kondensator gespeichert. Die Kapazität des Kondensators ist in 5 Stufen von 80 nF bis 9,6 μ F einstellbar. Durch die Entladung des Kondensators innerhalb von Mikrosekunden, werden Hochspannungsimpulse erzeugt. Diese werden von der Behandlungskammer in elektrische Feldimpulse umgewandelt und über parallel an der Behandlungskammer angebrachte Elektroden auf das Lebensmittel übertragen. In der Literatur [20] sind zwei Behandlungskammern näher beschrieben (Tabelle 4).

Die Zusammensetzung des kontinuierlichen Prozesses ist in Abbildung 11 schematisch dargestellt.

Der Produktstrom wird über eine Pumpe (Pump) geregelt und der Behandlungskammer (Treatment Chamber) zugeführt. Die benötigten Hochspannungsimpulse (High Voltage Pulser) werden im Hochspannungsimpulsgenerator (ein sich ladender bzw. entladener Kondensator) erzeugt und über parallel an der Behandlungskammer angebrachte Elek-

3. Impulsverfahren

troden auf das Lebensmittel übertragen. Hierbei wird die Temperatur der Elektroden kontrolliert und über einem Wärmeaustauscher geregelt.

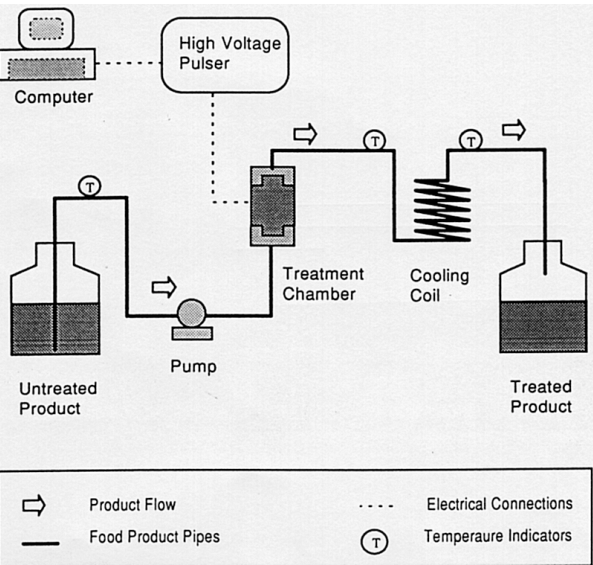


Abbildung 11: Schematische Darstellung einer kontinuierlichen HPEF- Behandlung [20]

Die eingesetzten elektrischen Parameter (Spannung/Stromwellenform) werden über ein digitales System mit Computer

aufgezeichnet und gesteuert. Hierdurch lassen sich unterschiedliche Behandlungseffekte realisieren. [20] Das in Abbildung 11 dargestellte Verfahren wurde im Labormaßstab zur Pasteurisation nachfolgender Produkte entwickelt : [20]

- Apfelsaft aus Konzentrat
- Apfelsaft aus Frischobst
- rohe Magermilch
- Vollei
- Erbsensuppe.

Je nach Produkt wurden unterschiedliche Behandlungszyklen gewählt (Tabelle 5). Überprüft wurden chemische, physikalische und sensorische Eigenschaften. Die im PEF-Verfahren hergestellten Lebensmittel zeigten im Vergleich zu herkömmlich hergestellten Produkten keine signifikanten Unterschiede.

Tabelle 4: Technischen Angaben der statischen und kontinuierlichen Behandlungskammer im Vergleich

	statische	kontinuierliche
Elektrodenabstände	0,5 oder 1,0 cm	0,5 cm
Behandlungsvolumen	12,5 oder 25 ml	8 cm3
Durchflußgeschwindigkeit		100 bis 500 ml/min

Tabelle 5: Behandlungsparameter für verschiedene Lebensmittel [20]

Lebensmittel / Prozeßparameter	Apfelsaft aus Konzentrat	Apfelsaft aus Frischobst	rohe Magermilch	Vollei	Erbsensuppe
elektr. Feldimpulse	50	50	40	35	35
Impulsdauer (µs)	2	2	2	2	2
Tein (°C)	8,5 ± 1,5	8,5 ± 1,5	10,0 ± 1,5	8,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
Tmax (°C)	45 ± 5	45 ± 5	50 ± 4	45 ± 5	53 ± 2
TLager (°C)	22 - 25	4 - 6	4 - 6	4 - 6	4 - 6
Lagerfähigkeit (d)	28	21	14	28	10

Tein : Anfangstemperatur
Tmax : maximale Behandlungstemperatur
TLager: Lagerungstemperatur

3.2 Lichtimpulsverfahren

Analog zum Elektroimpulsverfahren wird beim Lichtimpulsverfahren Energie in Form von Pulsen sehr hoher Intensität auf das Lebensmittel zur Abtötung von Mikroorganismen übertragen. Hierbei wird eine Oberflächenentkeimung im Produkt erzielt. Eine Tiefenwirkung ist aufgrund der

geringen Eindringtiefe der Lichtimpulse im Produkt nicht möglich. Derzeit wird kontinuierliches UV- Licht zur Entkeimung von Verpackungsmaterialien und bestimmten Lebensmittelgruppen eingesetzt. Neuartig ist der Einsatz von UV- Lichtimpulsen. Hier laufen bereits erste Tests, von der Fa. Pure Pulse Technologies. Das resultierende Verfahren wird als PureBright® Verfahren („reines helles Verfahren“) bezeichnet. [19; 27]

3.2.1 Grundlagen

Im PureBright® Verfahren werden Lichtimpulse zur Oberflächenentkeimung eingesetzt. Zur Erzeugung hoher elektrischer Impulse wird elektrische Energie, analog dem elektrischen Impulsverfahren, im Kondensator gespeichert. Durch die schlagartige Entladung des Kondensators werden hohe elektrische Feldimpulse erzeugt und zur Ionisierung einer Xenon Lampe eingesetzt. Das daraus erhaltene Emissionsspektrum ähnelt dem der Sonne und setzt sich wie folgt zusammen:

Zusammensetzung der Lichtstrahlen	Wellenlänge [nm]
25 % UV Licht	200 bis 300 nm (fern UV)
	300 bis 380 nm (nahes UV)
45 % sichtbares Licht	380 bis 780 nm
30 % infrarotes Licht	780 bis 1100 nm

Gegenüber dem auf der Erdoberfläche eintreffenden Sonnenlicht, ist die Intensität der Strahlung 20.000-mal höher. Das Emissionsspektrum enthält UV-Wellenlängen, die aus dem Sonnenlicht durch die Erdatmosphäre gefiltert werden. [28]

Innerhalb weniger Sekunden wirken 1 bis 10 solcher Entladungsblitz (Impulsdauer ca. 200 bis 300 µs) auf die Oberfläche ein. Zur Abtötung der Mikroorganismen reicht ein Entladungsblitz aus, so dass hohe Durchsatzmengen möglich sind. [19]

Während der Behandlung erfolgt eine geringe Wärmeentwicklung. Versuche zeigten, dass Energien von 1,5 J/cm² zur Inaktivierung von Staphylococcus aureus und Energien von 4 J/cm² zur Abtötung von Bacillus subtilis benötigt werden². Die Abtötungsrate lag in beiden Fällen bei größer 107/cm²³.

Gramnegative Bakterien

Grampositive Bakterien

Hefen

Bakteriensporen

Pilzkonidien

Viren

*Zunahme der
Strahlenresistenz*

Der Entkeimungseffekt der Lichtimpulse, wird auf das breite UV-Spektrum (siehe oben), die hohe Lichtintensität und die kurze Behandlungsdauer zurückgeführt. [28]

Bei der herkömmlichen UV-Strahlung, erzeugt in Niederdruck Quecksilberlampen, wird hauptsächlich unsichtbares UV-Licht der Hg-Resonanzlinie 253,7 nm mit kleinem Anteil der Wellenlänge 185 nm emittiert. [5]

Der wirksamste Wellenbereich der UV- Strahlung liegt nach Literaturangaben [7] bei 250 bis 260 nm, was sich mit dem Absorptionsmaximum der Nucleinsäure deckt. Hierbei

² Die Wärmemenge, die erforderlich ist um 1 g bzw. 1 mol eines einatomigen Elementes um 1 K zu erhöhen, wird als spezifische Wärmemenge bezeichnet. Die spezifische Wärmemenge für Wasser beträgt 4,1855 J/g*K. [5]

³ auch beschrieben als 7 log/cm². [24]

nimmt die Strahlenresistenz der Mikroorganismen wie folgt zu: [7]

3.2.2 Wirksamkeit

Im Vergleich zur herkömmlichen UV-Strahlung, erzeugt aus einer Niederdruck Quecksilberlampe, zeigen die gepulsten UV- Strahlen des PureBright® Verfahren einen besseren Abtötungseffekt. Dieses ist in Abbildung 12 am Beispiel der Abtötung von A. niger Sporen auf Verpackungsmaterial veranschaulicht.

Hier ist die logarithmische Abtötungsrate (log s) in Abhängigkeit von der Behandlungszeit (t) graphisch wiedergegeben.

Die Anwendung herkömmlicher UV-Strahlen, zeigt einen für Mikroorganismen, Pilz- und Bakteriensporen üblichen Verlauf. In Abhängigkeit von der jeweiligen Art, ergibt sich eine zweiphasige Abtötungskurve mit anfangs hoher Effizienz. Nach einer Reduzierung von 3 - 5 Logarithmeneinheiten wird dagegen nur noch eine geringe Abtötung bei hoher Behandlungszeit erhalten.

Im Gegensatz dazu, werden durch die Anwendung von UV-Lichtimpulse hohe Abtötungsraten bei geringen Behandlungszeiten erzielt. Im Beispiel werden A. Niger Sporen um bis zu 7 Logarithmeneinheiten, reduziert. [28]

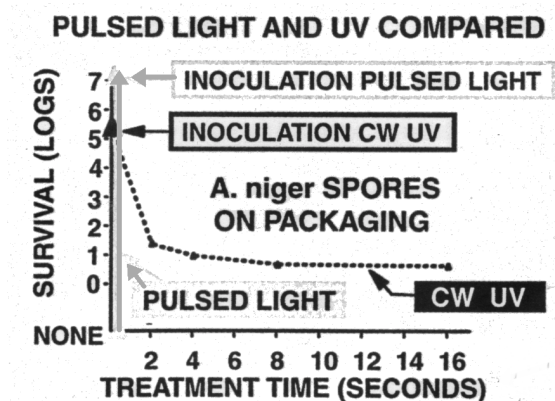


Abbildung 12: Vergleich der Abtötungsrate gepulster und herkömmlicher UV- Strahlung [28]

3.2.3 Anwendungsbereich

Das PureBright® Verfahren eignet sich u. a. zur Oberflächenentkeimung von Verpackungsmaterial sowie zur Wasser- und Luftreinigung. Darüber hinaus ist es zur Entkeimung von verpackten und unverpackten Lebensmitteln einsetzbar. Bei verpackten Lebensmitteln müssen lichtdurchlässige Verpackungsmittel eingesetzt werden. Die Wirksamkeit des Verfahrens ist bei der direkten Lebensmittelbehandlung geringer. Gründe hierfür sind die gewöhnlich undurchsichtigen und ungleichmäßigen Oberflächen der Lebensmittel. [19] Dennoch wird von erfolgreichen Entkeimungsversuchen berichtet. Nach Literaturangaben [19] eignet sich das

3. Impulsverfahren

„PureBright Verfahrens“ zur äußerlichen Entkeimung von: a.) frischen Früchten und Gemüse, b.) Backwaren, c.) Fleisch und Fleischerzeugnissen, d.) Geflügel und Fisch, e.) Eiern, f.) bestimmten Flüssigkeiten sowie frei fließenden Partikeln. Die im Pure Pulse® Verfahren behandelten Lebensmittel zeigten gegenüber herkömmlich behandelten Lebensmitteln verringerte Keimzahlen und verbesserte Lagerzeiten bei unverändertem Nährstoffgehalt (Abbildung 10). Bei bestimmten Früchte- und Gemüseprodukten wurde darüber

hinaus eine Hemmung der enzymatischen Aktivität beobachtet.

Die Selektivität der Lichtimpulse ist lebensmittelspezifisch. Lichtimpulsbehandlungen, die große Abtötungsraten bei Verpackungen oder einfachen Oberflächen erzielen, werden bei komplexeren Oberflächen wie z. B. bei Fleischwaren nur geringere Reduzierungen von 1 bis 3 Logarithmeneinheiten erreichen. [19, 28]

Tabelle 6: Übersicht über impulsbehandelte Lebensmittel [19, 28]

Quelle	Produkt	Versuchs- und Lagerbedingung	Ergebnis
[28]	Backwaren	1.) PE verpackte Brothälften bei Raumtemperatur gelagert	herkömmliche: 5-7 Tagen: Schimmelkolonien > 11 Tage: stark verschimmelt
			Impulsbehandelt: > 11Tage: keine Schimmelbildung
	Meerestiere	2.) Backwaren einschließlich Brotstangen, Schokoladen Teekuchen, Pizza, Tortillas, Hefekringel	ähnliche Ergebnisse
		Schrimps wurden 7d kalt gelagert	<i>Impuls behandelte:</i> eßbar <i>unbehandelte:</i> nicht eßbar (mikrobiologischen Abbau, Verfärbungen, Geschmacksveränderungen)
[19]	Fleischwaren	a.) Hähnchenflügel mit Salmonellen versetzt (ca. 5 log/cm ²)	<i>Impulsbehandlung:</i> Abnahme von 2 log /cm ²
		b.) Frankfurter Würstchen versetzt mit <i>Listeria innocua</i> (ca. 3 - 5 log/ Würstchen)	<i>Impulsbehandlung:</i> Abnahme von ca. 2 log Nährstoffanalysen (Protein, Riboflavin, Nitrosamin, Benzpyren, Vitamin C) zeigten keine Unterschiede zu unbehandelten
	Obst und Gemüse	Kaltkonservierung von Tomaten, Pflaumen, Erbsen, Himbeeren und Erdbeeren	<i>Impulsbehandelte:</i> 36 Tage

4 Elektrothermische Konservierungsmethoden

Der Einsatz elektrothermischer Energie zur Nahrungskonservierung von flüssigen Nahrungsmitteln wurde vor mehr als 100 Jahren patentiert. Bereits im Zeitraum von 1911 bis 1920 wurden von Beatty und Lewis systematische Untersuchungen durchgeführt, Milch im Durchfluß durch direkten Stromdurchgang zu pasteurisieren. Auf der Basis dieser Untersuchungen wurden in der Folgezeit parallel zwei unterschiedliche konduktive Systeme bis hin zum industriellen Einsatz weiterentwickelt. Hierzu gehören der *konduktive Längsfelderhitzer*, bei dem der Strom parallel zur Strömungsrichtung des zu erwärmenden Gutes fließt und der *konduktive Quersfelderhitzer*, bei dem der Strom senkrecht zur Strömungsrichtung des zu erwärmenden Gutes fließt.

Trotz vielversprechender Anfänge und zahlreicher Weiterentwicklungen, konnten sich diese Verfahren damals nicht durchsetzen und wichen den wirtschaftlich überlegenen Platten- und Röhrenwärmetauschern sowie den um 1950 entwickelten UHT-Verfahren⁴. [29]

Diese thermischen Verfahren ermöglichen auch heute noch eine preisgünstige Lebensmittelverarbeitung. Vor allem Lebensmittel niedriger und mittlerer Viskosität können damit kontinuierlich in großen Mengen hergestellt werden. Nicht anwendbar sind diese Verfahren zur Verarbeitung höherviskoser Lebensmittel und flüssiger Lebensmittel mit stückigem Anteil. Diese Produkte werden meist im Autoklaven unter hoher Wärmebelastung haltbar gemacht. Um auch hier eine produktschonendere und wirtschaftliche Behandlung vorzunehmen, wird die Anwendung neuer Technologien untersucht. [30]

Neben der Anwendung von Hochdruck und Impulsverfahren, werden derzeit „elektrothermische Verfahren“ getestet.

4.1 Grundlagen

Grundlegend lassen sich zwei Klassen von Erwärmungstechniken unterscheiden [17]:

- die *mittelbare* Erwärmung durch Übertragung der Wärme von außen auf das Erwärmungsgut und
- die *unmittelbare* Erwärmung durch Erzeugung der Wärme im Inneren des Erwärmungsgutes.

Die traditionelle thermische Haltbarmachung von Nahrungsmitteln erfolgt fast ausschließlich durch mittelbare Erwärmung. Hierfür stehen je nach Art und Struktur des zu erhitzenden Gutes unterschiedliche Verfahrenstechniken, wie die UHT-Verfahren, Autoklaven und indirekte Wärmetauscher zur Verfügung.

Ein Beispiel für die unmittelbare Erwärmung sind die elektrothermischen Verfahren. Durch den Einsatz von

elektromagnetischer Energie wird im Inneren der zu behandelnden Lebensmittel Wärme erzeugt. Die dabei entstehende Hitze wirkt keimtötend, ähnlich wie bei einer herkömmlichen Hitzesterilisation.

Zu den elektrothermischen Verfahren zählen die ohmsche oder konduktive Erhitzung, die induktive Erhitzung, die Mikrowellenerwärmung und die Hochfrequenzerhitzung (HF-Erhitzung). Die HF-Erhitzung wird in der hier vorliegenden Literatur nur am Rande berücksichtigt. Daher wird im folgenden nur auf die konduktive, induktive und dielektrische Erhitzung eingegangen.

Das Prinzip der Erwärmung im elektrischen Feld beschreibt Literatur^[31]: Materie wird im elektrischen Feld polarisiert, d. h. unter der Wirkung der *Coulomb Kraft* werden positive und negative Ladungen auseinandergezerrt. Ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, mit Ladungsverschiebung auf die Coulomb Kraft zu reagieren, ist die sog. Polarisierbarkeit. In der Wechselstromtechnik wird die Polarisierbarkeit meist als relative Dielektrizitätskonstante oder Dielektrizitätszahl ausgedrückt.

In Wechselfeldern findet eine ständige Umpolarisierung statt, bei der die Ladung hin und her bewegt wird. Diese Ladungsbewegung ist mit Verlusten verbunden, auf denen die erwärmende Wirkung elektrischer Wechselfelder beruhen. Der Anteil der in Wärme umgesetzten Energie an der elektrischen Feldenergie wird durch den dielektrischen Verlustfaktor quantifiziert.

Die dielektrischen Eigenschaften der Lebensmittel, sind in erster Linie von ihrer stofflichen Zusammensetzung, ihrem Wasser- und Salzgehalt abhängig. Weiterer Einflußgrößen sind Temperatur, Struktur bzw. Textur, Luftgehalt und die Frequenz des elektrischen Wechselfeldes.

Wasser ist das einfachste lebensmittelrelevante Stoffsystem. Im elektrischen Wechselfeld werden die Wasserdipole zu Drehschwingungen angeregt, die bei Annäherung der Anregungsfrequenz an die Eigenfrequenz der Wassermoleküle im Mikrowellenbereich zu beträchtlichen Verlusten infolge molekularer Stöße führen. Auf diesen Polarisationsverlust beruht zu einem großen Teil der Erwärmungseffekt der *Mikrowelle*. Ein weiterer bedeutender Anteil wird durch Ionenwanderung erzielt. Gleiche Quellen werden bei der *HF-Erwärmung* ausgenutzt.

Der Verlustfaktor im Mikrowellen- und Hochfrequenzbereich ist in Abbildung 13 am Beispiel von entionisiertem Wasser gegenübergestellt. Den Einfluß freier Ionen auf das dielektrische Verhalten von Wasser wird gezeigt am Beispiel einer 0,05 %igen NaCl-Lösung. Während der Verlustfaktor für Mikrowellen im zweiten Beispiel nur gering ist, zeigt dieser im HF-Bereich eine Zunahme um mehrere Größenordnungen.

⁴ UHT: Ultrahocherhitzung

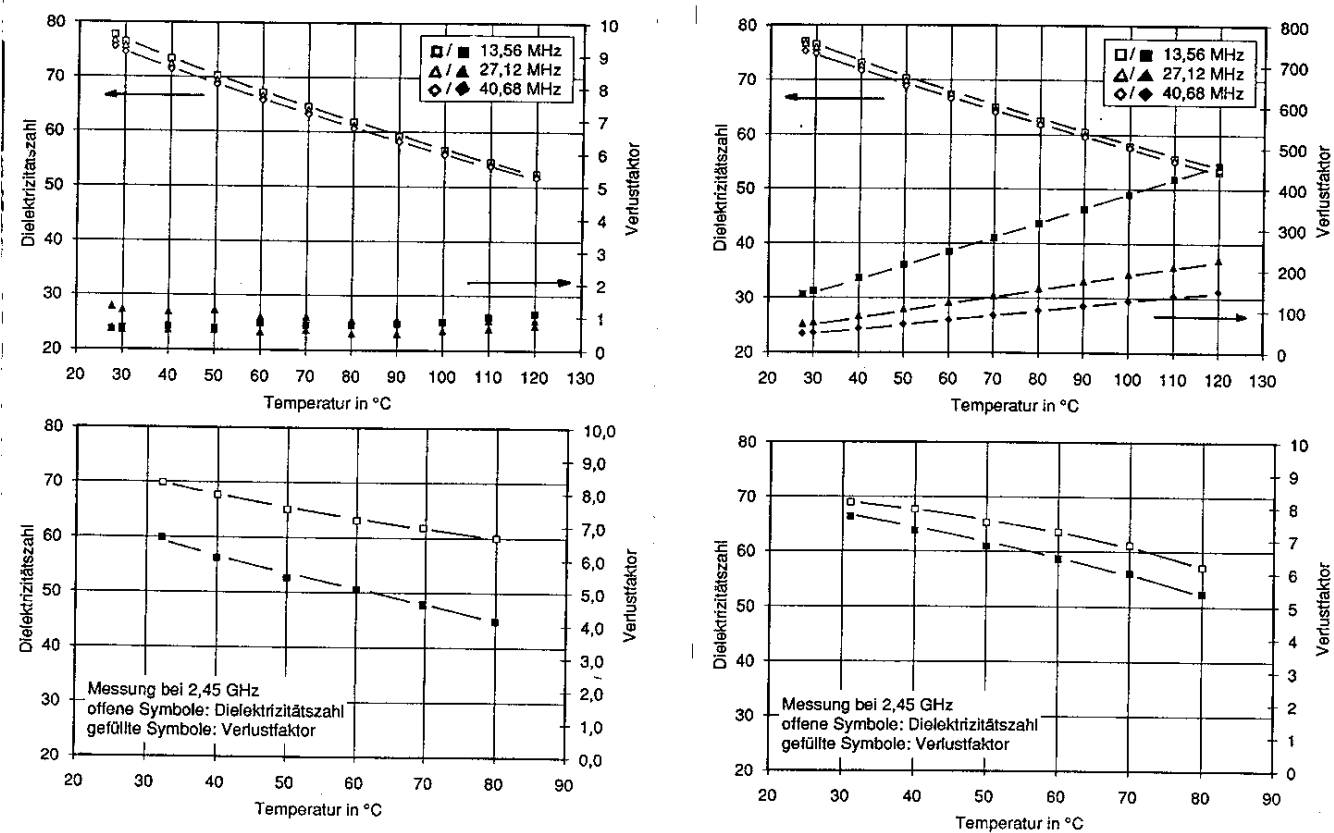


Abbildung 13: (linke Abbildung) Dielektrischen Eigenschaften von entionisiertem Wasser [29], oberes Bild: Hochfrequenz, unteres Bild: Mikrowelle; (rechte Abbildung) Dielektrische Eigenschaften einer 0,05% igen NaCl Lösung, oberes Bild: Hochfrequenz, unteres Bild: Mikrowelle

Bei der *Ohmschen Erwärmung* und bei der *induktiven Erwärmung* ist die elektrische Leitfähigkeit allein für das Erwärmen verantwortlich.

Elektrische Leiter lassen sich allgemein in zwei Gruppen eingeteilt, in Elektronenleiter und Ionenleiter. Elektronenleiter, auch Leiter 1. Ordnung genannt, leiten den elektrischen Strom durch freie oder locker gebundene Elektronen. Bei Ionenleitern (Leiter 2. Ordnung) erfolgt die Stromleitung durch Ionenverschiebung. [5, 17]

Nahrungsmittel gehören zu den *Ionenleitern*. Dieser Leitungsmechanismus liegt bei allen Elektrolyten vor, d. h. bei allen in wässrigen Medium gelösten Salzen, Säuren und Basen. Bringt man Stoffe, die auf Ionenbindung beruhen in eine wässrige Lösung, so zerfällt das Ionengitter auf Grund der Wirkung des Lösungsmittels in positiv und negativ geladene Ionen. Dieser Vorgang, den man als „elektrolytische Dissoziation“ bezeichnet, ist die Voraussetzung für die elektrische Leitfähigkeit einer Lösung.

Die Ionen sind innerhalb des Elektrolyten beweglich und können somit im elektrischen Feld Ladung transportieren. Die alternierende Ionenwanderung führt über molekulare Reibung zur Entstehung Joule'scher Wärme. Dabei nimmt die Ionenbeweglichkeit und somit die elektrische Leitfähigkeit mit steigender Temperatur zu. [5; 32]

Reitler (1990), zitiert in [33], hat die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit für einige Lebensmittel untersucht (Abbildung 14). Hierbei zeigten flüssige Nahrungsmittel, wie z. B. Gemüsesaft, Tomaten und Sauerkrautsaft die mit Abstand höchste Leitfähigkeit.

Bei Milch wurden in Abhängigkeit vom Fettgehalt unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten ermittelt. Je höher der Fettgehalt umso geringer die elektrische Leitfähigkeit.

Obst und Gemüse sind im Rohzustand äußerst schlechte elektrische Leiter. Abbildung 15 zeigt dies am Beispiel der Banane. Bei der pürierten Banane liegt ein linearer Anstieg zwischen Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit vor. Das

stückige Gut dagegen, zeigt im unteren Temperaturbereich eine sehr geringe Leitfähigkeit. Erst durch den thermischen Aufschluß der Zellmembran (Temperatur ca. 60 bis 90 °C) tragen auch die Ionen der intrazellulären Flüssigkeit zum Stofftransport bei und führen zu einem fast sprunghaften Anstieg der Leitfähigkeit. Bei höherer Temperatur, sind die Zellwände größtenteils zerstört. Hier zeigt die Leitfähigkeit die von wässrigen Elektrolyten bekannte Linearität.

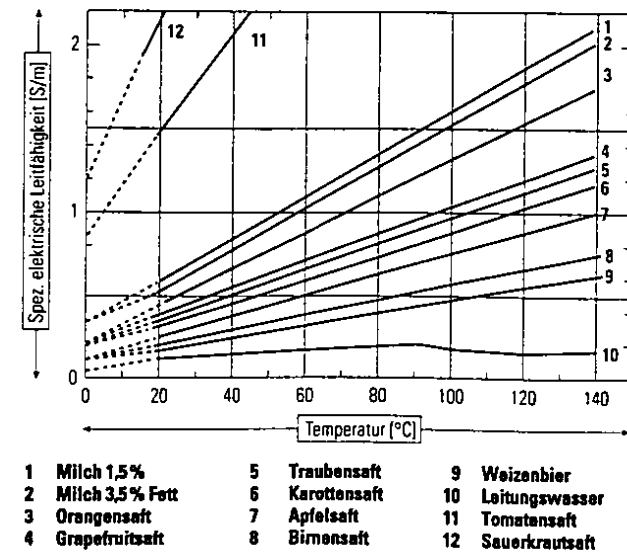


Abbildung 14: Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit [31]

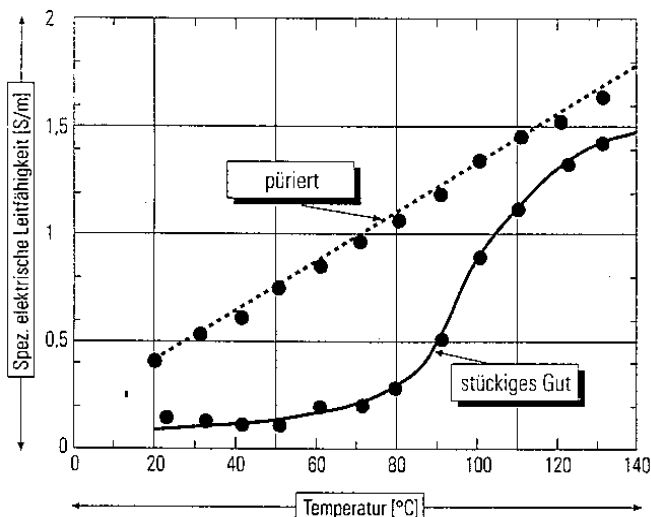


Abbildung 15: Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit zwischen pürierte und stückige Banane [31]

4.2 Verfahren

Bevor die Verfahren im einzelnen beschrieben werden, wird ein Vergleich der Erhitzungsarten (konduktiv, induktiv und dielektrisch) in Tabelle 7 aufgeführt. Hieraus ist zu erkennen, dass die Verfahren eine unterschiedliche Eindringtiefe erzielen. D. h., die elektromagnetischen Wellen können nur bis zu einer bestimmten Tiefe in das Gargut eindringen; darüber hinaus findet die Erwärmung durch Wärmeleitung statt.

Die geringste Eindringtiefe besitzen Mikrowellen. Daher besitzen Mikrowellen gegenüber der ohmschen und konduktiven Erhitzung den Nachteil, dass es oft zu einer ungleichmäßigen Erwärmung im Produkt kommt. Weitere Gründe für eine ungleichmäßige Erwärmung mit Mikrowellen sind [40]:

- *inhomogene Feldverteilung* im Garraum eines Mikrowellengerätes (bedingt durch Reflexion der elektromagnetischen Wellen an der Garraumwand oder am Behältnis)
- *inhomogene chemische Zusammensetzung* und physikalische Struktur eines Lebensmittels: Fettreiche Zonen werden langsamer erwärmt als wasserreiche Zonen
- *Formen und Abmessungen* eines Gutes oder Behälters: Ausgeprägte Ränder und Ecken werden häufig schneller erhitzt als glatte oder gewölbte Oberflächen.

Tabelle 7: Vergleich elektrothermischer Verfahren

	konduktive Erhitzung	induktive Erwärmung	dielektrische Erwärmung (Mikrowelle)
Betriebsfrequenz	50 bzw. 60 Hz	50 - 300 Hz	2450 MHz 915 MHz (Auftauverfahren)
Eindringtiefe der elektromagnetischen Strahlung	> 100 m	0,3 - 3 m	0,2- 5 cm
Erwärmung durch:	Ionenwanderung	Ionenwanderung	Anregung von Dipolen und Ionenwanderung

4.2.1 Ohmsche Erhitzung

Die Ohmsche Erhitzung ist auf viskose Lebensmittel und Lebensmittel mit einem stückigen Anteil bis zu 25 mm Größe anwendbar. Da das Erhitzungsverfahren von der Anzahl der frei verfügbaren Ionen im Lebensmittel abhängt, ist es notwendig, dass die zu behandelnden Produkte in genügend Saft oder Soße schwimmen. Anwendungsbeispiele sind Obst

4. Elektrothermische Konservierungsmethoden

und Gemüse in Stücken, Fertiggerichte, Füllmassen, Suppen und sauer eingelegtes Gemüse.

In Fruchtstücken oder ganzen Früchten bremsst die unzerstörte Gewebestruktur die Ionenwanderung. Die Fruchtstücke werden daher von der umgebenden wärmenden Wasserphase langsam erwärmt. Ungeeignet ist das Verfahren für nicht ionisierende Medien wie Fette, Öle und Alkohole. [30]

Bei der Ohmschen Erhitzung wird das Lebensmittel direkt als Heizwiderstand benutzt. Der Strom wird den Erwärmungsgut über Elektroden zugeführt.

Der Aufbau der Ohmschen Erhitzung wird in der Literatur [34, 35, 36, 37] wie folgt beschrieben: Das Verfahren besteht aus einer Erwärmungssäule, mit vier in PTFE⁵-Blocks eingespannten Elektroden (Abbildung 16). Die Säule ist so gestaltet, dass jede Heizstufe den gleichen elektrischen Widerstand aufweist. Da die elektrische Leitfähigkeit mit steigender Temperatur zunimmt, werden die Verbindungsrohre zur Produktaustrittsseite immer länger.

Der Produktstrom wird von unten nach oben gefördert. Zwischen den Elektroden werden Spannungen bis 3,5 kV angelegt, so dass ein Strom von 10 bis 12 A durch die Nahrungsmittel geleitet wird.

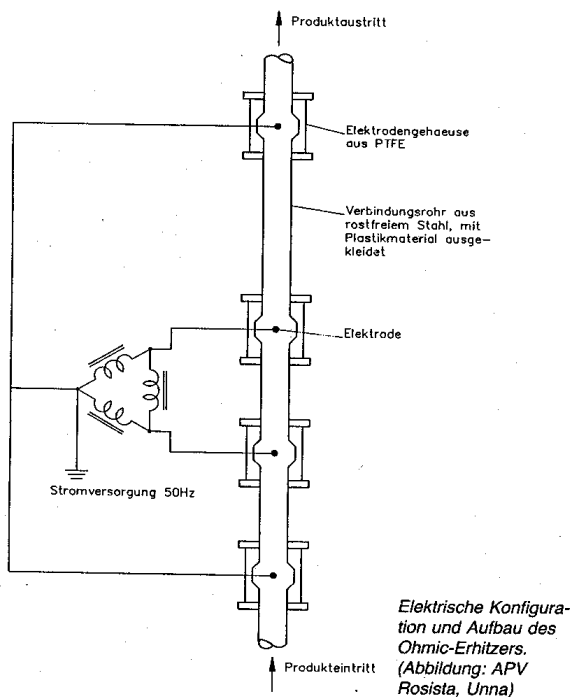


Abbildung 16: Aufbau der Ohmschen Erhitzung [35]

⁵ PTFE: Polytetrafluorethylen

4.2.2 Induktive Erhitzung

Wie bei der konduktiven Erhitzung (Ohmsche Erhitzung) wird auch bei der induktiven durch Stromfluß, Ionenwanderung und innere Reibung Wärme im Produkt erzeugt. [30]

Im Gegensatz zur Ohmschen Erhitzung wird die elektrische Energie kontaktlos, durch Induktion auf den Produktstrom übertragen.

Das Prinzip der Induktionswärme läßt sich wie folgt verdeutlichen: Das elektrisch leitfähige Produkt wird in nichtleitenden Rohren (Glas oder Kunststoff) in zwei Teilwicklungen um einen Eisenkern herumgeführt /

Abbildung 17).

Über die Primärwicklung wird in jeder Sekundärwicklung eine Wechselfspannung zwischen 50 bis 300 kHz eingespeist. Da beide Teilwicklungen elektrisch in Reihe geschaltet sind, kann sich ein geschlossener Stromfluß durch das Erwärmungsgut einstellen.

Die induktive Erhitzung wird derzeit in einer UHT-Anlage getestet. Die Erwärmung des Gutes wird dabei in zwei Schritten durchgeführt. Zuerst wird das Produkt im Wärmetauscher vorgewärmt und anschließend induktiv auf die gewünschte Endtemperatur gebracht. Der Vorteil der induktiven Erhitzung liegt in der kontaktlosen Wärmeübertragung. [38, 39]

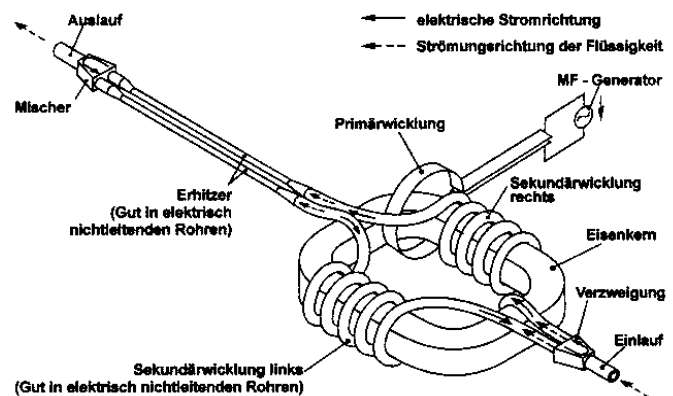


Abbildung 17: Schematische Darstellung der induktiven Erwärmung [38, 39]

4.2.3 Mikrowellenerwärmung

Die Mikrowellenerwärmung ist wohl das bekannteste „elektrothermische Verfahren“. In der Lebensmitteltechnologie wird der Einsatz von Mikrowellen in zahlreichen Gebieten erforscht. Anwendungsbeispiele sind u. a. das Auftauen, Temperieren, Trocknen, Backen, Pasteurisieren und die Enzyminaktivierung.

Die Wärmeerzeugung durch Mikrowellen basiert hauptsächlich auf Dipolanregung und Ionenwanderung, wobei vor allem durch die Ausrichtung der Dipole (Moleküle mit polarer Struktur, wie z. B. Wasser, Fett, Aminosäuren) im

elektromagnetischen Wechselfeld Reibungswärme entsteht. [40, 41]

Anwendungsbeispiele für den Einsatz von Mikrowellen [41]:

- Auftauen:

Mikrowellenanlagen arbeiten in der Regel bei einer Frequenz von 2450 MHz. Für das Auftauen von Lebensmitteln werden Anlagen mit einer Frequenz von 915 MHz eingesetzt, da die Eindringtiefe bei dieser Frequenz größer ist.

Mikrowellen sind zum vollständigen Produktaufthauen nicht geeignet. Deshalb sollten tiefgefrorene Produkte wenn möglich nur temperiert werden, d. h. der Auftau-prozeß wird bei -4°C bis -2°C abgeschlossen.

Probleme die beim vollständigen Auftauen auftreten können sind Überhitzungserscheinungen an der Oberfläche. Dies wird in der Literatur [41] wie folgt begründet:

Die Wärmeerzeugung ist abhängig von der Frequenz, der elektrischen Feldstärke sowie der Dielektrizitätskonstante des zu erwärmenden Produktes. Die Dielektrizitätskonstante verändert sich mit der Temperatur. So ist z. B. für die Erhöhung der Produkttemperatur von -3°C auf -2°C nahezu die doppelte Energiemenge erforderlich, wie für eine Erwärmung von -4°C auf -3°C .

Ab etwa -1°C nimmt die für weitere Temperaturerhöhung pro Grad benötigte Energie wieder stark ab. Ein Großteil der Mikrowellenenergie wird in der oberen Produktschicht absorbiert, diese fungiert sozusagen als Isolator, es kommt zu Überhitzungserscheinungen an der Oberfläche.

Um den Überhitzungen bei vollständigen Auftauen entgegen zu wirken, wurden Kombinationsverfahren entwickelt. Vorgeschlagen wird, die Produktoberfläche parallel zur Mikrowellenbehandlung zu kühlen oder das Auftauen bei reduziertem Druck durchzuführen. Außerdem ist beim Auftauen mit Mikrowellen darauf zu beachten, dass:

- die verwendete Produkte nicht vorher schon bei Umgebungstemperatur gelagert werden, da die auf- oder angetauten oberen Schichten den größten Teil der zugeführten Energie absorbieren und so die Oberfläche zu heiß, der Kern jedoch nicht einmal mehr aufgetaut wird
- die aufzutauenden Produkte gleiche Form und Größe besitzen, d. h. nach Möglichkeit nur einheitliche Ware gleichzeitig behandeln.

Gegenüber konventioneller Auftaumethoden bietet das Temperieren bzw. Auftauen mit Mikrowellenenergie nachfolgende Vorteile:

- kurze Behandlungszeit
- keine bis geringe Gewichtsverluste
- bei Fleisch: Saffthaltevermögen und Säuerungsgrad gegenüber dem Zustand vor dem Einfrieren nicht verändert.
- kein Bakterienwachstum
- Flexibilität in der Produktion; der Temperiervorgang kann problemlos in den Gesamtprozeß eingebaut werden Raumeinsparung; der Platzbedarf wird mit

$\frac{1}{10}$ desjenigen konventioneller Methoden angegeben Arbeitseinsparungen.

- Trocknen

Der Trocknungsprozeß wird in der Regel bei einer Frequenz von 2450 MHz in einem kombinierten Verfahren durchgeführt. Hierbei wird z. B. parallel zur Mikrowellentrocknung heiße (oder auch kalte) Luft über das Produkt geleitet. Ein weiteres Verfahren ist die Kombination mit Infrarot-Strahlung.

Die Trocknung von Lebensmitteln mit Mikrowellenenergie, wird in zahlreichen Bereichen getestet. Zu nennen sind u. a. die Herstellung von Teigwaren, Herstellung von Frucht- und Instantpulver, Fleisch- und Getreideprodukte. Einen umfangreichen Überblick über bisher durchgeführte Arbeiten liefert Literatur [41].

5. Zusammenfassung

Zur Verlängerung der Lagerfähigkeit von Lebensmitteln, werden in der Industrie verschiedene zum Teil kombinierte Verfahren eingesetzt. Zu nennen sind Temperaturveränderungen, Feuchtigkeitsentzug, Einsatz von Konservierungsmitteln, Senkung des pH- Wertes, Verminderung der Lufteinwirkung oder die Anwendung von UV- Strahlen.

Darüber hinaus werden derzeit eine Reihe neuer Konservierungsmethoden zur Anwendung auf Lebensmitteln getestet. Hierzu zählen die Hochdruckbehandlung, die Impulsbehandlung und der Einsatz elektromagnetischer Strahlen.

In einer Literaturrecherche, wurde der Frage nachgegangen, wie diese Verfahren aufgebaut sind und welche Vorteile diese neuen Konservierungsmethoden bieten.

Für die Anwendung von *Hochdruck* werden derzeit zwei Verfahren, die Behandlung mit CO₂ und die Anwendung hoher hydrostatischer Drücke beschrieben. Beide Verfahren sind auf feste und flüssige Lebensmittel anwendbar.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet der Hochdruckbehandlung ist das Pasteurisieren von Lebensmitteln. Gegenüber den herkömmlichen Temperaturverfahren bietet es entscheidende Vorteile. Zum einen erfolgt das Pasteurisieren bei niedrigen Temperaturen was zu Energieeinsparungen führt, zum anderen behalten hochdruckbehandelte Lebensmittel ihre natürlichen sensorischen Eigenschaften wie Farbe, Geschmack und Aussehen.

Neben den Pasteurisieren wird die Hochdruckbehandlung auch für weitere Anwendungen im Lebensmittelbereich getestet. Dabei zeigen die beiden Hochdruckverfahren unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten auf.

Gase wie Kohlendioxid (CO₂) ermöglicht aufgrund ihrer Kompressibilität beim Entspannen zu expandieren. Aus den schlagartigen Entspannen nach der Behandlung mit Gasen lassen sich unterschiedliche Verfahrensprozesse herleiten, die auch in der Lebensmittelverarbeitung Anwendung finden könnten. In der Literatur genannt werden u. a. das Zerkleinern von Feststoffpartikeln, der Zellaufschluss von Fettzellen und die Mikronisierung zur Pulverherstellung.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten für eine Hochdruckbehandlung im Lebensmittelbereich, ergeben sich aus dem Verhalten von Wasser. Während Wasser unter Normaldruck bei 0 °C zu Gefrieren beginnt, wird der Gefrierpunkt unter Druckeinwirkung auf bis zu -22 °C bei einem Druck von ca. 200 MPa verschoben. Das Verhalten von Wasser unter Druck ermöglicht das Gefrieren und Auftauen von Lebensmitteln in temperierter Umgebung. Neben der Unterdrückung von Verderbnisreaktionen führt das Druckgefrieren zur Bildung kleiner, gleichmäßig geformter Eiskristalle. Gewebeschädigungen, wie sie bei herkömmlichen Gefrierprodukten aufgrund

unterschiedlicher Kristallgrößen entstehen könnten, treten beim Hochdruckgefrieren nicht auf.

Das zweite hier vorgestellt Verfahren ist die *Impulsbehandlung*. Die Anwendung von elektrischen Impulsen im Form von Hochspannungs- oder Lichtimpulsen, ermöglicht ebenfalls ein Pasteurisieren von Lebensmitteln bei niedrigen Temperaturen. Dabei ist zu unterscheiden, dass das Lichtimpulsverfahren nur zur Oberflächenentkeimung, das elektrische Hochspannungsverfahren zur Entkeimung von flüssigen, pumpfähigen Lebensmitteln zur Verfügung steht.

Die Inaktivierung der Mikroorganismen wird in beiden Verfahren direkt durch die Anwendung elektromagnetischer Strahlung hervorgerufen. Die elektrische Energie wird in einem Kondensator gespeichert und zur Erzeugung hoher elektrischer Hochspannungsimpulse bzw. Lichtimpulse genutzt. Die hohe Intensität der gepulsten Energie bzw. des gepulsten Lichtes führt zur Zerstörung der Zellmembran, was wiederum zur Abtötung der Mikroorganismen beiträgt.

Weitere Behandlungsmethoden zur Haltbarmachung von Lebensmitteln sind *elektrothermische Verfahren*. Hierzu zählen die konduktive, induktive und dielektrische Erhitzung. Die Inaktivierung der Mikroorganismen erfolgt dabei analog zum traditionellen Erhitzen durch Temperaturerhöhung. Hierbei wird die Temperatur nicht von außen auf das zu erwärmende Gut übertragen sondern direkt im Inneren der Lebensmittel durch Ionenwanderung (induktiv und konduktiven Erhitzung) bzw. durch Dipolanregung und Ionenwanderung (Mikrowelle) erzeugt.

Der Vorteil der ohmschen bzw. induktiven Erhitzung liegt besonders in der schonenden Erwärmung höherviskoser Lebensmittel und Lebensmittel mit einem stückigen Anteil.

6. Anhang

Tabelle 1: Neuere Untersuchungen über die Wirkung der Hochdruckbegasung mit CO₂ auf Lebensmittel [11]

Substrat	Druck [bar]	Temperatur [°C]	Zeit [min]	Inaktivierung
<i>Reinkultur:</i> E.coli Ps. aeruginosa C.albicans subtilis Coliphagen	500 bis 2500	> 31	20	10 ⁵ bis 10 ⁸
<i>Reinkultur:</i> E.coli S.aureus A.niger Sac. cerev B. subtilis B.stearothermophilus	40 bis 202	20 bis 35	120	10 ⁴ bis 10 ⁷
<i>Reinkultur</i> E.coli L.plantarum M.luteus P.requefort R.rubra	150	5 bis 40	60	10 ⁷ bis 10 ⁸
Pkt. C. utilis, S.Cerevis	1 bis 120	8 bis 38	5	bis 10 ²
Fermentationsbrühe	40 bis 200	33	80	10 ²
- Citrussaft	550	45	120	10 ⁵ bis 10 ⁸
- frische aromatische Kräuter				
- frischer Sellerie mit natürlicher Mikroflora	69 bis 628	40 bis 60	30 und 60	10 ² bis 10 ³
- Volleimasse	10 bis 350	40	180	bis 10 ⁵
- Milch				
- Fruchtsaft				
- Getränke				
befeuchtete Gewürze (Paprika, Pfeffer)	80	60	120	10 ² bis 10 ⁴

7. Literaturverzeichnis

- 1 Wallhäußer K. H.: Praxis der Sterilisation Desinfektion-Konservierung; Thieme Verlag; S.212, 383
- 2 Tscheuschner H.-D.: Grundzüge der Lebensmitteltechnik; Behr's Verlag; 1996
- 3 Walz E.; Spieß W.: Moderne Verfahren der Lebensmittelbe- und verarbeitung; Verbraucherdienst 42; 2; 1997
- 4 Hayashi R.: Utilization of pressure in addition to temperature in food science and technology; Eurotext Ltd; 224; 1992; S.185-193
- 5 Falbe J.; Regitz M.: Römpp Chemie Lexikon; Thieme Verlag; Band 8; 1992
- 6 Vardag T.: Kombinationsverfahren zur Haltbarmachung von Lebensmitteln; DEI; 5; 1998
- 7 Müller G.; Weber H.: Mikrobiologie der Lebensmittel; Behr's Verlag, 8. Auflage; 1996
- 8 Buk P.; Tauscher B.: Pasteurisierung von Lebensmitteln mit hydrostatischen Hochdruck: Chemische Aspekte; Lebensmittelchemie; 51; 1997; S. 131-147
- 9 Tauscher B.: Pasteurization of food by hydrostatic high pressure: chemical aspects; Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und Forschung; 200; 1995; S. 3-13
- 10 Kurzhals H.-A.: Entwicklungsstand nicht thermischer Konservierungsverfahren; Lebensmitteltechnik; 4; 1995
- 11 Butz P., Tauscher B.: Pasteurisieren unter Hochdruck. Was haben wir von der neuen Konservierungsmethode zu erwarten?; Forschungs Report; 2; 1997
- 12 Näser K.-H.: Physikalische Chemie für Techniker und Ingenieure; VEB Verlag; 1990
- 13 Koch H., Knorr D.: Nur kleine Eiskristalle. Mit Druckwechsel schonend gefrieren; Lebensmitteltechnik; 4; 1997
- 14 Knorr, Schlüter, Heinz: Impact of High Hydrostatic Pressure on Phase Transitions of foods, Food Technology, 9; 1998
- 15 Kalichevsky M.T.; Knorr D.; Lillfort P.J.: Potential food applications of high pressure effects on ice- water transitions; Trends in Food Science & Technology; 1995; S. 253-258
- 16 Moor H.: Theory and Practice of High Pressure Freezing; [in: Steinbrecht R.A.; Zierold K.; Cryotechniques in Biological Electron Microscopy; Springer Verlag Berlin; 1987 ; S. 175-191
- 17 Pasteurisieren ohne Wärme: Qualitätsverbesserung bei Fruchtsäften; Lebensmitteltechnik; 11; 1998; S. 56-57
- 18 Spook W.J.A.:Sterilisation von Gewürzen und Kräutern; DEI; 9; 1993
- 19 Dunn J.: Pulsed Light and electric Fields for Foods and Eggs; Poultry Science 1996
- 20 Qin B. L.; Pothakamury U.; u.a.: Food Pasteurization using High- Intensity Pulsed Electric Fields; Food Technology; 1995
- 21 Grahl T.; Märkl H.: Killing of microorganisms by pulsed electric fields; Appl Microbiol. Biotechnol 45; 1996
- 22 Knorr D.; Geulen M.; u.a.: Food application of high electric field pulses; Trends in Food Science & Technology 5; 1994
- 23 Castro A.J.; Barbosa-Cánovas G.; Swanson B. G.: Microbial inactivation of food by pulsed electric fields, Journal of Food and Preservation 17; 1993
- 24 Hallman G. J.; Zhang Q. H.: Inhibition of fruit fly (Diptera: Tephritidae) development by pulsed electric field; Florida Entomologist 80 (2); 1997
- 25 Kurzhals H.-A.: Entwicklungsstand nicht thermischer Konservierungsverfahren ; Lebensmitteltechnik 4; 1995
- 26 Schulz E.: Haltbarmachung von Lebensmitteln durch Wärme (III); Lebensmitteltechnik 12; 1993
- 27 Keck B.: Steril durch Lichtstöße; Pack Report 11/94
- 28 Dunn J.; Ott Th.; Clark W.: Pulsed- Light Treatment of Food and Packaging; Food Technology 9; 1995
- 29 Reitler W.: Konduktive Erwärmung von Nahrungsmitteln; Dissertation and der Technischen Universität München ; 1990
- 30 Lenges J.: Aseptische Lebensmittelherstellung- ein Überblick; ZFL; 40; 1-2; 1989; S.6-13

Literaturverzeichnis

- 31 Pfeiff Th.: Dielektrische Eigenschaften von Lebensmitteln; ZFL 45; 7/8; 1994; S.38-41
- 32 Lenges J.: Aseptische Lebensmittelherstellung-eine Übersicht; ZFL 40; 1-2; 1989; S.6-14

-
- 33 Kessler H. G.: Überblick und Grenzen Alternativer Methoden bzw. Abtötung von Lebensmitteln; Deutsche Milchwirtschaft 46; 8; 1995
- 34 Schulz E.: Haltbarmachung von Lebensmitteln durch Wärme (I); Lebensmitteltechnik; 10; 1993
- 35 Ladwig H.: Ohmic- Heating- System: Ein kontinuierliches Sterilisationsverfahren für Medien mit stückhaltigen Produkten; Lebensmitteltechnik 5; 1991
- 36 Terry M.: Sterilisierung durch ohmsches Erhitzen; Die Ernährungsindustrie; 6; 1991
- 37 Neues Durchflußsterilisierungsverfahren; Neue Verpackung; 4; 1989
- 38 Rosenbauer G., Rudolph M.: Induktive Erwärmung: Schonende UHT-Behandlung fließfähiger Nahrungsmittel; Lebensmitteltechnik, 4, 1996, S.43-45
- 39 Barnickel M.: Alternative thermische Verfahren; DMZ; 3; 1998; S.97-102
- 40 Bögl K. W., Rosenberg U.: Was passiert bei der Mikrowellenerhitzung von Nahrungsmitteln?, Deutsche Apotheker Zeitung 131; 12; 1991
- 41 Rosenberg U.; Bögl W.: Auftauen, Trocknen, Wassergehaltsbestimmung und Enzyminaktivierung mit Mikrowellen; ZFL, 1, 1986