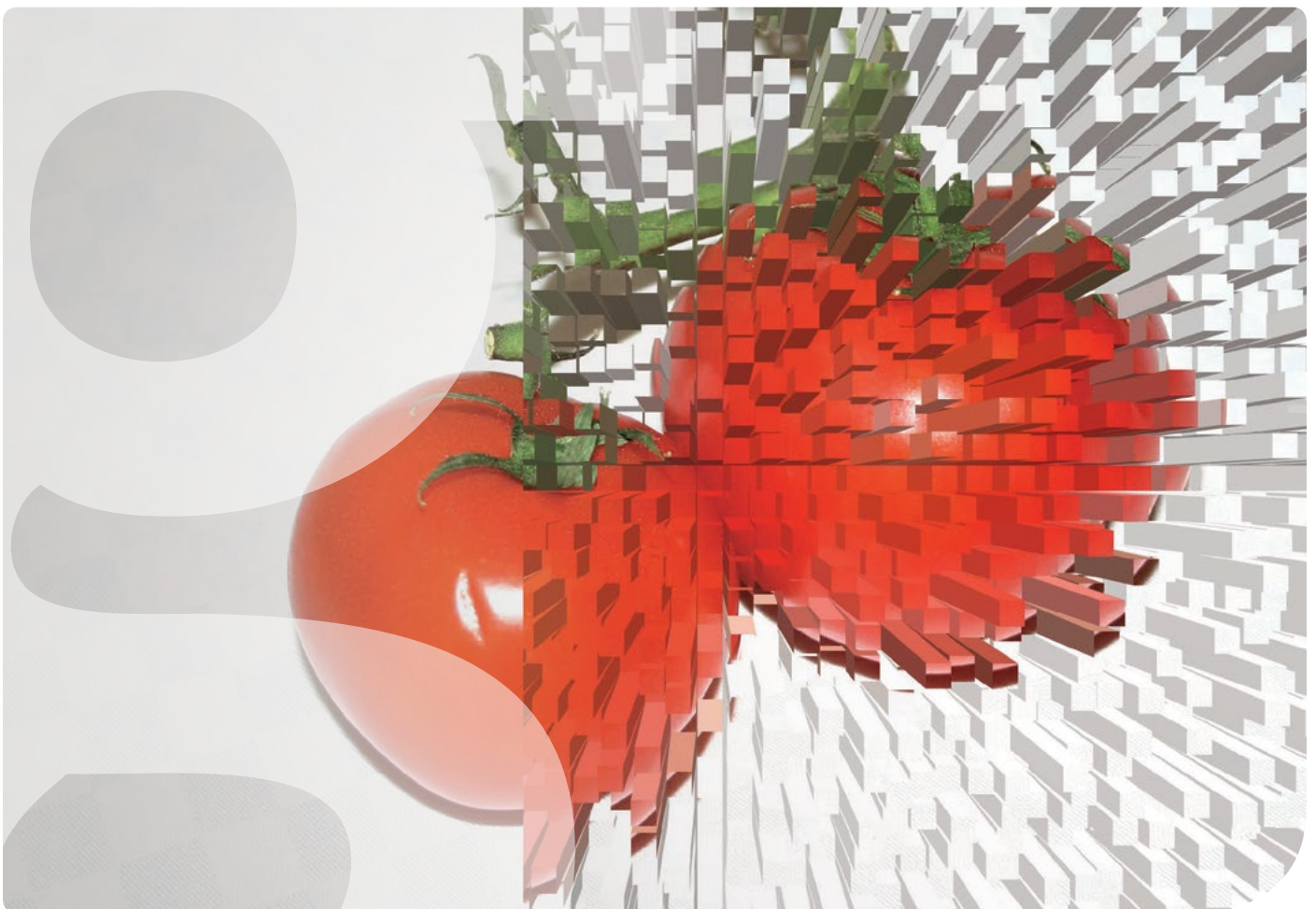


# Lebensmittelverarbeitung

Teil 4 aus „Neue Verfahren und Techniken bei der  
Lebensmittelherstellung und Lebensmittelversorgung“



## Impressum

Herausgeber, Medieninhaber und Hersteller:  
**Bundesministerium für Gesundheit, Sektion II**  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

### **Autorinnen und Autoren:**

Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Emmerich Berghofer  
Ass. Prof. Univ. Doz. Dr. Mag. Regine Schönlechner  
DI Julia Schmidt

### **Für den Inhalt verantwortlich:**

Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Emmerich Berghofer

### **Cover-Foto:**

Magdalena Amann; Idee: Madeleine Gromann und Magdalena Amann

### **Druck:**

Kopierstelle des BMG, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

### **Internet:**

Dieser Auszug Teil 4 sowie die gesamte Studie stehen als Download auf der Website des BMG unter [www.bmg.gv.at](http://www.bmg.gv.at) zur Verfügung.

### **Erscheinungstermin:**

Studie: Juli 2015 / Auszug Teil 4: Mai 2016

---

# Inhaltsverzeichnis

1. Neue Verfahren zur Lebensmittelverarbeitung – Querschnittstechniken .....	4
1.1 Struktur- und formgebende Verfahren .....	5
1.1.1. Nanotechnologie .....	5
1.1.1.1. Stand der Technik .....	5
1.1.1.2. Potential .....	11
1.1.1.3. Rechtliche Aspekte .....	12
1.1.1.4. Nutzen und Risiken .....	14
1.1.1.5. Informationsstand und Akzeptanz seitens der Verbraucherinnen und Verbraucher .....	16
1.1.2. 3-D-Food Printing .....	17
1.1.2.1. Stand der Technik .....	17
1.1.2.2. Potential .....	19
1.1.2.3. Rechtliche Aspekte .....	21
1.1.2.4. Nutzen und Risiken .....	21
1.1.2.5. Informationsstand, Wahrnehmung und Akzeptanz seitens der Verbraucherinnen und Verbraucher .....	21
1.1.3. Neue Emulgiertechniken .....	21
1.1.3.1. Membranemulgierung .....	21
1.1.3.2. Microfluidization .....	22
1.1.3.3. Ultraschall-emulgierung .....	24
1.1.4. Mikroverkapselung .....	24
1.1.5. Neue Zerkleinerungstechniken .....	26
1.1.5.1. Neue Schneidetechniken .....	26
1.2 Neue Trenn- und Isolierungsverfahren .....	27
1.2.1. Neue Entwicklungen bei den Membrantrennverfahren .....	27
1.2.1.1. Kombination der Membrantrennverfahren mit Ultraschall .....	27
1.2.1.2. Verbesserte Membrane durch Nanotechnologie .....	27
1.2.2. Neue Adsorptionsmaterialien .....	28
1.3. Verwendung von überkritischem Kohlendioxid .....	28
1.3.1. Einsatz von überkritischem Kohlendioxid bei der Extrusion .....	29
1.3.2. Einsatz von überkritischem Kohlendioxid zur Inaktivierung von Mikroorganismen in Lebensmitteln (Kaltpasteurisation) .....	30
1.3.3. Mikropartikelbildung mit überkritischem Kohlendioxid .....	30
1.3.3.1. RESS ( <i>rapid expansion of a supercritical solution</i> ) .....	31
1.3.3.2. SAS ( <i>supercritical antisolvent technology</i> ) .....	31
1.3.3.3. CPF ( <i>concentrated powder form</i> ) .....	31
1.3.3.4. PGSS ( <i>particle from gas saturated solution</i> ) .....	31

1.4. Einsatz von Ultraschall in der Lebensmitteltechnik.....	33
1.4.1. Prinzipielle Wirkung von Ultraschall und allgemeine Einsatzkriterien bei Lebensmitteln.....	33
1.4.1.1. Ultraschallunterstütztes Schneiden .....	34
1.4.1.2. Ultraschallunterstützte Emulsionsherstellung .....	34
1.4.1.3. Ultraschallunterstützte Extraktion .....	35
1.4.1.4. Ultraschallunterstütztes Gefrieren.....	35
1.4.1.5. Ultraschallunterstützte Trocknung .....	36
1.4.1.6. Inaktivierung von Mikroorganismen (Thermosonification) .....	36
1.4.1.7. Rechtliche Aspekte, Nutzen und Risiko der Anwendung von Ultraschall .....	36
1.4.1.8. Informationsstand, Wahrnehmung und Akzeptanz seitens der Verbraucherinnen und Verbraucher .....	37
2. Neue Verfahren zur Zubereitung, Garung und Haltbarkeitsverlängerung von Lebensmitteln.....	38
2.1. Minimal processing (minimally processed food) / fresh cut products.....	38
2.1.1. Schutzüberzüge .....	40
2.1.1.1. Schutzüberzüge, die eine mechanische Barriere zwischen dem Lebensmittel und der Umgebung bilden.....	40
2.1.1.2. Schutzüberzüge mit integrierten, aktiven Substanzen.....	40
2.1.1.3. Rechtliche und sicherheitstechnische Bewertung von Schutzüberzügen.....	40
2.2. Neue oder verbesserte Garverfahren .....	41
2.2.1. <i>Sous vide</i> -Garung.....	41
2.2.2. Mikrowelleninduziertes Dämpfen.....	42
2.3. Vorgegarte Convenience-Produkte .....	43
2.4. Überhitzter Wasserdampf ( <i>superheated steam</i> - SHS) .....	45
2.4.1. Prinzip von SHS.....	45
2.4.2. Nutzungsrelevanz von SHS .....	45
2.4.3. Aktuelle Forschung zur Verwendung von SHS.....	47
2.4.4. Derzeitiger, praktischer Einsatz von SHS.....	47
2.4.5. Risiken, rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz.....	50
2.5. Reinraumtechnik in Verbindung mit „Hygienic design“ und Robotik .....	50
2.5.1. Reinraumtechnik .....	50
2.5.2. „Hygienic design“ .....	51
2.5.3. Robotik .....	51
2.6. Aseptische Abfülltechnik in Kombination mit neuen Konservierungsverfahren .....	52
2.7. <i>Supercooling/superchilling</i> .....	54
2.7.1. Prinzip und Nutzungsrelevanz .....	54
2.7.2. Kritische Parameter und Beschränkungen .....	55
2.7.3. Kombinationen .....	55
2.7.4. Mögliche Risiken und Forschungsbedarf.....	55

2.7.5. Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz .....	56
2.8. Nichtthermische Verfahren .....	56
2.8.1. Nutzung elektromagnetischer Energie .....	58
2.8.1.1. Radiowellen ( <i>radio frequency</i> ) (RF) .....	59
2.8.1.2. Mikrowellen ( <i>microwave frequency</i> ).....	63
2.8.1.3. Infrarotstrahlung ( <i>infrared frequency</i> - IR) .....	65
2.8.1.4. UV-Licht .....	68
2.8.1.5. Gepulstes Licht ( <i>pulsed light</i> - PL) .....	73
2.8.1.6. Hochbogenentladung ( <i>high voltage arc discharge hydrodyne</i> – HVADH).....	77
2.8.1.7. Hochspannungs-Elektroimpulsverfahren ( <i>high intensity pulsed electric fields</i> - PEF).....	78
2.8.1.8. Oszillierende Magnetfelder ( <i>oscillating magnetic fields</i> ) (OMF).....	84
2.8.1.9. Induktionserhitzung ( <i>inductive heating</i> ) (IE) .....	86
2.8.1.10. Ohm´sche Erhitzung ( <i>ohmic heating</i> ) (OH).....	87
2.8.1.11. Kaltplasma ( <i>cold plasma</i> - CP) .....	92
2.8.1.12. Aktiviertes, elektrolysiertes Wasser ( <i>activated &amp; electrolyzed water</i> ) .....	97
2.8.2. Nutzung mechanischer Energie.....	100
2.8.2.1. Hochdruckbehandlung ( <i>high pressure</i> - HP) ( <i>Pascalisation</i> ) .....	100
2.8.2.2. <i>Thermosonication</i> (TS).....	105
3. Literatur .....	108

# 1. Neue Verfahren zur Lebensmittelverarbeitung – Querschnittstechniken

Soweit es sinnvoll und möglich ist und in der wissenschaftlichen Literatur Hinweise und Fakten zu finden sind, werden für alle neuen Techniken jeweils folgende Aspekte behandelt:

- Stand der Technik
- Potential der neuen Technik
- Rechtliche Aspekte
- Nutzen und Risiken
- Informationsstand, Wahrnehmung und Akzeptanz seitens der Verbraucherinnen und Verbraucher

**Rechtliche Aspekte – Allgemein:** Bei den meisten der in diesem Kapitel angeführten, neuen Verfahren ist immer die rechtliche Einstufung zu hinterfragen und zu prüfen. Sehr oft wird die Novel Food Verordnung zum Tragen kommen, wobei aber gegebenenfalls noch andere Aspekte gesondert zu berücksichtigen sind. In vielen Fällen wird nur eine „*case by case*“-Entscheidung möglich sein, also immer nur für einen bestimmten Anwendungsfall. Den Produzenten kann deshalb nur geraten werden, schon im Vorfeld Kontakt mit der zuständigen Behörde aufzunehmen.

**Informationsstand, Wahrnehmung und Akzeptanz seitens der Verbraucherinnen und Verbraucher:** Bezüglich dieses Punktes existieren einige Publikationen, die generell und auch spezifisch für einzelne Technologien den Wissensstand und die Akzeptanz beschreiben. Übereinstimmend wird darin festgestellt, dass der Wissensstand der Konsumentinnen und Konsumenten über neue Technologien weltweit sehr gering ist. Die Einstellung gegenüber neuen Technologien ist in Europa generell skeptischer als in anderen Kontinenten (Lyndhurst, 2009, Siegrist, 2008). Die Akzeptanz hängt in großem Ausmaß von der Risikowahrnehmung und von wahrgenommenen, potentiellen Vorteilen ab (Rollin et al., 2011). Wenn persönliche Vorteile oder Vorteile für die Umwelt wahrgenommen werden, besteht die Bereitschaft ein höheres Risiko zu akzeptieren. Solche tatsächlichen oder gefühlten Vorteile können ein geringerer Preis, gesundheitliche Vorteile, Convenience, Nachhaltigkeit und Authentizität (Anonym, 2013 a), oder „Natürlichkeit“ sein. Natürlichkeit ist in den Augen der Konsumenten ein sehr positiv besetzter Begriff, wobei es meistens um eine „gefühlte Natürlichkeit“ geht. Chemische Verfahren reduzieren in den Augen der Bevölkerung die Natürlichkeit mehr als physikalische Verfahren. Gentechnik wird als Manipulation der Natur angesehen, während beispielsweise Nanotechnologie nicht so gesehen wird (Siegrist, 2008).

Ein wichtiger Punkt zur Akzeptanz ist auch das Vertrauen in die Informationsquellen. Diese variiert ebenfalls von Kontinent zu Kontinent. In Asien fungieren die Medien als bevorzugte Informationsquellen. Die Konsumentinnen und Konsumenten in den USA haben größeres Vertrauen in die Gesetzgebung als in Europa. Die Europäer setzen mehr Vertrauen in „Aktivisten“ (NGOs, Konsumentenschutz- und Umweltschutzorganisationen) (Lyndhurst, 2009).

## 1.1 Struktur- und formgebende Verfahren

### 1.1.1. Nanotechnologie

Alle unsere Lebensmittel und auch der Mensch selbst sind Konstrukte aus natürlichen Nanostrukturen. **Nanotechnologie hingegen ist die bewusste und kontrollierte Schaffung künstlicher, synthetischer Nanostrukturen, die so in der Natur nicht vorkommen.** Der Begriff Nanotechnologie wurde zwar erst vor einigen Jahrzehnten geprägt, die Menschen haben aber auch schon vorher künstliche Nanostrukturen geschaffen. Das trifft genauso für den Bereich der Lebensmittelverarbeitung zu, wo bei vielen traditionellen Verarbeitungsverfahren in den Lebensmitteln neue Nanostrukturen entstehen. Genau das ist nun ein Problem bei der Erstellung institutionalisierter bzw. rechtlicher Definitionen für den Begriff Nanotechnologie (siehe Kap. 1.1.1.1.).

Nanotechnologie ist eine sogenannte Querschnitts- bzw. Schlüsseltechnologie und umfasst nicht nur einen Bereich, sondern sie spielt in vielen Gebieten der Technik eine entscheidende Rolle, genauso im Bereich Lebensmittel und Ernährung. Während in vielen Technikbereichen und auch in der Medizin die Nanotechnologie schon in größerem Ausmaß Verwendung findet, ist bis jetzt der praktische Einsatz in der Lebensmitteltechnik noch eher bescheiden. Das Potential wird aber hier ebenfalls sehr hoch eingeschätzt.

#### 1.1.1.1. Stand der Technik

Im Folgenden werden nach dem derzeitigen Wissensstand die Möglichkeiten des Einsatzes der Nanotechnologie im Bereich Lebensmittel und Ernährung beschrieben.

Prinzipiell kann der Einsatz der Nanotechnologie gegliedert werden in die Anwendungsgebiete direkt in den Lebensmitteln selbst (*nano inside*) und um die Lebensmittel herum (*nano outside*). Abb. 4.1.1. zeigt schematisch die potentiellen Einsatzbereiche, von denen in diesem Kapitel nur diejenigen eingehender betrachtet werden, welche direkt in die Lebensmittel neue Nanostrukturen einführen.

Zu Erzielung neuer synthetischer Nanostrukturen gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

**Top-down-Strategie:** Durch Zerkleinerung werden Strukturen unter 100 nm erreicht (z.B. Kolloidvermahlung oder Mikroemulsion). Es entstehen z.B. Nanopartikel, Nanofasern, Nanopulver oder Nanoemulsionen. Partikel in dieser Größenordnung haben eine enorm vergrößerte Oberfläche und weisen deshalb ganz andere Eigenschaften auf (z.B. größere Reaktionsfreudigkeit, verbesserte Textur und sensorische Eigenschaften, bessere Bioverfügbarkeit).

**Bottom-up-Strategie:** Atome oder Moleküle werden durch Zwangsmaßnahmen oder auch durch Selbstanordnung (z.B. Monoglyceride) zu Nanostrukturen (Nanotubes, Nanokapseln, Nanosomen, Nanomaschinen usw.) geformt. Diese Nanoprodukte können weiter zu Mikro- und Makrostrukturen aufgebaut oder angeordnet werden. In der Natur existieren beeindruckende Beispiele für die Anordnung von Nano- zu Makrostrukturen (z.B. Pflanzen, Bäume, Tiere, Menschen).

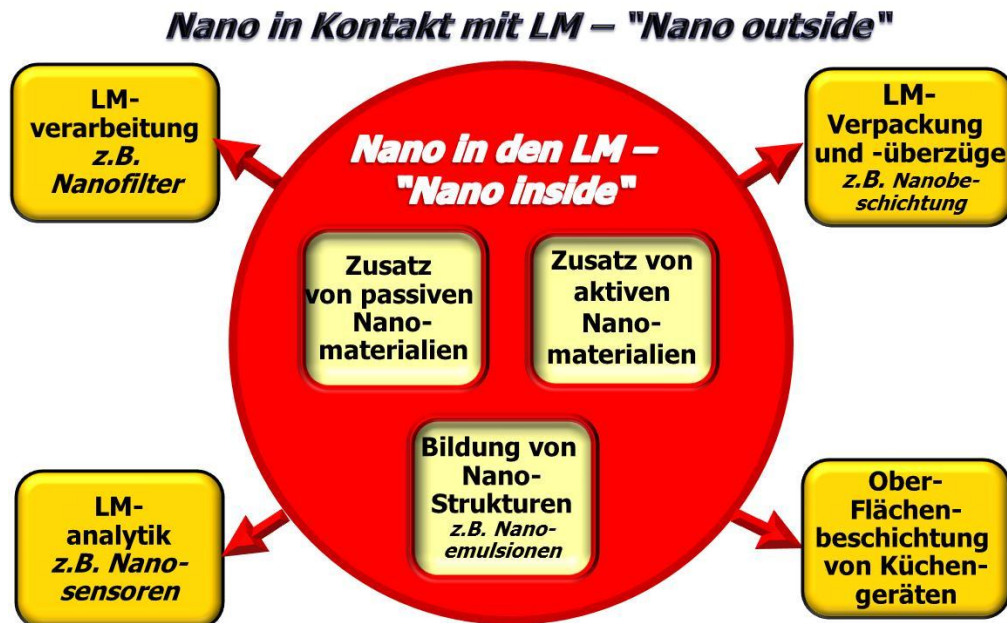


Abb. 4.1.1.: Prinzipielle Möglichkeiten zur Anwendung von Nanotechnologie im Lebensmittel- und Ernährungsbereich

### Zugabe von passiven Nanomaterialien direkt zu Lebensmitteln

Anorganische oder organische Zusatzstoffe, Mineralstoffe und Nährstoffe in nanoskaliger Form [⇒ ENPs (*engineered nanoparticles*)] können eine Reihe von technisch-funktionellen und biofunktionellen Vorteilen bei ihrer Zugabe zu Lebensmitteln ergeben. Sie wirken aufgrund ihrer Nanoskaligkeit und sollen nicht in Wechselwirkung mit anderen Inhaltsstoffen treten. Bei anorganischen, nanoskaligen Stoffen wird auch von "harter Nanotechnologie" gesprochen, während die Verwendung von organischen bzw. biologischen, nanoskaligen Stoffen als "weiche Nanotechnologie" benannt wird.

An Hand von Beispielen, die derzeit schon praktische Verwendung finden oder diskutiert werden, sollen die beabsichtigten Wirkungen näher erläutert werden.

#### ANORGANISCHE ZUSATZSTOFFE IN NANOPARTIKULÄRER FORM

**Siliziumdioxid** wird seit langem als Rieselhilfsmittel in trockenen Lebensmitteln eingesetzt (Zusatzstoff mit der E-Nummer 551). Bei der Herstellung dieses Produktes entstehen zwar intermediär nanoskalige Partikel, die aber sofort zu größeren Partikeln weit über 100 nm aggregieren. Die verwendete Kieselsäure ist zwar nanostrukturiert, weil sie aus nanoskaligen Teilchen zusammengesetzt ist, das verwendete Produkt besteht jedoch nicht aus Nanopartikeln.

**Titandioxid:** Nanopartikuläres Titandioxid wird im Kosmetikbereich bereits eingesetzt (z.B. in Sonnencremes). In Bulkform ist Titandioxid ein erlaubter Lebensmittelzusatzstoff (E-Nummer 171) und dient als weißer Pigmentfarbstoff, beispielsweise für Süßwaren. Im Jahr 1995 wurde von der Firma Mars ein Patent angemeldet in dem neben Titandioxid auch Silizium-, Calcium-, Zink- und Manganoxid zur Nanobeschichtung von Süßwaren vorgeschlagen werden, um die Fettreifbildung auf Schokolade zu verhindern (Beyer et al., 1998). Dieses Patent wird sehr häufig in diversen Internetseiten als Beispiel für den Einsatz der Nanotechnologie im Lebensmittelbereich zitiert. Es wurde aber noch nie praktisch umgesetzt und wird wahrscheinlich nie zum Einsatz kommen. Nach der gegenwärtigen Rechtslage in der EU (siehe Kap. 1.1.1.3.) muss nämlich nanopartikuläres Ti-



tandioxid schon jetzt als Zusatzstoff neu bewertet und zugelassen werden. Abgesehen davon ist Titanoxid, egal in welcher Form, kein erlaubter Zusatzstoff für Schokolade.

#### ANORGANISCHE STOFFE IN NANOPARTIKULÄRER FORM ZUR ERHÖHUNG DER BIOVERFÜGBARKEIT

Die Tatsache, dass sich die Bioverfügbarkeit von Stoffen in Nanoform verbessert, wird vor allem im Bereich der Nahrungsergänzungsmittel bereits in größerem Umfang genutzt. Bei Lebensmitteln gibt es ebenso Beispiele dafür. Keines dieser Produkte findet sich aber in Österreich auf dem Markt.

**Nano-Calcium:** Calciumverbindungen in Nanoform können Lebensmitteln zugesetzt werden. Der Vorteil gegenüber der herkömmlichen Calciumanreicherung liegt darin, dass nanoskalige Calciumverbindungen keine Trübung ergeben, sich nicht entmischen und besser resorbiert werden (Erfanian et al., 2014). Tatsächlich fanden sich in der Datenbank DATAMONITOR-Consumer (2015) bereits vor 2011 einige solche Lebensmittel. Als Calciumquelle können verschiedene calciumhaltige Mineralstoffe dienen, die durch Feinvermahlung (*Top-down*-Strategie) in die Nanoform gebracht werden.

**Nanoskalige Metalle und Metalloxide:** Nanokolloidales Kupfer, Gold, Iridium, Palladium, Platin, Silber, Titan und Zink werden in Nahrungsergänzungsmitteln eingesetzt. Aus dem Lebensmittelbereich gibt es ein bekanntes Beispiel der japanischen Firma Nippon Ham Group's Nippon Luna Co., Ltd, die im Jahr 2006 ein mit 4 Mikrogramm Platin in Nanoform angereichertes, „*anti-aging*“ Joghurt auf den Markt gebracht hat. Keines dieser Produkte findet sich gegenwärtig in Österreich auf dem Markt.

#### ORGANISCHE STOFFE IN NANOPARTIKULÄRER FORM

**Carotinoide** sind in vielen pflanzlichen Lebensmitteln enthalten. In isolierter Form dienen sie auch als Zusatzstoffe zur Färbung von Lebensmitteln (E 160a-f). Sie sind fettlöslich und können deshalb in wässrigen Lebensmitteln nur in Form einer Emulsion oder eben in nanopartikulärer Form eingesetzt werden. Die feine Teilchengröße der Carotinoide bewirkt ihre bessere Aufnahme im Verdauungstrakt. Sehr oft werden sie dabei noch in eine wasserlösliche Matrix eingebettet. An und für sich existiert der Einsatz nanopartikulärer Carotinoide schon seit Jahrzehnten. Weltweit, auch in Europa, gibt es einige Hersteller solcher Produkte. Es wurden bereits zahlreiche toxikologische Untersuchungen mit diesen Formulierungen durchgeführt und es ergaben sich keine Bedenken gegen ihren Einsatz (Möller et al., 2009). Es ist davon auszugehen, dass sie auch in europäischen Lebensmitteln eingesetzt werden, wobei drei Carotinoide dominieren, nämlich  $\beta$ -Carotin, Lycopin (gewonnen aus Paradeisern) und Astaxanthin (gewonnen aus Meeresalgen).

**Resistente Stärke (RS):** RS vom Typ III bildet sich in geringem Ausmaß bei vielen Garprozessen von stärkereichen Lebensmitteln (Brot und Gebäck, Nudeln, Kartoffeln usw.), unabhängig ob die Zubereitung im Haushalt oder großtechnisch erfolgt. RS besteht aus kurzkettigen, linearen Stärkeketten bis zu 60 Glucosemolekülen. Zwei Ketten verdrillen sich jeweils zu Doppelhelices, welche sich weiter zu Stärkekrystalliten zusammenlagern. Die sich ergebende, dichte, kristalline Packung erklärt die Nichtangreifbarkeit durch die menschlichen Verdauungsenzyme und die hohe physikalische Beständigkeit. RS von Typ III kann nun aus normaler Stärke gezielt produziert und Lebensmitteln zur Ballaststoff-Anreicherung zugesetzt werden. Die Herstellung erfolgt entweder durch Feinstvermahlung von nativen Stärkekörnern (*Top down*-Strategie) oder durch enzymatische Hydrolyseverfahren. Diese schon seit einigen Jahren praktizierte Herstellung von RS Typ III kann aus heutiger Sicht als Nanotechnologie bezeichnet werden. Einige Firmen bieten solche RS-Präparate auch in Europa an. Inwieweit sie tatsächlich eingesetzt werden, ist schwer zu beurteilen, weil sie rechtlich nicht als Zusatzstoffe gelten. Eine explizite Anführung in der Zutatenliste als RS ist deshalb nicht erforderlich.

**Chitosan:** Ein Vorschlag aus der Literatur ist der Einsatz von nanopulverisiertem Chitosan (⇒ Gerüstsubstanz von Schalenweichtieren) in cholesterinreduziertem Yoghurt, wodurch angeblich nachteilige sensorische Eigenschaften vermieden werden können (Seo et al., 2009).

---

### Zusatz von aktiven Nanostrukturen aus organischen Molekülen zu Lebensmitteln oder Bildung dieser Strukturen direkt in den Lebensmitteln selbst

---

„Aktiv“ in Zusammenhang mit Nanostrukturen (⇒ Nanopartikel, Nanokapseln, Nanocluster, Micellen, Liposome usw.) bedeutet, dass diese in Wechselwirkung mit Lebensmittelinhaltsstoffen treten und diese verändern, binden oder gezielt wieder freisetzen können. Aktive Nanostrukturen bieten zweifelsohne die interessantesten Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie bei Lebensmitteln, sowie in der menschlichen und tierischen Ernährung und in der Medizin. Die Bildung aktiver Nanokonstrukte kann durch spontane Selbstassoziation von organischen Molekülen ebenso direkt in Lebensmitteln erfolgen. Bei entsprechenden Bedingungen zerfallen sie wieder.

Die Herstellung dieser Nanostrukturen ist aber nicht Selbstzweck. Sie dienen zur Bindung und vor allem zur Einkapselung von anderen empfindlichen Molekülen. Beispielsweise ist es möglich Aroma- und Farbstoffe einzuschließen, dadurch zu schützen und in den Lebensmitteln bei Bedarf wieder freizusetzen. Einkapselte, bioaktive Stoffe können aber auch nach dem Verzehr gezielt an die Stellen in unserem Körper herangebracht werden, wo sie ihre größte Wirksamkeit entfalten.

Die Kombination von Nanokonstrukten mit funktionellen Wirkstoffen lässt sich potentiell auf mehrere Arten bewerkstelligen:

- a) Bindung der Wirkstoffe an der Oberfläche von Nanopartikeln: Letztere dienen hier als Trägermaterial und können auch aus anorganischen Nanopartikeln bestehen.
- b) Einbettung bzw. Einschluss von Wirkstoffen in feste Nanopartikel (z.B. Einbettung in Hydrokolloidgel-Nanokugeln). Diese Möglichkeit wird an und für sich schon lange bei der sogenannten Mikroverkapselung in der Lebensmitteltechnik genutzt. Neu ist nun, dass versucht wird, die Kapseln bis in den Nanobereich zu verkleinern.
- c) Einkapselung bzw. Einschluss von Wirkstoffen in Löchern oder offenen Hohlräumen von Nanomolekülen bzw. Nanokonstrukten, wie z.B. in Cyclodextrinen.
- d) Einkapselung bzw. Einschluss von Wirkstoffen in Nanohohlkugeln (Micellen, Liposome). Werden diese Präparate dann in einer wässrigen Phase verteilt, ergeben sich Nanoemulsionen.

#### NICHT SELBSTANORDNENDE, AKTIVE NANOSTRUKTUREN

**Cyclodextrine (CDs):** CDs sind auf enzymatischem Weg aus Stärke hergestellte, nanoskalige Ringstrukturen aus sechs, sieben oder acht verbundenen Glucosemolekülen, wobei ein konusförmiger, wasserabweisender Hohlraum (⇒ Nanotüten) entsteht. Diese „Molekülfallen“ können in ihrem wasserabweisenden Innenraum fettlösliche Moleküle, wie Vitamine, Aromastoffe oder Cholesterin einschließen, schützen und gezielt wieder freisetzen. Beta-Cyclodextrin ist in der EU als deklarationspflichtiger Lebensmittelzusatzstoff (E 459) zugelassen und wird in Lebensmitteln als Trägerstoff verwendet.

#### SELBSTANORDNENDE, AKTIVE NANOSTRUKTUREN

Die Selbstanordnung bzw. Selbstassoziation von organischen Molekülen ist ein der Natur innewohnendes Prinzip und war eine der Voraussetzungen zur Entstehung des Lebens bzw. der Lebensformen. Die Nanotechnologie nutzt nun dieses Prinzip geschickt zur Bildung neuer Strukturen (⇒ NSSL – *nano sized self-assembled liquid structures*).

*Aktive Nanostrukturen als Einkapselungssysteme auf der Basis von oberflächenaktiven Substanzen (⇒ nanodelivery systems):*

---

Werden oberflächenaktive Substanzen, wie z.B. Emulgatoren, nicht in ein Zweiphasensystem (z.B. Öl/Wasser), sondern in genügend hoher Konzentration in ein Einphasensystem eingebracht, neigen sie dazu durch Selbstanordnung kleine Nanomicellen zu bilden. Dabei ordnen sich die Moleküle so, dass der mit der äußeren Phase nicht verträgliche Molekülteil nach innen gerichtet ist. Es entstehen igelförmige „*Bottom up*“-Nanokugeln. Letztere können dann als Vehikel benutzt werden, um empfindliche Gastmoleküle [z.B. Vitamine, Omega-3-Fette, sekundäre Pflanzenstoffe (z.B. Isoflavone, Flavonoide, Carotinoide), Pflanzenextrakte, ätherische Öle, Konservierungsstoffe und Farbstoffe] darin einzuschließen und zu schützen, oder wieder gezielt freizusetzen (Sagalowicz, 2006).

Weltweit bieten mehrere Firmen solche Präparate für Nahrungsergänzungsmittel an. Es ist nicht auszuschließen, dass sie auch in Lebensmitteln verwendet werden. Beispielhaft sei hier die Fa. AQUANOVA GmbH (2015) angeführt. Sie vertreibt unter dem Markennamen NOVASOL<sup>R</sup> zahlreiche solcher Micellenpräparate. Vor einigen Jahren wurde von dieser Firma für diese Micellen noch der Begriff „Nano“ auf der Homepage verwendet, nun wird nur mehr von Micellen gesprochen.

*Aktive Nanostrukturen als Einkapselungssysteme auf der Basis von Proteinen:*

Proteine sind gleichfalls von Natur aus in der Lage sich selbst zu Nanostrukturen anzuordnen, wie die Beispiele der Enzyme, der Muskelproteine und des Kollagens zeigen. Auch das Hauptprotein der Milch, das Kasein, besteht aus natürlichen Nanomicellen (Durchmesser 20-500 nm). Diese Fähigkeit von Kasein Nanomicellen zu bilden, könnte gezielt zum Einschluss von Fremdmolekülen genutzt werden (Pszczola, 2007).

*Aktive Nanostrukturen als Einkapselungssysteme auf der Basis von Stärke:*

Stärke liegt in der Natur in den Stärkekörnern größtenteils in Form von Nanokristalliten vor. Diese Fähigkeit zur Selbstassoziation von Stärkemolekülen lässt sich ebenfalls zur Erzeugung von Micellen nutzen.

---

### Veränderung von Lebensmittelstrukturen und -inhaltsstoffen durch Nanotechnologie, bzw. Erzeugung nanoskaliger Strukturen direkt in den Lebensmitteln

---

Hier geht es um die drei wichtigsten, grob- bzw. makrodispersen Lebensmittelsysteme, nämlich Suspensionen, Emulsionen und Schäume.

Bei **Suspensionen** sind nichtlösliche Feststoffpartikel in einer Flüssigphase verteilt, wie z.B. Zellwandpartikel in naturtrübem Apfelsaft.

Als **Emulsion** wird die Verteilung zwei nichtmischbarer Flüssigkeiten bezeichnet, wobei eine Flüssigphase in Form feinsten Tröpfchen in der anderen, zusammenhängenden Flüssigphase vorliegt. Das kann eine „Öl in Wasser“-Emulsion (z.B. Milch, Soßen) oder eine „Wasser in Öl“-Emulsion (z.B. Butter, Margarine) sein.

Unter einem **Schaum** ist die Verteilung von kleinen Gasblasen in einer Flüssigkeit (z.B. Eiweißschaum) oder in einem Feststoff (z.B. erstarrter Eiweißschaum oder Brot) zu verstehen.

Allen diesen grobdispersen Mehrphasensystemen ist gemeinsam, dass sie nicht stabil sind und wieder zur Entmischung der beiden Phasen neigen. Je kleiner die Flüssigkeitströpfchen, Feststoffpartikel oder Gasblasen sind, umso besser ist die Stabilität und Lagerfähigkeit dieser Lebensmittelsysteme. Es war daher immer schon das Ziel der Lebensmitteltechnik, die Partikelgröße in diesen Systemen zu verringern, also aus Makro- Mikropartikel zu machen. Mit den heutigen technischen Möglichkeiten können sie nun bis in den Nanobereich zerkleinert werden. Nanopartikel weisen veränderte Eigenschaften auf, weshalb auch die entstehenden Systeme völlig neue, oft verblüffende Eigenschaften haben.

### NANOSUSPENSIONEN BZW. ZERKLEINERUNG FESTER LEBENSMITTELINHALTSSTOFFE IN DEN NANOBEREICH

Die Zerkleinerung von unlöslichen, pflanzlichen Zellwandstrukturen in den Nanobereich könnte einerseits stabile, naturtrübe Obst- und Gemüsesäfte liefern, bei denen sich die festen Bestandteile auch bei langer Lagerzeit nicht mehr absetzen. Andererseits fungieren die Zellwandbestandteile von Pflanzen auch als Ballaststoffe. Sie bereiten aber bei der Zugabe zu anderen Lebensmitteln, zum Zwecke der Ballaststoffanreicherung, sensorische und technologische Probleme. Je feiner und kleiner die Zellwandbestandteile zerkleinert werden, umso leichter lassen sich diese Nachteile vermeiden. Nach dem Verzehr ergeben sich gleichfalls Vorteile, weil die positiven Wirkungen im Verdauungstrakt (z.B. Wasserbindungskapazität) verbessert werden. Der Einsatz der Nanotechnologie könnte also in Zukunft die Gewinnung von Ballaststoffpräparaten erleichtern bzw. überhaupt erst ermöglichen. Das zeigen Versuche, bei denen im Labormaßstab durch intensive Vermahlung mit Kugelmöhlen Zellwandbestandteile von Kleie (Arabinoxylane) in den Nanobereich zerkleinert und damit wasserextrahierbar gemacht wurden (Craeyveld, 2009).

### NANOEMULSIONEN

Je kleiner die Tröpfchengröße in Emulsionen ist, umso stabiler sind diese. In natürlichen und künstlichen Emulsionen liegt die Größenordnung der Tröpfchen im Bereich von ca. 1-50 µm. Da es sich aber immer um eine Tröpfchengrößenverteilung handelt, kommen auch in konventionellen Emulsionen bereits Tröpfchen vor, die im Nanobereich sind, also kleiner als 0,1 µm (= 100 nm). Wenn der Großteil der Tröpfchen unter 300 nm ist, wird eine sehr stabile Mikroemulsion bzw. Nanoemulsion erhalten. Es existieren heute Emulsionstechniken, mit denen die Herstellung solcher Emulsionen möglich ist, wie Membranemulgierung, Ultraschallmulgierung und Microfluidisation (Sangasuri & Agustin, 2006).

Trotz Verringerung des Fettanteiles bleiben in Nanoemulsionen angeblich die sensorischen Eigenschaften nicht nur erhalten, sondern sie werden sogar noch verbessert, weil es nicht auf die Fettmenge ankommt, sondern auf die Zahl und die Größe der Öltröpfchen (deGroot, 2006). Damit lassen sich kalorienreduzierte Nanoemulsionen erzeugen, die sich im Geschmack nicht von vollfetten, normalen Emulsionen unterscheiden.

Nanoemulsionen sind auch geeignet, um aromatische Öle (Aromastoffe) und fettlösliche Farbstoffe einzuschließen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Emulsionen sind diese völlig transparent und sehr stabil. Ein Vorteil, der anscheinend schon genutzt wird. Sowohl die Firma AQUANOVA (2015) als auch die Firma WILD (2015) preisen auf ihrer Homepage Emulsionen an, die klar sind und zahlreiche Vorteile aufweisen sollen, sowie Vitamine und andere Wirkstoffe (z.B. Carotinoide) enthalten können. Beide Firmen sprechen nicht von Nanoemulsionen, sondern von Micellen und Mikroemulsionen. Im Patent der Fa. WILD (Chanamai, 2007), welches die Herstellung dieser Mikroemulsionen zum Inhalt hat, wird die Tröpfchengröße dieser Mikroemulsionen unter 1.400 Ångström, vorzugsweise im Bereich von 100 – 500 Ångström, angegeben. Die Einheit Ångström ist keine SI-Einheit und wird kaum mehr verwendet. Wenn eine Umrechnung in Nanometer vorgenommen wird, ergeben sich für die Tröpfchengröße Werte von 140 nm, vorzugsweise 10 – 50 nm. Es handelt sich also zweifelsohne um Nanoemulsionen.

Durch die große innere Oberfläche von Nanoemulsionen ist die Bioverfügbarkeit von Stoffen in der Ölphase weit höher. Das kann beispielsweise zur besseren Bioverfügbarkeit von Algenölen, die reich an Omega-3-Fettsäuren sind, genutzt werden. Das Öl wird dabei in Form einer Nanoemulsion in Joghurt eingebracht (Lane et al., 2013).

### NANOSCHÄUME UND NANOBLÄSCHEN

So wie Nanoemulsionen sind Nanoschäume ebenfalls extrem stabil und ergeben sehr interessante sensorische Eigenschaften, wie ein Produkt der Firma JONES SODA Co., USA zeigt. Der Riegel dieser Firma enthält angeblich Kohlendioxidbläschen in Nanoform und ergibt beim Verzehr im Mund ein angenehmes, „elektrisches“ Kribbeln (JONES SODA, 2015).

Ozon zeigt einen guten Sterilisationseffekt bei Wasser, und zwar weit besser als Chlorverbindungen. Ozon existiert in Wasser allerdings nur sehr kurze Zeit, während Ozonbläschen in Nanoform mehrere Monate stabil sein können und Langzeitsterilisationseffekte ergeben. Mit Ozon-Nanobläschen angereichertes Wasser könnte beispielsweise zur Abtötung von Noroviren in Austern eingesetzt werden (Chiba & Takakashi, 2015).

### 1.1.1.2. Potential

Der Nanotechnologie wird ein großes, hoffnungsträchtiges Potential zugeschrieben. Das lässt sich auch aus der Zahl der Patente auf diesem Gebiet ablesen. Im Zeitraum von 2002-2012 finden sich in den Patentdatenbanken 22.759 Patente allein unter dem Stichwort „*nano*“ in Kombination mit „*food*“ und/oder „*agriculture*“ (Grobe & Rissanen, 2012). Bezüglich der Zahl liegt die Patentfamilie „*food processing and production*“ hinter den Familien „*medical applications*“, „*construction materials*“ und „*paper products*“ an vierter Stelle. Seit dem Jahr 2009, wo der Höhepunkt der Patentwelle im Lebensmittelbereich mit ca. 2.500 Patentanmeldungen erreicht wurde, ist aber ein drastischer Abfall auf ca. 1.000 im Jahr 2011 zu beobachten (Pérez-Estève et al., 2013). Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass die praktischen Erfolge der Nanotechnologie im Lebensmittelbereich bis jetzt nicht in dem erhofften Ausmaß eingetreten sind.

In der Datenbank „*Food Science and Technology Abstracts*“ werden im Zeitraum 2001 bis dato 350 wissenschaftliche Artikel betreffend die Nanotechnologie im Lebensmittelbereich zitiert. Nur sehr wenige befassen sich direkt mit der Anwendung in Lebensmitteln selbst. Der Großteil behandelt Einsatzmöglichkeiten bei Lebensmittelverpackungen.

Obwohl mit Sicherheit alle Lebensmittelkonzerne sehr intensiv im Bereich der Nanotechnologie forschen, halten sie sich bezüglich Forschungsergebnissen oder Resultaten bzw. eines praktischen Einsatzes sehr bedeckt.

In der Nanoprodukt-Datenbank des Woodrow Wilson Int. Center (PEN, 2015) wurden im November 2013 in der Kategorie „*Food and Beverages*“ (inkl. Nahrungsergänzungsmitteln und Küchenutensilien) ca. 200 Nanoprodukte angeführt, die schon auf dem Markt sind. 83 davon betrafen Nahrungsergänzungsmittel. 86 Produkte waren Lebensmittel, die Titandioxid als erlaubten Zusatzstoff enthielten. Warum gerade diese aus der Vielzahl an Lebensmitteln, die diesen Zusatzstoff enthalten, herausgegriffen wurden, war nicht nachvollziehbar. Sie wurden unter der Kategorie 5 „*not advertised by manufacturers*“ geführt. Nur 10 Produkte, darunter auch Küchenutensilien, betrafen Lebensmittel direkt. Bei einer Abfrage im Februar 2015 in dieser Datenbank finden sich in der Gruppe „*Food*“ nur mehr 7 Nano-Lebensmittel. Alle Titandioxid enthaltenden Lebensmittel wurden aus der Datenbank entfernt. Von den sieben angeführten Produkten betreffen nur drei Lebensmittel, denen Nanostrukturen zugesetzt wurden, nämlich ein Getränk mit zugesetztem Nano-Gold; ein Pflanzenöl mit zugesetzten, Phytosterine enthaltenden Nanomicellen und ein Schokolade-Shake mit nanoskaligem Kakaopulver.

In der Produktdatenbank DATAMONITOR-Consumer (2015) können auf dem Markt befindliche Lebensmittel nach allen möglichen Kriterien abgefragt werden. Eine Suche nach Lebensmitteln (Abfrage 05.02.2015), die ab 2011 weltweit auf den Markt gekommen sind, und auf der Etiketle die Bezeichnung „*nano*“ allein oder in Wortverbindungen enthalten, ergab nur folgende sieben relevante Treffer:

- Funktionelles Getränk mit zugesetztem Nano-Collagen (Thailand)
- Funktionelles Getränk mit stabilen Nano-Bläschen (USA)
- Milch mit zugesetztem Nano-Eisen (Taiwan)
- und 4 Wodka-Produkte, bei denen bei der Herstellung die Nanofiltration eingesetzt wurde.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, dass weltweit derzeit kaum Lebensmittel auf dem Markt zu finden sind, bei denen der Einsatz der Nanotechnologie beziehungsweise von Nanoprodukten und -strukturen angeführt oder ausgelobt werden.

Die Frage ist deshalb, ob es bei dem großen Potential der Nanotechnologie und der Vielzahl an einschlägigen Patenten, tatsächlich noch zu keinem breiteren Einsatz gekommen ist, oder ob Bestandteile, die unter die Kennzeichnungspflicht fallen, auf den Lebensmitteletiketten dennoch nicht angeführt werden.

### 1.1.1.3. Rechtliche Aspekte

Voraussetzung für eine rechtliche Regelung des Einsatzes der Nanotechnologie im Lebensmittelbereich ist eine entsprechende Definition. Letztere kann entweder über die Größe der Nanopartikel oder über ihre innere Oberfläche erfolgen. International wird der Größenordnung des Nanobereiches sehr unterschiedlich definiert, nämlich von 1 – 200 Nanometer. Die Schwierigkeit bei der Definition nach der Größe liegt darin, dass erstens einmal Nanopartikel nur in einer Dimension im Nanobereich vorliegen können (z.B. Nanofibrillen). Außerdem kann es sein, dass in einem stofflich homogenen Nanomaterial nur ein Teil in Nanopartikelform vorliegt. Ab welchem Anteil an Nanopartikeln wird der Stoff dann zum Nanomaterial? Genau diese Frage stellt sich bei schon lange in Verwendung befindlichen Lebensmittelzusatzstoffen (Titanoxid, Siliziumdioxid).

Besser wäre wahrscheinlich eine Definition über die innere Oberfläche eines Nanomaterials. Je kleiner die Teilchen, umso größer wird diese. Diese Größe sagt auch etwas über die Reaktivität eines Materials aus und damit im Endeffekt auch über mögliche Risiken.

Weltweit fehlt eine einheitliche und verbindliche Definition von Nanomaterialien. Die Europäische Kommission hat im Jahr 2011 eine allgemeine, nicht lebensmittelspezifische Definition empfohlen (Europäische Kommission, 2011), die folgendermaßen lautet:

*„Nanomaterial“ ist ein natürliches, bei Prozessen anfallendes oder hergestelltes Material, das Partikel in ungebundenem Zustand, als Aggregat oder als Agglomerat enthält, und bei dem mindestens 50 % der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung ein oder mehrere Außenmaße im Bereich von 1 nm bis 100 nm haben.*

*In besonderen Fällen kann der Schwellenwert von 50 % für die Anzahlgrößenverteilung durch einen Schwellenwert zwischen 1 % und 50 % ersetzt werden, wenn Umwelt-, Gesundheits-, Sicherheits- oder Wettbewerbserwägungen dies rechtfertigen.*

Spezifisch für den Lebensmittelbereich wird derzeit in der EU versucht in der Novelle der Novel Food-Verordnung eine Regelung und Zulassung für „...**technisch hergestellte Nanomaterialien...**“ zu implementieren (Europäische Kommission, 2013). Derzeit ist nicht bekannt, wann diese Novellierung umgesetzt wird.

Trotz dieser fehlenden verbindlichen horizontalen Definition gibt es bereits zwei EU-Verordnungen, in denen konkret Nanomaterialien in Lebensmitteln geregelt werden. Zum einen ist das die Lebensmittelzusatzstoffverordnung [Verordnung (EG) Nr. 1333/2008] und die Lebensmittelinformationsverordnung [Verordnung (EU) Nr. 1169/2011].

In der Zusatzstoffverordnung wird in Artikel 12 ausgeführt:

*Wenn bei einem Lebensmittelzusatzstoff, der bereits in der Gemeinschaftsliste aufgeführt ist, sein Produktionsverfahren oder die verwendeten Ausgangsstoffe erheblich geändert werden **oder die Partikelgröße — z. B. durch die Anwendung der Nanotechnologie — ge-***

**ändert wird**, ist dieser nach den neuen Verfahren oder mit den neuen Ausgangsstoffen hergestellte Lebensmittelzusatzstoff als ein anderer Zusatzstoff anzusehen, und es ist ein neuer Eintrag in die Gemeinschaftsliste bzw. eine Änderung der Spezifikationen erforderlich, bevor der Zusatzstoff in Verkehr gebracht werden darf.

Offen bleibt hier die Frage, ob das auch Zusatzstoffe betrifft, die schon seit vielen Jahren eingesetzt werden, und zumindest teilweise in nanoskaliger Form vorliegen (z.B. Titandioxid, Siliziumdioxid, Cyclodextrin).

In der Lebensmittelinformationsverordnung wird in Artikel 2 und Artikel 18 sehr ausführlich auf Nanotechnologie Bezug genommen:

*Artikel 2 - Begriffsbestimmungen*

t) **„technisch hergestelltes Nanomaterial“** jedes absichtlich hergestellte Material, das in einer oder mehreren Dimensionen eine Abmessung in der Größenordnung von 100 nm oder weniger aufweist oder deren innere Struktur oder Oberfläche aus funktionellen Kompartimenten besteht, von denen viele in einer oder mehreren Dimensionen eine Abmessung in der Größenordnung von 100 nm oder weniger haben, einschließlich Strukturen, Agglomerate und Aggregate, die zwar größer als 100 nm sein können, deren durch die Nanoskaligkeit bedingte Eigenschaften jedoch erhalten bleiben.

Zu den durch die Nanoskaligkeit bedingten Eigenschaften gehören

- i) diejenigen Eigenschaften, die im Zusammenhang mit der großen spezifischen Oberfläche des betreffenden Materials stehen, und/oder
- ii) besondere physikalisch-chemische Eigenschaften, die sich von den Eigenschaften desselben Materials in nicht nanoskaliger Form unterscheiden.

*Artikel 18 - Zutatenverzeichnis*

**(3) Alle Zutaten, die in Form technisch hergestellter Nanomaterialien vorhanden sind, müssen im Zutatenverzeichnis eindeutig aufgeführt werden. Auf die Bezeichnung solcher Zutaten muss das in Klammern gesetzte Wort „Nano“ folgen.**

Die Problematik dieser Regelung ist die mangelnde Differenzierung zwischen traditionellen Lebensmittelverarbeitungsverfahren und neuen Verfahren. Bei vielen, seit Jahrhunderten betriebenen, klassischen Lebensmittelverarbeitungsverfahren entstehen neue Nanostrukturen (z.B. Mahlen, Emulgieren, Homogenisieren, Macerieren). Theoretisch müssten nach dieser Definition nun alle technisch hergestellten Emulsionen, Mahlprodukte (Mehl) etc., die Nanomaterialien enthalten, als Nanomaterialien gekennzeichnet werden (Grobe & Rissanen). Genau über diese Frage sind sich die Europäische Kommission und das Europäische Parlament uneinig. Das Parlament vertritt hier einen sehr rigiden Standpunkt (Scott-Thomas, 2014).

Seit 11. Dezember 2014 müssen die Regelungen der Lebensmittelinformationsverordnung eingehalten werden. Es gibt aber seitens der Kommission noch keine Leitlinien, was nun wirklich unter einem „technisch hergestelltem Nanomaterial“ zu verstehen ist, und welche Zutaten so zu kennzeichnen sind (BLL, 2014). Es wird jedenfalls spannend, wie die Produzenten diese Regelung umsetzen werden. Zumindest neuartige Nano-Zutaten sind auf jeden Fall kennzeichnungspflichtig. Voraussichtlich wird sich nur sehr selten der „nano“-Hinweis auf den Lebensmittletiketten finden, weil es wie in Kap. 1.1.1.2. ausgeführt, derzeit kaum solche gibt.

Einen Sonderfall stellt der Bereich der Lebensmittelverpackung dar, wo der Einsatz der Nanotechnologie schon weit verbreitet ist (siehe Teil 5). Für Lebensmittelverpackungen gibt es eigene gesetzliche Regelungen [VERORDNUNG (EG) Nr. 1935/2004]. Sie müssen einzeln genehmigt werden und es gilt der Grundsatz, dass sie nicht auf Lebensmittel übergehen dürfen. Eine Kennzeichnung des Verpackungsmaterials selbst ist auf den Lebensmittelverpackungen nicht vorgeschrieben.

### 1.1.1.4. Nutzen und Risiken

---

#### Nutzen der Nanotechnologie

---

Der Einsatz der Gentechnik im Agrar- und Lebensmittelbereich hat bis heute kaum einen direkt erkennbaren und spürbaren Nutzen für die Konsumentinnen und Konsumenten. Ob beispielsweise eine Pflanze Herbizid-resistent ist, wird dem Endverbraucher ziemlich egal sein und er kann darin keinen Vorteil erkennen. Im Gegensatz dazu sollte der Nutzen der Nanotechnologie in allen Einsatzbereichen für die Verbraucherinnen und Verbraucher direkt erkennbar und spürbar sein. Obige Ausführungen zeigen diese Vorteile für den Lebensmittelbereich auf und müssen hier nicht wiederholt werden.

Ob diese Vorteile das möglicherweise ebenfalls vorhandene Risiko aufwiegen, muss im Endeffekt von den Konsumentinnen und Konsumenten selbst entschieden werden. Die Akzeptanz der Nanotechnologie wird umso größer sein, je offener alle Beteiligten damit umgehen.

---

#### Risiken der Nanotechnologie

---

So wie jedes technische Handeln, birgt die Nanotechnologie neben den unbestreitbaren Nutzen ebenfalls ein „Gefährdungspotential“. Das Gefährdungspotential bezeichnet das im Auslöser eines Risikos (etwa Stoff, Technologie oder Verhalten) enthaltene Potenzial an möglicher Gefährdung von Leben, Gesundheit und Umwelt (Zimmer et al., 2009).

Nachdem Nanotechnologie, wie bereits ausgeführt, sehr vielfältig ist und alle Technikbereiche betrifft, kann auch keine allgemeingültige, allumfassende Risikoabschätzung vorgenommen werden. Auch innerhalb eines Technikbereiches muss noch weiter differenziert werden. Wahrscheinlich wird oft nur eine separate Entscheidung für jeden Einsatzfall zielführend sein. Bestenfalls kann ein Clustering von Einsatzfällen vorgenommen werden.

Mit den Risiken der Nanotechnologie allgemein und auch im Lebensmittelbereich befassen sich bereits eine Vielzahl an Publikationen [z.B. die NanoTrust Dossiers des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW, 2015)] und sogar ein eigener Wissenschaftsbereich (⇒ Nanotoxikologie). Trotzdem ist der Wissensstand bezüglich des Risikopotentials in vielen Bereichen noch sehr dürftig. Hier soll nur auf einige spezifische Aspekte im Lebensmittelbereich eingegangen werden. Insbesondere wird der Risikoaspekt beim Verzehr von Nanopartikeln oder Nanostrukturen, also die orale Aufnahme, behandelt.

Die in Kap. 1.1.1.4. angeführten, möglichen Verwendungsbeispiele lassen sich in drei Risikokategorien zusammenfassen und abhandeln:

a) Organische, abbau- bzw. verdaubare Nanopartikel oder Nanostrukturen

In diese Kategorie fallen Nanoemulsionen aus Lipiden und aromatischen Ölen und den darin gelösten organischen Stoffen (z.B. Vitamine, Farbstoffe, Aromastoffe). Diese können sich im Verdauungstrakt durch zahlreiche physikalische Vorgänge so verändern, dass der Nanobereich verlassen wird (z.B. Koaleszenz). Eine weitere Möglichkeit ist der Abbau bzw. Verdauung dieser Substanzen, so wie in der Nichtnanoform. Nach Yada et al. (2014) gibt es keinerlei Hinweise, dass solche Strukturen im Verdauungstrakt direkt absorbiert werden und in andere Körperregionen (z.B. Blutbahn) gelangen.

Bei stärke- (z.B. Cyclodextrin) und proteinbasierten Einkapselungssystemen werden sich hinsichtlich der Trägermaterialien ebenfalls keine größeren Probleme ergeben, wenn diese im Verdauungstrakt abgebaut werden können oder löslich sind.

---



b) Organische, nicht abbau- bzw. verdaubare Nanopartikel

Zu dieser Gruppe zählen beispielsweise Nanosuspensionen, bei denen natürliche Zellwandbestandteile in den Nanobereich zerkleinert wurden, oder isolierte, nanoskalige Ballaststoffpräparate und andere Hydrokolloide. Die Bestandteile der pflanzlichen Zellwände und viele Hydrokolloide sind durch menschliche Verdauungsenzyme nicht abbaubar, das trifft uneingeschränkt für Cellulose zu. Andere können im Dickdarm teilweise durch unser Mikrobiom (Darmbakterien) gespalten werden (z.B. Pektin). Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass diese Substanzen bei der Magen-Darm-Passage verändert werden (Yada et al., 2014). Wie sich das auf ihre Resorbierbarkeit auswirkt, oder ob sie ausgeschieden werden ist nicht klar.

c) Anorganische, unlösliche Nanopartikel (Metalle und Metalloide)

Das größte Risikopotential geht zweifelsohne von unlöslichen, anorganischen Nanopartikeln aus. Metalle und Metalloide, entweder in ihrer Reinform oder in Verbindung mit anderen Elementen, werden in ihrer nanoskaligen Form schon bewusst oder unbewusst im Bereich der Lebensmittel eingesetzt. Beispielsweise sind das:

**Siliziumdioxid (silicone dioxide):** Wird als erlaubter Zusatzstoff (E 551) seit Jahrzehnten als Rieselhilfsmittel verwendet. Zu diesem Zusatzstoff liegen umfangreiche toxikologische Studien vor, die keine Hinweise auf nachteilige gesundheitliche Effekte ergaben (Greßler et al., 2008, Biosuisse, 2013). Die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) hat die Verwendung von Siliziumdioxid (silanisiert) als Zusatzstoff in Lebensmittel-Kontakt-Materialien im Zuge einer Re-Evaluierung genehmigt. Hintergrund des wissenschaftlichen Gutachtens war die Tatsache, dass dieses Material bislang immer auf der Basis von synthetischem amorphem Siliziumdioxid in Nanoform hergestellt wurde. Das CEF-Gremium kam zu dem Schluss, dass die bereitgestellten Informationen das Fehlen von isolierten Primär-Nanopartikeln im Ausgangsmaterial hinreichend belegen, da nur Agglomerate mit einem Durchmesser größer 100 nm nachgewiesen werden konnten. Das Einbringen der Siliziumdioxid-Partikel in eine Polyethylen-Folie hatte keinen Einfluss auf die beobachtete Partikelgröße. Im Fall eines simulierten Lebensmittel-Kontakt-Materials konnte ein Transport von Partikel jeglicher Größe aus der Folie hin zum entsprechenden Lebensmittel ausgeschlossen werden. Demnach geht von den beschriebenen Partikelgrößen von Siliziumdioxid (silanisiert) kein Sicherheitsrisiko für den Verbraucher aus innerhalb der derzeit autorisierten Nutzungsbedingungen (EFSA CEF Panel, 2014). Bis Dezember 2016 soll auch eine Neubewertung von Siliziumdioxid (E 551) als Lebensmittelzusatzstoff erfolgen [Verordnung (EU) Nr. 257/2010].

**Nanocalcium** wird, wie bereits erwähnt, in manchen Ländern (nicht in der EU) Lebensmitteln zur Calciumanreicherung zugesetzt.

**Nanosilber** ist eines der am weitesten verbreiteten Nanomaterialien in vielen Technikbereichen. Lebensmitteln wird es zwar nicht direkt zugesetzt, es wird aber zur Oberflächenbeschichtung von vielen Lebensmittelkontaktmaterialien verwendet (z.B. Kühlschränke, Vorratsdosen, Schneidbretter). Die generellen Bedenken gegenüber der weitverbreiteten Anwendung dieses Nanomaterials und potentielle Risiken werden in einem eigenen Nano-Dossier der ÖAW (Fries, 2009) eingehend behandelt. Durch Abrieb könnte Nanosilber auch in die Lebensmittelmatrix gelangen. Wie die Ergebnisse von Echegoyen & Nerin (2013) zeigen, kann eine solche Migration tatsächlich in geringem Ausmaß eintreten (unter dem zulässigen Grenzwert), wobei sich das Nanomaterial verändert. Eine solche Transformation des nanoskaligen Silbers bei einer Migration finden auch Artiaga et al. (2015)

**Titandioxid:** In letzter Zeit gibt es Hinweise, dass die als Lebensmittelzusatzstoff verwendeten Titandioxidpräparate von Natur aus einen relativ hohen nanopartikulären Anteil (ca. 36 % unter 100 nm) aufweisen (Weir et al., 2012). Aus Tierversuchen ergab sich der Verdacht auf eine

mögliche krebserregende Wirkung von Titandioxid generell (Baan et al., 2006). Während früher angenommen wurde, dass Titandioxidpartikel den Verdauungstrakt passieren ohne adsorbiert zu werden, wurde nun in Tierversuchen gefunden, dass eine zumindest teilweise Adsorption erfolgt (Yada et al., 2014).

**Zusammenfassend kann zur Risikobewertung von Nanomaterialien im Lebensmittelbereich festgestellt werden, dass wegen der Vielfalt der Materialien eine generelle Bewertung nicht möglich ist und der Informationsstand derzeit noch nicht für endgültige Beurteilungen der unterschiedlichen Nano-Strukturen ausreicht. Insbesondere fehlen definitive Erkenntnisse und Aussagen bezüglich des Schicksals aufgenommener Nanopartikel und -strukturen im Verdauungstrakt (Yada et al., 2014).**

### 1.1.1.5. Informationsstand und Akzeptanz seitens der Verbraucherinnen und Verbraucher

Einleitend zu dieser Thematik sei hier eine Aussage der Delphi-Studie zur Nanotechnologie des deutschen Bundesinstituts für Risikoforschung zitiert (Zimmer et al., 2009):

*Die schnelle Entwicklung der Nanotechnologie und die zunehmende Bedeutung dieser Technologie für den Verbraucheralltag finden bislang eher unbeachtet von der Öffentlichkeit statt. Der gesellschaftliche und beim überwiegenden Teil der Bürger auch der individuelle Meinungsbildungsprozess zum Thema stehen erst am Anfang. Die Debatten zur Nanotechnologie werden derzeit überwiegend von Experten in Fachzirkeln geführt. Bei Politik und Fachöffentlichkeit besteht jedoch Problembewusstsein dahingehend, dass eine so weit in die Zukunft reichende und so viele Bereiche des Alltagslebens tangierende Technologie wie die Nanotechnologie auch auf ihre Akzeptanz durch Nutzer und Verbraucher hin untersucht werden sollte.*

Nach einer anderen Studie des Bundesinstituts für Risikoforschung (Zimmer et al., 2008) können ca. 50 % der Bevölkerung mit dem Begriff Nanotechnologie nichts anfangen. Bei der Bewertung der Nanotechnologie durch die Konsumentinnen und Konsumenten ergaben sich deutliche Unterschiede hinsichtlich der einzelnen Anwendungsgebiete. Während insgesamt eher eine positive Akzeptanz vorhanden war, verringerte sich diese „je näher die Produkte als an den Körper herandrückend bzw. im Körper selbst wirkend erlebt werden“. Ausnahme von dieser Regel ist der Medizinbereich. Nanotechnologie in Gebrauchsartikeln wird also eher akzeptiert als in der Kosmetik und vor allem im Lebensmittelbereich. Im Lebensmittelbereich wiederum, wird Nanotechnologie im Verpackungsbereich leichter angenommen (Rollin et al., 2011). Gefühlte Vorteile sind hier ein entscheidender Prädiktor für eine Kaufbereitschaft (Siegrist et al., 2007, Siegrist et al., 2008).

Die Europäische Kommission (Gaskell et al., 2010) hat sich ebenfalls mit der Akzeptanz verschiedener Technologien, unter anderem mit der Nanotechnologie, auseinandergesetzt. Die Schlussfolgerungen basieren auf den Eurobarometer 73.1 Umfragen. In der EU sagen 55 % der Konsumentinnen und Konsumenten, dass sie noch nie von Nanotechnologie gehört haben. 20 % haben davon gehört und 22 % haben sich tatsächlich auch schon damit informationsmäßig auseinandergesetzt. Auf die Frage, ob Nanotechnologie generell unterstützt werden sollte, gaben 60 % der EU-Bürgerinnen und Bürger eine zustimmende Antwort. Österreich liegt hier mit einer Zustimmungsrate von 48 % am vorletzten Platz.

Das vor kurzem abgeschlossene Europäische Projekt „NANOPINION - Monitoring public opinion on Nanotechnology in Europe“ hatte ebenfalls das Ziel den Wissensstand und die Zustimmung der EU-Bürgerinnen und Bürger zur Nanotechnologie mittels on-line Befragungen zu erheben

(NANOPINION, 2015). Zur Nanotechnologie im Lebensmittelbereich gab es nur eine Fragestellung, nämlich „Würden Sie antibakterielle Lunchboxen benutzen, die Nanopartikel in Kunststoff enthalten?“ Gemeint sind dabei vor allem die bereits auf den Markt befindlichen, mit Nanosilber beschichteten Kunststoffbehälter. Die Antworten lauteten:

5 %	Weiß nicht
20%	Stimme absolut nicht zu
14 %	Stimme überwiegend nicht zu
25 %	Stimme überwiegend zu
36 %	Stimme absolut zu

**Es scheint so, dass ein Großteil der Bevölkerung sich noch keine endgültige Meinung bezüglich der Nanotechnologie gebildet hat. In welche Richtung das Meinungspendel ausschlägt, wird davon abhängen, wie offen und ehrlich mit dieser Thematik von allen Beteiligten umgegangen wird.**

## 1.1.2. 3-D-Food Printing

Gag oder Realität, Fiktion oder Funktion, Nonsense oder ernstzunehmende Technik, diese Fragen stellen sich im Zusammenhang mit dem 3-D-Druck von Lebensmitteln. In der Öffentlichkeit ist dieses Thema bis jetzt bestenfalls eine Randnotiz. Auch in der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur ist diese Technik nicht existent. Gerade einmal zwei relevante Treffer finden sich bis jetzt in der Datenbank „*Food Science and Technology Abstracts*<sup>®</sup>, *OvidSP*“.

Der 3-D-Druck und die dazugehörigen Maschinen (3-D-Drucker) sind allerdings schon weit entwickelt und gehören in vielen Technikbereichen mehr oder weniger bereits zum Stand der Technik. Die Herstellung von neuen Lebensmitteln beziehungsweise -strukturen durch 3-D-Drucker ist zwar eine sehr futuristisch klingende Angelegenheit, zumindest aber in der Labor-Praxis bereits erstaunlich weit fortgeschritten.

### 1.1.2.1. Stand der Technik

3-D-Druck ist ein computergestütztes Fertigungsverfahren, bei dem die phantasievollsten, dreidimensionalen Produkte und Gegenstände durch sukzessives Aufeinanderschichten von Material erzeugt werden. Im Prinzip kann die Technik mit Laser- oder Tintenstrahldruckern verglichen werden, wo aus Patronen entnommene, farbige Tinte schichtweise aufgetragen wird, und aus wenigen Farben alle Farbtöne erzeugbar sind. Statt Tinte verwendet ein 3-D-Drucker aber Pulver oder Pasten (Bermann, 2012).

Das aus- bzw. aufgetragene Material muss dann in irgendeiner Weise verfestigt (ausgehärtet) werden oder sich selbst verfestigen. Dafür existieren mehrere prinzipielle Methoden bzw. Techniken (Anonym, 2014 a, Barnat, 2014):

**Materialextrusion** (*fused decomposition modelling, thermoplastic extrusion, plastic jet printing, fused filament method*): Ein pumpbares oder vorzugsweise thermoplastisches (Kunststoff)-Material wird aufgeschmolzen, durch eine computergesteuerte Extruderdüse ausgetragen und schichtweise aufeinander gelegt. Im Prinzip können aufschmelzbare (Metall)-Pulver, Beton, keramische Materialien und auch Lebensmittelkomponenten bzw. -zutaten dafür verwendet werden.

**Bottich-Photopolymerisation** (*vat photopolymerization*): In einem Tank mit einem flüssigen Photopolymer wird mittels eines Lichtstrahls oder Lasers die erste Schicht eines dreidimensionalen Objektes an der Flüssigkeitsoberfläche polymerisiert. Diese erste Schicht liegt auf einer absenkbaren Plattform, welche nun Schritt für Schritt abgesenkt und jedes Mal vorher mit dem Lichtstrahl eine neue Schicht darauf polymerisiert wird.

**Material-Strahl-Verfahren** (*material jetting*): Ein computergesteuerter Druckerkopf sprüht schichtweise eine Flüssigkeit auf, die entweder mit Licht verfestigt wird, oder bei Kontakt erstarrt.

**Bindemittel-Verfahren** (*binder jetting*): Ein computergesteuerter Druckkopf versprüht selektiv ein Bindemittel auf aufeinanderfolgenden Pulverschichten.

**Power Bed Fusion**: Ein Laser oder eine andere Wärmequelle verbindet selektiv aufeinanderfolgenden Pulverschichten.

**Laser Pulver-Formung** (*laser powder forming or directed energy deposition*): Ein Metallpulver wird in einen Laser gebracht, geschmolzen und abgelagert.

**Blatt-Lamination** (*sheet lamination*): Dünne, vorgeschchnittene Schichten aus Papier, Kunststoff oder Metall werden aufeinander laminiert.

Es liegt auf der Hand, dass für den 3-D-Lebensmitteldruck nur das erstgenannte **Materialextrusionsverfahren** praktikabel ist. Bei der Suche nach einem leicht verfügbaren Experimentiermaterial für 3-D-Druckversuche kam ein findiger Forscher, Brandon Bowman, auf die erfolgreiche Idee Buttergebäckteig dafür zu verwenden (Lipson & Kurman, 2013).

Beim 3-D-Druck von Lebensmitteln wird also das extrudierte Vor- bzw. Rohmaterial durch eine computergeführte Extruder- bzw. Formdüse schichtweise zu dreidimensionalen Lebensmitteln aufgetragen. Im Prinzip sind dafür folgende Komponenten erforderlich:

- Rohmaterial
- 3-D-Drucker mit Extruderdüse
- Computersteuerung zur Führung der Extruderdüse
- Computersoftware, wo die erwünschte Produktform vorprogrammiert ist.
- Nachbehandlungskomponenten zur Aushärtung bzw. Verfestigung des Materials

**Rohmaterial**: Es gibt viele Lebensmittelpulver, Pasten, Teige, Gele, Zuckerglasur, Schokolade usw., die sich prinzipiell für eine solche Extrusion eignen. Die Vorprodukte für einen 3-D-Druck können selber zusammengemischt, oder vielleicht zukünftig abgefüllt in Patronen von diversen Erzeugern gekauft werden. So wie bei Tintenstrahl- oder Laserdruckern werden die einzelnen Vorkomponenten zu fertigen Lebensmitteln gedruckt beziehungsweise geformt. Angeblich arbeitet die Firma Barilla schon an solchen Vorkomponenten zur Pastaherstellung (Anonym, 2014 b).

**3-D-Drucker** sind bereits Stand der Technik und in vielen Ausführungen und Varianten zu erschwinglichen Preisen erhältlich. Es existieren sogar schon Modelle speziell für den Lebensmittelbereich, wie z.B.

Foodini 3-D-Printer ([www.naturalmachines.com](http://www.naturalmachines.com))

ChefJet™ 3-D-Printer ([www.3dsystems.com/es/chefjet](http://www.3dsystems.com/es/chefjet)) – Diese Firma bietet auch die entsprechende Software mit Rezepten dazu und sogar die Rohstoffe selbst an. Welche phantastischen Kreationen mit diesem Drucker aus Zucker(glasur) möglich sind, zeigt Abb. 4.1.2.

**Computersteuerung und Computersoftware:** Die Computersteuerung ist beim 3-D-Drucker inkludiert. 3-D-Druck-Software zur Kreation und zum Entwurf eigener Formen ist ebenfalls schon käuflich für jedermann zu erwerben (z.B. <https://www.indiegogo.com/projects/new-matter-mod-t-a-3d-printer-for-everyone>).

**Nachbehandlungskomponenten zur Aushärtung bzw. Verfestigung des Materials:** Hier besteht mit Sicherheit noch der größte Entwicklungsbedarf. Materialien, wie Zuckerglasur, die sich selbst verfestigen, stellen nicht das Problem dar. Wenn das Produkt aber verfestigt werden soll, muss der 3-D-Drucker mit Nachbehandlungsgeräten kombiniert werden. Dafür sind einige Möglichkeiten vorstellbar:

- Backplatte: Das Produkt wird durch den Druckerkopf direkt auf eine heiße Platte ausgedruckt und sozusagen schichtweise gebacken (Lipson & Kurman, 2013).
- Mikrowelle zum nachträglichen Erhitzen, um zum Beispiel Proteinprodukte zu koagulieren.
- Hochfrequenz zur Trocknung und Verfestigung von Gelen



Abb. 4.1.2: Kreationen aus Zuckerglasur, hergestellt mit dem ChefJet™ 3-D-Drucker (<http://the-sugar-lab.com/gallery>)

### 1.1.2.2. Potential

Aus derzeitiger Sicht sind 3-D-Drucker für eine Massenfertigung von Lebensmitteln kaum geeignet. Ihre Stärke liegt vielmehr in der raschen und einfachen individuellen Gestaltung von Unikaten. In Zukunft wäre es denkbar, dass 3-D-Drucker die Küche revolutionieren und in der Haushaltsküche oder in der Gastronomie zur Standardausrüstung gehören. Neue Lebensmittel werden direkt von den Endverbrauchern vor Ort in kreativer Weise hergestellt. Die Lebensmittelproduzenten werden zu Lieferanten von Vorprodukten, welche in Patronen, Tuben etc. abgefüllt und angeboten werden. Es könnten ähnliche Konzepte wie das Nespresso-System von der Firma Nestlé entstehen, bei dem Maschine und Vorprodukte (Kaffeekapseln) gemeinsam verkauft werden.

Der 3-D-Druck von Lebensmitteln wird an seine Grenze gelangen, wenn frische Lebensmittel ausgedruckt werden sollen. Das wird am Beispiel eines Hamburgers von Lipson & Kurmann (2013) erklärt. Der 3-D-Druck von Faschierem zum Burger stellt kein Problem dar. Auch das Ketchup kann aus einer anderen Tube darauf gedruckt werden. Der Druck des rohen Teiges und das anschließende Backen sind ebenfalls vorstellbar. Nicht möglich ist der 3-D-Druck von frischen Tomatenscheiben, Zwiebelringen und Salatblättern. Dazu muss ein völlig neues Konzept kreiert werden, indem diese Lebensmittel zuerst püriert und dann in der früheren Form dreidimensional ausgedruckt und re-strukturiert werden. Ein 3-D-Druck eines Hamburgers geht also von mehreren Patronen aus, in denen die diversen Bestandteile vorerst in pump- und formbarer Pastenform vorliegen und schichtenweise zu einem Hamburger gedruckt werden. Ob ein solches Produkt mit dem echten konkurrieren kann, wird sich herausstellen. Der bessere Weg wird sein, nicht konventionelle Lebensmittel zu imitieren bzw. nachzudrucken, sondern völlig neue Lebensmittel und Lebensmittelkompositionen zu kreieren.

Um das derzeit gar noch nicht in vollem Umfang vorstellbare Potential des 3-D-Druckes von Lebensmitteln zu beleuchten, werden im Folgenden einige in Zukunft denkbare Einsatz- und Anwendungsgebiete angeführt:

**Süß- und Backwarenbereich:** Schokolade und Zuckerglasur sind ideale Vormaterialien für einen 3-D-Druck von Süßwaren (Marcelo Coelho Studio, 2015, Lipson & Kurman, 2013). Nicht von ungefähr beschäftigen sich die Firma Hershey (Askew, 2014) und die Firma Mondelez (Borison, 2014) bereits intensiv auf diesem Gebiet. Zukünftig wären Konditoreien und Bäckereien prädestiniert, 3-D-Drucker zur Herstellung von phantastischen Süßwaren- und Gebäckkreationen einzusetzen.

**Herstellung von neuen Lebensmitteln für ältere Personen:** Ausgehend von Pasten ermöglicht ein 3-D-Druck die Herstellung von Lebensmitteln mit weichen Texturen, die aber so aussehen und schmecken, wie die „härteren“ Originale, und auch von Personen mit Schluckbeschwerden ohne Kauen verzehrbar sind (Bonar, 2014).

**3-D-Druck von Lebensmitteln in Flugzeugen und in der Raumfahrt:** Die Passagiere gestalten auf dem Bildschirm vor ihren Sitzen ein Lebensmittel, welches in der Kombüse ausgedruckt wird. Der Vorteil wäre, dass nicht viele Lebensmittel unnötig vorrätig gehalten werden müssen, sondern bei Bedarf ganz individuell aus wenigen Grundrohstoffen erzeugbar sind.

**Individualisierte Ernährung (Molekulare Ernährung):** Dieser Bereich lässt sich am besten an Hand eines Beispiels erklären. Ein Nanosensor in der Blutbahn eines Diabetikers sendet Daten an einen Computer, dessen Software berechnet, welche Nährstoffe die nächste Mahlzeit enthalten muss. In weiterer Folge erstellt er eine Rezeptur für ein vom Diabetiker vorgewähltes Lebensmittel, leitet diese Daten an den 3-D-Drucker weiter, der schlussendlich das Lebensmittel ausdruckt (Lipson & Kurman, 2013).

**Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass 3-D-Drucker ganz gewiss Eingang in unser Leben und in unsere Haushalte für die unterschiedlichsten Zwecke finden werden. Der 3-D-Druck von Lebensmitteln wird ebenfalls kommen. Die Frage ist nur, ob er eine Nische für skurrile Anwendungsgebiete bleibt, oder allgemein Einzug in unsere Küchen hält, und ob er unsere Art zu essen und unsere Gesundheit zu managen entscheidend beeinflussen wird oder nicht. Wenn ja, wird der Kühlschrank in Zukunft zahlreiche Patronen mit aseptisch abgefüllten Grundmaterialien enthalten, die zu den diversesten Produkten kombiniert und gestaltet werden können.**

### 1.1.2.3. Rechtliche Aspekte

Klarerweise gibt es noch keine spezifischen, rechtlichen Regelungen auf dem Gebiet des 3-D-Druckes für Lebensmittel. Die Vorprodukte als auch die fertig „gedruckten“ Produkte werden im Normalfall eindeutig Lebensmittel sein. Es könnten aber völlig neue Vorprodukte aus diversen Ingredienzen und isolierten Lebensmittelbestandteilen erzeugt werden, die in dieser Zusammensetzung noch nicht existieren.

Die fertigen Produkte werden direkt im Haushalt oder in der Gastronomie erzeugt. Der Gesetzgeber wird sich daher wahrscheinlich eher auf die Regelung der angebotenen Vorprodukte beschränken müssen.

Es wäre auch möglich, dass in der EU die Novel-Food-Verordnung zum Tragen kommt. Zwei in dieser Verordnung genannte Kriterien, wann ein Lebensmittel neuartig ist, könnten hier zutreffen [VERORDNUNG (EG) Nr. 258/97]:

- Lebensmittel mit neuer oder gezielt modifizierter primärer Molekularstruktur
- Lebensmittel, die mit einem neuen, nicht üblichen Verfahren hergestellt wurden, das eine Veränderung der Zusammensetzung oder Struktur bewirkt.

### 1.1.2.4. Nutzen und Risiken

Der Nutzen des 3-D-Druckes für Lebensmittel wird individuell ganz verschieden sein. Jedenfalls können die Verbraucher selbst frei entscheiden, ob ihnen diese Technik Vorteile bringt oder nicht.

Lebensmittel aus dem 3-D-Drucker sind, obwohl sie den Anschein von konventionellen Produkten haben können, künstliche, designte Lebensmittel und weit von „natürlichen“ Lebensmitteln entfernt.

Spezifische Risiken sind in dieser Technik derzeit nicht erkennbar.

### 1.1.2.5. Informationsstand, Wahrnehmung und Akzeptanz seitens der Verbraucherinnen und Verbraucher

Aufgrund der Neuheit des Verfahrens ist der Informationsstand der Öffentlichkeit derzeit praktisch nicht vorhanden. Da direkt sichtbare und spürbare Vorteile existieren, ist zu erwarten, dass zumindest bei einigen Konsumentenschichten und für bestimmte Einsatzzwecke die Akzeptanz gegeben sein wird.

## 1.1.3. Neue Emulgiertechniken

Beim Emulgieren sollen zwei nicht miteinander mischbare Flüssigkeiten zu einem System (⇔ Emulsion) vereinigt werden, indem eine der beiden Flüssigkeiten in der anderen in Form feinsten Tröpfchen verteilt wird.

### 1.1.3.1. Membranemulgierung

Während bei den konventionellen Emulgierv Verfahren die erwünschte Tröpfchengröße durch sukzessives Zerkleinern größerer Tröpfchen erfolgt, wird bei der Membranemulgierung jedes Tröpfchen individuell geformt. Dazu wird die zu emulgierende Phase durch eine Membran in die kontinuierliche Phase hinein gedrückt (Abb. 4.1.3). Die Größe der Membranporen bestimmt die Tröpfchengröße (Spyropoulos et al., 2013, Charcosset, 2009). Die Technik ist sehr einfach und benötigt weniger Energie, weniger Emulgatoren und ermöglicht eine sehr enge Tröpfchengrößenverteilung.

lung. Außerdem werden die Produkte schonender behandelt als bei den klassischen Emulgiermethoden.

Eine Sonderform der Membranemulgierung ist die rotierende Membran-Emulgierung. Hier wird nicht die äußere Phase an der Membran vorbei gepumpt, sondern die Membran ist eine rotierende Röhre, die in der äußeren Phase rotiert. Die aus der Membran austretenden Tröpfchen, werden durch die Rotation sofort abgeschert und sind sehr klein (Lloyd et al., 2014).

Als Membranmaterialien können poröses Glas, keramisches Material und Kunststoffpolymere verwendet werden. Die letzte Entwicklung sind Metallmembranen, bei denen sehr gleichmäßige Poren mittels Laser gebohrt werden können (Spyropoulos et al., 2013).

Seit ihrer Einführung vor rund 30 Jahren hat die Membranemulgierung in der Pharma- und Kosmetikbranche weit verbreitete Anwendung gefunden. Aufgrund der Nachteile, vor allem der geringen Durchflussrate, steht im Lebensmittelbereich ihr Einsatz erst am Beginn. Mit dem weiteren Fortschritt dieser Technik, vor allem bei den Membranen, ist aber eine weitere Verbreitung auch in diesem Bereich zu erwarten.

Im Jahr 2009 war erst ein Lebensmittel dokumentiert auf dem Markt, bei dessen Herstellung die Membranemulgierung bereits genutzt wurde. Es handelt sich um einen kalorienreduzierten Brotaufstrich (Charcosset, 2009). Es kann angenommen werden, dass es in der Zwischenzeit bereits mehr Produkte sind. Da die Deklaration eines Einsatzes dieser Technik auf den Etiketten nicht zwingend erforderlich ist, kann das aber kaum eruiert werden.

Die mittels Membranemulgierung erzeugten Emulsionen sind prinzipiell mit den auf konventionellem Weg erzeugten vergleichbar.

### 1.1.3.2. Microfluidization

Die Weiterentwicklung der konventionellen Kegel/Platten-Homogenisatoren bzw. -emulgatoren stellt die Maschine der US-Firma Microfluidics dar. Das Verfahren wurde inzwischen als „*Microfluidization*“ bekannt. Dabei wird eine Voremulsion mit hohem Druck (bis zu 150 MPa) in eine sogenannte Interaktionskammer gepumpt (Abb. 4.1.4). Diese besteht aus Mikrokanälen in denen das Produkt in zwei Flüssigkeitsströme geteilt wird, die rechtwinkelig umgelenkt werden, wobei sehr hohe Scherkräfte entstehen. Die beiden Flüssigkeitsströme prallen dann in der Kammer aufeinander, werden noch einmal umgelenkt und treten anschließend aus der Kammer aus (Jafari et al., 2007). Bei sehr hohen Drücken und langen Emulsionszeiten kann es allerdings zu einer Überverarbeitung kommen, wobei die Tröpfchen koaleszieren, also sich wieder zu größeren Tröpfchen vereinigen.

Die auftretenden hohen Scherkräfte und Kavitationen in der Interaktionskammer ermöglichen die Herstellung sehr feindisperser Emulsionen bis in den Nanobereich.

Mit dieser Maschine können auch Feststoffpartikel in Suspensionen (z.B. Zellwandbestandteile in trüben Obst- und Gemüsesäften) bis in den Nanobereich zerkleinert werden. Die entstehenden Nanosuspensionen sind stabil, d.h. die Nanopartikel setzen sich nicht mehr ab. Wan et al. (2015) nutzen diese Möglichkeit zur Herstellung von essbaren Überzugsmaterialien für Lebensmittel. Ballaststoffe werden dabei mittels *Microfluidization* sehr fein zerkleinert. Das entstehende Überzugsmaterial zeigt gute Barriereigenschaften und ist wasser“löslich“ bzw. besser wasserdispergierbar.



Die Firma Microfluidics bietet Produktionsmaschinen in verschiedenen Größen und Ausführungen an, von denen einige bereits in der Praxis eingesetzt werden. Ob ein breiterer Einsatz in Zukunft zu erwarten ist, wird sich weisen.

Rechtliche Aspekte dieser Methode betreffen einerseits die Maschine selbst aber auch die damit erzeugten Lebensmittelsysteme, sofern sie in den Nanobereich hineinfallen. Die Bewertung solcher Nanosysteme wird im Kap. 1.1.1.3. abgehandelt.

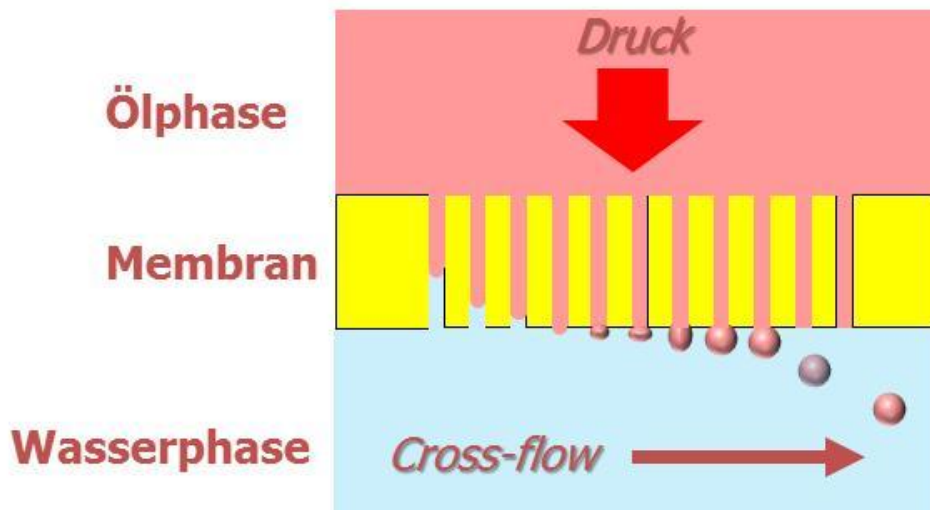


Abb. 4.1.3: Schematische Darstellung der Membranemulgierung

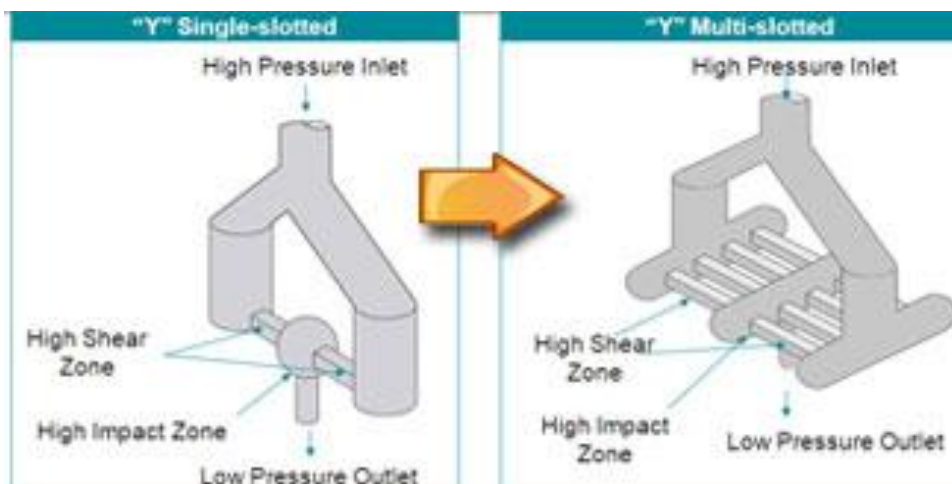


Abb. 4.1.4: Interaktionskammer eines Microfluidizer (Microfluidics, 2015)

### 1.1.3.3. Ultraschallemlulierung

Siehe dazu Kapitel 1.4.1.2.

Durch die neuen Emulsionstechniken und die Verwendung von Emulgatoren lassen sich auch Liposomen erzeugen, wo z.B. sehr kleine Wassertröpfchen in Öltröpfchen eingeschlossen werden und letztere dann wieder in eine Wasserphase hinein emulgiert werden. Es entstehen sogenannte multiple Emulsionen (z. B. Wasser/Öl/Wasser-Emulsionen). Damit können z.B. wasserlösliche Inhaltsstoffe, die miteinander reagieren könnten, getrennt in die innerste und äußere Wasserphase eingebracht werden (z.B. Aromastoffe), oder eine langsamere und länger anhaltende Freisetzung der Aromastoffe beim Verzehr bewirkt werden. Abb. 4.1.5 zeigt eine solche mit einem Microfluidizer erzeugte W/O/W-Emulsion.

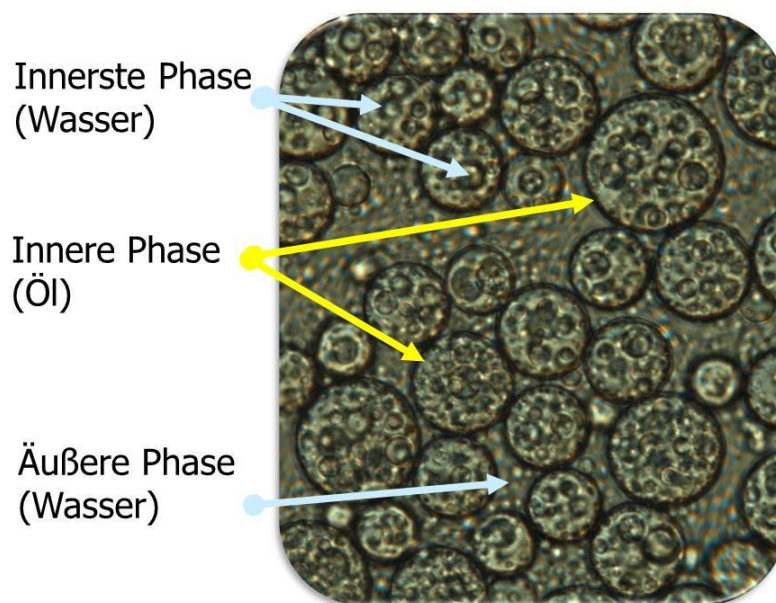


Abb. 4.1.5: Wasser in Öl in Wasser-Emulsion (Sommeregger, 2010)

### 1.1.4. Mikroinkapselung

Die Mikroverkapselung von empfindlichen Wirkstoffen zählt in der Pharmaindustrie schon lange zum Stand der Technik und wird auch in der Lebensmittelindustrie mehr und mehr genutzt. Damit können Lebensmittelinhaltsstoffe durch eine physische Barriere geschützt, und am richtigen Ort zur richtigen Zeit gezielt in Lebensmittelsystemen und auch im Verdauungstrakt freigesetzt werden (Gouin, 2004).

Beispiele für mikroverkapselte Stoffe:

- Aromastoffe, Aromen, ätherische Öle und Gewürzextrakte - In mikroverkapselter Form sind diese länger stabil und besser dosierbar.
- Antioxidantien und Konservierungsmittel (Beispiel: Mikroverkapselung von Sorbinsäure und Zusatz zum Teig, wo sie aber in mikroverkapselter Form keine Wirkung hat und das Backhefewachstum nicht stört. Beim Backen schmelzen die Mikro kapseln und setzen die Sorbinsäure frei, die nun das Schnittbrot vor Schimmelwachstum schützt.)

- Vitamine - In mikroverkapselter Form sind diese länger stabil und besser dosierbar.
- Öle (z.B. mikroverkapselte Fischöle oder Omega-3-fettsäurereiche Öle zur Anreicherung von wässrigen Lebensmitteln)
- Mikroverkapselte Eisenpräparate zur Anreicherung von Lebensmitteln, um sensorische Nachteile dieser Präparate zu beseitigen.
- Enzyme (Enzymimmobilisierung durch Mikroverkapselung – In dieser Form können sie nach ihrer Tätigkeit wieder entfernt und erneut eingesetzt werden.)
- Lebende, probiotische Bakterien sind in mikroverkapselter Form während der Magenpassage geschützt und gelangen im Lebendzustand in den Dickdarm.

Grundsätzlich lassen sich die in Abb. 4.1.6 dargestellten vier Typen von Mikrokapseln unterscheiden:

- a) Mikrokapseln mit einem von einer festen Schale bzw. Hülle umgebenen flüssigen oder festen Kern. Der Kern enthält den zu schützenden Stoff.
- b) Mikrosphären bzw. Mikromatrix, wo der Wirkstoff in einer (Polymer)-Matrix eingebettet ist.
- c) Mehrschalige Mikrokapseln
- d) Kombination aus mehrschaligen Mikrokapseln und Mikrosphären

Als **Hüllmaterialien** werden bevorzugt Stärke und modifizierte Stärken, Cellulose und ihre Derivate verwendet. Es können aber im Prinzip alle Hydrokolloide aus Landpflanzen, Algen und Mikroorganismen, sowie tierische und pflanzliche Proteine dafür eingesetzt werden (Nedovic et al., 2011). Die meisten Hydrokolloide sind rechtlich als deklarationspflichtige Zusatzstoffe einzuordnen. Das ist beim Einsatz solcher Mikrokapseln natürlich zu beachten (z.B. Höchstgrenzen, Einschränkung auf bestimmte Lebensmittel).

Die technische Umsetzung der Mikroverkapselung kann mit mehreren Methoden erfolgen (Nedovic et al. 2011), wie z.B.:

**Sprühtrocknung:** Ist die älteste und am weitesten verbreitete Methode. Der Wirkstoff wird in einer Polymerlösung gelöst bzw. dispergiert und sprühgetrocknet. Die erhaltenen Mikropartikel liegen im Größenbereich von unter 40 Mikrometer.

**Fließbett-Trocknung:** Pulverpartikel werden in einem Luftstrom aufgewirbelt (Fließbett) und mit dem flüssigen Überzugs- bzw. Einbettungsmaterial besprüht und das Lösungsmittel abgetrocknet.

**Sprühkühlung:** Wird zur Mikroverkapselung in einer Fettmatrix eingesetzt. Der Wirkstoff wird in der ausgeschmolzenen Fettmatrix gelöst, emulgiert oder dispergiert. Die Fettmatrix wird dann in einen Kühlturm fein versprüht, wobei sie erstarrt und den Wirkstoff einschließt.

**Extrusionsmethode:** Der Wirkstoff wird in einer Polymerlösung, vorzugsweise Alginatlösung, gelöst bzw. dispergiert und die Lösung über eine (Tropf)-Düse in ein Fällungsbad extrudiert. Es entstehen feste, gelartige Mikrokugeln oder Mikrofasern.

**Phasenseparation (Koazervation):** Der Wirkstoff wird in Form flüssiger Tröpfchen oder in Form fester Partikel in einer organischen Polymerlösung emulgiert bzw. suspendiert. Durch Zugabe eines Phasentrennmittels kommt es zur Koazervation des Polymers. Darunter versteht man die Auftrennung einer makromolekularen Lösung in zwei miteinander nicht mischbare Flüssigkeiten, eine dichte, polymerreiche Koazervatphase und eine zweite Phase, die hauptsächlich aus dem Lösungsmittel besteht. Die Koazervate können die Partikel mit einem flüssigen Polymerfilm umschließen und vorzugsweise einheitlich einhüllen. Der flüssige Polymerfilm kann mittels eines geeigneten Verfahrens, wie der Variation der Temperatur oder des pH-Wertes oder einer chemi-

schen Reaktion, verfestigt (feste oder gelartige Phase) und gehärtet werden. Die Mikrokapselformen können mittels Sedimentation oder Filtration abgetrennt werden (Gouin, 2004).

Bezüglich eventuell vorhandener Risiken sind nicht so sehr die einzelnen, zum Stand der Technik zählenden Verfahren relevant, sondern die verwendeten Hüllmaterialien und die Wirkstoffe selbst. Eine Beurteilung kann hier nur von Fall zu Fall vorgenommen werden.

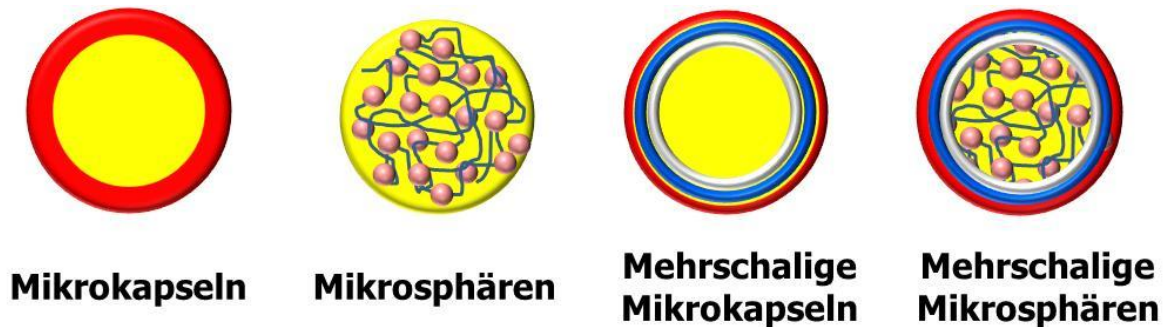


Abb. 4.1.6: Typen von Mikrokapselformen

## 1.1.5. Neue Zerkleinerungstechniken

### 1.1.5.1. Neue Schneidtechniken

#### Wasserstrahlschneiden

Wasserstrahlschneiden (*water jet cutting*) zählt an und für sich schon seit Jahrzehnten in vielen Bereichen, auch in der Lebensmittelproduktion, zum Stand der Technik. Dabei wird ein gebündelter, dünner Wasserstrahl, der von einer Hochdruckpumpe (bis zu 620 MPa) erzeugt wird, auf das zu schneidende Material gerichtet. Die Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls beträgt an der Austrittsdüse ca. 750 m/s, das entspricht etwa der 3-fachen Schallgeschwindigkeit.

Es können damit die verschiedensten Arten an Lebensmitteln (z.B. Pizza, Kuchen, Torten, Sellerie, frisches und gefrorenes Fleisch, gefrorener Fisch, Speck, Sandwiches, Schokoriegel, Müsliriegel) mit dem Wasserstrahl geschnitten werden. Die Schnittflächen sind glatt und exakt und es gibt keinen Abrieb. Der Vorgang erfolgt in hygienischer Umgebung und ohne die beim Klingenschneiden auftretenden Kreuzkontaminationen. Weitere Vorteile sind die Zeitersparnis und keine Ausfallzeiten durch das Austauschen oder Schärfen stumpfer Schneidwerkzeuge.

Aufgrund dieser Vorteile zählt das Wasserstrahlschneiden zu den weltweit am schnellsten wachsenden bedeutenden Maschinenwerkzeugprozessen (Anonym 2015 a +b). In Zukunft ist zu erwarten, dass auch kleine Hersteller (Bäcker, Konditoren, Fleischer) diese Schneidtechnik einführen werden. Auf der anderen Seite wird sie vielleicht auch Eingang bei den ganz großen Betrieben halten, wie zum Beispiel in Zuckerfabriken zum Schneiden der Zuckerrüben (Harten, 2006).

Die Maschinenhersteller führen an, dass das Verfahren durch die USDA (*United States Department of Agriculture*) genehmigt wurde, weil es ein bakterienfreies und hygienisches Schneidverfahren ermöglicht.

Die Vorteile sowohl für die Produzenten als auch für die Endverbraucher sind offensichtlich.

Erkennbare Risiken sind damit keine verbunden, eher im Gegenteil: Es werden hygienische Risiken minimiert. Die weitere Akzeptanz kann daher angenommen werden.

---

## Ultraschallunterstütztes Schneiden

---

Siehe dazu Kap. 1.4.1.1.

## 1.2 Neue Trenn- und Isolierungsverfahren

### 1.2.1. Neue Entwicklungen bei den Membrantrennverfahren

Membrantrennverfahren sind heutzutage nicht mehr aus der Lebensmittelproduktion wegzudenken und werden in den verschiedensten Bereichen für die unterschiedlichsten Zwecke eingesetzt. Es sind also keine neuen Verfahren. Sowohl die Verfahren als auch die verwendeten Membrane werden aber sukzessive weiter entwickelt und optimiert. Dafür werden im Folgenden einige Beispiele angeführt.

#### 1.2.1.1. Kombination der Membrantrennverfahren mit Ultraschall

Ein Problem der Membrantrennverfahren ist das sogenannte „*fouling*“. Dabei setzen sich Stoffe an oder auf der Membran fest und verringern den Durchfluss. Mittels Ultraschall kann diese Deckschichtbildung verhindert werden (Jin, 2014). Die grundsätzliche Wirkung von Ultraschall wird in Kapitel 1.4. eingehend behandelt.

#### 1.2.1.2. Verbesserte Membrane durch Nanotechnologie

Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen nanostrukturierten und nanoverbesserten Membranen. Bei **nanostrukturierten Membranen** bezieht sich der Term „nano“ ausschließlich auf die Porenstruktur. Der Porendurchmesser liegt hier im Nanometerbereich. Diese Nanoporen werden durch verschiedenste Techniken erreicht. Mittels solcher Membrane ist eine sogenannte **Nanofiltration** möglich, die zwischen der Ultrafiltration und der Umkehrosiose liegt und eine Trenneffektivität zwischen Salzen und Kolloiden aufweist.

Bei **nanoverbesserten Membranen** werden hingegen künstliche Nanopartikel und -strukturen in die Membranmatrix integriert bzw. inkorporiert oder auf die Membranoberfläche aufgebracht (Müller, 2011, Buonomenna, 2013).

Ein Trend in diese Richtung ist beispielsweise die Inkorporation von Nanopartikeln in Polymere Membrane (Nguyen et al., 2013). Dadurch können eine ganze Reihe von Membraneigenschaften positiv verändert werden, wie z.B. die Selektivität und Permeabilität. Als Nanopartikel kommen Silber, Eisen, Zirkonium, Silizium, Aluminium, Titan und Magnesium in Frage.

Auch Nanotubes lassen sich vorteilhaft in Membrane integrieren (Buonomenna, 2013).

Nanostrukturierte Membrane sind genauso wie andere Membrane zu betrachten. Bei nanoverbesserten Membranen wird es hingegen darauf ankommen, ob die integrierten Nanopartikel in oder auf der Membran bleiben oder in die Lebensmittel übergehen können, und falls ja, in welchem Ausmaß. Hier kommen dann die allgemeinen, sicherheitsrelevanten Aspekte der Nanotechnologie zum Tragen.

### 1.2.2. Neue Adsorptionsmaterialen

Neben den gängigen Adsorptionsmitteln, wie Aktivkohle, Kieselgur und Bentonit wird verstärkt nach neuen, besseren und selektiven Mitteln gesucht.

Jiang et al. (2012) beschreiben die Herstellung von Kunststoffpartikeln, die mit einer Nano-Eisenverbindung überzogen wurden. Diese Präparate sind zur spezifischen Entfernung von Arsen aus Trinkwasser geeignet. Zhang (2013) machen das gleiche mit einer Manganverbindung.

Laut Nasabi et al. (2012) eignen sich Titandioxid-Nanopartikel als Adsorptionsmittel zur Entfärbung von Dattelsirup.

Behbahani et al. (2013) stellen durch **molekulare Prägung (*molecular imprinting*)** von Kunststoffpartikeln mit Blei ein ganz selektives Adsorptionsmittel für Blei her. Bei dieser Methode wird um die Zielmoleküle (Bleiverbindung) herum ein vernetztes Polymer gebildet. Das Zielmolekül wird anschließend aus der Kunststoffmatrix heraus gelöst, wobei ein Hohlraum bleibt, in dem sich wieder die gleichen Moleküle einlagern können. Solcherart geprägte Polymere können zur selektiven Entfernung von Blei aus diversen Lebensmitteln eingesetzt werden. Die wieder mit Blei beladenen Partikel werden aus der Lebensmittelmatrix entfernt. Mit der faszinierenden Methode der molekularen Prägung lassen sich noch viele weitere Möglichkeiten andenken, um unerwünschte Moleküle aus Lebensmitteln gezielt abzutrennen.

Alle neuen Adsorptionsmittel gelten als Zusatzstoffe bzw. Verarbeitungshilfsstoffe und sind zulassungspflichtig. Im Rahmen dieser Zulassungsverfahren wird von Fall zu Fall eindeutig abzuklären sein, ob Risiken bestehen.

### 1.3. Verwendung von überkritischem Kohlendioxid

Obwohl die Extraktion mit überkritischen Flüssigkeiten (*supercritical fluid extraction – SFE*) seit einigen Jahrzehnten auch im Lebensmittelbereich zum Stand der Technik gehört, ist ihre verbreitete Anwendung trotz der vielen Vorteile gegenüber organischen Extraktionsmitteln (wie z.B. Hexan, eine Benzinfraktion, eingesetzt zur Gewinnung pflanzlicher Öle) bis jetzt leider ausgeblieben. Im Prinzip ließen sich alle Extraktionsverfahren in der Lebensmitteltechnik durch dieses umwelt- und produktschonende Trennverfahren ersetzen. Als Extraktionsmittel wird dabei Kohlendioxid im überkritischen Zustand verwendet. Das verwendete Kohlendioxid kommt nicht aus der Verbrennung von fossilen Rohstoffen, sondern wird als regeneratives Nebenprodukt (Lebensmittelkohlen-säure) bei Fermentationen gewonnen. Überkritische Flüssigkeiten haben eine Dichte ähnlich wie Flüssigkeiten und damit die gleich guten Lösungseigenschaften. Hinsichtlich der Viskosität sind sie aber eher mit der Gasphase vergleichbar. In der Gasphase können Stoffe gut diffundieren, wodurch eine rasche Stofftrennung möglich ist.

Manche neue Techniken werden oft sehr rasch in die Praxis eingeführt, bei anderen dauert der Durchbruch länger, beziehungsweise sie schaffen es nie. Ein Beispiel dafür sind die Membran-

trennverfahren, von denen lange geglaubt wurde, dass sie sich nicht durchsetzen werden. Fortschritte in der Herstellung der Membranen haben dazu geführt, dass heute kaum ein Lebensmittelbetrieb existiert, in dem nicht in irgendeiner Form ein Membrantrennverfahren zum Einsatz kommt. SFE hat den Nimbus von den Anlagekosten ein sehr teures Verfahren zu sein, was aber gar nicht so stimmt (Perrut, 2015). Wenn sich diese Erkenntnis endlich durchsetzt, wird in Zukunft dieses Verfahren nicht nur für die Gewinnung von „hochpreisigen“ Produkten (z.B. Aromastoffextrakte) sondern auch in anderen Bereichen genutzt werden.

Das Anwendungspotential von überkritischem Kohlendioxid in der Lebensmitteltechnik ist aber keineswegs nur auf die Extraktion beschränkt. In der Zwischenzeit wurden viele andere Einsatzmöglichkeiten gefunden, erforscht und teilweise auch schon praktisch eingesetzt. Diese fallen in die unterschiedlichsten Aufgabengebiete, werden aber hier gemeinsam behandelt. Einleitend dazu werden die vielen Vorteile von überkritischem Kohlendioxid angeführt:

- Es ist toxikologisch unbedenklich.
- Es wirkt bakterio­statisch.
- Es ist chemisch reaktionsträge.
- Es ist nicht brennbar, wie andere Lösungsmittel.
- Es ist nicht umweltbelastend.
- Es ist leicht und ökonomisch verfügbar.
- Es hat bei 50 MPa etwa dieselben Lösungseigenschaften wie Hexan.

### 1.3.1. Einsatz von überkritischem Kohlendioxid bei der Extrusion

Mittels Heiextrusion können stärke- und proteinreiche Rohstoffe in einem Extruder ohne Wasserzusatz unter Druck und hoher Temperatur innerhalb kurzer Zeit aufgeschmolzen beziehungsweise aufgeschlossen (⇒ gekocht) werden. Beim Austritt der Schmelze aus dem Extruder tritt ein plötzlicher Druckabfall ein. Der in der Schmelze noch vorhandene, geringe Wassergehalt wird durch diese Entspannung verdampfen. Die entstehenden Dampfbläschen schäumen die Schmelze auf (⇒ Expansion), die sofort zu einem festen, amorphen Schaum erstarrt. Auf diese Weise lassen sich unzählige expandierte Snackprodukte, Quellmehle usw. herstellen.

Werden proteinreiche Rohstoffe heißextrudiert und die Expansion verhindert, indem die aus dem Extruder austretende Schmelze in einem weiterführenden Rohr langsam unter die Verdampfungstemperatur des Wasser abgekühlt wird. Auf diese Weise lassen sich aus Pflanzenproteinen (z.B. Sojaprotein) fleischähnliche Strukturen erzeugen. Dieser Prozess ist für Sojaprotein an und für sich schon lange bekannt. Zur Erzeugung von Fleischimitaten aus anderen pflanzlichen Proteinquellen erfährt er in Europa aufgrund des „vegetarischen Trends“ gegenwärtig zumindest im Forschungsbereich wieder eine gewisse Renaissance.

Schon 1995 wurde die Möglichkeit beschrieben (Rivzi, 1995), in die im Heiextruder entstehende Schmelze bevor sie austritt überkritisches Kohlendioxid hinein zu pressen. Durch den hohen Druck im Extruder bleibt es im fluiden Zustand und verdampft erst nach dem Austritt. Im Vergleich zur Wasserdampfexpansion ergibt Kohlendioxid viel feinere Bläschen und damit eine bessere Struktur der Endprodukte. Damit lassen sich auch aus schwer expandierbaren Rohstoffmischungen bei niedrigen Extrusionstemperaturen sensorisch akzeptable Produkte erzielen (Cho & Rivzi, 2010, Sinkhorn et al., 2012). Die Methode ist zur Teiglockerung in Knetextrudern gleichfalls einsetzbar (Hicsasmaz, 2003). Eine praktische Nutzung des Verfahrens scheint derzeit noch nicht stattzufinden. Das Einsatzspektrum wird voraussichtlich auch in überschaubaren Grenzen bleiben.

Die Vorteile für die Konsumentinnen und Konsumenten liegen in sensorisch verbesserten Extrusionsprodukten. Schon jetzt ist ihnen kaum bekannt, welche Lebensmittel durch die konventionelle Heißextrusion erzeugt wurden, das würde sich auch beim Einsatz des neuen Verfahrens kaum ändern.

### 1.3.2. Einsatz von überkritischem Kohlendioxid zur Inaktivierung von Mikroorganismen in Lebensmitteln (Kaltpasteurisation)

Schon seit ca. 30 Jahren ist die Möglichkeit bekannt, Mikroorganismen (MO) in Lebensmitteln zu inaktivieren, indem diese für eine bestimmte Zeit in beziehungsweise mit überkritischem Kohlendioxid behandelt werden (Perrut, 2015, Garcia-Gonzalez et al., 2007). Wahrscheinlich ist dieser Effekt auf mehrere Ursachen zurückzuführen, wie z.B.

- Lösung des überkritischen Kohlendioxid in den MO-Zellen und Zerreißen der Zellen bei plötzlicher Druckentspannung
- Intrazellulärer pH-Abfall
- Zellmembranmodifikation
- Inaktivierung von Schlüsselenzymen

Für die praktische Durchführung könnten die gleichen Anlagen wie für eine SF-Extraktion eingesetzt werden. Im Prinzip handelt es sich um eine nichtthermische Pasteurisation. Sporen können nur in Kombination mit milder Hitze, weit unterhalb der thermischen Sterilisationstemperatur, abgetötet werden. Das Verfahren eignet sich auch zur Inaktivierung rohstoffeigener Enzyme (Yank et al., 2011), also für ein nichtthermisches Blanchieren. Im Gegensatz zu den thermischen Konservierungsverfahren werden Lebensmittelinhaltsstoffe kaum geschädigt.

Die SF-Extraktion zählt zwar zum Stand der Technik. Für dieses neue Einsatzgebiet von überkritischem Kohlendioxid ist wahrscheinlich aber eine Zulassung nach der Novel Food Verordnung erforderlich. Insbesondere muss festgestellt werden, ob die hygienische Sicherheit auch wirklich gewährleistet wird. Zu klären wäre auch noch der genaue Wirkungsmechanismus.

Gegenwärtig wird sehr intensiv nach nichtthermischen Haltbarkeitsmethoden gesucht, weshalb in Zukunft dieses Verfahren Bedeutung erlangen könnte.

Wenn alle Sicherheitsbedenken gelöst sind, wird wahrscheinlich auch die Akzeptanz durch die Verbraucherinnen und Verbraucher gegeben sein, zumal sie frischer schmeckende Lebensmittel mit natürlichem Image bekommen.

### 1.3.3. Mikropartikelbildung mit überkritischem Kohlendioxid

Viele feste, trockene Lebensmittelingredienzen werden in der Lebensmitteltechnik in Form von feindispersen Pulvern eingesetzt, welche durch Kristallisation, Mahlen, Sprüh- und/oder Fließbett-Trocknung usw. erzeugt werden.

Aktive Substanzen, wie Enzyme, Vitamine, Farbstoffe, Aromastoffe werden immer mehr durch **Mikroinkapselung** in diversen Matrices in stabile, lagerfähige, gut dosierbare Mikropartikel übergeführt.



Wenn sehr kleine Mikropartikel benötigt werden, oder zähe, hochviskose Schmelzen, Fette und fettähnliche Substanzen und Flüssigkeiten ebenfalls in ein freifließendes Pulver mikropartikuliert werden sollen, sind die Grenzen der bisherigen Methoden erreicht. Hier kommen nun neue Verfahren zum Einsatz, die eine Partikelbildung mit Hilfe von überkritischem Kohlendioxid erreichen und sogar flüssigkeitsgefüllte Mikropartikel generieren können (Wendt, 2007).

Perrut (2015) und Lack et al. (2005) geben einen Überblick über die prinzipiellen Möglichkeiten zur Partikelgenerierung mittels überkritischem Kohlendioxid, von denen die für die Lebensmitteltechnik wichtigen näher beschrieben werden.

#### **1.3.3.1. RESS (*rapid expansion of a supercritical solution*)**

Das Produkt wird in überkritischem Kohlendioxid gelöst und durch eine Düse in einen Sprühturm eingetragen. Das überkritische Kohlendioxid verdampft plötzlich und setzt lauter kleine, freifließende Feststoffpartikel frei. Das Verfahren ist nur für Produkte einsetzbar, die in überkritischem Kohlendioxid löslich sind (Lack et al., 2005). Es wurde bereits in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts entwickelt und findet in der Pharmaindustrie Verwendung (Perrut, 2015).

#### **1.3.3.2. SAS (*supercritical antisolvent technology*)**

Das Produkt wird vorerst in einem organischen Lösungsmittel gelöst. Durch sukzessive Zufuhr von überkritischem Gas, das sich im organischen Lösungsmittel löst, wird anschließend die Löslichkeit des Produktes herabgesetzt, wodurch es in kleinen Partikeln ausfällt (Lack et al. 2005). Die Größe beziehungsweise die Kleinheit der anfallenden Partikel kann bis in den Nanobereich gehen (50 – 200 nm) (Perrut, 2015). Das Verfahren wird in der Pharmaindustrie für Wirkstoffe eingesetzt, könnte aber durchaus auch im Lebensmittelbereich Verwendung finden. Zhou et al. (2012) beschreiben beispielsweise die Herstellung von Resveratrol/Hydroxypropyl- $\beta$ -Cyclodextrin-Einschlusskomplexen mit diesem Verfahren zur Verbesserung der Wasserlöslichkeit.

#### **1.3.3.3. CPF (*concentrated powder form*)**

Das CPF-Verfahren generiert pulverförmige Partikel aus Flüssigkeiten. Dazu wird eine Flüssigkeit (Lösung, Getränke, Gewürzextrakte, Ätherische Öle, Pflanzenöle etc.) mit überkritischem Kohlendioxid gemischt und in einem Sprühturm versprüht. Gleichzeitig wird in diesen Turm ein pulverförmiges Trägermaterial (Stärke und modifizierte Stärke, Cellulose, Kieselsäure, Zucker etc.) eingeblasen. Das freigesetzte Gas verwirbelt die Flüssigkeitströpfchen und den pulverförmigen Trägerstoff, die sich miteinander verbinden. Es entsteht ein freifließendes Pulver mit bis zu 85 % gebundener Flüssigkeit. Damit lassen sich quasi Flüssigkeiten in ein pulverförmiges Material umwandeln (Lack et al. 2005).

#### **1.3.3.4. PGSS (*particle from gas saturated solution*)**

Die zu versprühende Substanz wird geschmolzen und mit dem Kohlendioxid unter Druck diskontinuierlich in einem Kessel oder kontinuierlich in einem statischen Mixer gemischt und danach über eine Düse versprüht. Das überkritische Kohlendioxid löst sich in der Schmelze und reduziert deren

Viskosität. Nach dem Austritt aus der Düse wird durch das plötzlich expandierende Gas die Schmelze in kleinste Tröpfchen zerrissen. Durch den Joule-Thomson-Effekt erfolgt auch eine plötzliche Abkühlung und die Tröpfchen erstarren sofort (Lack et al. 2005). Aus hochviskosen Fetten und Emulgatoren entstehen auf diese Weise freifließende, gut dosierbare Pulver.

Es können auch zwei Komponenten mit dem überkritischen Gas vermischt werden, beispielsweise ein Hüllmaterial (Schokolade, Palmfett etc.) und ein Kernmaterial (Extrakte, Flüssigkeiten etc.). Beide Materialien werden erhitzt und intensiv mit dem Gas gemischt, damit Flüssigkeits-Mikrotröpfchen im geschmolzenen Hüllmaterial entstehen. Nun wird wieder über eine Düse versprüht. Das expandierende Gas entzieht durch den Joule-Thomson-Effekt den entstandenen Tröpfchen sehr rasch die Wärme, wodurch das Hüllmaterial erstarrt und eine feste Hülle bzw. eine Schale um die mikropartikulierten Flüssigkeitströpfchen bildet (Wendt et al., 2007). Beispielsweise lässt sich dadurch Kirschwasser oder Aromen in kleine Schokoladekugeln inkapseln, die wiederum verschiedensten Lebensmitteln (z.B. Cappuccino) zudosiert werden können (Anonym, 2005).

Zwei Einsatzbeispiele aus der letzten Zeit sollen das Potential der Methode noch näher darstellen. DePaz et al. (2012) beschreiben die Einkapselung von  $\beta$ -Carotin in Sojabohnen-Lecithin durch PGSS, wobei Partikel von 1 – 5 Mikrometer erhalten wurden. Der flüssige Farbstoffextrakt aus Opuntien wurde von Saldanha do Carmo et al. (2015) mittels PGSS in Glycerinmonostearat inkapselt. Im Vergleich zu einem getrockneten Extrakt ließen sich die PGSS-Partikel weit besser in Eiscreme integrieren.

Das bereits 1994 entwickelte PGSS-Verfahren, an dem auch die österreichische Firma Natex beteiligt war, hat sein großes Potential in der Zwischenzeit an den unterschiedlichsten Materialien bewiesen. Mittlerweile hat es Industriestandard erreicht und einige Anlagen sind in Betrieb. Das erste industriell erzeugte Produkt war Schokoladenpulver und ist angeblich auf dem Markt (Wendt et al., 2007). Das PGSS-Verfahren hat von den oben angeführten Methoden zweifelsohne die größte Bedeutung in der Pharma- und Lebensmittelindustrie erreicht. Aufgrund der faszinierenden Möglichkeiten ist zu erwarten, dass es in Zukunft noch weitere Verbreitung finden wird. Vor allem dann, wenn der Anlagenbau im Umgang mit überkritischen Gasen weiter fortschreitet.

Alle Verfahren zur Mikropartikulierung mittels überkritischen Kohlendioxids haben gemeinsam, dass sie sehr produkt- und umweltschonend sind. Ob sie in rechtlicher Hinsicht eine Zulassung nach der Novel Food Verordnung bedürfen ist eher unwahrscheinlich, weil sie zumindest teilweise schon vor dem Inkrafttreten dieser Verordnung eingesetzt wurden und auch schon ähnliche Produkte mit anderen Verfahren gewonnen wurden.

Rechtliche und Risikofragen stellen sich eher nicht im Zusammenhang mit den Verfahren selbst, sondern mit den verwendeten Hüllmaterialien (z.B. Polymere) und den erzeugten Endprodukten, sofern letztere auch in den Nanobereich hinein gehen.

Der Nutzen für die Lebensmittelproduzenten liegt in leicht hantierbaren Materialien und für die Konsumentinnen und Konsumenten in kreativen Produkten.

Da die Endverbraucher in den meisten Fällen gar nicht wissen werden, mit welchen Verfahren die neuen, kreativen Produkte erzeugt wurden, stellt sich die Frage der Akzeptanz wahrscheinlich gar nicht.

## 1.4. Einsatz von Ultraschall in der Lebensmitteltechnik

Ähnlich wie die Nanotechnologie oder die Verwendung von überkritischem Kohlendioxid ist auch der Einsatz von Ultraschall eine Querschnittstechnologie und kann für die unterschiedlichsten Aufgaben und Zwecke herangezogen werden. Deshalb werden diese auch gemeinsam in diesem Kapitel abgehandelt.

Die praktische Anwendung von Ultraschall steht in den meisten möglichen Einsatzfällen aber erst am Beginn und bedarf noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

### 1.4.1. Prinzipielle Wirkung von Ultraschall und allgemeine Einsatzkriterien bei Lebensmitteln

Akustische Wellen sind mechanische Wellen, die sich in einem Material ausbreiten. Sie werden bezüglich ihrer Wellenlänge in drei Frequenzbereiche unterteilt. Der für den Menschen hörbare Frequenzbereich liegt zwischen 20 Hz – 20 kHz. Niedrigere Frequenzen werden als **Infraschall** und höhere als **Ultraschall** bezeichnet.

Werden Ultraschallwellen durch ein Medium geleitet, verändern sie sich hinsichtlich ihrer Geschwindigkeit, ihrer Frequenz oder ihrer Wellenlänge. Diese Veränderungen sind vom Material abhängig. Deshalb sind Ultraschallwellen im hochfrequenten Bereich mit geringer Energie (nicht höher als  $1 \text{ W/cm}^2$ ) zur Untersuchung von menschlichem Gewebe aber auch zur zerstörungsfreien Untersuchung von Lebensmitteln geeignet. Ultraschallwellen mit höherer Energie im Bereich von 20 – 1000 kHz (*power ultrasound, high intensity ultrasound*) können das Medium, welches sie durchdringen, direkt beeinflussen und verändern. Ultraschall lässt sich deshalb potentiell für die unterschiedlichsten Aufgaben im Bereich der Lebensmitteltechnik nutzen (Cárcel et al., 2012, Soria & Villamiel, 2010).

Der Haupteffekt von Ultraschall in einem flüssigen Medium besteht darin, dass die Schallwellen alternierend eine Kompression (Druckaufbau) und Dekompression (Druckentlastung) aufbauen. Bei der Dekompression kommt es durch Kavitation zur Bildung von Dampf- bzw. Gasblasen im Mikrometerbereich. Unter Kavitation versteht man eine örtlich begrenzte Phasenänderung in Flüssigkeiten von flüssig in gasförmig infolge der Dekompression (Dampfdruckabsenkung). Diese Blasen sind nicht stabil und fallen zusammen, wenn der Druck wieder über den Dampfdruck ansteigt. Dieses Zusammenfallen kann nun auf zwei Arten geschehen.

Bei der **weichen Kavitation** treten in die Blasen Gase ein, die in der Flüssigkeit gelöst vorliegen, und dämpfen den Blasenkollaps beziehungsweise verhindern diesen ( $\Rightarrow$  stabile Kavitation). Auf diese Weise wird eine Mikro-Durchmischung der Flüssigkeit erreicht.

Bei der **harten (transienten) Kavitation** wachsen die Blasen, die hauptsächlich Dampf der umgebenden Flüssigkeit enthalten, weiter und kollabieren dann durch die Einwirkung des umgebenden Drucks dann schlagartig. Es kommt zur Blasenimplosion (mikroskopischer Dampfschlag), wobei lokal enorme Temperaturen (*hot spots* bis zu  $5000^\circ \text{ K}$ ) und Drücke (bis zu 500 MPa = 5.000 bar), sowie Stoßwellen und Turbulenzen entstehen (Cárcel et al., 2012, Pingret et al., 2013). Erfolgt die Implosion einer solchen Dampfblase in der Nähe der Flüssigkeitsoberfläche ist diese asymmetrisch. Dabei schießen Mikro-Flüssigkeitsstrahlen ( $\Rightarrow$  Mikrojets) mit hoher Energie aus der Flüssigkeitsoberfläche heraus und treffen auf die umgebenden Festkörperoberflächen. Dieser Effekt kann bei festen Körpern (z.B. Metallen, Glas) zur Reinigung eingesetzt werden. Treffen die Mikro-

jets auf weiche Materialien, wie z.B. feste Lebensmittel, dringen die Mikrojets ein und es kommt zu einer Imprägnierung (Awad et al., 2012, Cárcel et al., 2012).

Werden Ultraschallwellen direkt in festen bzw. weichen Materialien (z.B. Pflanzengewebe) erzeugt, bewirken sie einen sogenannten „Schwammeeffekt“. Durch alternierenden Druckaufbau und Druckentlastung kann die in dem Festkörper enthaltene Flüssigkeit austreten, beziehungsweise kann die umgebende Flüssigkeit eintreten. Die entstehenden Kräfte können die Kapillarkräfte übersteigen (Cárcel et al., 2012). Neben den physikalisch/mechanischen Effekten kann bei der Kavitation durch die auftretenden Temperaturen und Drücke auch die chemische Reaktivität im Medium drastisch beeinflusst werden, d.h. es kann zu chemischen Reaktionen, wie beispielsweise zur Bildung von Radikalen kommen (Awad et al., 2012, Pingret et al., 2013). Dieser Effekt ist gleichfalls im Lebensmittelbereich nutzbar, z.B. zur Inaktivierung von Enzymen und Mikroorganismen. Es können dadurch aber auch nachteilige Reaktionen ausgelöst werden, wie z.B. Farbstoff- und Fettveränderungen (Pingret et al., 2013).

Für die praktische Anwendung von Ultraschall muss dieser zuerst einmal durch die Nutzung elektrischer Energie erzeugt werden. Ein Umwandler ( $\Rightarrow$  Transducer) wandelt elektrische Energie in mechanische Energie in Form von akustischen Ultraschallwellen um. Es gibt magnetostriktive und die weiter verbreiteten piezoelektrischen Transducer. An den Umwandler ist ein Vibrationsystem angeschlossen, welches die Schallwellen in das Medium weiter leitet. In Ultraschallbädern sind mehrere Transducer an den metallischen Tank angeschlossen, die phasengleich die Ultraschallwellen an den Tank übertragen. Beim Sondensystem wird der Ultraschall durch ein Ultraschallhorn (Sonotrode, Finger, Sonde) direkt in das zu behandelnde Medium geleitet. Das Problem dabei ist, dass sich das Ultraschallfeld mit der Entfernung von der Sonotrode stark abschwächt (Cárcel et al., 2012).

In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Einsatzmöglichkeiten von Ultraschall näher dargestellt.

#### **1.4.1.1. Ultraschallunterstütztes Schneiden**

Das Verfahren gehört schon zum Stand der Technik und wird zum Schneiden von schmierenden Lebensmitteln eingesetzt, die eine hohe Reibkraft auf die Messerklingen ausüben, und wo dünne Scheiben gewünscht sind (z.B. Hartkäselaipe, Fleischwaren, Süßwaren). Eine Ultraschallschneideeinrichtung besteht aus einem Generator, der die Netzspannung in eine ausgewählte hochfrequente Wechselspannung umwandelt, die üblicherweise im Bereich von 20 – 50 kHz liegt. Der Converter beinhaltet eine Piezokeramik, mittels derer die elektrische Schwingung in eine mechanische Schwingung gleicher Frequenz umgesetzt wird. Die Sonotrode ist im Falle der vielfach verbreiteten Keilmesser für einen drückenden Schnitt bereits als Schneide ausgebildet. Form und Länge sind so abzustimmen, dass die Sonotrode in Resonanz schwingt (Zahn, 2009).

Es gibt Hinweise, dass bei fetthaltigen Lebensmitteln aufgrund der von den Ultraschallwellen ausgelösten Reaktionen (Radikalbildung) die Ausbildung eines Fehlgeschmacks ( $\Rightarrow$  *off-flavor*) entstehen kann (Schneider et al., 2006).

#### **1.4.1.2. Ultraschallunterstützte Emulsionsherstellung**

Die Wirkung von Ultraschall beim Emulgieren beruht wieder auf der Kavitation. Wenn die entstehenden Dampfblasen in der Nähe der Grenzfläche der beiden Flüssigkeiten kollabieren, wird

durch den entstehenden Schock und die entstehenden Mikrojets eine effiziente Mischung erreicht. Es lassen sich sehr stabile Emulsionen mit kleiner Tröpfchengröße erreichen (Soria & Villamiel, 2010). Die Tröpfchengröße kann sogar bis in den Nanobereich herabgesetzt werden. Außerdem werden Emulgatoren eingespart (Awad et al., 2012).

Kommerzielle Anlagen in Form von Ultraschallbädern oder in Röhren eingebettete Sonotroden ( $\Rightarrow$  *in-line process*) werden in vielen Industriezweigen weit verbreitet genutzt. Im Lebensmittelbereich erfolgt ein Einsatz bei der Herstellung von Majonäse und Ketchup (Soria & Villamiel, 2010). Laut Pingret et al. (2013) war die Emulgierung einer der ersten Einsatzgebiete des Ultraschalls in der Lebensmitteltechnik. Die Ultraschalleinrichtungen lassen sich auch leicht in bestehende Anlagen integrieren. Bei der ultraschallunterstützten Emulgierung wurden durch die bei der Blasenimplosion entstehenden Bedingungen Veränderungen von Inhaltsstoffen gefunden. Diese Tatsache kann bei pflanzlichen Ölen zu einem ranzigen oder metallischen Fehlgeschmack führen (Pingret et al., 2013).

Mit Ultraschall lassen sich auch Nanomemulsionen erzeugen, wie das Beispiel von Pascual-Pineda et al. (2015) zeigt.

#### **1.4.1.3. Ultraschallunterstützte Extraktion**

Nach Cárcel et al. (2012) wurde die ultraschallunterstützte Extraktion in den letzten zwei Dekaden schon weit verbreitet zur Herstellung von Pflanzenextrakten genutzt. Vorteile sind die Ausbeutesteigerung, geringere Verfahrenstemperatur und Einsparung von Lösungsmittel.

Die Wirkung des Ultraschalls beruht auf dem oben erwähnten „Schwammeeffekt“ und der Zerstörung der pflanzlichen Zellwände (Soria & Villamiel, 2010).

Die Extraktion mit überkritischem Kohlendioxid kann ebenfalls ultraschallunterstützt ablaufen. Die geringeren Diffusionsraten in diesem Medium werden mittels Ultraschall gesteigert.

Unter milden Extraktionsbedingungen wurden keine Inhaltsstoffveränderungen gefunden. Bei manchen Rohstoffen wurden aber sehr wohl Hinweise auf eine Veränderung der organoleptischen und chemischen Eigenschaften nachgewiesen (Pingret et al., 2013, Soria & Villamiel, 2010).

#### **1.4.1.4. Ultraschallunterstütztes Gefrieren**

Beim Gefrieren beziehungsweise Tiefkühlen von wasserreichen Lebensmitteln wird ein Teil des Wassers ausfrieren. Die Kristallisation des Wassers zu Eis erfolgt in zwei Stufen. Zuerst müssen sich Eiskristallkeime bilden, die dann weiter wachsen. Je mehr Kristallkeime sich bilden, umso kleiner werden sie bleiben, und umso besser wird die Textur und Struktur der Lebensmittel erhalten. Das lässt sich durch eine hohe Gefriereschwindigkeit erreichen. Genau hier setzt aber auch die Wirkung des Ultraschalls an. Durch die Kavitation wird die Bildung von Eiskristallkeimen angeregt und der Wärme- und Stofftransport durch die entstehenden Mikroströmungen verbessert (Awad et al., 2012).

Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes MINICRYSTAL (2008-2010) wurden die Vorteile des ultraschallunterstützten Gefrierens bei der Herstellung von Tiefkühlkost untersucht. Die Eiskristallgröße konnte um 19 – 28 % verringert werden und der Saftverlust nach dem Auftauen um bis zu 28 %. Im Rahmen dieses Projektes wurde auch eine Prototyp-Anlage konstruiert, die zum Testen in einem Werk eingebaut wurde (Anonym 2014 c).

Ein interessantes, zukünftiges Einsatzgebiet der ultraschallunterstützten Kristallisation ist die Eiscremeherstellung. Je kleiner die Eiskristalle in Eiscreme sind, umso cremiger schmeckt diese (Awad et al., 2012).

Auch bei der Gefriertrocknung und der Gefrierkonzentration ist der Einsatz von Ultraschall vorstellbar. Bei der Gefrierkonzentration wird beim Gefrieren der Rohstoffe die Bildung von vielen, kleinen Eiskristallkeimen angeregt, was dann wiederum Textur- und Strukturvorteile nach der Sublimation des Eises ergibt. Im Gegensatz dazu wird bei der Gefrierkonzentration die Flüssigkeit unterkühlt und durch Ultraschall die Bildung von nur wenigen Kristallkeimen induziert, die dann zu großen Eiskristallen heranwachsen und leicht von der nun aufkonzentrierten Flüssigkeit abgetrennt werden können (Awad et al., 2012).

#### **1.4.1.5. Ultraschallunterstützte Trocknung**

Es wurde gezeigt, dass Ultraschall zur Unterstützung entweder vor der Trocknung oder bei der Trocknung dienen kann. Vorher, indem die zu trocknenden Lebensmittel in einem Ultraschallbad behandelt werden. Es lässt sich aber auch direkt in den Trockner ein Transducer zur Erzeugung der Ultraschallwellen integrieren (Witrowa-Rajchert et al., 2014). In beiden Fällen wurden höhere Diffusionsraten und damit eine raschere Trocknung und Kosteneinsparung erzielt.

Bei der Gefriertrocknung ergibt eine gleichzeitige Ultraschallbehandlung eine raschere Sublimation, was wieder zur Senkung der Trocknungszeit und der Kosten führt (Schossler et al., 2012).

#### **1.4.1.6. Inaktivierung von Mikroorganismen (Thermosonification)**

Siehe dazu Kapitel 2.8.2.2.

#### **1.4.1.7. Rechtliche Aspekte, Nutzen und Risiko der Anwendung von Ultraschall**

Die praktische Anwendung von Ultraschall steht bei vielen potentiellen Einsatzgebieten erst am Beginn und bedarf noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit. In manchen Bereichen ist der Einsatz aber bereits Stand der Technik.

Ultraschalleinsatz ist zweifelsohne ein nicht übliches Verfahren. Sicher ist auch, dass dabei Veränderungen der Zusammensetzung und der Struktur erfolgen. Die Frage, ob diese bedeutend sind und Auswirkungen auf den Nährwert und Stoffwechsel haben, und sich unerwünschte Stoffe dabei bilden, wird eine Ermessenssache sein, die von Fall zu Fall zu prüfen ist.

Wie oben ausgeführt, kann es zur Veränderung von Inhaltsstoffen und zur Bildung von Radikalen kommen. Das wird auch genutzt, um gezielt Enzyme oder Mikroorganismen zu inaktivieren. Zur Relativierung sei angeführt, dass auch bei konventionellen, mechanischen Verfahren eine Radikalbildung passieren kann, wie z.B. beim Mahlen trockener Produkte.

Für eine Risikobeurteilung wird also immer auch das Ausmaß dieser Veränderungen entscheidend sein.

#### **1.4.1.8. Informationsstand, Wahrnehmung und Akzeptanz seitens der Verbraucherinnen und Verbraucher**

Ultraschalltechniken bieten eher verfahrenstechnische Vorteile und nutzen deshalb vor allem den Herstellern. Für die Endverbraucher ergeben sich indirekte Vorteile durch verbesserte Lebensmittel. Sie werden aber gar nicht wahrnehmen, wie diese Vorteile erzielt wurden.

Der Informationsstand der Konsumentinnen und Konsumenten ist derzeit sicher als sehr gering einzuschätzen. Als mechanisches Verfahren wird die Akzeptanz höher sein, als bei anderen, „von der Natur weiter entfernten“ Methoden.

## 2. Neue Verfahren zur Zubereitung, Garung und Haltbarkeitsverlängerung von Lebensmitteln

Einleitend muss festgehalten werden, dass eine klare Trennung und Abgrenzung zwischen Gar- und Haltbarkeitsmethoden nicht möglich ist. Viele der in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren können für mehrere Zwecke eingesetzt werden, beziehungsweise können Verfahren kombiniert werden. Die Erstellung und exakte Einhaltung einer Systematik ist deshalb schwierig beziehungsweise unmöglich.

### 2.1. Minimal processing (minimally processed food) / fresh cut products

Vor einigen Jahren hat sich eine neue Produktgruppe in unseren Supermärkten etabliert, die in eigenen Kühlvitrinen oder sogar bei Raumtemperatur angeboten werden. Es handelt sich um vorge schnittene, rohe Obst- und Gemüseprodukte, die in der Fachsprache als „*minimally processed food*“, „*chilled products*“ oder „*fresh-cut products*“ bezeichnet werden.

Entstanden ist diese Produktgruppe in der Obst- und Gemüseverarbeitung und wurde in weiterer Folge auf tierische Lebensmittel übertragen. Schlussendlich wurde die Bezeichnung „*minimally processed food*“ sogar für Fertiggerichte angewandt.

Eine ursprüngliche Definition lautet (Ohlsson, 1994):

*„Minimal-processing methods all involve processing procedures that change the inherent fresh-like quality attributes of the food as little as possible (minimally) but at the same time endow the food products with a shelf life sufficient for its transport from the processing plant to the consumers.“*

Demnach handelt es sich bei „*minimally processed food*“ um vorverarbeitete, aber **rohe, nicht garte** Lebensmittel. In dieser Definition werden die beiden Bereiche „Vorverarbeitung“ und eine erforderliche „Haltbarmachung“ kombiniert, wobei sich „minimal“ auf beide bezieht. Synonyme für dieses Wort sind sowohl im Deutschen als auch im Englischen die Wörter „gering“ und „wenig“. Eine geringe (Vor)verarbeitung von Lebensmitteln ist möglich und ergibt auch einen Sinn, eine geringe Haltbarmachung oder Konservierung hingegen nicht. Entweder ist eine Konservierung für einen bestimmten Zweck ausreichend oder zu gering. „Minimal“ im Zusammenhang mit der Haltbarkeitsverlängerung bedeutet also eher schonend oder sanft.

Jedem ist die Tatsache bekannt, dass geschnittenes Obst und Gemüse nur eine sehr geringe Haltbarkeit aufweist. Ohne entsprechende Haltbarkeitsmaßnahmen ist deshalb ein Verkauf im Supermarkt nicht möglich. Klarerweise lassen sich bei dieser Produktgruppe nicht alle Konservierungsmethoden anwenden. Thermische Methoden, wie die klassische Hitzepasteurisation und -sterilisation scheiden aus. Konsequenterweise wurde deshalb verstärkt nach schonenden, nichtthermischen Konservierungsverfahren für diese gering vorverarbeiteten Lebensmittel gesucht. Einige der in den folgenden Kapiteln angeführten Verfahren sind für diese Zwecke geeignet. Es wird üblicherweise auch nicht nur eine einzelne Konservierungsmaßnahme getroffen, sondern es werden mehrere Maßnahmen im Rahmen eines **Hürdenkonzeptes** kombiniert. Wird nur eine einzelne Hürde (= eine Haltbarkeitsmethode) verwendet, muss diese entsprechend hoch oder intensiv sein. Werden dagegen mehrere Hürden kombiniert, kann die Intensität der einzelnen Hür-



den geringer sein. Die Hitzesterilisation ist beispielsweise eine solche Einzelhürde und erfordert Temperaturen von über 100° C. Die schonendere Hitzepasteurisation wird nur in Kombination mit saurem pH-Wert oder Kühlung eingesetzt und kann bei Temperaturen unter 100° C erfolgen. Es handelt sich also hier um ein Zueihürdenverfahren.

Abb. 4.2.1 zeigt schematisch die Herstellung von „*minimally processed food*“ und die in den einzelnen Verfahrensstufen möglichen Hürden zur Verhinderung von Verderbsreaktionen.

Intensive Forschungen laufen gegenwärtig im Bereich der Schutzüberzüge (siehe Kap. 2.1.1.). Diese können nicht nur für geschnittenes, sondern auch für unverarbeitetes Obst und Gemüse eingesetzt werden.

In weiterer Folge hat sich der Begriff „*minimal processed*“ von der Zubereitung gelöst und wird jetzt auch nur alleine auf nichtthermischen Konservierungsverfahren angewandt, unabhängig davon, wie hoch verarbeitet bzw. zubereitet das damit behandelte Lebensmittel ist. Gegarte Fertiggerichte, die mit einer schonenden Methode haltbar gemacht wurden, fallen daher heute ebenfalls in diese Kategorie.

In einer Weiterentwicklung dieses Konzeptes wurde dann noch der Schritt der Garung einbezogen. Letzterer sollte ebenfalls so schonend als möglich erfolgen. Dazu wurde beispielsweise die Methode des mikrowelleninduzierten Dämpfens entwickelt (siehe Kap. 2.2.3.).

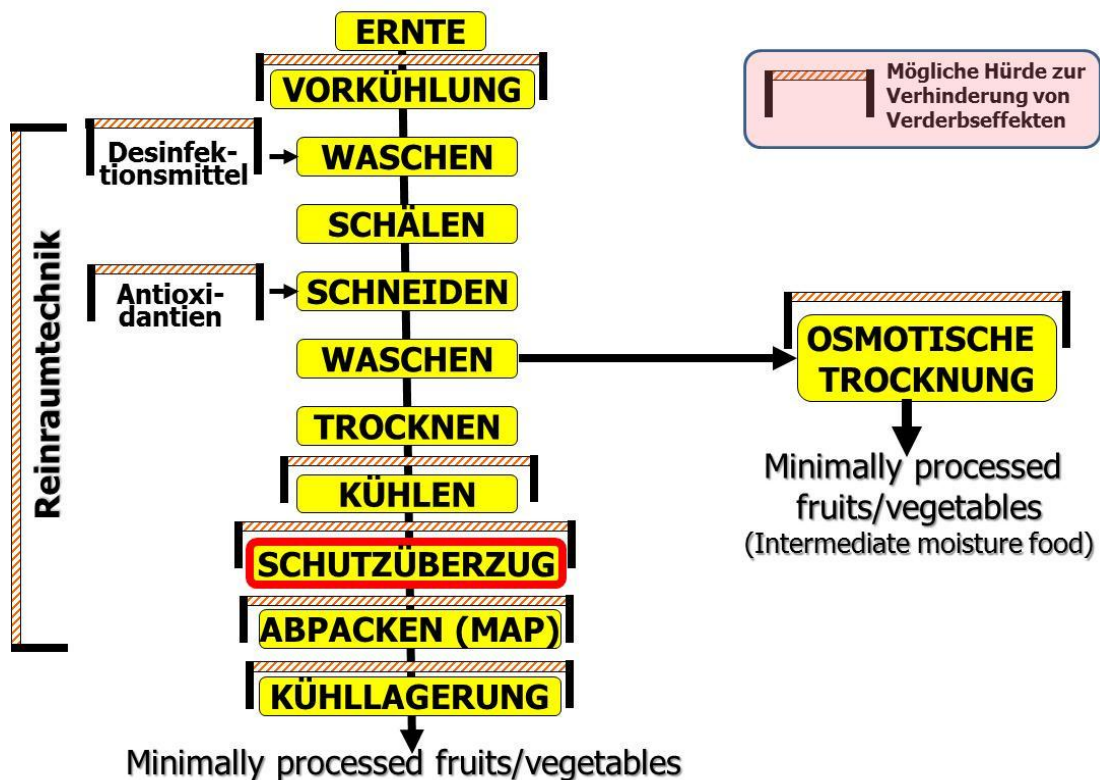


Abb. 4.2.1: Herstellung von „*minimally processed fruits and vegetables*“

### 2.1.1. Schutzüberzüge

Es gibt eine unüberschaubare Zahl an Publikationen, welche sich mit Schutzüberzügen von frischen, ganzen oder vorgeschnittenen Obst und Gemüse, aber auch von tierischen Lebensmitteln (Fleisch, Fisch, Eier, Käse) beschäftigen.

Siehe dazu auch Kapitel 2.2.3 – Essbare Überzüge auf Lebensmitteln (*edible films/coatings*) in Teil 5 dieses Reports.

Prinzipiell lassen sich solche Schutzüberzüge bzw. -filme in folgende zwei Gruppen gliedern.

#### 2.1.1.1. Schutzüberzüge, die eine mechanische Barriere zwischen dem Lebensmittel und der Umgebung bilden.

In der Literatur werden unzählige, potentielle Stoffe für Schutzüberzüge beschrieben (Rojas-Graü et al., 2009, Falguera et al., 2011). Die meisten sind filmbildende Hydrokolloide aus den verschiedensten Quellen. Da sie mit den Lebensmitteln mitverzehrt werden, müssen sie auch essbar ( $\Rightarrow$  *edible coating*), aber nicht unbedingt verdaubar sein. Sie dienen als mechanische Barriere und schützen das Lebensmittel einerseits vor Umwelteinflüssen (z.B. Luftsauerstoff, Mikroorganismen), andererseits können sie auch Wasserverluste durch Austrocknung vermindern.

Im Zeitalter der Nanotechnologie liegt es auch auf der Hand, nanostrukturierte Überzüge zu kreieren (siehe dazu Teil 5, Kapitel 2.2.3.).

#### 2.1.1.2. Schutzüberzüge mit integrierten, aktiven Substanzen

In die Schutzüberzüge können zusätzlich eine Reihe von aktiven Stoffen in Normal- oder Nanoform für folgende Zwecke integriert werden:

- Antimikrobielle Substanzen (z.B. Konservierungsmittel, Lysozym – ein bakterienzellwandabbauendes Enzym)
- Antibräunungsmittel (Antioxidantien, wie Ascorbinsäure, organische Säuren, Bräunungsenzyme-Inhibitoren)
- Texturverbessernde Mittel (z.B. Calciumsalze)

#### 2.1.1.3. Rechtliche und sicherheitstechnische Bewertung von Schutzüberzügen

Die rechtliche Einordnung und Sicherheitsbewertung essbarer Lebensmittelüberzüge ist aufgrund der Vielfalt der Substanzen und Möglichkeiten sehr schwierig. Schutzüberzüge könnten als Lebensmittel, Lebensmittelzusatzstoffe, Lebensmittelkontaktmaterial oder sogar als Lebensmittelverpackung bewertet werden.

Einige der vorgeschlagenen Hydrokolloide sind Lebensmittel bzw. Lebensmittelzutaten, wie beispielsweise Proteine. Viele sind Lebensmittelzusatzstoffe. Hier muss überlegt werden, ob ihr Einsatz für diesen Zweck mit dem Lebensmittelzusatzstoffrecht konform geht.

Liegen die Überzugsmaterialien oder die darin integrierten Aktivstoffe in Nanoform vor, muss auf jeden Fall eine separate und spezielle Bewertung erfolgen.

Schutzüberzüge sollten jedenfalls für die Konsumentinnen und Konsumenten eindeutig und klar gekennzeichnet werden, damit jeder selbst entscheiden kann, ob er diese akzeptiert.

## 2.2. Neue oder verbesserte Garverfahren

### 2.2.1. *Sous vide*-Garung

Der französische Ausdruck „*sous vide*“ bedeutet „unter Vakuum“. Fälschlicherweise wurde daraus der Begriff Vakuumkochen, was absolut unrichtig ist, weil unter Vakuum durch die Herabsetzung der Siedetemperatur kein Kochen erfolgen kann. Gemeint ist vielmehr, dass rohe Lebensmittel oder Zutaten unter Vakuum in kochstabile Kunststoffbeutel abgepackt, und Letztere anschließend in Wasserbädern schonend unter Luftausschluss gegart werden (Baldwin, 2011).

Chefköche in Toprestaurants nutzen dieses Garverfahren weltweit schon seit den 70er-Jahren des vorigen Jahrhunderts zur Garung unter exakten Temperatur- und Zeitbedingungen in evakuierten Beuteln. Dabei wird beispielsweise ein Steak in diesen Beuteln ca. 1 Stunde bei 60 – 70° C (Niedrigtemperaturgarung) gegart, aus den Beuteln entnommen und danach kurz angebraten. Das Steak ist bei dieser Garmethode innen noch rosa aber zart, und außen braun und knusprig (Seitz, 2015).

In weiterer Folge wurde das Verfahren von der Catering-Industrie übernommen und ein eigenes Catering-System daraus entwickelt [Vakuumkochen (*sous vide*), *vacuum cooking*, „*la cuisson sous vide*“]. Rohe Lebensmittel werden in temperaturstabile Kunststoffbeutel vakuumverpackt und in der Packung gegart. Es erfolgt eine schonende Garung unter Sauerstoffausschluss. Gleichzeitig erfolgt auch eine Pasteurisation des Gutes.

Diese Vorgangsweise bietet mehrere Vorteile: Durch den Sauerstoffausschluss beim Kochen und bei der späteren Lagerung wird eine Oxidation empfindlicher Inhaltsstoffe (Aroma- und Geschmackstoffe) minimiert. Deren Oxidation führt sonst bei fertig gekochten und gelagerten Speisen zur Ausbildung des sogenannten „Aufwärmgeschmacks“ (*WOF – warmed over flavor*). Die daraus resultierenden negativen, sensorischen Veränderungen sind generell ein großes Problem bei der Lagerung von Fertiggerichten, weshalb diese auch kaum wie frisch gekochte Gerichte schmecken. Weitere Vorteile sind eine gute Nährwerterhaltung und die Verhinderung von Auslaageverlusten. Durch die gleichzeitig stattfindende Pasteurisation wird eine Haltbarkeit der Produkte bei Kühlung (⇒ Hürdenkonzept) von bis zu 42 Tagen erreicht. Im Gegensatz dazu beträgt die maximale Lagerzeit beim Catering-System „kochen/kühlen“ nur 3 – 4 Tage.

Das Verfahren erfordert aber eine äußerst hygienische Arbeitsweise von Beginn an, um das hygienische Risiko zu minimieren. Weil eben nur eine Pasteurisation erfolgt, muss die Kühlkette als zweite Hürde exakt eingehalten werden. Es können auch nicht alle Lebensmittel in Beuteln gekocht werden, wie zum Beispiel Kohllarten.

Die dritte Einsatzstufe dieser Methode ist nun die Herstellung von Fertiggerichten für den Endverbraucher. In vielen europäischen Ländern finden sich bereits seit längerer Zeit in den Supermärkten – also im Retailhandel – *sous vide*-Produkte. In Österreich sind sie nur vereinzelt erhältlich (z.B. geschälte, gekochte, ganze Kartoffel), nicht zuletzt aus Preisgründen. Der höhere Verpackungsaufwand und die erforderliche Kühlung sind nämlich teuer. Mit dem Fortschreiten des Anteils an Fertiggerichten ist aber zu erwarten, dass auch in Österreich in Zukunft ein höherer Marktanteil an solchen Qualitäts-Produkten erreicht wird.

Da die Hersteller in diesem Verfahren durchaus eine USP (*Unique Selling Proposition*) erkennen, erfolgt oft eine freiwillige Auslobung dieser Methode auf den Verpackungen.

## 2.2.2. Mikrowelleninduziertes Dämpfen

Um die sensorischen Nachteile von Fertiggerichten zu vermeiden, aber trotzdem einen hohen Conveniencegrad hinsichtlich der Zubereitungs- und Servierzeit zu bekommen, werden mehrere Maßnahmen kombiniert (Abb. 4.2.2.). Ausgegangen wird von rohen, vorzerkleinerten („*fresh-cut*“) Produkten (Gemüse, Fleisch und deren Kombinationen). Ihre Herstellung wurde schon in Kapitel 2.1. dargestellt. Sie werden in speziellen Kunststoffbehältern, -beuteln etc. abgepackt und durch Kühlung zu den Endverbraucherinnen und -verbrauchern gebracht. Als weitere Hürden neben der Kühlung können alle in Kapitel 2.1. aufgeführten Möglichkeiten genutzt werden, wie eventuell auch die Abpackung unter modifizierter Atmosphäre (MAP – *modified atmosphere packaging*).

Im Haushalt werden die Verpackungen in den Mikrowellenöfen gestellt. Die Mikrowellenbehandlung dient aber nicht dazu, um die rohen Lebensmittel zu garen, sondern um rasch Wasserdampf in der Verpackung zu erzeugen. Der Wasserdampf wird aus dem in den Lebensmitteln vorhandenen Wasseranteil gebildet, oder es wird ein wassergetränktes Fließ zusätzlich in die Verpackung hinein gegeben. Die Verpackung ist dicht, weshalb durch den gebildeten Dampf darin ein Überdruck, und damit verbunden eine Temperatur über 100 °C (bis zu 120 °C) entsteht. Damit die Verpackung nicht explodiert, ist ein Überdruckventil in der Verpackung integriert, welches sich ab einem bestimmten Dampfdruck öffnet. Durch den gebildeten Dampf und den erreichten Überdruck erfolgt eine verblüffend rasche Garung der Lebensmittel. Das Prinzip ist mit dem Dämpfen in Druckkochtöpfen vergleichbar. Die Vorteile dieses Kombinationsverfahrens liegen in der kurzen, schonenden Garung, der gleichmäßigen Temperaturverteilung in der Verpackung ohne „*hot spots*“, und es werden frisch gegarte, sensorisch ansprechende Speisen erhalten.

In der Zwischenzeit bieten schon eine Reihe von Firmen solche Verpackungssysteme an, darunter auch die österreichische Firma Mondi, Korneuburg mit ihrem NeoSteam™MAP-System (MONDI, 2015). Es gibt auch leere Verpackungen zu kaufen, die zu Hause mit rohen Lebensmitteln befüllt, verschlossen und im Mikrowellenofen rasch gedämpft werden können.

Ein neues Verfahren der Firma Microplast (MICROPLAST, 2015) nutzt dieses mikrowelleninduzierte Dämpfen zur Haltbarmachung von Fertigenmenüs. Dabei werden die rohen Fertigenmenükomponenten in Kunststoffschalen gefüllt, dampfdicht verschlossen, durch einen Mikrowellentunnelofen geführt und dabei schonend durch Dämpfen gegart und gleichzeitig pasteurisiert (10–12 min bei 120° C). Um ein Schrumpfen bzw. ein Einfallen des Deckels der Packung nach Kondensation des Dampfes beim Abkühlen zu verhindern, wird nach der Mikrowellenbehandlung mittels einer Injektionsnadel ein inertes, steriles, sauerstofffreies Gas in die Verpackung eingeleitet. Die sterile Atmosphäre verdrängt den heißen Dampf. Die Öffnungen im Verpackungsdeckel werden danach mit einem Etikett verschlossen. Die neue Atmosphäre in der Verpackung sorgt zusätzlich für eine lange Haltbarkeit bis zu 90 Tage im Kühlregal, also weit länger als bei *Sous vide*-Produkten.

Mit dem mikrowelleninduzierten Dämpfen sind keine erkennbaren, spezifischen Risiken verbunden. Viele Konsumentinnen und Konsumenten stehen aber aus wissenschaftlich nicht nachvollziehbaren Gründen der Anwendung von Mikrowellen skeptisch gegenüber. Diese Gruppe wird deshalb auch diese Produkte nicht goutieren. Für alle anderen steht damit aber eine Garmethode zur Verfügung, die einen hohen Conveniencewert mit sensorischen und ernährungsphysiologischen Vorteilen verbindet.

Für Produkte, die außer Haus mit Mikrowellengarung bzw. -behandlung hergestellt wurden, wird es aber für kritische Konsumentinnen und Konsumenten schwierig. Mikrowellenbehandlung ist kein neues Verfahren im Sinne der Novel Food-Verordnung und daher auch nicht extra zu deklarieren. Erfolgt keine freiwillige Kennzeichnung können die Konsumentinnen und Konsumenten gar nicht erkennen, ob eine Mikrowellenbehandlung bei der Produktion eingesetzt wurde.

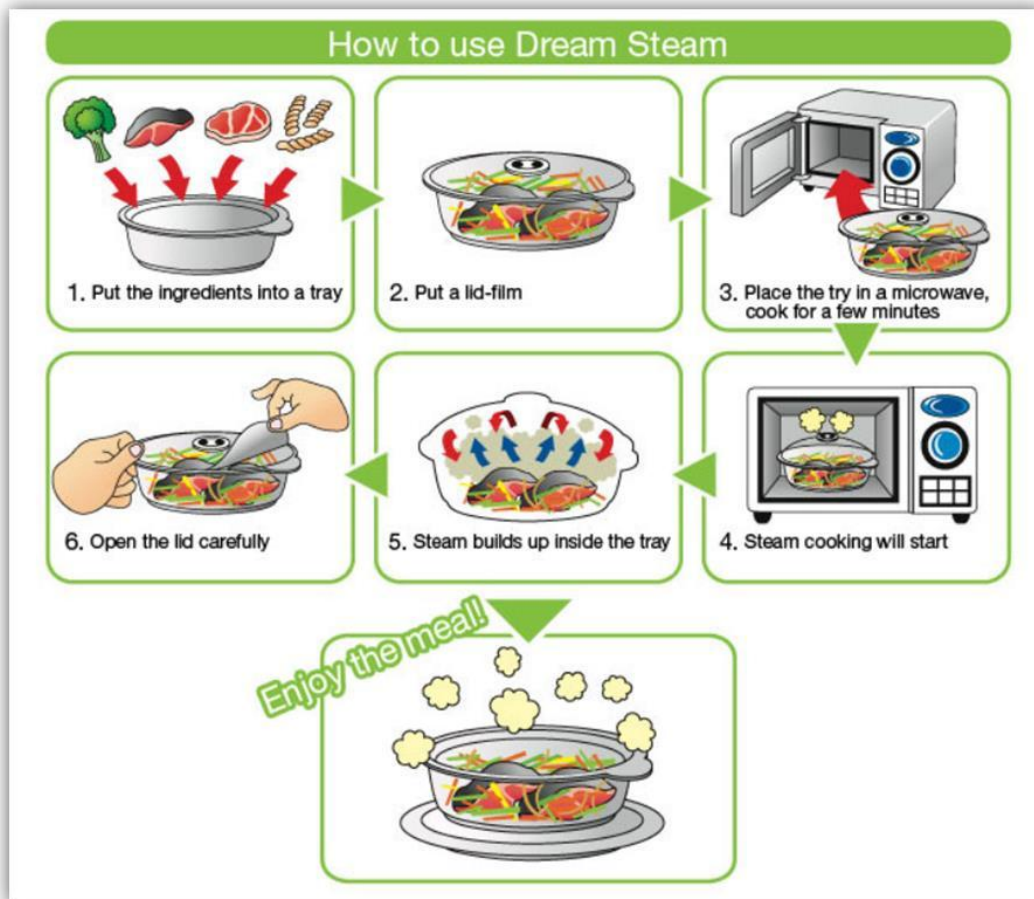


Abb. 4.2.2: Schematische Darstellung des mikrowelleninduzierten Dämpfens (TAKIGAWA, 2015)

## 2.3. Vorgegarte Convenience-Produkte

Die mehr oder weniger lange Kochzeit von stärkereichen Rohstoffen wird im Convenience-Zeitalter als nachteilig angesehen. Daher steigt der Anteil an fertig gekochten bzw. gegarten Lebensmitteln und Fertiggerichten. Diese benötigen einerseits einen höheren Konservierungsbedarf, um die Zeit zwischen der Produktion und dem Verzehr zu überbrücken; andererseits können sie auch sensorische Nachteile aufweisen (*warmed over flavor*). Das heißt, sie schmecken nicht wie frisch gekochte Speisen.

Um dieses Dilemma aufzulösen, werden mehr und mehr vorgekochte bzw. vorgegarte Produkte im Lebensmittelhandel angeboten, die eine verkürzte Garzeit benötigen, aber dann wie frisch gekocht schmecken. Insbesondere betrifft das folgende Produktgruppen:

- **Stärkereiche Körner und Samen**  
Getreidekörner (Reis, Weizen usw.)  
Leguminosen (Hülsenfrüchte) (Bohnen, Erbsen, Linsen usw.)
- **Knollen und Wurzel**  
Kartoffel usw.

### **Stärkereiche Körner und Samen**

Um schnellkochende, vorgegarte Produkte zu erhalten, werden die ungeschälten oder geschälten Körner und Samen eingeweicht, dann gekocht oder gedämpft oder einer anderen thermischen Behandlung unterzogen, und anschließend wieder getrocknet. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es nur sehr vage Hinweise über die Prozesse. Mehr Informationen findet man in der Patentliteratur, aber generell halten sich die Firmen aus Konkurrenzgründen hier sehr bedeckt.

Instant-Reis beziehungsweise vorgekochter ( $\Rightarrow$  *pre-cooked* oder *quick-cooking*) Reis ist bereits weit verbreitet. Er darf nicht mit dem *parboiled* Reis verwechselt werden, obwohl die Herstellungsverfahren ähnlich sind. Beim Parboiling wird der Reis ebenfalls eingeweicht, die darauffolgende Erhitzung erfolgt aber unterhalb der Verkleisterungstemperatur der Reistärke. Es soll nur dazu führen, dass Inhaltsstoffe aus den äußeren Schichten des Reiskorns in das Endosperm hinein wandern (diffundieren). Beim Instant-Reis werden Temperaturen oberhalb der Stärkeverkleisterungstemperatur angewandt, also eine wirkliche (Vor-)Garung erzielt.

Bei Weizen finden sich gleichfalls ähnliche Produkte auf dem Markt, die im Prinzip auf die in Vorderasien seit langem eingesetzte Bulgur-Herstellung zurückgehen.

Leguminosen, die einst zu unserer wichtigsten Grundnahrungsmitteln zählten, werden heute kaum mehr verzehrt, unter anderem auch sicher wegen ihrer besonders langen Einweich- und Kochzeit. Neben Nasskonserven, bei denen die Leguminosen schon voll gegart sind, sind vereinzelt auch nur vorgegarte Trockenprodukte zu finden.

### **Knollen und Wurzel**

Im Cateringbereich, also in Großküchen, ist es heute sehr verbreitet, nicht von rohen ungeschälten Kartoffeln auszugehen, sondern von geschälten, vorgekochten oder voll gekochten ganzen oder geschnittenen Kartoffeln. Mittlerweile existieren im Retail-Handel ebenfalls vergleichbare Produkte, die meistens in Kunststoffbeuteln, unter Vakuum abgepackt, angeboten werden.

Neben der thermischen Garung besteht die Möglichkeit das Hochdruckverfahren (siehe Kapitel 2.8.2.1) für eine Vorgarung einzusetzen, wie Boluda-Aguilar et al. (2013) am Beispiel von Reis beweisen.

## 2.4. Überhitzter Wasserdampf (*superheated steam* - SHS)

Eine Möglichkeit, um energieeffizient und schonend zu trocknen, zu kochen, sowie zu braten bzw. zu frittieren ist die Anwendung von überhitztem Wasserdampf (*superheated steam*).

### 2.4.1. Prinzip von SHS

Unter überhitztem Dampf (auch Heißdampf genannt) versteht man Dampf, der eine höhere Temperatur als gesättigter Dampf unter identem Druck aufweist. Er wird durch weitere Wärmezufuhr zu gesättigtem Dampf gewonnen, welcher vorher vom restlichen „Ausgangswasser“ befreit wurde. Durch die zusätzliche Wärmezufuhr wird der Dampf sozusagen getrocknet, was einen instabilen Zustand darstellt, dem er durch erneute Wasseraufnahme entkommen möchte. Genau dieses Bestreben, also die äußerst hohe Wasseraufnahmefähigkeit des überhitzten Dampfs gegenüber gesättigtem Dampf, macht man sich bei der Trocknung zunutze. Die Abwesenheit von Luft in der Dampfatmosfera und die Tatsache, dass Dampf eine geringere Dichte als Luft besitzt, sind ebenfalls hilfreich bei der Trocknung. Im Vergleich mit der sonst zur Trocknung genutzten Heißluft wird eine raschere Strömung des Dampfes zum Trocknungsgut, sowie eine raschere Diffusion in das Gut bewirkt, was wiederum eine schnelle und homogene Trocknung ergibt. Bei SHS werden üblicherweise Temperaturen von 120 – 180° C, für manche Prozesse sogar bis zu 240° C eingesetzt.

Der bedeutendste, die Trocknungscharakteristika bestimmende Parameter ist unbestritten der Grad der Überhitzung des Dampfes (z.B. Pronyk et al., 2004, Zzaman & Zhang, 2014, Kozanoglu et al., 2006). Im Gegensatz zur Heißlufttrocknung soll neben der Temperatur auch die Geschwindigkeit der Dampfströmung der Trocknungsrate direkt proportional sein (Pronyk et al., 2004).

### 2.4.2. Nutzungsrelevanz von SHS

Die Anwendung von SHS zeigt gegenüber der konventionellen Heißlufttrocknung folgende wirtschaftliche, ernährungsphysiologische und sensorische Vorteile:

#### **Erhöhte Trocknungsgeschwindigkeit & erhöhte Energieeffizienz**

Wie bereits in der Verfahrensbeschreibung (2.3.1) angeführt, ist die Hauptintention zur Nutzung von SHS die erhöhte Trocknungsgeschwindigkeit, basierend auf der höheren Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Heißdampfes (z.B. Moreira, 2011, Li et al., 1999, Wu et al., 2014). So konnte etwa laut den Ergebnissen des Fraunhofer-Instituts die Trocknungszeit von Apfelchips von 8 h bei der Heißlufttrocknung auf 50 min und von Kartoffelprodukten von 7 h auf 30 min verkürzt werden (Hirth, 2014). Die raschere Trocknung erfordert entsprechend weniger Energieaufwand. Die Wärmeverluste sind ebenfalls geringer und die kompakteren Anlagen erfordern geringere Investitionskosten (siehe auch Kap. 2.3.4).

#### **Eine gleichzeitige Hygienisierung ist möglich.**

Die hohen Temperaturen ermöglichen eine Keimzahlreduktion des Trocknungsgutes bzw. dieses zu sterilisieren. Es können nämlich sogar die äußerst hitzeresistenten Sporen von *Bacillus stearothermophilus* inaktiviert werden. Das Fusarium-Mycotoxin DON in Getreide wird ebenfalls unschädlich gemacht (Head et al., 2008, Lenkowski et al., 2007).

### **Weniger oxidative Reaktionen**

Da Heißdampf im Gegensatz zu Heißluft keinen Sauerstoff enthält, sind sämtliche sauerstoffbasierten Reaktionen weitgehend ausgeschlossen. Für Güter geringer Partikelgröße (etwa Mehl oder Trockensuppen) bedeutet dies den sicherheitstechnisch relevanten Ausschluss der Gefahr von Staubexplosionen. Bei Produkten mit hohem Fettgehalt ergibt sich eine Verringerung der Lipidoxidation mit reduziertem *off-flavour*, sowie damit verbunden eine längere Erhaltung der Genusstauglichkeit. Das ist bei der Trocknung von Fleisch und Fisch relevant (Sotome & Isobe, 2011, Huang et al., 2004). Auch andere sauerstoffempfindliche Lebensmittelinhaltsstoffe wie Vitamin C und einige phenolische Substanzen haben sich bei der Behandlung mit überhitztem Dampf als stabiler im Vergleich mit Heißlufttrocknung erwiesen (Moreira, 2011, Kadoma et al., 2005). Hierzu ist allerdings auch eine widersprüchliche Studie zu finden, welche eine schnellere Degradierung von Vitamin C in Pulverform für SHS im Temperaturbereich 140 – 180° C unter Heißluft/Heißdampfbehandlung beschreibt (Horagai. et al., 2008). Dies weist darauf hin, dass hier Matrix / und oder Temperaturbereiche eine Rolle spielen dürften. Ein „Trick“ beim Einsatz von SHS zum verbesserten Erhalt hitzelabiler Substanzen ist die Behandlung unter Druck (siehe dazu Kapitel 1.8.3).

### **Geringere Fettaufnahme**

Bei Pommes frites, die vor dem Frittieren mittels SHS behandelt wurden, wurde eine deutlich reduzierte Fettaufnahme (von 0,359 kg/kg auf 0,263 kg/kg) bei vergleichbarer Härte und Knusprigkeit beobachtet. Dies soll sowohl auf dem Entzug der Feuchtigkeit an sich als auch auf der Veränderung des Gewebes beruhen. Elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigten nämlich einen Kollaps der Stärkekörner, welcher mit einer homogeneren, kompakteren Oberflächenstruktur einherging, was wiederum die Durchlässigkeit für das Öl verhindert haben könnte (Zielinska et al., 2014).

### **Texturerhalt**

Studien zeigten ein verbessertes Texturprofil (weniger Fissuren) und damit verbunden eine bessere Qualität bei mit SHS behandeltem Reis im Sinne von besseren Kocheigenschaften, wie etwa geringerem Kochverlust (Wu et al., 2014). Ein ähnliches Ergebnis wurde nach dem SHS-Blanchieren von Kartoffeln beobachtet, welche beim Kochen keinen nachweisbaren Masseverlust aufwiesen, wohingegen die herkömmlich blanchierte Vergleichsprobe einen 4 %-igen Kochverlust zeigte (Sotome et al., 2009).

### **Geringerer Salzgehalt**

Eine Auswirkung, deren Nutzen fraglich ist, ist die Möglichkeit der Reduktion des natürlich im Lebensmittel enthaltenen Salzgehalts. Dieser soll durch das Prinzip des Konzentrationsausgleiches des Salzes zwischen zwei angrenzenden Bereichen zustande kommen, welcher sich in diesem Fall durch Lebensmittel mit hohem Salzgehalt und umgebendem salzlosen Dampf bzw. Kondenswasser ergibt (Kadoma et al., 2005). Hier wäre zu hinterfragen, ob neben Natriumchlorid nicht auch andere Salze aus dem Lebensmittel extrahiert werden.

### **Sonstiges**

Versuche zur Trocknung und Enzyminaktivierung (Urease) bei Sojabohnen ergaben, dass unter Nutzung von SHS eine geringere Temperatur zum Erreichen desselben Trocknungs- und Enzyminaktivierungsgrades bei identem Erhalt der Proteinlöslichkeit gegenüber Heißlufttrocknung ausreichend war (Prachayawarakorn et al., 2000).

### **Farberhalt**

Durch die geringeren Trocknungszeiten wurde ein zu erwartender, verbesserter Farberhalt etwa für Reismehl (Wu et al., 2014), sowie Kakaobohnen (Zzaman und Yang, 2014) beobachtet. Bei Pommes frites ergaben sich im Vergleich zur Referenz höhere Gelb- und Rotwerte bei ähnlicher Helligkeit (Zielinska et al., 2014). In diesem Zusammenhang wurde auch ein erhöhter Gehalt an



niedermolekularen Kohlenhydraten und freien Aminosäuren in mit SHS behandelten Kartoffeln gemessen, welche für ihre farbgebenden Eigenschaften (Maillard-Reaktion) bekannt sind (Iyota et al., 2003).

#### **Stärkeverkleisterung**

Bei Pommes frites wurden im Vergleich zur herkömmlichen Vorbehandlung durch Zielinska et al. (2014) keine signifikanten Unterschiede im Grad der Stärkeverkleisterung festgestellt. Dementgegen wurde eine klare Erhöhung des Verkleisterungsgrades in einem ähnlichen Versuchsaufbau mit Pommes frites von Lin et al. (2009), sowie von Iyota et al. (2003) aufgezeigt. Eine Erhöhung der Temperatur soll dabei mit einer Erniedrigung der Gelatinisierungsrate assoziiert sein (Lin et al., 1999). Zudem ist zu erwähnen, dass bei SHS behandelten Kartoffeln im Gegensatz zu herkömmlich behandelten, keine Stärkekörner an der Oberfläche verblieben waren (Iyota et al., 2003).

### **2.4.3. Aktuelle Forschung zur Verwendung von SHS**

Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich - neben der Simulation zum Auffinden optimaler Bedingungen für jeden Einsatzzweck (z.B. Sinhal et al., 2010) – einerseits mit der weiteren Steigerung der Energieeffizienz, und andererseits mit der weiteren Verbesserung der Produktqualität insbesondere für empfindliche Produkte.

#### **Kombination mit „hot water micro-droplets“**

Der Hitzetransfer lässt sich durch zusätzliches Einsprühen von in Mikrotröpfchen zerteiltem Heißwasser in den überhitzten Wasserdampf erhöhen (Sotome et al., 2009). Dieser Effekt wurde durch das Umwälzen des Dampfes durch den Aufprall der Mikrotropfen erklärt (Sotome & Isobe, 2011).

#### **Intermittent super heated steam**

Die Nutzung von Unterbrechungen im Trocknungsverlauf soll vor allem der weiteren Erhöhung der Energieeffizienz, aber auch der Produktschonung dienen (Thomkapanich et al., 2007).

#### **Low-pressure superheated steam (LPSHS)**

Unter leicht erhöhtem Druck (üblicherweise 5 – 10 kPa) ist Dampf bereits bei niedrigeren Temperaturen gesättigt und dementsprechend auch bei niedrigeren Temperaturen überhitzt, als das unter Normaldruck der Fall wäre. Diese Methodik ist besonders für die Trocknung hitzeempfindlicher Produkte wie Obst, Gemüse und Kräuter vorteilhaft, weil mit deutlich geringeren Temperaturen ähnliche Effekte erzielt werden können (Mujumdar, 2008). Konkret wurden beispielsweise für unter LPSHS bei 70 – 90° C mit SHS getrocknete Bananenchips ein deutlich verbesserter Farberhalt, sowie ein geringerer Schrumpfungsgrad gegenüber Heißlufttrocknung festgestellt (Thomkapanich et al., 2007). LPSHS-Trocknung bei 50 – 70° C resultierte für Basilikumblätter gegenüber Heißlufttrocknung in einem deutlich besseren Erhalt des charakteristischen Aromas, sowie der phenolischen Substanzen (Barbieri et al., 2004).

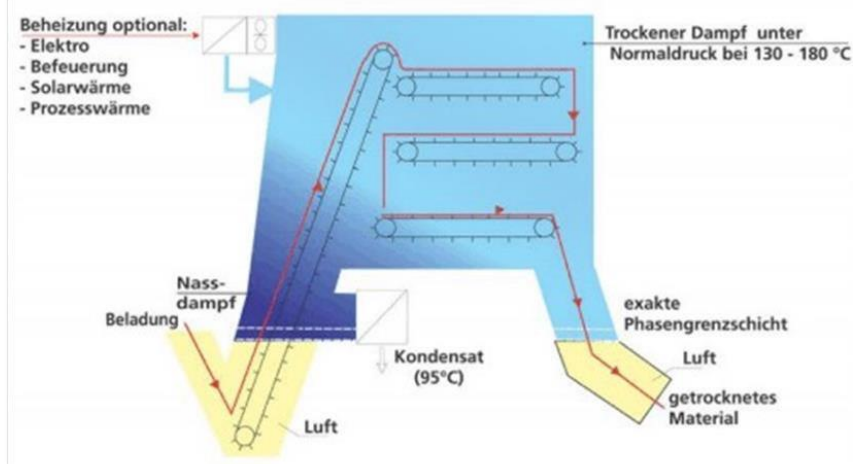
### **2.4.4. Derzeitiger, praktischer Einsatz von SHS**

Obgleich das Prinzip von SHS seit über 100 Jahren bekannt ist, blieb die technische Umsetzung noch sehr begrenzt (Karimi, 2010). Vor dem Hintergrund des hohen Energie- und damit verbundenen Kostenaufwand für Trocknungsverfahren (90 % der Energie zur Herstellung von Lebensmitteln fließen in die Trocknung) und möglicher Förderungen für energieautarke Firmen könnte sich dies jedoch in Zukunft ändern. Die nachstehend beschriebenen Fortschritte im Anlagenbau bezüg-

lich weiterer Energieeffizienzsteigerung, Simplifizierung und universaler Nutzbarkeit werden dazu ebenfalls einen Beitrag leisten.

Am Fraunhofer-Institut wurde kürzlich eine Anlage (Abb. 4.2.3) vorgestellt, bei der unter Atmosphärendruck Heißdampf unter einer Art „unten offener Käseglocke“ gehalten wird. Dies beruht darauf, dass Heißdampf leichter ist als unten abgeschiedene Luft und Kondenswasser. Damit muss der Dampf nicht neu produziert und nur wirklich genutzte Wärme erneut zugeführt werden. Es sind keine aufwendigen Schleusen erforderlich, und es kann ein relativ beliebiges Transportsystem gewählt werden. Abgegebene Trocknungswärme wird dem Heißdampf wieder zugeführt. Außerdem lassen sich die Abwärme und Kondenswasser an anderen Stellen der Verarbeitung nutzen. SHS-Trocknungsanlagen lassen sich mittlerweile im Industriemaßstab in existierende Trockner integrieren, wie z.B. in Fließbettrockner oder rotierende Trocknungsräume (Abb. 4.2.4) (GEA Process Engineering Ltd, 2015).

Ein bereits seit einigen Jahren erfolgreiches industrielles Anwendungsgebiet ist das Frittieren mit SHS in den seit 2007 kommerziell erhältlichen Anlagen der Marke „HiFri<sup>®</sup>“ der belgischen Firma QBTEC, welche vor allem an Restaurants verkauft werden (Abb. 4.2.5) (QBTEC BV, 2015). Das Marketing zielt dabei vor allem auf Fettreduktion, geringen Energieaufwand und den Wegfall des Filterns und Wechsels des Öls ab. Neben Industrieanlagen und Anlagen für die Gastronomie wurde SHS auch für Haushaltsgeräte entdeckt. So vertreibt die Firma Sharp einen SHS-Ofen im Design einer Mikrowelle (Abb. 4.2.6). Dieser wird offensiv als kalorien-, fett-, und salzreduzierte, sowie vitaminschonende Zubereitungsart beworben (SHARP Corporation, 2015).



Wasserdampf ist bei gleicher Temperatur leichter als Luft. Daher können zu trocknende Produkte ohne Schleusen von unten und kontinuierlich durch die Trocknungsapparatur gefördert werden.  
© Fraunhofer TEG

Abb. 4.2.3: Beispiel für energieeffizientes Anlagendesign eines *superheated steam* Trockners (Fraunhofer TEG, 2015)



Abb. 4.2.4: Diverse Anlagendesigns von *Superheated steam*-Trocknern der Fa. GEA Barr-Rosin (GEA Process Engineering, 2015)



Abb. 4.2.5: *Superheated steam* Friteuse HiFri© (QBTEC BV, 2015)



Abb. 4.2.6: *Superheated steam*-Haushaltsgerät AX-HC1-R (SHARP Corporation, 2015)

## 2.4.5. Risiken, rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz

Gesundheitlich nachteilige Effekte ausgehend von SHS behandelten Lebensmittel sind nicht publiziert und nicht zu erwarten. Um ein vorteilhaftes Nährstoffprofil zu erhalten und minimal negative hitzeinduzierte Reaktionsprodukte (wie etwa Acrylamid) zu generieren, ist selbstverständlich – wie bei allen anderen hitzebasierten, lebensmitteltechnologischen Prozessen – die Wahl der Temperatur und Prozesszeit zu beachten.

Für Konsumentinnen und Konsumenten ist SHS wohl noch kein Begriff. Zumal man Dampfgaren und Dampfdruckkochen etc. aus der Küche kennt, ist zu vermuten, dass die Akzeptanz gegeben sein wird.

## 2.5. Reinraumtechnik in Verbindung mit „Hygienic design“ und Robotik

### 2.5.1. Reinraumtechnik

Je geringer die Ausgangskeimzahl (= Kontamination der Lebensmittel mit Mikroorganismen), umso länger wird es dauern, bis sich pathogene Mikroorganismen zu einer schädlichen Konzentration vermehren können. Genau dieses Prinzip macht man sich bei der Lebensmittelverarbeitung in Reinräumen zu Nutze, um Kontaminationen bzw. Rekontaminationen zu verhindern oder zu minimieren. Beispielsweise werden Lebensmittel, wie Wurst, Schinken, Käse Schnittbrot etc., immer mehr im vorgeschnittenen Zustand angeboten. Diese an und für sich im Inneren keimarmen Lebensmittel werden beim Schneiden rekontaminiert. Das kann durch die an der Oberfläche der Lebensmittel und vor allem in der Umgebungsluft befindliche Mikroorganismen passieren oder auch durch verkeimte, unsaubere Maschinen und Maschinenteile, wie die Schneidwerkzeuge.

Das Prinzip der Reinraumtechnik ist in der Elektronikindustrie bei der Chipherstellung (⇒ Bauelemente mit integrierten Schaltkreisen) schon seit längerer Zeit im Einsatz. Damit soll verhindert werden, dass sich in der Luft vorhandene Staubpartikel auf diese elektronischen Bauteile absetzen und ihre Funktion später stören. Die Produktionsräume werden dabei gekapselt und durch stetiges Einblasen von sauberer, staubpartikelfreier Luft unter leichten Überdruck versetzt. Alle in den Reinräumen befindlichen Personen müssen eine Art Vollkörperschutzkleidung tragen, um als Kontaminationsquelle auszuschneiden.

Staubpartikel haben in etwa die gleiche Größenordnung wie Mikroorganismenzellen. Es war deshalb naheliegend das Reinraumkonzept auf die Lebensmittelherstellung zu übertragen. Auch hier wird in den Produktionsraum stetig entkeimte Luft eingeblasen. Diese Luft wird an undichten Stellen bzw. an Stellen, die nicht abgedichtet werden können, wieder ausströmen. Damit wird verhindert, dass nicht entkeimte Luft in den Produktionsraum eindringen kann. Die Arbeiter im Reinraum müssen entsprechende Schutzkleidung tragen und können den Reinraum nur über eine Schleuse betreten oder verlassen. Die Luftströmungen im Reinraum sind so zu gestalten, dass sie von den Maschinen und Produkten weg zu den Arbeitern hin gerichtet sind und nicht umgekehrt, und möglichst keine Verwirbelungen eintreten.

Die Entkeimung der Luft vor ihrem Eintritt in die Reinräume kann so wie in der Elektronikindustrie mechanisch durch Feinfiltration erfolgen. Eine andere Möglichkeit ist die Inaktivierung bzw. Abtötung der Keime in der Luft durch UV-Strahlung, durch gepulstes Licht, oder durch Zerstäubung von Desinfektionsmitteln in der Luft (Aerosole) (z.B. Peressigsäure, Wasserstoffperoxyd).

Reinräume halten vermehrt Einzug in die Lebensmittelverarbeitung. Auch in Österreich nutzen einige Firmen schon dieses Konzept bei der Herstellung und Verpackung von geschnittenen Fleischprodukten.

### 2.5.2. „Hygienic design“

Ein weiterer konsequenter Schritt zur hygienischen Lebensmittelproduktion ist die Konstruktion und Ausgestaltung von Maschinen und Geräten in der Art, dass eine Kontamination bzw. Rekontamination verhindert oder minimiert wird. Dieses Konzept hat sich schon gut etabliert und ist als „Hygienic Design“ bekannt. Seine Grundzüge lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (EHEDG, 2004, Koch, 2009):

- Glatte, leicht zu reinigende Oberflächen (Nanostrukturierte Oberflächen werden hier in Zukunft einen wesentlichen Beitrag leisten.)
- Keine toten Winkel und unzugängliche Stellen, die nicht inspiziert werden können.
- Vollständige Entleerungsmöglichkeit bzw. selbstentleerende Rohrleitungen, Behälter etc.
- Geringer Wartungsbedarf

Es gibt bereits eine eigene Vereinigung in Europa, in der Maschinenhersteller und Forschungsinstitutionen zusammenarbeiten, um dieses Ziel in der Praxis umzusetzen (EHEDG – The European Hygienic Engineering & Design Group).

### 2.5.3. Robotik

Die Menschen sind trotz Schutzanzügen die Hauptkontaminationsquellen in Reinräumen (Anonym, 2006). Konsequenterweise sollten sich daher so wenige Arbeiter als möglich in Reinräumen aufhalten. Durch weitere Automatisierung und Einsatz von Robotern wird es in Zukunft möglich sein, überhaupt ohne Menschen in den Produktionsräumen auszukommen. Diese sitzen in den Kontrollstationen und betreten die Reinräume nur mehr zu Inspektions- und Reparaturzwecken.

Der Einsatz von Robotern in den einzelnen Teilbranchen der Lebensmittelindustrie ist unterschiedlich stark (z. B. Automatisierungsgrad in Großbäckereien ca. 80 %, fleischverarbeitende Industrie ca. 20 %). Bereits zu den Standardanwendungen von Robotern gehören Verpacken und Palettieren.

Für den direkten Kontakt mit Lebensmitteln ist ein entsprechendes „Hygienic Design“ der Roboter erforderlich. Das betrifft u. a. die verwendeten Werkstoffe oder die Gestaltung der Gelenke, die ohne Schmiermittel auskommen müssen. Außerdem werden eine entsprechende 3-D-Objekterkennung und flexible, produktschonende Greifer benötigt. Das Deutsche Institut für Lebensmitteltechnik (DIL) betreibt eine Forschungsplattform Robotik, und entwickelte vor kurzem einen neuen Vakuumgreifer für weiche Produkte (DIL, 2015). Die österreichische Firma EEP Maschinenbau hat eine Verfahrenslinie zur vollautomatisierten Produktion von Lasagne von den Rohstoffen bis zur Abpackung errichtet, wobei mehrere, standardmäßige Industrieroboter eingesetzt werden (EEP, 2013).

In der zukünftigen *Smart Factory* (siehe Kapitel 1.1.4.1.) werden dann nicht nur standortfixierte Roboter zum Einsatz kommen, sondern ähnlich wie Menschen bewegliche Automaten, die alle miteinander vernetzt agieren und kommunizieren (Industrie 4.0, siehe Teil 1, Kapitel 1.1.4.1). Unsere Lebensmittelproduktionsstätten werden also in Zukunft völlig anders aussehen und betrieben werden. Die Konsumentinnen und Konsumenten werden wahrscheinlich davon nicht sehr viel

mitbekommen, weil die Lebensmittelindustrie verständlicherweise immer noch gern ein romantisches Bild der Lebensmittelherstellung zeichnen möchte. Zum Beleg dieser Aussage braucht man sich nur Werbespots für Lebensmittel im TV anzusehen, wo sicher kein realistisches Bild der Lebensmittelproduktion vermittelt wird.

## 2.6. Aseptische Abfülltechnik in Kombination mit neuen Konservierungsverfahren

In den 50er-Jahren des vorigen Jahrhunderts wurde von der schwedischen Firma Tetra Pack ein revolutionierendes neues Verfahren für die Abpackung von pasteurisierter Milch auf den Markt gebracht. Im Prinzip wird dabei ein flaches Kartonband kontinuierlich durch Verschweißen zu einem Schlauch geformt. Der Schlauch wird unten ebenfalls durch Verschweißen verschlossen und abgewickelt. Von oben wird nun pasteurisierte Milch eingefüllt und der Schlauch nochmals im rechten Winkel zur unteren Naht verschlossen und abgetrennt. Es entstehen am laufenden Band mit Milch gefüllte, **tetra**ederförmige Milchpackungen.

Ein gewaltiger Vorteil dieses Verfahrens war nun, dass die Milchpasteurisation produktschonend und energiesparend außerhalb der Verpackung durchgeführt werden konnte. Bei der konventionellen Pasteurisation oder Sterilisation wird das unsterile Lebensmittel in eine nicht sterile Verpackung (z.B. Konservendose) gefüllt, letztere verschlossen und nun durch Wärmezufuhr pasteurisiert oder sterilisiert. Es dauert sehr lange bis in der gesamten Dose die erforderliche Temperatur erreicht wird. Das Gut wird deshalb sehr ungleichmäßig erhitzt. Wie Abb. 4.2.6 zeigt, wird beim Tetra Pak-Prozess die Milch außerhalb der Verpackung pasteurisiert. Das Verpackungsmaterial wird nun, bevor es mit Milch befüllt wird, oberflächlich ebenfalls entkeimt. In einer sogenannten **Aseptikzone** wird dann die pasteurisierte oder auch sterilisierte Milch in die entkeimte Verpackung abgefüllt und diese verschlossen (⇒ **aseptische Abfüllung**). Die Aseptikzone muss einerseits verhindern, dass eine Wiederverkeimung der Milch erfolgt, andererseits aber die Einschleusung der Verpackung und der Milch und die Austragung der fertigen Verpackungen ermöglichen. So wie in der Reinraumtechnik (siehe Kap. 2.5.1.) wird deshalb in dieser Zone durch kontinuierliches Einblasen von Sterilluft ein Überdruck erzeugt und das Eindringen nicht steriler Luft verhindert.

Die Entkeimung des Verpackungsmaterials bzw. der Verpackungen kann heute durch chemische Entkeimung (z.B. Wasserstoffperoxid, Peressigsäure), durch Heißluft oder Sattedampf, durch Bestrahlung mit UV-, Infrarot-, gepulstem Licht oder Elektronenstahlung, oder durch Plasma erfolgen.

Die Erhitzung und Abkühlung der Milch beziehungsweise auch anderer flüssiger Lebensmittel außerhalb der Verpackung ist sehr rasch und gleichmäßig durchführbar. Es sind sogenannte Hoch/Kurzzeit-Erheizungen (HTST – *high temperature/short time*) oder sogar Ultrahoch/Kurzzeit-Erheizungen möglich. Je höher die Pasteurisations- oder Sterilisationstemperatur und umso kürzer die Behandlungszeit, desto produktschonender ist der Prozess. Diese Tatsache wird von vielen Konsumentinnen und Konsumenten nicht verstanden, weil hohe Temperaturen automatisch als nachteilig empfunden werden. Dass dies hier nicht der Fall ist, kann durch die Reaktionskinetik erklärt werden. Jede Reaktion wird nämlich durch Temperaturerhöhung beschleunigt, aber jede unterschiedlich stark. Die Inaktivierung von Mikroorganismenzellen wird sehr stark beschleunigt, während hingegen schädliche Reaktionen (z.B. Vitaminabbau, Bräunungsreaktionen) nicht so stark davon betroffen sind. Um einen ausreichenden Pasteurisations- oder Sterilisationseffekt zu erzielen, muss eine bestimmte Hitzebelastung erfolgen. Die Erreichung dieser Norm kann bei niedrigen Temperaturen aber dafür langen Behandlungszeiten oder eben vorteilhafter bei hohen

Temperaturen und dafür kürzeren Zeiten erfolgen. Im letzteren Fall werden weit weniger bis gar keine schädlichen Abbaureaktionen eintreten.

Stand der Technik ist gegenwärtig die Aufheizung und Abkühlung flüssiger Lebensmittel in einer Sekunde auf 150° C. Das gelingt mit dem sogenannten Direktdampfinfusionsverfahren, wo heißer Dampf direkt in das zu pasteurisierende oder sterilisierende, flüssige Lebensmittel unter Druck eingebracht wird. Der Dampf kondensiert und gibt seine Kondensationswärme an das Produkt ab. Anschließend wird die Flüssigkeit sofort entspannt. Bedingt durch den Druckabfall verdampft ein Teil der Flüssigkeit und die dafür erforderliche Verdampfungsenergie wird dem Gut sehr rasch entzogen und dieses wieder abgekühlt. Das Verfahren wird unter anderem zur Herstellung von ESL-Milch eingesetzt (ESL = *extended shelf life*). Damit wird eine länger"frische" Milch bezeichnet, die in der Haltbarkeit zwischen pasteurisierter Frischmilch und sterilisierter H-Milch liegt. ESL-Milch kann aber auch durch eine Kombination von Mikrofiltration und Pasteurisation erhalten werden.

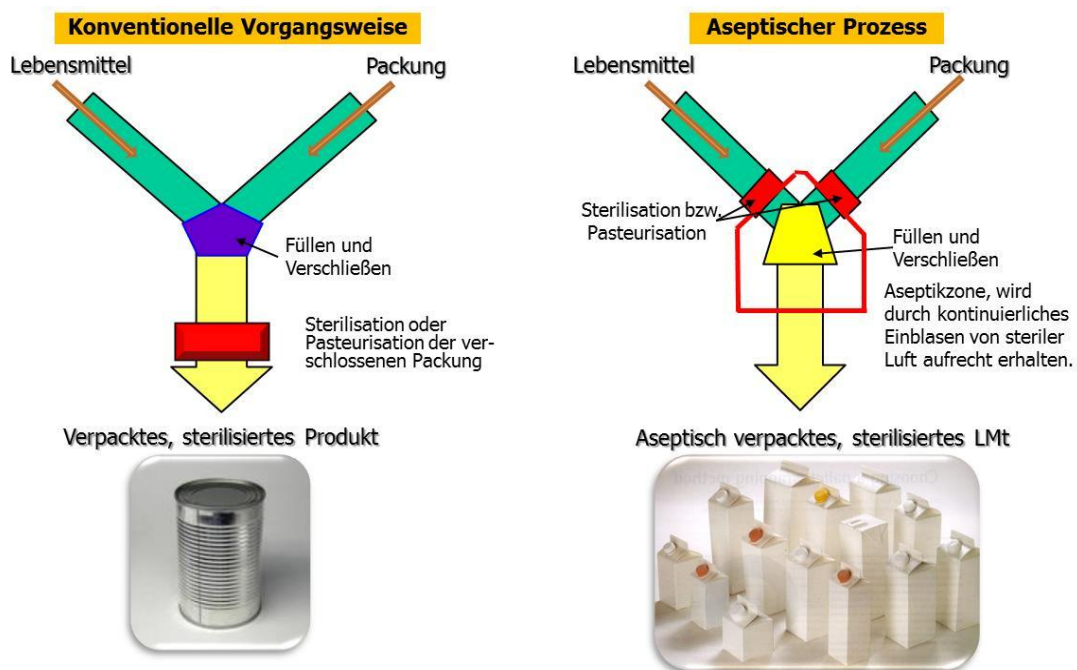


Abb. 4.2.6: Vergleich der konventionellen Pasteurisation/Sterilisation mit der aseptischen Abfüllung

Aufgrund ihrer Vorteile hat sich die aseptische Abfüllung in der Zwischenzeit generell durchgesetzt. Neben Milch können und werden heute ein Großteil aller flüssigen Lebensmittel (Getränke, Suppen etc.) aseptisch abgefüllt. Voraussetzung ist, dass die flüssige Phase nicht zu viskos ist. Es können auch feste Partikel suspendiert enthalten sein, sofern ihr Anteil nicht zu hoch und die Partikel nicht zu groß sind.

Die Abfülltechnik ist in der Zwischenzeit so weit fortgeschritten, dass nicht nur flexible Verbundkartonverpackungen, sondern auch starre Verpackungen aus den unterschiedlichsten Materialien (z.B. Glas- und Kunststoffflaschen, Aluminiumdosen) auf diese Weise abgefüllt werden können. Es ist sogar die aseptische Abfüllung in Großbehältern möglich, wie z.B. in Fässern und Metallcontainern.

Zur kontinuierlichen Durchführung der klassischen Hitzepasteurisation oder -sterilisation werden heutzutage unterschiedlichste Arten an Wärmeaustauschern eingesetzt, die HTST-Prozesse ermöglichen. In Kapitel 2.8. werden neue Verfahren beschrieben, um die Aufheiz- und Abkühlraten noch weiter zu beschleunigen.

**Trotz der produktschonenden Weise der neuen thermischen Erhitzungsmethoden bleibt aber der grundsätzliche Nachteil aller thermischen Haltbarkeitsverfahren weiter bestehen. Nämlich der, dass eben nicht nur Mikroorganismenzellen inaktiviert werden, sondern auch andere Reaktionen ausgelöst werden können. Zum besseren Verständnis kann der Vergleich mit einem Schrotgewehr heran gezogen werden. Der unpräzise Schuss trifft erwünschte und unerwünschte Ziele. Besser wäre ein gezielter präziser Schuss, der nur die Mikroorganismen trifft aber keine Lebensmittelinhaltsstoffe. Chemische Konservierungsmittel wirken genau auf diese Weise. Wie in Kapitel 2.8. ausgeführt wird, gibt es heute tatsächlich neue nichtthermische, technische Verfahren, die gezielt nur die Mikroorganismen inaktivieren oder entfernen und andere Inhaltsstoffe völlig unbehelligt lassen. Das erklärt auch, warum immer intensiver nach Alternativverfahren zu den thermischen Haltbarkeitsverfahren gesucht wird.**

## 2.7. *Supercooling/superchilling*

Unter „*super-chilling*“, auch unter den Namen „*super-cooling*“, „*deep-chilling*“, „*light-freezing*“ und „*partial ice-formation*“ bekannt, ist das Herabkühlen und die Lagerung eines Lebensmittels auf etwa 1 – 1,5° C unter seinem Gefrierpunkt zu verstehen. Das entspricht im Allgemeinen bei den dafür prädestinierten Lebensmitteln wie Fisch und Fleisch realen Temperaturen von etwa -1° bis -3° C. Dabei werden die Vorzüge des Frierens (lange Lagerfähigkeit) und des Kühlens (geringerer Energie- und Kostenaufwand und vom Konsumenten als „frischer“ erachtet) in vorteilhafter Weise kombiniert.

### 2.7.1. Prinzip und Nutzungsrelevanz

Die Technologie umfasst vereinfacht das (Abpacken) und das rasche Abkühlen und Halten auf der von der Matrix abhängigen Zieltemperatur. Um den Gefriervorgang möglichst rasch und damit schonend im Sinne von möglichst geringer Größe der gebildeten Eiskristalle zu gestalten, werden statt herkömmlicher, mechanischer Froster meistens Kryogenfroster (z.B. Flüssigstickstoff-Kühlen) oder *impingement-freezer* eingesetzt. Bei Letzteren handelt es sich um Froster, die aus zwei unabhängig voneinander regelbaren (Temperatur und Luftgeschwindigkeit) Zonen bestehen, wobei die Lebensmittel zunächst die höher temperierte Zone und anschließend die Zone mit einer deutlich geringeren Temperatur auf einem Förderband durchlaufen.

Physikalisch wird ein Teil des Wassers im Lebensmittel (5 – 30 % hat sich als optimal erwiesen) zu Eis konvertiert, was meist einem oberflächlichen Frieren der äußersten 1 – 3 mm entspricht. Damit wird sozusagen ein „interner Eispolster“ gebildet, welcher die von innen nachgelieferte Wärme auffängt. Auf diese Weise lässt sich die Eislagerung im Frischfischhandel ersetzen, die eine Kontaminationsquelle darstellt. Der Grundgedanke des *super-chillings* besteht darin, dass das Innere des Lebensmittels weitgehend unbeeinflusst von Schäden durch Eiskristallbildung bleibt, was beim klassischen „Durchfrieren“ zu einem gewissen Grad unvermeidbar ist. Die Temperaturen sind dabei tief genug, um mikrobielles Wachstum und viele enzymatische/biochemische Verderbsreaktionen zu unterdrücken. Für abgepackte und *super-chilled* Seebrasse wurde gegenüber Lagerung auf Eis eine verbesserte Sensorik in ungekochtem und gekochtem Zustand, geringere



Werte für Trimethylamin, freier Gesamtstickstoff (TVN) und Thiobarbitursäure (Verderbnisindikatoren bei Fisch) und ein verringertes bakterielles Wachstum beobachtet (Duran-Montge et al., 2014). Damit konnte die Haltbarkeit der Seebrassenfilets um das 1,25 – 1,7-fache verlängert werden. Für Fisch (Karpfen und Lachs) sowie Schweinefleisch wurde ein verminderter Tropfverlust und eine damit assoziierte erhöhte Wasserbindungskapazität gegenüber gekühlten und gefrorenen Produkten festgestellt (Mi et al., 2011, Johansen et al., 2013, Duun et al., 2008, Kaale et al., 2014). Gegenüber Kühlung konnte die Haltbarkeit von *super-chilled* Schweinefleisch von 14 Tagen auf 16 Wochen erhöht werden (Duun et al., 2008). Für Fisch wurde die verlängerte Haltbarkeit (für Karpfen etwa 21 Tage) damit erklärt, dass die Degradierung der myofibrillären Proteine (Hauptverderbsursache bei Fisch) durch die Bildung von insgesamt weniger und kleineren Eiskristallen geringer ausfällt und die Aktivität des Enzyms Calcium-ATPase besser erhalten bleibt (Mi et al., 2013). Auch am Objekt Surimi wurde eine verringerte Zerstörung des myofibrillären Proteins aufgezeigt (Liu et al., 2014).

## 2.7.2. Kritische Parameter und Beschränkungen

Kritisch beim *super-chilling* ist, dass die Abkühlung so rasch als möglich abläuft und die Temperatur in sehr geringen tolerierbaren Schwankungsbreiten gehalten wird. Temperaturschwankungen und -gradienten führen nämlich zu einer unerwünschten Rekristallisation, die mit einer Vergrößerung vorhandener Eiskristalle einhergeht und damit einen wesentlichen Vorteil des *super-chillings* zunichte macht (Kaale et al., 2014). Die Erhöhung der Temperatur über Gefrieretemperatur ist bekanntermaßen mit einem Risiko für die Lebensmittelsicherheit und Qualität assoziiert, wobei hier aber im Gegensatz zum herkömmlichen TK-Lagern wenige Grad Temperatursteigerung ausreichen, um in den kritischen Bereich zu gelangen.

## 2.7.3. Kombinationen

Liu et al. (2014) beobachteten Synergien des *super-chilling* mit den Kryoprotektoren Saccharose und Sorbit bei Surimi.

## 2.7.4. Mögliche Risiken und Forschungsbedarf

Forschungsbedarf besteht vor allem dahingehend, zu eruieren, inwieweit die Qualität und Sicherheit der Lebensmittel bei der anschließenden Kühl- bzw. Tiefkühlagerung durch Handel und/oder im Haushalt auch wirklich gewährleistet bleibt. Derzeit nutzt man *super-chilling* nämlich noch wenig und ausschließlich zur Kostensenkung und Qualitätssteigerung im Produktionsbereich und nicht im Handel bzw. Haushalt. Der *super chilling*-Temperaturbereich ist eher unüblich. Daher weiß man auch über die Wachstumskinetik und den Stoffwechsel von MO, Proteindenaturierung, Fettoxidation etc. bei diesen Bedingungen und möglichen Schwankungen relativ wenig. Weiter muss für jede Lebensmittelmatrix der optimale Temperaturbereich des *super-freezings* ermittelt werden, weil dieser z.B. vom Fettgehalt abhängig ist. Während Fisch relativ gut und Fleisch zumindest etwas untersucht ist, fehlen für andere Lebensmittel wissenschaftliche Kenntnisse zum Qualitätserhalt unter *super-chilling*.

## 2.7.5. Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz

Im Österreichischen Lebensmittelbuch (online Zugriff 01/2015) wird der beim *super chilling* eingesetzte Temperaturbereich nicht angeführt. Hier existieren nur folgende Lagermöglichkeiten hinsichtlich der Temperatur:

1. Bereich der Tiefkühlagerung: Entspricht definitionsgemäß einem Temperaturbereich unter minus 18 °C und wird in der Kennzeichnung durchwegs mit der genauen Angabe der Lagertemperatur und dem Hinweis „tiefgekühlt“ oder „tiefgefroren“ deklariert.
2. Bereich der gekühlten Lagerung: Das bedeutet eine Lagerung im Kühlschrank bzw. in Kühlgeräten und umfasst den Temperaturbereich von 0 - 9 °C (mit Toleranz bis 10 °C). Darüber hinaus kann eine konkrete Angabe der Lagertemperatur erfolgen z. B. „(gekühlt) bei +6 °C lagern“, „(gekühlt) bei 4 - 6 °C lagern“, so z.B. bei Milcherzeugnissen (+6 - +8 °C) oder bei Fleischerzeugnissen (meist +4 - +6 °C).
3. Raumtemperatur.

Für den praktischen Einsatz des *super chillings* müssen also zuerst die rechtlichen Voraussetzungen geschaffen werden.

Da man sich unter *super-chilling* als Kombination der beiden lange bekannten und als sicher eingestuften Lebensmittel-Kühlagerung und TK-Lagerung sehr viel vorstellen kann (also „Erwartetes“ passiert) und die Vorteile der Kombination verständlich sein dürften, ist bei einem allfälligen Einsatz von einer breiten Konsumentenakzeptanz auszugehen.

## 2.8. Nichtthermische Verfahren

Die im Folgenden beschriebenen Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass der bei konventionellen Verfahren meistens genutzte Eintrag von thermischer Energie vermieden oder zumindest weitgehend reduziert wird. Damit soll die Reduktion des Verlustes an wertgebenden Inhaltsstoffen (z.B. Vitamine, Farb- und Aromastoffe) vermieden werden. Daneben lässt sich bei einigen Verfahren der Gesamtenergieeintrag reduzieren, was wiederum ökonomische Vorteile mit sich bringt.

Im Wesentlichen ist die Nutzungsrelevanz auf einem oder mehreren der nachfolgenden Charakteristika begründet:

- Es wird keine wesentliche Hitzeeinwirkung hervorgerufen, d.h. es handelt sich um sogenannte „nicht-thermische Verfahren“. Das ist der Fall, wenn anstatt thermischer Energie mechanische Energie [z.B. hoher Druck im Fall der Hochdruckbehandlung (HP)] oder elektromagnetische Energie [z.B. Elektroporation für pulsed electric fields (PEF)] genutzt wird.
- Die Hitzeeinwirkung wird durch vorteilhafte Änderung des Zeit/Temperaturprofils wesentlich reduziert, sozusagen nach dem „Vorbild der UHT-Behandlung.“ Das lässt sich beispielsweise durch Beschleunigung des Aufheizvorgangs bewerkstelligen, wie z.B. durch Ohm'sche Erhitzung oder mittels Nutzung einer zweiten Wirkungskomponente wie Ultraschall, womit die ursprünglich nötige Temperatur deutlich verringert werden kann, etwa im Fall der Thermosonication.
- Die Hitzeeinwirkung wird homogener gestaltet, was bei Verfahren möglich ist, die das sogenannte „volumetrische Erhitzen“ nutzen. Volumetrisches Erhitzen bedeutet, dass die Wärme im Lebensmittel selbst generiert wird und nicht von außen nach innen geleitet wer-

den muss. Letzteres führt bei herkömmlichen Prozessen oft zu Überhitzung der äußeren Schichten mit allen daraus resultierenden Qualitätseinbußen. In diesen Bereich fallen beispielsweise die Radiofrequenzerhitzung (radio-frequency heating) und die Ohm'sche Erhitzung (ohmic heating).

- Das Verfahren ermöglicht eine gezielte Inaktivierung der Keime und Enzyme, vorrangig zur Haltbarkeitsverlängerung. Dazu zählen Methoden, die beispielsweise bei festen Lebensmitteln gezielt nur die Oberflächenflora inaktivieren und das Innere der Lebensmittel dabei quasi „unberührt“ lassen und/oder das Erbgut von Mikroorganismen gezielt schädigen, wie UV-Strahlung, gepulstes Licht oder Kaltplasma. Auch Verfahren wie Hochdruck das gezielt vorrangig Proteine denaturiert, fallen unter diesen Punkt.

Meistens treffen für diese neuartigen Verfahren nicht nur einer sondern mehrere der oben angeführten Punkte zu, wodurch eine systematische Einteilung schwierig wird. Eigentlich nicht-thermische Verfahren werden häufig auch in Kombination mit schwacher Hitzeeinwirkung (meist im Bereich 50 – 60° C = Kompromiss zwischen keinen negativen Effekten und etwas „Wirkung“) genutzt, weil sich so synergistische Wirkungen ergeben. Dies wird im Nachfolgenden in den „Kombinations“-Unterkapiteln näher beschrieben.

Die Generierung der jeweiligen Wirkmechanismen erfolgt vorrangig durch elektromagnetische oder mechanische Energie, weshalb die weitere Gliederung in den nachfolgenden Kapiteln nach diesen Kriterien vorgenommen wurde.

Diese neuartigen („*novel*“) Verfahren können unter die Novel-Food Verordnung Nr. 258/97 fallen. Die Definition eines *Novel Food* aufgrund des Produktionsprozesses ist folgende: *„Lebensmittel und Lebensmittelzutaten, bei deren Herstellung ein nicht übliches Verfahren angewendet worden ist und bei denen dieses Verfahren eine bedeutende Veränderung hinsichtlich der Zusammensetzung oder den Strukturen des Lebensmittels oder der Lebensmittelzutaten bewirkt hat, was sich auf den Nährwert, den Stoffwechsel oder auf die Menge unerwünschter Stoffe im Lebensmittel auswirkt.“*

Grundsätzlich ist hierzu klarzustellen, dass die Klärung, ob es sich bei den – durch die im nachfolgenden beschriebenen Verfahren hergestellten – Lebensmitteln um Novel-Food handelt nur *case-by-case* gefällt werden kann. Entscheidungen sind demnach nur auf Empfehlung der zuständigen Behörden als Einzelfallentscheidungen zu treffen.

Dennoch sollen im Folgenden kurz allgemein einige Entscheidungskriterien, die sich aus der Definition eines Novel-Food ergeben, andiskutiert werden.

Die Formulierung „bedeutend“ ist eine Auslegungssache - selbst wenn die Art der Veränderung definiert wäre, müsste man sich etwa über das betroffene Ausmaß der Veränderung im Lebensmittel Gedanken machen. Beispielsweise fallen unter die nichtthermischen Verfahren auch gepulstes Licht und Kaltplasma, welche als Oberflächenentkeimungsverfahren lediglich im Nanometer-Bereich in das zu behandelnde Lebensmittel eindringen. Definiert man nun „bedeutende“ Änderung als eine hochprozentuell im Lebensmittelgewicht stattfindende Änderung, fallen/fielen diese Verfahren *per definitionem* nicht unter die Novel-Food-Verordnung.

Bei der **Beurteilung der Akzeptanz** dieser neuartigen Verfahren seitens der Konsumentinnen und Konsumenten sind folgende Erkenntnisse aus der „Akzeptanzforschung“ zu berücksichtigen:

- Das Bewusstsein für neuartige Lebensmitteltechnologien ist in der Allgemeinbevölkerung sehr gering.
- Kaum jemand traut sich zu, selbst medial breitgetretene Themen wie z.B. die Gentechnik (welche einen Ausnahmefall mit hoher Bewusstseinsbildung darstellt) seinen Freunden zu erklären, weil befürchtet wird, dass der eigene Wissensstand nicht ausreicht.
- Eine Meinungsbildung erfolgt meistens durch eine Gegenüberstellung aus angenommenen Vorteilen und Risiken. Das setzt aber ausreichende Informationen voraus.
- Die angenommenen Vorteile/Risiken der einzelnen Verfahren decken sich nur bedingt mit den Ansichten der Experten.
- Information ist eine Sache des Vertrauens, sie muss also aus einer für die jeweilige Bevölkerungsgruppe vertrauenswürdigen Quelle stammen. Hierbei gibt es in den verschiedenen Ländern große Unterschiede darin, wem die Bevölkerung traut (Ärzte? Wissenschaftler? Politik?).
- In Fällen eines geringen Informationsstandes ist die Akzeptanz der Konsumentenkreise im Allgemeinen leicht negativ, in einigen wenigen Studien neutral. Ohne klar erkennbare Vorteile schlägt die „*wir kommen auch ohne klar*“-Meinung durch und/oder „*das bringt wohl nur den Herstellern was*“.
- Bekannte Grundlagen zur Entscheidung über den Akzeptanzlevel neuer Technologien sind: Preis, Convenience, „Natürlichkeit“, Gesundheitsaspekte (negative & positive).
- Frauen stehen neuen Technologien allgemein skeptischer gegenüber als an der Technik interessiertere Männer.
- Junge Menschen mit hohem Bildungsniveau sind ebenfalls tendenziell offener.
- „*The proof of the pudding is in the eating*“ – Es wurde beobachtet, dass im Fall, dass eine Versuchsperson anfangs eine wenig stark ausgeprägte Meinung zu einer Technologie hat, sich diese durch Verkostung eines damit hergestellten Produktes in die Gegenmeinung umkehren lässt. Das wurde beispielsweise im Fall von gepulsten elektrischen Feldern (PEF) beobachtet, wo eine anfängliche Skepsis gegenüber „Elektrizität im Lebensmittel“ durch das positive Erlebnis „Trinken eines wie frisch gepressten Saftes“ ins Positive umgekehrt werden konnte.

### 2.8.1. Nutzung elektromagnetischer Energie

Abb. 4.2.7 zeigt das elektromagnetische Spektrum mit den einzelnen Bereichen, sowie deren Wellenlängen und Frequenzen. Von Radiowellen bis zur Gammastrahlung werden alle Bereiche zur Bearbeitung und Behandlung von Lebensmitteln eingesetzt. Der unterste Teil von Abb. 4.2.7 stellt schematisch die Wechselwirkung der elektromagnetischen Wellen mit der Materie dar. Von Radiowellen bis zur Infrarotstrahlung werden Moleküle angeregt und beginnen zu rotieren bzw. zu schwingen. Die elektromagnetische Energie wird dabei in Wärmeenergie umgewandelt (⇒ dissipiert). Diese Bereiche (Radiowellen, Mikrowellen, Infrarotstrahlung) können und werden daher zur Erwärmung von Lebensmitteln eingesetzt.

Ab dem kurzwelligen, sichtbaren Licht, UV-Licht, Röntgen und Gammastrahlung entstehen direkte strahlenchemische Effekte, indem Elektronen aus den Hüllen der Atome herausgeschlagen werden. Dabei entstehen freie Elektronen und Radikale. Wie der Name schon sagt, sind Radikale nicht beständig, weil sie mit anderen Molekülen weiter reagieren, um ihre Elektronenhüllen wieder zu

sättigen. Geringfügige Änderungen in Lebensmitteln durch solche Effekte sind ausreichend, um Haltbarkeitseffekte durch die Inaktivierung von Mikroorganismen und Enzymen zu erreichen. Die Behandlung mit ionisierenden Strahlen (Lebensmittelbestrahlung schlechthin) oder mit UV-Licht zählen schon lange zum Stand der Technik.

In den folgenden Kapiteln werden neue Entwicklungen bei der Nutzung der einzelnen Bereiche näher dargestellt.

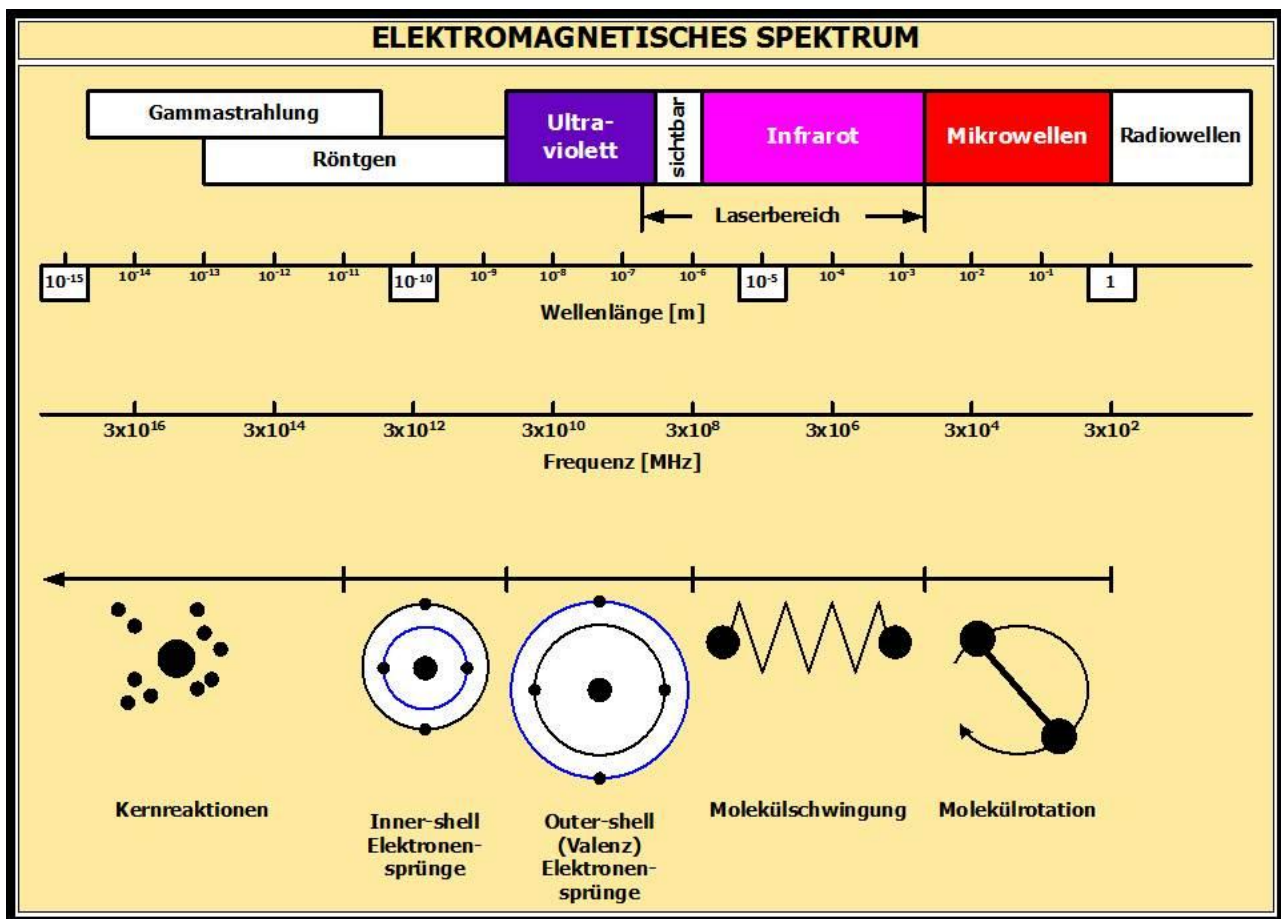


Abb. 4.2.7: Bereiche des elektromagnetischen Spektrums

### 2.8.1.1. Radiowellen (*radio frequency*) (RF)

Unter „*radio-frequency*“-Behandlung versteht man in der Lebensmittelverarbeitung eine Nutzung hochfrequenter Energie in Form von nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung zum Kochen, Trocknen, Auftauen und zur Dekontamination von Lebensmitteln.

#### Prinzip

Die RF-Behandlung fällt methodisch ebenso wie die weitaus bekanntere Mikrowellentechnologie unter das Prinzip des dielektrischen Erhitzens, was folgendermaßen funktioniert: Ein elektrisches Wechselfeld hoher Energie (zugelassene Radiofrequenzen für Lebensmittel sind 13,56 bzw. 27,12 bzw. 40,68 MHz) bewirkt im Lebensmittel „Bewegung“. Einerseits bewegen sich negativ geladene Ionen zur positiv geladenen Elektrode und positive geladene Ionen zur negativ geladenen

Elektrode. Dieses Phänomen nennt man auch „ionische Depolarisierung“. Elektrisches Wechselfeld bedeutet, dass sich die Ladungen der Elektroden ständig ändern und dies – da auf Radiofrequenz – mit sehr hoher Frequenz (Häufigkeit). Da die Ionen versuchen sich im elektrischen Feld auszurichten, bewirkt diese ständige Umpolung eine Oszillation der Moleküle. Dies wird als „Dipolrotation“ bezeichnet. Die hohe Bewegungsenergie, die sich aus der Summe der ionischen Depolarisierung und der Dipolrotation ergibt, wird letztlich im Lebensmittel in Wärmeenergie umgewandelt (dissipiert).

Neben der hervorgerufenen Erhitzung, die sich von herkömmlichen Garmethoden nur durch die Art der Wärmeerzeugung unterscheidet – letztlich ist es immer Molekülbewegung, die Wärme generiert – sollen auch noch nicht näher definierte, nicht-thermische Effekte für das rasche Abtöten von MO durch eine RF-Behandlung verantwortlich sein (Marra et al., 2009).

Wesentliche Unterschiede zu Mikrowellen sind die geringere Frequenz (für Lebensmittel zugelassene Mikrowellenfrequenzen sind 915 und 2450 MHz) und die damit verbundenen, höheren Wellenlängen. Bei RF soll der Effekt der ionischen Dipolarisierung gegenüber der Dipolrotation im Gegensatz zu den Mikrowellen überwiegen (Buller et al., 1993). In der Praxis äußern sich die Unterschiede in einer höheren Eindringtiefe der längeren RF-Strahlen in das Lebensmittel, was mit einer homogeneren Erhitzung assoziiert sein soll. Für Mikrowellen ist die Bildung sogenannter *hot* und *cold spots* (also Stellen mit deutlich höherer bzw. niedrigerer Temperatur als im Gesamtlebensmittel) ein größeres Problem (Marra et al., 2009).

Der einfachste Aufbau einer RF-Anlage ist ein Generator mit einem Elektrodenpaar, zwischen welchen sich das zu behandelnde Gut befindet. Im Gegensatz zu der unten beschriebenen Ohm'schen Erhitzung ist kein direkter Elektrodenkontakt erforderlich, was eine Behandlung in der Verpackung ermöglicht.

### **Nutzungsrelevanz**

Gegenüber der konventionellen Erhitzung ergeben sich die folgenden methodischen Vorteile:

- Die Absorption (Aufnahme) der Energie erfolgt direkt durch das Lebensmittel und nicht durch ein Übertragungsmedium, was geringere Energieverluste ergibt.
- Da die Wärme direkt im Lebensmittel generiert wird (volumetrisches Erhitzen), erfolgt eine gleichmäßige Erhitzung.

In Kombination führt das zu einem deutlich schnelleren Prozessverlauf (z.B. bis zu dreißigmal schnelleres Kochen von Fleisch) (Laycock et al., 2003, Guo et al., 2006) und zu Verbesserungen bei diversen Qualitätsparametern. So konnten im Vergleich zu herkömmlichem Kochen auf denselben Endpunkt (z.B. festgelegte Textur, Kerntemperatur etc.) in Brokkoli durch RF höhere Gehalte an Vitamin C und Glucosinolaten, sowie in Lachs ein höherer Vitamin B-Gehalt erhalten, und für Röstkartoffeln der Acrylamidgehalt um 50% gesenkt werden (Fiore et al., 2013). Ein verbesserter Erhalt von Vitamin C bei gleichzeitig geringerer Bildung von 5-Hydroxymethylfurfural wurde bei Behandlung von Tomatenmark erzielt (Felke et al., 2011). Die Verringerung des Acrylamidgehalts konnte auch für Kekse bei Ersetzen eines Teils der Backzeit durch RF bestätigt werden. Dabei wurde anstatt 205°C für 11 min Backen, nur 8 min bei 205°C gebacken und anschließend 45 sec RF-behandelt, wobei eine Acrylamidreduktion um 50% beobachtet wurde (Kocadagli et al., 2012). RF nach Ende des Backprozesses zu nutzen, hat einen weiteren Sinn, den man bereits industriell nutzt. Dabei werden die bestehenden Inhomogenitäten in der Feuchteverteilung (*moisture-pockets*) mittels RF ausgeglichen, was letztlich zu geringerer Bruch tendenz führt. Dabei macht man sich zunutze, dass RF Wasser vorrangig verglichen mit Fett und Zucker erhitzt, da dieses eine höherer Dielektrizität aufweist (Jones, 1985). Bei der Salattrocknung konnte bei beachtlicher Verringerung der Trocknungsdauer auf 120 min (vgl. dazu mit Heißluft: 360 min) ein deutlich

verbesserter Farberhalt sowie eine klar erhöhte Rehydrierungskapazität, allerdings bei etwas erhöhter Schrumpfrate im Vergleich zur Heißlufttrocknung gezeigt werden (Roknul et al., 2014). Ein verbesserter Erhalt von Farbe und Sensorik wurde auch bei Einsatz von RF als Nacherntetechnologie zur Dekontamination für Persimonen (Monzon et al., 2007) und Pfeffer (Jeong und Kang, 2013) beobachtet. Die Entfernung von Schädlingen mittels RF bei gleichzeitig gutem Erhalt der sensorischen Eigenschaften beruht u.a. darauf, dass Schädlinge im Allgemeinen einen höheren Wassergehalt als die Lebensmittelmatrix aufweisen und damit schneller erhitzt werden. RF hat sich in zahlreichen Studien z.B. mit Nüssen, Gewürzen, Persimonen, Äpfeln, Süßkirschen und Alfalfasamen als sinnvolle Alternative zu Pestiziden etc. erwiesen (Wang et al., 2002, Wang et al., 2013, Jeong and Kang, 2014, Monzon et al., 2007, Wang et al., 2006, Nelson et al., 2003). Dabei wurde die ausreichende Inaktivierung der jeweils relevanten Schädlinge bzw. Mikroorganismen bei Temperaturen von 48 - 55°C mittels RF durch die Schale (wenn vorhanden) bewerkstelligt. Bei Alfalfasamen wurde gezeigt, dass die Keimfähigkeit durch die RF-Behandlung zur Abtötung von Salmonellen und *E.coli* nicht leidet (Nelson et al., 2003). Weiters wurde RF auch bereits erfolgreich zur Inaktivierung der unerwünschten Enzyme Phosphatase und Proteasen genutzt, um die Haltbarkeit der temperaturempfindlichen Misopaste zu erhöhen. Die vollständige Inaktivierung dieser Enzyme im bereits abgepackten Lebensmittel wurde unter besserem Erhalt von Farbe und Sensorik in 1/3 des Zeitaufwands einer herkömmlichen Hitzebehandlung realisiert (Lemura et al., 2014). Bei Pasteurisierung von Eiern in der Schale mittels RF ließen sich neben den sensorischen Eigenschaften auch technologisch relevante Eigenschaften wie Viskosität und Schaumstabilität erhalten (Kannan et al., 2013). Bei Fleisch wurde ein deutlich geringerer Saftaustritt experimentell bestätigt (LAYCOCK et al., 2003, Orsat et al., 2004), was vermutlich u.a. auf die verringerte Kochzeit zurückzuführen ist. Für den Trend des *fresh-cut* Gemüses ist möglicherweise relevant dass eine RF-Behandlung verbesserte Qualität (Farbe, Sensorik) im Vergleich mit Chlor behandelten und Heißwasser behandelten Karottensticks zeigte (Orsat et al., 2001). Der Vorteil der volumetrischen Erhitzung und der hohen Eindringtiefe der Strahlung zeigt sich vor allem bei heterogenen Lebensmitteln. So erhitzen sich in Versuchen am Modell „Lasagne“ Teig, Tomatensauce, Faschiertes und Käse erstaunlich homogen (Wang et al., 2012). Auch in einer vergleichenden Studie für Erdnussbuttercracker in Sandwichform mit homogener Creme versus „*crunchy*“- Variante ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in der Inaktivierung der für dieses Lebensmittel relevanten *Salmonella ssp* und *E.coli* (Ha et al., 2013).

### Derzeitiger praktischer Einsatz

RF wird für das Nachtrocknen von Keksen und Crackern zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Feuchteverteilung sowie zur Pasteurisierung und Vortrocknung von gefüllter Pasta industriell genutzt (Jones, 1985; Alberti et al., 2011). Einige andere Anwendungen wurden zumindest auf ihre industrielle Machbarkeit getestet. So wurde eine Linie zur RF-Pasteusierung von Wurst mit Durchsätzen von ca. 120 kg/h betrieben (Houben et al., 1991). Abgepackte marinierte Hühnerbrust konnte in RF-Bandöfen unter 41% iger Verringerung der Kochzeit bei vergleichbarer Kochausbeute, Wasserbindungsvermögen, allerdings unerwartet etwas schlechterem Farberhalt gegenüber dem herkömmlichen Kochen prozessiert werden (Kirmaci & Singh, 2012). Grundsätzlich hat sich RF in der Industrie allerdings noch nicht durchgesetzt, was laut Marra et al. (2009) im Bereich der Dekontamination vor allem auf die höheren Investitionskosten bei ähnlichen Energiekosten basiert. Im Bereich des Garens ist das ebenfalls dielektrische Mikrowellenverfahren momentan erforschter, bekannter und damit klar verbreiteter. Fernab der eigentlichen Lebensmittelverarbeitung könnte RF mittelfristig als RFID (*radio-frequency identification*) zum *tagging* und damit zur Verbesserung der Rückverfolgbarkeit von agrarischen Rohstoffen und Lebensmitteln Einsatz finden (z.B. Ruiz-Garcia and Lunadai, 2011, Qian et al., 2012, siehe dazu Teil 5).

### Beschränkungen, kritische Parameter und Forschungsbedarf)

Die aufgenommene Energie lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$Q_v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon' \cdot \epsilon'' \cdot E^2$$

f = Frequenz

E = elektrische Feldstärke

$\epsilon'$  = dielektrische Konstante

$\epsilon''$  = dielektrischer Verlustfaktor.

$\epsilon''$  gibt an, wie gut eine Matrix die Strahlung absorbieren kann und damit letztlich, wieviel Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt wird.  $\epsilon''$  hängt wesentlich von der Zusammensetzung des Lebensmittel ab. Studien am Modell Rindfleisch zeigten, dass mit steigendem Salzgehalt im Lebensmittel  $\epsilon''$  ansteigt, während eine Erhöhung des Fettgehaltes eine Verringerung von  $\epsilon''$  bewirkt (Lyng et al., 2005, Zhang et al., 2007). Die Eindringtiefe der RF-Strahlung soll weiters mit Erhöhung der Frequenz sinken und mit Erhöhung von Wassergehalt und Temperatur im Gut steigen (Zhu et al., 2014, Basaran-Akgul & Rasco, 2013).

Als mögliche weitere Faktoren, welche die Effizienz der RF-Behandlung beeinflussen könnten wurden in diversen Studien die Form, Menge und Ausrichtung des Lebensmittels im elektrischen Feld identifiziert. Für Äpfel und Orangen unter RF-Behandlung traten selbst unter Nutzung von wasserunterstütztem RF, das üblicherweise der Verbesserung der homogenen Temperaturverteilung dient, gewisse *hot spots* auf (Birla et al., 2004). Eine höhere Schichtdicke, also ein verringerter Abstand zu den Elektroden, sowie mechanisches Umwälzen des Gutes erwiesen sich als förderlich (Orsat et al., 2001, Tiwari et al. 2011, Wang et al., 2005). Ebenso wurde das Einleiten von Dampf in den RF-Ofen zur Verbesserung der Temperaturverteilung empfohlen (Aymerich et al., 2008). Neueste Forschungsarbeiten zeigten den Nutzen der Verpackung in Polyetherimiden (PEI) zur homogeneren Temperaturverteilung unter RF-Behandlung auf. Konkret wurde bei Pathogeninaktivierung von in PEI-verpackter Erdnussbutter mittels RF der Temperaturunterschied zwischen *hot* und *cold spots* an der Oberfläche von 13°C auf 7°C, im Querschnitt von 28°C auf 18°C gesenkt (Jiao et al., 2014).

Bei Dekontaminationsapplikationen könnten Unterschiede in der Empfindlichkeit verschiedener Mikroorganismen problematisch sein. Schlüsselberg et al. (2013) zeigten in Faschiertem für *E.coli* eine vollständige Inaktivierung (bei konventionellem Erhitzen für 40 min bei 220°C ergab sich nur eine Reduktion von etwa 2 log), während unter identer Behandlung für *Listeria monocytogenes* RF kaum Wirkung zeigte (Reduktion von nur 0,4 log) und konventionelles Erhitzen eine vollständige Inaktivierung erzielte. Die Mechanismen dahinter sind ungeklärt. Ein weiterer ungeklärter Effekt ist die Verringerung der Proteinlöslichkeit und des Molkeproteinstickstoffindex (WPNI) in mittels RF zur Dekontamination behandeltem Milchpulver (Chen et al., 2013).

### Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz

Im Vergleich zur Mikrowellenstrahlung ist eine verbesserte Homogenität durch die längere Wellenlänge und eine bessere Regelbarkeit (keine „unkontrollierte Reflexion an Wänden“) zu nennen. Dies macht RF-Strahlung im Vergleich zur MW zur sichereren Variante.

Die Konsumentenakzeptanz von RF sollte selbst bei ausschließlicher Bereitstellung der Information, „dass die Mikrowellenstrahlung etwas länger ist“, derjenigen der Mikrowelle ähnlich sein. Die Bekanntheit von RF-Strahlung im Lebensmittelbereich ist momentan äusserst gering.



### 2.8.1.2. Mikrowellen (*microwave frequency*)

Unter Mikrowellenbehandlung versteht man in der Lebensmittelverarbeitung – analog zur *radio-frequency* Behandlung – eine Nutzung hochfrequenter Energie in Form von nichtionisierender, elektromagnetischer Strahlung, die im Wesentlichen zur Erwärmung, Garung, Trocknung, zum Auftauen und Dekontaminieren von Lebensmitteln dient.

#### Prinzip und Nutzungsrelevanz

Die Erwärmung von Lebensmitteln durch Mikrowellen beruht auf dem Prinzip des dielektrischen Erhitzens, dessen Grundlagen bereits im vorangehenden Kapitel (Radiofrequenzstrahlung) behandelt wurden. Dabei überwiegt die Dipolrotation gegenüber der ionischen Depolarisierung. Der wesentliche methodische Unterschied zu RF besteht in der höheren Frequenz (915 bzw. 2450 MHz) und demnach geringeren Wellenlängen. Dies hat eine geringere Eindringtiefe der Mikrowellenstrahlung zur Folge. Gerätetechnisch besteht der wesentliche Unterschied darin, dass nicht „zwischen“ Elektroden erhitzt wird, sondern die in einem sogenannten Magnetron generierte elektromagnetische Strahlung in einen strahlungsisolierten Hohlraum (Mikrowellenofen) geleitet wird. Dort wird sie in Abhängigkeit von der Absorption durch das Lebensmittel mehrmals an den Wänden zurück ins Gut reflektiert, bis sie sämtliche Energie an dieses abgegeben hat. Der Prozess ist demnach stark von der Geometrie und Dichte des Gutes abhängig, also tendenziell weniger exakt kontrollierbar.

#### Wenig bekannte und neuere Anwendungen

Die klassische Anwendung der Mikrowelle in Haushalt und Industrie zum Erwärmen, Auftauen und Garen von Lebensmitteln und ihr wesentlicher Vorteil, die schnellere Erhitzung, sind hinreichend bekannt. Der Trend und damit die Verkaufszahlen für Haushalts-Mikrowellengeräte sind in Europa und den USA rückläufig (Watson, 2014, Euromonitor, 2013). Neben der bereits flächendeckenden Versorgung mit den Geräten, wurden weitere Ursachen dafür ausgemacht:

- Mikrowellen haben ein schlechtes Image in der Bevölkerung
- Konsumentinnen und Konsumenten wollen neben „*convenience*“ angeblich immer mehr Kontrolle über ihr Essen zurückbekommen, und selbst Kreatives „schaffen“, was typische „Mikrowellenmahlzeiten“ nicht bieten können (Watson, 2014).

Im Gegensatz zum Haushalt erhält der Einsatz von Mikrowellen großtechnisch eine immer größere Bedeutung. Im Folgenden werden einige industrielle Einsatzbereiche angeführt:

- **Mikrowellen unterstützte Extraktion:** Sowohl in der Probenvorbereitung für die Lebensmittelanalytik als auch zur schonenden, technischen fest-flüssig Extraktion wertvoller Lebensmittelinhaltsstoffe ist seit einigen Jahren MAE (*microwave assisted extraction*) bzw. SFME (*solvent free microwave extraction*) im Einsatz. Die Extraktion wird dabei durch die Veränderung der Zellwände durch Einwirkung elektromagnetischer Strahlung in Kombination mit der auftretenden strahlungsinduzierten Erwärmung unterstützt. Der wesentliche methodische Vorteil der MAE ist, dass Hitze- und Massetransfer in dieselbe Richtung, von innen nach außen, erfolgen. Im Fall herkömmlicher Extraktion erfolgt hingegen die Diffusion der zu extrahierenden Stoffe ebenfalls von innen nach außen, die förderliche Erwärmung aber durch Wärmeleitung von außen ins Innere (z.B. Veggi et al., 2013). Basierend auf der Verringerung bis Vermeidung organischer Lösungsmittel gilt MAE bzw. SFME als umweltschonendes „grünes“ Verfahren. Zur praktischen Durchführung wird das Gut in einen geschlossenen Behälter mit einem geeigneten Lösungsmittel (oft Wasser) eingebracht und mit MW bestrahlt. Bei einer MW-unterstützten (SFME) Hydrodestillation zur Gewinnung essentieller Gewürzöle aus Basilikum, Minze und Thymian ergab sich beispielsweise eine Verkürzung

der Extraktionszeit auf 30 min gegenüber 4,5 Stunden bei der herkömmlichen Hydrodestillation unter gleichzeitiger, besserer Erhaltung der wertgebenden Inhaltsstoffe (Lucchesi et al., 2004). Viele bioaktive, antioxidative Substanzen, wie Flavanoide und sonstige phenolische Substanzen, lassen sich mittels MAE ebenfalls mit geringerem Zeitaufwand extrahieren (z.B. Routray & Orsat; 2012, Perino-Issartier, 2011). Um das Verfahren noch schonender für die Inhaltsstoffe zu gestalten, lässt sich die MAE auch unter Vakuum durchführen (z.B. Mengal & Mompon, 1996).

- Krustenloses Brot: Krustenloses Sandwich- und Toastbrot wird herkömmlich sehr energieaufwändig nach dem klassischen Backprozess durch „Entrinden“ hergestellt. Alternativ lässt sich mittels Mikrowellenbehandlung in seiner Eigenschaft als volumetrisches Erhitzungsverfahren (Erhitzung „von innen nach außen“) Brot direkt ohne Kruste backen. Die beim herkömmlichen Prozess auftretende, die Krustenbildung hervorrufende Übererhitzung der Oberfläche wird hierbei vermieden.
- Erzeugung von Schnellkochreis: Der beliebte Schnellkochreis (10 min. anstatt der üblichen 20 – 30 min. Kochzeit) wird klassisch durch ein energie- und zeitaufwändiges mehrstufiges Verfahren bestehend aus Wässern und Trocknung hergestellt (siehe dazu auch Kapitel 2.4.). Kontinuierliche Mikrowellenbehandlung in Kombination mit förderlicher Dampfatmosphäre bereits in der Verpackung reduziert die Prozesszeit deutlich bei simultaner Erhöhung der Kochausbeute. Hierauf hält die deutsche Mikrowellengeräte vertreibende Firma Linn High Therm GmbH ein Patent (Kintsel, 2013)
- Dekontamination von rohem Fleisch: Mittels entsprechend optimierter Parameter konnten in einem zweistufigen Verfahren bei rohem Fleisch, welches mit *E. coli* O157:H7 inokuliert wurde, in 1 min. (70° C) die Bakterien vollständig inaktiviert werden (Huang & Sites, 2010).
- Behandlung von Weinkorken: Weinkorken werden sterilisiert, um eine Reduktion des durch Bakterien erzeugten Trichloranisol zu erreichen, welches den typischen Korkgeschmack in Wein hervorrufen kann. Die schlechte Wärmeleitfähigkeit von Kork erschwert den herkömmlichen, auf Kochen und anschließender Heißdampfbehandlung basierenden Dekontaminationsprozess. Mittels MW-Strahlung lässt sich die Dekontaminationseffizienz bei erhöhter Behandlungsgeschwindigkeit steigern (Kintsel, 2013).
- Kombinationensmethoden: Um Synergien zwischen den verschiedenen Erhitzungsmethoden optimal nutzen zu können, wird an der Kombination von Infrarotstrahlung, Heißluft, Dampf und MW geforscht. Damit lässt sich etwa beim Backen sowohl eine hohe Prozessgeschwindigkeit (vor allem durch MW), als auch eine vorteilhafte Krustenbildung (durch Heißluft) realisieren. Bei derartigen Kombinationen kann sich ein von den Einzelmethoden differierendes Erhitzungsprofil sowohl bezüglich der Erhitzungsrate als auch in der Wärmeverteilung im Gut ergeben (Datta & Rakesh, 2012). Mit steigender Anzahl der kombinierten Techniken summieren sich aber die Einflussparameter, weshalb Kombinationsöfen einen hohen mathematischen Simulationsbedarf und ausgefeilte Kontrollmechanismen erfordern.

### Potentielle Risiken

- Unzureichend homogene Erhitzung: Das Problem potentiell auftretender *hot* und *cold spots* unter MW-Behandlung ist bekannt (z.B. Marra, 2009). In diesem Zusammenhang wurde beispielsweise von einem Praxisfall aus Alaska berichtet. Von 30 Personen, die ein identes, rohes, kontaminiertes Schweinefleisch zuhause erhitzen, erkrankten ausschließlich nur diejenigen an Salmonellen bedingter Gastroenteritis, welche die Garung mit MW vornahmen (Gessner und Beller, 1994).
- Migration von Substanzen aus Behältnissen: Behältnisse müssen auf ihre Mikrowellentauglichkeit getestet werden. Für das an Beliebtheit gewinnende Melamingeschirr wurde eine

deutliche Migration von Melaminformaldehyd in Lebensmitteln festgestellt, wobei der EU-Grenzwert von  $10 \text{ mg/dm}^2$  überschritten wurde (Poovaradom et al., 2014).

- **Gesundheitliche Risiken:** In vielen Medien und diversen Internetforen wird immer wieder die Schädlichkeit der Behandlung von Lebensmitteln mit Mikrowellen behauptet. Seriöse wissenschaftliche Studien, welche diese Behauptungen unterstützen, wurden auch im Zuge dieser Recherche nicht gefunden. Das schlechte Image dürfte eher auf psychologische Momente zurückzuführen sein. Im Gegensatz zur Infrarotstrahlung, wo die Quelle der Strahlung meistens durch die Begleitstrahlung des sichtbaren roten Lichtes wahrgenommen wird und die Wirkung der Infrarotstrahlung sofort spürbar ist, kann die Mikrowellenstrahlung vom Menschen nicht identifiziert werden. Die teilweise auch in wissenschaftlichen Publikationen gefundenen Unterschiede zwischen einer konventionellen Erhitzung und einer Mikrowellenerhitzung sind darauf zurückzuführen, dass die thermische Belastung nicht gleich war. Die Wirkung der Mikrowellen ist, so wie bei allen klassischen Garverfahren, ausschließlich auf thermische Effekte zurückzuführen. Trotz aller gegenteiligen Behauptungen konnten spezifische, strahlenchemische Effekte bis jetzt nicht gesichert bewiesen werden. Da die Mikrowellenbehandlung kein neues Verfahren ist, wird in der vorliegenden Studie auch nicht näher auf diesen Punkt eingegangen. Eine Zusammenfassung aller Aspekte einer Mikrowellenbehandlung wird sehr ausführlich von Hill (1998) gegeben.

#### **Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz**

Bekanntermaßen ist Mikrowellenstrahlung bereits ein allgemein akzeptiertes, anerkanntes Verfahren mit weiter Verbreitung in Industrie, Gastronomie und Haushalten und unterliegt keine besonderen rechtlichen Vorschriften oder Einschränkungen.

#### **2.8.1.3. Infrarotstrahlung (*infrared frequency* - IR)**

Die Infrarotstrahlung ist eine nichtionisierende Strahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen  $0,78 - 1000 \mu\text{m}$  (zwischen Mikrowellen und sichtbarem Licht). Sie wird von der Menschheit schon seit ca. 1 Million Jahren mit der Nutzung des Feuers beim Grillen, Backen, Braten und Rösten eingesetzt. In der Lebensmittelindustrie wird sie darüber hinaus zusätzlich zur Trocknung, Pasteurisation/Sterilisation, sowie zur gezielten Bräunung und zum Erleichtern des Schälens genutzt.

#### **Prinzip**

Prinzipiell funktioniert Infrarotbehandlung analog zu den aus dem medizinischen Bereich bekannten Infrarotlampen. Lebensmittel werden in einer Kammer (Ofen) oder Tunneln etc. einer sehr intensiven IR-Strahlung (meist im Bereich  $100 - 500 \text{ W}$ ) ausgesetzt. Die Infrarotstrahlung wird mit IR-Lampen, direkt oder indirekt beheizten Infrarotstrahlern (z.B. keramische Elemente) und anderen Einrichtungen erzeugt. Die Strahlung muss direkt auf das Lebensmittel gerichtet sein. Zur besseren Wärmeverteilung wird oft noch eine Luftgebläse eingesetzt. Im Gegensatz zu den Radio- und Mikrowellen erfolgt die Hitzegenerierung durch die deutlich kürzeren Infrarotstrahlen nicht durch Dipolrotation und/oder ionische Depolarisierung, sondern vorwiegend durch Anregung von Molekylvibrationen. Jedes Molekül (bzw. jede Bindung im Molekül) hat bestimmte natürliche Schwingungsfrequenzen (z.B. Aminosäuren, Polypeptide und Proteine in den Bereichen  $3 - 4 \mu\text{m}$  und  $6 - 9 \mu\text{m}$ , Lipide bei  $3 - 4 \mu\text{m}$  bzw.  $6 \mu\text{m}$  bzw.  $9-10 \mu\text{m}$ , Kohlenhydrate bei etwa  $3 \mu\text{m}$  sowie im Bereich  $7-10 \mu\text{m}$ ) (Krishnamurthy et al., 2008). Diese Schwingungsfrequenzen liegen im Bereich der meistens genutzten, fernen Infrarotstrahlung (FIR:  $3-1000 \mu\text{m}$ ). IR-Strahlung funktioniert demnach, indem sie die Moleküle zur Schwingung anregt, wobei letztlich aus der Bewegungsenergie der Lebensmittelmoleküle Wärme im Lebensmittel entsteht. Bei Desinfektionsanwendungen scheint der Wirkmechanismus eine DNA-Schädigung ähnlich der UV-induzierten zu sein.

Im Gegensatz zu Radio- und Mikrowellen kann die Infrarotstrahlung aber nur unwesentlich in Lebensmittel eindringen. Die Anregung der Moleküle und damit verbunden die Erwärmung erfolgt deshalb nur oberflächlich. Die Wärme muss dann durch Wärmeleitung in das Innere weiter geleitet werden.

### **Nutzungsrelevanz und Anwendungsbeispiele**

Wie alle strahlungsbasierten Erhitzungsmethoden weist auch die Infrarotstrahlung gegenüber den anderen Verfahren den wesentlichen Vorteil der rascheren Wirkung auf. Üblicherweise lassen sich die Prozesszeiten in den gängigen Anwendungen auf etwa 40% reduzieren, wobei die Parameterwahl eine entscheidende Rolle spielt. Pilze ließen sich beispielsweise mittels IR-Behandlung bei 70° C in 260 min mittels IR gegenüber 480 min mittels Heißlufttrocknung bei besserem Erhalt von Farbe und sensorischen Eigenschaften trocknen (Wang et al., 2014). Entsprechend geringer ist auch der Energieverbrauch (Yilmaz & Tuncel, 2010).

Neben der Verringerung von Prozesszeit und -energie gibt es Hinweise auf einen besseren Erhalt der Farbe, sowie der ernährungsphysiologischen und sensorischen Eigenschaften. Beispielsweise sollen die sensorischen Eigenschaften von IR-getrockneten Pilzen in Textur und Geschmack heißluftgetrockneten deutlich überlegen sein (Wang et al., 2014). IR-getrocknete Karotten sollen gegenüber heißluftgetrockneten einen um 17 % erhöhten Caroteinidgehalt aufweisen (Vishwanathan et al., 2010). Die Änderungen bezüglich der mechanischen Eigenschaften (Knusprigkeit und Härte), der Farbe und der Wasseraufnahmekapazität von im selben Ofen mittels IR gegenüber unter Heißluft bei identer Temperatur (65° C bzw. 75° C) getrockneten Apfelscheiben sollen lediglich von der Temperatur, nicht aber von der Methode beeinflusst sein (Nowak & Lewicki, 2005).

### **Kritische Parameter und Beschränkungen**

Grundsätzlich hat sich die Nutzung des fernen Infrarot (FIR, meistgenutzt sind 2,5 bis 30 µm) gegenüber dem nahen Infrarot (NIR, 0,78 – 2,5 µm) für die Lebensmittelbehandlung als vorteilhaft erwiesen. Theoretisch liegt das daran, dass die Schwingungswellenlängen der meisten Lebensmittelinhaltsstoffe in diesem Bereich liegen. Praktisch äußert sich das in einer rascheren Erwärmung bei tendenziell geringerer Temperatur, einer homogeneren Erhitzung und einfacherer Entfernbarekeit von Häuten und Schalen. Mittels speziellen Filtern lassen sich prinzipiell auch sehr kleine Wellenlängenbereiche herausfiltern, um ganz spezifisch bestimmte Moleküle anzuregen. So wurde für Sporen von *A.niger* und *Fusarium proliferatum* in Maismehl mit gefiltertem IR-Licht mit einer Wellenlänge von 5,88 – 6,66 µm gegenüber ungefiltertem IR eine um 40 % gesteigerte Inaktivierungsrate erzielt (Krishnamurthy et al., 2008). Die Erklärung soll in der bevorzugten Denaturierung der Sporenproteine in diesem Wellenlängenbereich liegen. Zur gezielten Nutzung gefilterter Wellenlängen fehlt derzeit allerdings noch Hintergrundwissen über die für bestimmte Zwecke optimalen Wellenlängen.

In zahlreichen Studien wurde bewiesen, dass die Trocknungsrate für IR stark positiv mit der zugeführten Energie im Trocknungsraum korreliert (Kocabiyik & Tezer, 2009, Doymaz, 2012, Ning & Han, 2013, Doymaz, 2014). Beispielsweise wurde für die Trocknung von Pilzscheiben und Granatapfelsamen bei stufenweiser Steigerung der Leistung von 83 auf 209 W eine proportionale Senkung der Trocknungsrate von 300 min bzw. 150 min (83 W) auf 40 min bzw. 60 min (209 W) erreicht (Doymaz, 2012; Doymaz, 2012 a).

Das wesentliche Problem der IR-Strahlung ist die geringe Eindringtiefe im Vergleich zur Radio- und Mikrowellenstrahlung. Bei hoher Lebensmittel-Dicke ist die Erhitzungseffizienz deutlich geringer. Dies wurde für Ginseng unterschiedlicher Größe ebenso aufgezeigt wie für Süßkartoffelscheiben (Ning & Han, 2013, Doymaz, 2012). Güter über etwa 1 cm Dicke eignen sich daher nur bedingt zur IR-Trocknung.

Für die Effizienz der Entkeimung mittels IR scheint der Wassergehalt im Ausgangsgut eine bedeutende Rolle zu spielen. Studien zum Zweck der Dekontamination von Reis von *Asperillus flavus*-Sporen zeigten bei identer Inokulation und identen IR-Bedingungen (60° C, 120 min) Inaktivierungsraten von 2,5 log bis 8,3 log in positiver Korrelation mit dem ursprünglichen Wassergehalt im Bereich 14 – 27 % (Wang et al., 2014). Die Inaktivierung des pathogenen *Staphylococcus aureus* in Milch lässt sich mittels IR mit einer Lampentemperatur von 619° C bei 4-minütiger Behandlungsdauer und sinnvoll dimensioniertem Probenvolumen unter Reduktion von >8 log realisieren (Krishnamurthy et al., 2008).

Bewiesen ist weiter, dass IR-Trocknung die Mikrostruktur der behandelten Lebensmitteloberflächen im Sinne geringerer Homogenität verändert (Ning & Han, 2013, Quintero-Ruiz et al., 2014). Hypothesen besagen, dass dies auf das teilweise Aufplatzen der Zellen zurückzuführen ist. Für einige Anwendungen kann das von Vorteil sein. So soll eine Vortrocknung mittel IR anstelle von Heißluft vor der Gefriertrocknung von Bananen diesen eine höhere Knusprigkeit verleihen (Pan et al., 2008). Das Schälen von Tomaten soll durch die veränderte Schalenstruktur gegenüber herkömmlicher Laugenschälung in kürzeren Prozesszeiten, dünneren Schalen und damit verbunden geringerem Masseverlust resultieren (Li et al., 2014). Somit lassen sich Wasser, Chemikalien und Energie bei gleichzeitiger Qualitätsverbesserung einsparen, und durch Wegfall der Chemikalien und Wasser einfacher *higher-value added products* aus dem Reststoff Schale (im Fall von Tomaten z.B. Lycopin und Ballaststoffe) herstellen, womit wiederum die Effizienz weiter erhöht wird (Pan et al., 2013).

### Kombinationen

Aufgrund der geringen Eindringtiefe der IR-Strahlung ist ihre singuläre Anwendung begrenzt. Daher gibt es verstärkt Forschungsaktivitäten in Richtung von IR-Kombinationskonzepten. Für Bananenchips kann eine IR-Vortrocknung auf etwa 40% Gewichtsverlust vor der kostenintensiven langdauernden Gefriertrocknung beispielsweise den Zeit- und Energiebedarf bei gutem Erhalt der Farbe, geringer Schrumpfung und Erhöhung der Knusprigkeit senken (Pan et al., 2008). Die Kombination IR mit Heißlufttrocknung führte beim Rösten von Mandeln zu einem verbesserten Energieverbrauch/Qualitätsniveau (Yang et al., 2013). Ernährungsphysiologisch bedeutend wurde ein um 39% erhöhter Vitamin C Gehalt bei mittels IR blanchierten und anschließend mittels IR-Heißlufttrocknung behandelten Karottensticks gegenüber herkömmlich im Wasserbad blanchierten und einer Heißlufttrocknung unterzogenen Karottensticks bei 45% Zeitersparnis beobachtet (Vishwanathan et al., 2013). Ein im Pilotmaßstab auf einem Förderbandsystem durchgeführter Vergleich zur Trocknung von Apfelscheiben mittels Heißluft, Kombination IR-Kaltluft und IR-Heißluft bewies klare Vorteile der IR-Heißluft-Kombination in Geschwindigkeit, Energieersparnis, Rehydrierungseigenschaften, Schrumpfungsausmaß und Farberhalt (El-Mesery & Mwithaga, 2014). Brote, die in IR-Heißluft hybridöfen gebacken wurden, wiesen im Vergleich mit konventionell gebackenen Broten höheres Wasserhaltevermögen, höheres Volumen, geringere Krumenhärte und eine bessere Sensorik auf, wobei die Backzeit um 28% reduziert werden konnte (Chhanwal et al., 2014). Für die Trocknung von Fleischstreifen ergab die IR/Heißluftkombination eine verbesserte Trocknung durch vorteilhafte Wasserdiffusion, sowie geringere Schrumpfung (Xie et al., 2014). Ebenso konnten Energieeffizienz und Qualität hinsichtlich des Farberhalts, der Textur, der Rehydrierungskapazität und der Schrumpfung für Chili durch Synergieeffekte IR/Mikrowelle gegenüber ausschließlicher Mikrowellenbehandlung gesteigert werden (Saengrayap et al., 2014). Die Dreierkombination Mikrowelle/Vakuumtrocknung/IR soll zur Herstellung hochqualitativer (Textur, Farbe, Rehydrierungskapazität) getrockneter Shiitakepilze geeignet sein (Kantong et al., 2012). Bei der Inaktivierung von *E.coli* und *Salmonella enterica* verbessert die Kombination IR/UV gegenüber ausschließlicher UV-Behandlung die antibakterielle Wirkung (Ha & Kang, 2013). Das Konzept der kombinierten Trocknung zur optimalen Synergienutzung mündete bereits in der Konstruktion einer kombinierten Anlage, welche zur seriellen und/oder parallelen Nutzung von Ge-

frier-, Heißluft-, Kontakt-, Mikrowellen-, Infrarot oder Vakuumtrocknung fähig ist (Kraus et al., 2011).

### Derzeitiger Einsatz

Die IR-Technologie hat bereits in vielen Haushaltsgrillern als die „Mikrowelle des Outdoorkochens“ Einzug gehalten. Die Firma TEC bietet dabei Griller (*Char-broil* Kombigeräte) an, welche zu 100% mit IR arbeiten. Das Hauptverkaufsargument ist schnelleres, saubereres, energiesparendes „Grillen“ mit geringerem Saftverlust. Die hohe Leistung und die damit erzielbaren hohen Temperaturen sollen allerdings selbst erfahrene Hobbygriller fordern, wobei vor allem die Gefahr des Übererhitzens verbunden mit der erhöhten Bildung an cancerogenen Maillard-Abbauprodukten bestehen kann.

Neben der Verwendung von Infrarotstrahlern in industriellen Back-, Brat- und Röstanlagen gibt es in diesem Bereich auch neue Entwicklungen. Die Firma OSRAM vertreibt beispielsweise diverse Infrarotlampen unter den Marken SICCATHERM® und HALOTHERM® zum Warmhalten von Lebensmitteln für den Gastronomie- und Cateringbereich. Die Firma HERAEUS baut maßgeschneiderte IR-Module für vielfältige Applikationsmöglichkeiten (Auswahl illustriert in Abb. 4.2.8). Darunter sind Geräte für übliche Prozessschritte, wie Brotbacken, fettfreies Rösten, Kochen von Würsten, Desinfektion von Schnittbrot nach dem Schneiden, Erhitzen beim Zusammenkleben von Pralinenhälften, Getreidekörnerpoppen etc. ebenso zu erhalten, wie IR-Tunnelsysteme zur Generierung von Lebensmitteln mit „attraktiver Oberflächenbräune“. Die Zielgruppe sind hier Hersteller von Fleischlaibchen, Schinken, Süßspeisen (etwa Käsekuchen, *Crème brûlée*), oder Fertiggerichten (Lasagne etc.). Der Trick dabei ist das Schaffen einer appetitlichen Bräune ohne zusätzliches in Fett braten oder Durchkochen der Lebensmittel.



Abb. 4.2.8 Beispiele industrieller Anwendung der IR-Strahlung (von links nach rechts: Bräunen von Schinken, Bräunen von Käsekuchen, Bräunen des Käsebelages auf TK-Lasagne, Desinfizieren von Schnittbrot) (Heraeus Noblelights, 2015)

### Potentielle Risiken, rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz

Nachdem, wie oben angeführt, die Infraroterhitzung von den Menschen seit Nutzung des Feuers angewandt wird, sind hinsichtlich ihres industriellen bzw. großtechnischen Einsatzes keine Akzeptanzprobleme und rechtliche Einschränkungen zu erwarten.

#### 2.8.1.4. UV-Licht

Ultraviolette Strahlung ist vorwiegend eine Möglichkeit zur Oberflächen- und Flüssigkeitsentkeimung und ein Weg zur Stimulation der Bildung einiger Vitamine und sekundärer Pflanzeninhaltsstoffe.

## Prinzip

UV-Strahlung ist elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 100 und 400 nm, deren Ursprung in der Sonne oder in künstlichen Quellen (meist Quecksilberdampf lampen) liegen kann. Ihre keimtötende Wirkung beruht darauf, dass DNA-Einzelstränge gespalten werden, womit die DNA an der Transkription und Replikation, also an Wachstum und Vermehrung, gehindert wird.

Der Aufbau von Vitamin D durch UV-Strahlung erfolgt aus dessen Vorstufen (z.B. Ergosterol in Pilzen) durch bereits identifizierte, photochemische Synthesewege. Die Hintergründe der verstärkten Bildung anderer Vitamine und antioxidativer Substanzen sind dagegen noch nicht vollständig geklärt. Das Phänomen des Anstiegs solcher dem Schutz des Organismus dienenden Substanzen durch geringe Dosen von UV-Licht wird "Hormesis" genannt. Es wird davon ausgegangen, dass dabei zelleigene Schutzmechanismen aktiviert werden, die aufgrund der (an und für sich schädlichen) UV-Strahlung ausgelöst werden. Das führt zur Bildung von Schutzsubstanzen gegenüber dem Auslöser (UV-Strahlung oder sonstigen schädlichen Einwirkungen). Im Fall negativer, oxidativer Einflüsse sind das Vitamin C und viele phenolische Substanzen, die antioxidative Funktionen in der Pflanze selbst aber auch im menschlichen Organismus (antientzündlich, anticancerogen, gegen viele Immunerkrankungen etc.) erfüllen.

## Nutzungsrelevanz und Einsatzmöglichkeiten

Der ursprüngliche und mittlerweile gut etablierte Einsatz der UV-Strahlung im Lebensmittelbereich war lange auf die Desinfektion von Lebensmittelkontaktoberflächen (Arbeitsflächen, Verpackungen etc.) und Wasser (z.B. Wasser für Limonadenbereitung, sonstige Prozesswasser) beschränkt. Diese Anwendungen bieten sich aufgrund der äußerst geringen Eindringtiefe der UV-Strahlung in undurchsichtige Materialien an.

In den letzten Jahren wurden aber einige Applikationsmöglichkeiten in der Lebensmittelverarbeitung selbst aufgezeigt. Dies bekam besondere Relevanz mit dem Auftreten von großflächigen Lebensmittelvergiftungen durch *E.coli* O157:H7 in kontaminierten Apfelsäften und Apfelm most in den USA, wodurch die UV-Bestrahlung in den USA zur Dekontamination zugelassen wurde. Dabei gilt das Kriterium, dass die Keimreduktion der Zielkeime bei Frucht- und Gemüseprodukten unabhängig von der angewandten Methode mindestens 5 log betragen soll. Mit UV-Strahlung ist das an der Grenze des Möglichen bei der Dekontamination von flüssigen Lebensmitteln. Die Keimreduktion durch UV-C Strahlung als ausschließliche Methode in Apfelsaft und Most beträgt etwa 4 log. Eine 90 prozentige Reduktion von Patulin in Apfelsaft wurde durch UV-Strahlung bei 222 nm bei gutem Erhalt von Farbe und Geschmack, allerdings 36 prozentiger Verringerung des Vitamin C Gehalts erreicht (ZHU et al., 2014). In Kokosnussmilch wurde unter mehreren Testbedingungen mit 4,1 log die maximale Reduktion für *E. coli* und *Salmonella typhimurium* erreicht (Ochoa-Velasco et al., 2014). Auch in Flüssigei konnte der Gehalt an Salmonellen in Versuchen nicht immer unter die Grenze des sicheren Verzehrs gebracht werden, wobei jedoch die funktionalen Eigenschaften (Schaumstabilität etc.) des Eies durch 5 bzw. 10-minütige UV-Behandlung etwas verbessert werden konnten (Abdanan Mehdizadeh et al., 2014). In Saft weißer Trauben wurde bei einmaligem Durchlauf eine log Reduktion von *E. coli*, Milchsäurebakterien und Hefen von 3,7 bzw. 4,1 bzw. 1,6 log erreicht, wobei mit Erhöhung auf 8-fachen Durchlauf (32 minütige Prozesszeit) die durch die FDA empfohlene 5 log Reduktion von *E.coli* in Fruchtsäften erfüllt werden konnte (Unluturk & Atilgan, 2014). In Wein wurde UV-Strahlung mit dem Ziel des Ersatzes des allergenen Sulfites als Konservierungsmethode in zehn Rot- und Weißweinen getestet. Das Ergebnis weist darauf hin, dass ein vollständiger Ersatz bei Weißweinen durchaus möglich wäre, bei Rotweinen eine UV-Behandlung allein jedoch nicht ausreicht (Rizotti et al., 2015).

Für feste Lebensmittel wurde die Eignung der UV-Strahlung zur Oberflächendekontamination untersucht. Die Qualität und Sicherheit von Seebrassenfilets konnte mittels UV-Bestrahlung direkt

*postmortem* in den ersten 4 Tagen der Kühlung deutlich verbessert werden (Molina et al., 2014). Die Bestrahlung ganzer Tomaten resultierte gegenüber der unbehandelten Kontrolle in einer Keimzahlsenkung von 1 – 2 log bei 8 – 9 % höherer Festigkeit und Reifeverzögerung an Tag 15 der Lagerung bei 10° C nach der Behandlung (Pinheira et al., 2014). Eine Verbesserung der Qualität über die 4-wöchige Lagerdauer (unter Kühlung) beweist auch eine Studie zur Untersuchung der Auswirkungen der UVA, UVB und UVC Strahlung auf Heidelbeeren (Nguyen et al., 2014).

Das zweite bedeutende Anwendungsgebiet der UV-Strahlung ist die Erhöhung des Vitamin D-Gehalts in pflanzlichen Lebensmitteln, was insbesondere in den Wintermonaten und für Veganer von Bedeutung ist. Kürzlich wurde zu diesem Zweck eine mit UV-behandelte Bäckerhefe (*S. cerevisiae*) als Novel Food zugelassen (EFSA, 2014), weitere Anträge etwa betreffend Milch sind in Bearbeitung. Vitamin D kann körpereigen durch Sonneneinstrahlung auf die Haut gebildet, oder über die Ernährung aufgenommen werden. Ein Mangel kann u.a. das Osteoporoserisiko erhöhen, sowie einige Autoimmunerkrankungen begünstigen (Bensik et al., 2014). Lebensmittel, die von Natur aus sehr hohe Vitamin D-Gehalte aufweisen, sind wilde Pilze, die gegenüber kultivierten Pilzen stark erhöhte Vitamin D-Gehalte – vermutlich aufgrund der einwirkenden UV-Strahlung – aufweisen. Durch UV-Bestrahlung lassen sich in Pilzkulturen die Vitamin D-Konzentrationen in etwa verzehnfachen (Simon et al., 2013). Daneben ließen sich auch die Gehalte an phenolischen Substanzen (um 7%) und speziell Flavonoiden (um 12 %) in Shiitakepilzextrakten durch UV-B Strahlung erhöhen (Kim et al., 2014). Die gezielte Erhöhung des Vitamin D-Gehalts funktioniert ebenso in Eiern von mit UV-Licht bestrahlten Hühner. Kühn et al. (2014) setzten Hühner einer UV-B Strahlung von bis zu 5 h täglich aus, wonach die gelegten Eier eine direkt proportionale, nichtlineare starke Steigerung des Vitamin D-Gehalts mit der Bestrahlungszeit auf bis zum 10-fachen der Ausgangskonzentration aufwiesen.

Wie eingangs erwähnt, wird bei geringen Dosen an UV-Strahlung durch die sogenannte Hormesis der Gehalt an den mittlerweile auch als gesundheitsförderlich bekannten, antioxidativen Substanzen erhöht. Bei Heidelbeeren wurden aber nur UV-B und UV-C-Strahlung für diesen Zweck als förderlich identifiziert (Nguyen et al., 2014).

### **Beschränkungen, kritische Parameter und Forschungsbedarf**

Neben der geringen Eindringtiefe und der damit assoziierten Beschränkung der alleinigen Nutzung von UV-Strahlung zur Dekontamination ergeben sich folgende, methodisch bedingte mögliche Probleme:

- Reparaturmechanismen der Organismen: Mikroorganismen und andere Organismen leben schon „länger unter der Sonne“ und sind damit an die UV-Strahlung gewöhnt und daher auch in der Lage diverse Schutzmechanismen zu entwickeln. Darunter fällt die Einlagerung von Pigmenten, welche die Resistenz gegenüber UV-Strahlung erhöhen (ähnlich „gebräunter Menschen“), aber auch Reparaturmechanismen auf DNA-Ebene. Bekannt wurde in diesem Zusammenhang die sogenannte Photoreaktivierung, also die Reparatur unter an die UV-Behandlung anschließender Lichteinwirkung. Photoreaktivierte Zellen sind für folgende Behandlungen deutlich resistenter. Einwirkungen subletaler Dosen fördern diese Resistenzen.
- Unterschiede in der Empfindlichkeit zwischen den MO: Mikroorganismen sind unterschiedlich empfindlich gegenüber einer UV-Strahlung. Für einige Arten wurden bereits die optimalen Inaktivierungsdosen identifiziert, für andere fehlen noch Erfahrungswerte.
- Inhomogenitäten der Oberflächenstruktur fester Lebensmittel Kleine Kavitäten in der Oberfläche fester Lebensmittel können Mikroorganismen Schutz bieten.



- Pigmente bzw. Partikel/Trübungen in flüssigen Lebensmitteln: Säfte mit hohem Feststoffanteil weisen im Vergleich mit klaren Getränken eine höhere Absorption und damit eine geringere Transmissionsfähigkeit für UV-Strahlung auf, wodurch diese weniger weit in das Lebensmittel penetrieren kann (Choudhary & Bandla et al., 2012; Koutchma, 2008). Ein Maß für diese, die Wirkung vermindern, Absorption eines Lebensmittels ist der Absorptionskoeffizient. Dieser beträgt etwa für klaren Apfelsaft  $11 \text{ cm}^{-1}$ , für Orangensaft bis zu  $50 \text{ cm}^{-1}$  (Koutchma, 2008).
- Sonstige, die Absorption steigernde Komponenten in Lebensmitteln: Koutchma et al (2008) zeigten auf, dass nicht nur offensichtliche Trübungen und Partikel im Lebensmittel die Absorption erhöhen können, sondern diese auch durch Vitamin C im Getränk erhöht wird. Versuche mit Vitamin C substituierten Getränken ergaben eine lineare positive Korrelation zwischen dem Vitamin C-Gehalt und der Absorption für UV-C-Strahlung. Daraus folgt, dass die häufig mit zusätzlichem Vitamin C angereicherten Säfte höhere Strahlungsdosen bei der Pasteurisation benötigen und allgemein die Zusammensetzung von Lebensmitteln eine große Rolle für die Effizienz der Methode spielen könnte.
- Veränderungen von einigen Lebensmittelkomponenten: UV-Strahlung kann die Bildung von freien Radikalen induzieren, wie etwa der *lipid superoxide radicals* (SOR). Diese wiederum können zur Vernetzung zwischen Kohlenhydraten und Proteinen, zur Proteinfragmentierung und Peroxidation ungesättigter Fettsäuren und zum Verlust von Membranfunktionen führen. In Milch beispielsweise könnte dieser Angriff auf Proteine, Aminosäuren und Enzyme durch UV-Einflüsse zu Texturveränderungen führen (Choudhary & Bandla et al., 2012).

Die Effektivität der Behandlung flüssiger Lebensmittel hängt neben der Strahlungsintensität im Wesentlichen von der Gewährleistung eines homogenen Durchflusses ab, also dem Ziel, jedes Teilchen des LM einer minimal zur Abtötung der entsprechenden Mikroorganismen nötigen Dosis auszusetzen. Hierfür haben sich technische Weiterentwicklungen zur Verbesserung der Strömungsdynamik in den Reaktoren als sinnvoll erwiesen wie *turbular-flow units*. Experten halten bei Optimierung Pasteurisationsraten für Säfte von bis zu 4.000 Litern in 24 s für möglich (Koutchma, 2014).

### Derzeitiger praktischer Einsatz

Momentan ist der Einsatz von UV-Strahlung zur Trinkwasseraufbereitung in der Lebensmittelindustrie weit verbreitet. So wird Wasser bzw. verdünnte Zuckerlösungen zur Verwendung in Sodawasser und Limonaden dekontaminiert. Für diese Anlagen gibt es viele kommerzielle Hersteller wie etwa Aquaionic oder Aquafine. Der Einsatz bei anderen Lebensmitteln ist weltweit aufgrund des noch hohen Forschungsbedarfes momentan gering, und in Europa zusätzlich rechtlich beschränkt. Kommerziell erhältliche Anlagen für die Industrie gibt es allerdings (siehe z.B. Abb. 4.2.9). Auf die amerikanische Zulassung und die durch Aufnahme von kontaminiertem Apfelsaft und Most verursachten Epidemien reagierte man mit dem kommerziellen Einsatz der Anlage CiderSure 3.500<sup>®</sup> für die Dekontamination dieser Produkte. Die C&S Equipment & Co. bietet rotierende Reaktoren und Förderbandsysteme zur Behandlung von frischen Lebensmitteln (Obst/Gemüse und Fleisch), gefrorenen Lebensmitteln (Gemüse, Fische, Fleisch, Backwaren) sowie auch von bereits gekochten, gekühlten Produkten (Pasta, Käse etc.) an. Mit diesen Anlagen soll für jeden Anwendungszweck eine optimale Durchmischung möglich sein, ein Sterilluftsystem für die Vermeidung einer Rekontamination sorgen, und Durchsätze bis zu 4.500 kg/h realisierbar sein (Koutchma, 2008). Auch die Firma DaRo-UV Systems hat mit Förderbändern kompatible Anlagen für einige Anwendungszwecke (auch Brotdeinfektion etc.) im Verkaufsprogramm. Hortimax<sup>®</sup> ist ein steuerbares UV-Lampensystem für die Pflanzenkultivierung von der Firma Van Remmen UV Technik.



Abb. 4.2.9: UV-Förderbandsystem der Fa. Daro- UV Systems, Hortimax der Fa. Van Remmen UV Technik, diverse Anlagen der DaRo von innen (Van Remmen UV Technik BV, 2014; DaRo UV Systems Ltd, 2010)

### Kombinationen

Um die Effektivität der UV-Behandlung zu steigern, wurden diverse synergistische Effekte im Rahmen eines Hürdenkonzeptes identifiziert. Eine förderliche Kombination ist die UV-Behandlung mit Hitze („UV-H“-Behandlung), wobei in Abhängigkeit der Thermoresistenz der abzutötenden MO Temperaturen der Bereich zwischen 50 und 60° C ein geeigneter Kompromiss zwischen Keimreduktion und Erhalt der Qualität sein soll. Die unter ausschließlicher UV-Nutzung unsichere Erreichung der von der FDA geforderten 5-Log Reduktion von *E.coli* H157:H7 in Apfelsaft lässt sich unter UV-H Nutzung bei 55° C zu 95 – 99,9 % erreichen (Gayan et al., 2014). Die Kombination UV-H in diesem Temperaturbereich brachte für Apfelsaft darüber hinaus den Vorteil einer deutlichen Reduktion der notwendigen Prozesszeiten und einer Reduktion der UV-Dosis (Gouma et al., 2014).

Die Kombination UV mit Ultraschall ergab eine Erhöhung der bioaktiven Substanzen Trans-Resveratrol, p-Coumarin bei Kaffee, und von Ferulasäure bei Erdnüssen im Vergleich mit den beiden Einzelbehandlungen (Sales & Resurrecion, 2010).

Eine neue Anwendungstechnik von UV-Licht ist der Einsatz in Kombination mit IR-Strahlung und sichtbarer Strahlung in Form von gepulster Bestrahlung (Lichtblitze) (siehe Kapitel 8.2.5.1.). UV-Strahlung soll ein für *pulsed-light* besonders geeigneter Bereich sein (Ramos-Villarrol et al., 2014).

### Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz

Die Lebensmittelbestrahlung mit UV-Licht ist in Österreich bzw. in der EU aufgrund der weitverbreiteten Anwendungsmöglichkeiten unterschiedlich geregelt bzw. nicht geregelt. Die Entkeimung von Trinkwasser wird speziell im Österreichischen Lebensmittelbuch (2007) (Codexkapitel B1 – Trinkwasser; online aberufen 01/2015) behandelt.

Die Behandlung mit ionisierenden Strahlen wird in der EU durch zwei Basis-Richtlinien geregelt (RICHTLINIE, 1999/2/EG und RICHTLINIE EU 1999/3/EG). In keiner der beiden Richtlinien wird die UV-Bestrahlung explizit erwähnt. EU-Richtlinien müssen durch nationale Verordnungen in den einzelnen Mitgliedstaaten umgesetzt werden. Die entsprechende österreichische Verordnung wurde im Jahr 2000 erlassen (Österr. Bestrahlungsverordnung, 2000). Auch in dieser Verordnung wird die UV-Strahlung nicht erwähnt. In der deutschen Verordnung (Deutsche Lebensmittelbestrahlungsverordnung, 2000) aber sehr wohl, wie schon aus deren Titel hervorgeht, der folgendermaßen lautet: Verordnung über die Behandlung von Lebensmitteln mit Elektronen-, Gamma- und Röntgenstrahlen, Neutronen oder **ultravioletten Strahlen** (Lebensmittelbestrahlungsverordnung - LMBestrv). In dieser Verordnung wird in § 1 Folgendes angeführt:

(4) Die Behandlung durch direkte Einwirkung mit ultravioletten Strahlen ist zugelassen zur Entkeimung

1. von Trinkwasser,
2. der Oberfläche von Obst- und Gemüseerzeugnissen,
3. von Hartkäse bei der Lagerung.

(5) Die bei der Entkeimung von Luft durch ultraviolette Strahlen auftretende indirekte Einwirkung auf Lebensmittel ist zugelassen.

Wir sind tagtäglich mit der UV-Strahlung konfrontiert, von der Sonnenstrahlung bis zur Diskothek. Viele Menschen haben mit der direkten strahlenchemischen Wirkung von UV-Licht auch schon unangenehme Erfahrungen in Form eines Sonnenbrands gemacht. Trotzdem wird die UV-Behandlung von Lebensmitteln nicht unmittelbar mit einer Lebensmittelbestrahlung assoziiert. Die Akzeptanz einer UV-Behandlung von Lebensmitteln ist deshalb ungleich höher im Vergleich zur ionisierenden (Gamma-)Strahlung. Außerdem ist eine Kennzeichnung von Lebensmitteln, die mit UV-Licht behandelt wurden, derzeit nicht explizit vorgesehen, wodurch die Konsumenten mit dieser Tatsache gar nicht konfrontiert sind.

### 2.8.1.5. Gepulstes Licht (*pulsed light*- PL)

Unter *pulsed light* (PL) versteht man die Nutzung intensiver Lichtpulse bzw. Lichtblitze von sehr kurzer Dauer im UV-VIS-NIR-Bereich mit dem vorrangigen Zweck der Dekontamination von Lebensmitteloberflächen und Verpackungen.

#### Prinzip

Das zu behandelnde Gut wird kurzen Lichtpulsen im Wellenlängenbereich von 100 – 2.600 nm ausgesetzt, wobei der tatsächlich genutzte Bereich weiter eingeschränkt sein kann. Der genutzte Bereich des elektromagnetischen Spektrums erstreckt sich also vom UV-Licht über den sichtbaren Lichtbereich bis in den Infrarotbereich. Üblich ist dabei eine Behandlung mit 1 – 20 Pulsen/s mit einer Dauer von je 1  $\mu\text{s}$  – 0,1 s. Die Energiedichte an der Lebensmitteloberfläche beträgt im Allgemeinen 0.01 bis 50  $\text{J}/\text{m}^2$ . PL wurde 2002 von der FDA zur Oberflächendekontamination von Lebensmitteln mit einer Beschränkung des Wellenlängenbereichs auf 200 – 1.000 nm, der Pulsdauer auf < 2 ms und der Energiedichte auf <12  $\text{J}/\text{m}^2$  zugelassen.

Technisch funktioniert PL im Prinzip folgendermaßen: In einem elektrischen Kondensator gespeicherte Energie wird in eine Xenonlampe entladen, was die enthaltenen Xenonatome in einen energetisch höheren Zustand versetzt. Um nun in den bevorzugten Grundzustand zurück zu gelangen, geben die Xenonmoleküle die Energie in Form von Photonen (also Licht) in das Lebensmittel ab.

#### Nutzungsrelevanz und Einsatzmöglichkeiten

Die Inaktivierung von Mikroorganismen durch PL wird im Wesentlichen folgenden drei Effekten zugeschrieben (FDA, 2014):

- Photochemische Schädigung durch den UV-Anteil: Der UV-Anteil des Lichtes bewirkt unter anderem eine DNA-Schädigung, womit MO im Wachstum und an der Vermehrung gehindert werden.
- Photothermische Schädigung durch lokale Überhitzung: Zwischen Bakterien und der umgebenden Lebensmittelmatrix bestehen Unterschiede in der Absorption und der Erhitzungs-/Abkühlungsrate, wobei die Bakterienzellen als lokales Verdampfungszentrum fungieren sollen. Damit lassen sich die bereits mikroskopisch beobachtete Zerstörung der Membrane

und das Aufbrechen der Zellwände erklären. Für die Erhitzung sind vor allem der sichtbare und der Infrarot-Spektralbereich verantwortlich.

- Photophysikalische Schädigung durch die Pulsintensität: Zellwand- und Zellmembranschädigungen, sowie Zerstörung anderer Komponenten im Cytoplasma könnten auch auf die physikalische Einwirkung der Pulse zurückzuführen sein.

PL versteht sich als Weiterentwicklung der kontinuierlichen UV-Behandlung, gegenüber der sich jedoch methodisch begründete Vorteile ergeben. Die MO-Inaktivierungsraten sind durch die zusätzlichen photothermischen und photophysikalischen Schädigungen deutlich erhöht. So wurde *L. monocytogenes* auf fester Oberfläche unter PL in ca. 180 s um 6 Zehnerpotenzen reduziert, während die Inaktivierung mittels kontinuierlicher UV-Licht-Bestrahlung in 1.000 s die Keimzahl lediglich um 4 Zehnerpotenzen verringerte (Ceigh et al., 2013). Ein weiterer Vorteil der PL-Behandlung ist die Nutzung von Xenonlampen, die im Vergleich zu den bei der kontinuierlichen UV-Bestrahlung genutzten Quecksilberdampflampen umweltfreundlicher sind.

Neben der Inaktivierung der klassischen lebensmittelpathogenen und haltbarkeitsvermindernden Bakterien und Pilze wurde auch ein Potential zur Reduktion von Viren aufgezeigt. Hepatitis A Viren und Norovirensurrogate ließen sich innerhalb von 2 s PL-Behandlung in Suspension sowie auf Stahloberfläche komplett (5 log) inaktivieren (Jean et al., 2011). In komplexeren Medien ist die Effizienz jedoch klar reduziert, wie sich in Versuchen mit Rinderserum zeigte (3 log Reduktion bei identer Ausgangsbelastung).

Analog zu kontinuierlicher UV-Behandlung lässt sich auch mittels gepulsten UV-Lichts (PL im Bereich 100 – 400 nm) der Vitamin D-Gehalt in Pilzen erhöhen. Dabei reicht eine Prozessdauer von 1 s (3 Pulse), um von quasi nicht vorhandenem Vitamin D<sub>2</sub>-Gehalt (0,005 µg/g) in *Agaricus bisporus*-Pilzen die Bildung der 100 %-igen Tagesdosis/Portion (entspricht 12, 6 µg/g) zu induzieren (Kalares et al., 2011).

Ein weiterer Anwendungszweck könnte die Inaktivierung von Enzymen sein. So wurde beispielsweise die für eine enzymatische Bräunung in Lebensmitteln verantwortliche Phenoloxidase (PPO) in Modelllösungen mittels PL (8,75 J/m<sup>2</sup>) vollständig inaktiviert (Manzocco et al., 2013).

Ebenfalls Gegenstand der Forschung ist die kürzlich entdeckte Möglichkeit, das allergene Potential von Lebensmitteln durch PL zu reduzieren. Die Verdaulichkeit des Milchproteins β-Lactoglobulin ließ sich dadurch erhöhen (Castillo-Santaella et al., 2014). Die Voraussetzung für eine mögliche allergene Wirkung von β-Lactoglobulin ist, dass es nicht verdaut wird, weil es nur so als „funktionierendes“ Allergen in die Blutbahn gelangen und dort an einen entsprechenden Antikörper von Allergikern binden kann. Eine Erhöhung der Verdaulichkeit ist deshalb mit einer Senkung des allergenen Potentials verbunden. Die Behandlung mit gepulstem UV-Licht konnte in Studien auch das allergene Potential von Tropomyosin, dem Hauptallergen von Shrimps in Shrimpsextrakten, die Allergenität von Sojaallergenen in Sojabohnenextrakten sowie Erdnussallergenen in Erdnussbutter reduzieren (Shriver et al., 2011, Yang et al., 2010, Yang et al. 2012).

Eine weitere Einsatzmöglichkeit von PL liegt in der Behandlung von Lebensmitteln, die in durchsichtigen Kunststoffmaterialien verpackt sind. Die Wirkungseffizienz von PL hinsichtlich der Inaktivierung von *L. monocytogenes* auf Agarplatten, welche in diverse Plastikfilme verpackt wurden, unterschied sich marginal von derjenigen unverpackter Platten (Fernandez et al., 2009). Ein ähnliches Ergebnis zeigte sich für die Dekontamination von Hartkäseoberflächen zur Reduktion von *P. roqueforti* und *L. monocytogenes*, wobei jedoch die Elastizitätsmodule des Kunststoffes herabgesetzt wurden (Can et al., 2014). PL kann ferner auch zur Dekontamination von Verpackungsmaterialien vor einer aseptischen Abfüllung als umweltfreundliche Alternative zu chemischer Desinfektion dienen (z.B. Turtoi & Nicolai, 2007).

### Kritische Parameter und Beschränkungen

Grundsätzlich ist die Wirkungseffizienz von PL der Energiedichte und der Pulszahl direkt, und dem Abstand des Guts von der Lichtquelle indirekt proportional (z.B. Pataro et al., 2011, Zhao et al., 2014,). Ein hoher UV-Anteil bzw. reines, gepulstes UV-Licht könnten der MO-Inaktivierung förderlich sein. Daneben existieren jedoch zahlreiche weitere Einflussgrößen, die von der Lebensmittelmatrix oder bei Dekontaminationsapplikationen vom jeweiligen Zielorganismus abhängig sind, wie:

- **Oberflächenbeschaffenheit:** Je stärker reflektierend die Lebensmitteloberfläche ist, desto weniger PL kann im Lebensmittel wirken und desto schlechter ist die Effizienz. Auch raue Oberflächen sind problematisch, weil Unebenheiten Schatten werfen und Kavitäten MO Schutz vor Licht bieten. Im Praxistest zeigte sich diesbezüglich eine der Oberflächenreflektion und -rauheit zuordenbare Variabilität bei der Inaktivierung von *Listeria innocua* auf Verpackungsmaterialien zwischen 3,5 und 7,2 log (Ringus & Moraru et al., 2013). In Scheiben geschnittene Pilze wiesen eine höhere Vitamin-D-Bildungsrate verglichen mit ganzen Pilzen auf (Kalares et al., 2011).
- **Farbe:** Gefärbte Lebensmittel absorbieren mehr UV-Strahlung, womit die Wirkungseffizienz von PL sinkt. Dieses Prinzip gilt auch für gefärbte MO. Dies konnte exemplarisch für weiße (*F. culmorum*) gegenüber schwarzen (*A. niger*) Schimmelsporen aufgezeigt werden (Gomez-Lopez et al., 2007). Die PL-induzierte Erhöhung des Vitamin D-Gehalts in Pilzen ist für weiße gegenüber braunen erhöht (Kalares et al., 2011). Komplexe Unterschiede in der Lebensmittelfarbe/Wirkungsbeziehung wurden in einer Studie mit gelben, orangen und roten Paprika identifiziert. In gelben und roten Paprika wurde im Gegensatz zu den anderen Sorten der Vitamin C-Gehalt erhöht. In rotem Paprika wurden L\*, a\* und b\*-Farbwerte erhöht, während sie bei orangen verringert wurden etc. (Hong et al., 2013).
- **Partikelgehalt:** Partikel bzw. Trübungen in flüssigen Lebensmitteln absorbieren die UV-Strahlung, woraufhin diese Energie verliert. Das bedeutet eine geringere Effizienz bei einem hohen Partikelgehalt in Flüssigkeiten (siehe auch Kapitel 2.8.1.4.). Dies wurde beispielsweise in einer Vergleichsstudie von klarem Apfelsaft und faserreichem Orangensaft aufgezeigt (Pataro et al., 2011). Versuche mit herkömmlicher Milch gegenüber einer partikelhaltigeren Dickmilch, bei denen Letztere eine deutlich höhere Keimbelastung nach der Behandlung aufwies, bestätigten diese Befunde (Miller et al., 2012). Auch MO sind Partikel und absorbieren demnach Energie und werfen Schatten. Eine hohe Keimbelastung führt deshalb unglücklicherweise ebenfalls zu einer verringerten Inaktivierungsrate (Gomez-Lopez et al., 2007).
- **Zusammensetzung:** Neben Trübungen bzw. Partikeln wurde ein erhöhter Fettgehalt in Milch als Störfaktor aufgefunden, was mit Streuung des Lichts an den Fetttropfen erklärt wurde (Miller et al., 2012).
- **Zielmikroorganismus:** MO sind unterschiedlich resistent gegenüber einer UV-Strahlung, wobei grampositive Bakterien resistenter sein sollen (Pataro et al., 2011).
- **Resistenzbildung und Photoreparaturmechanismen:** Für *Enterococcus faecalis* wurde die Fähigkeit aufgezeigt, Resistenzen durch Mutationen im Anschluss an eine PL-Behandlung ( $0,5 \text{ J/cm}^2$ ) gegenüber nachfolgenden Behandlungen ( $1,2 \text{ J/cm}^2$ ) auszubilden (Massier et al., 2013). Zusätzlich wurde für PL-Behandlung – analog zu einer kontinuierlichen UV-Behandlung – das Phänomen der Photoreparatur beobachtet, also eine DNA-Reparatur nach einer nachfolgenden subletalen Lichteinwirkung. Die Kultivierbarkeit einer *Listeria innocua*-Probe, welche nach PL-Behandlung unter Lichteinfluss gelagert wurde, war gegenüber der dunkel gelagerten Vergleichsprobe um 2,2 log erhöht (Lasagabaster & Maranon, 2014).

- Sonstiges: Bei Käsescheiben, welche mit diversen Energiedichten im Bereich von 0,7- 11,9 J/m<sup>2</sup> behandelt wurden, zeigte sich bei Dosiswerten von > 4,2 J/m<sup>2</sup> eine erhöhte Protein-oxidation (Fernandez et al., 2014). Außerdem wurde ein Zusammenhang zwischen dem pH-Wert des Lebensmittels und der Inaktivierungseffizienz des für eine enzymatische Bräunung verantwortlichen Enzyms Polyphenoloxidase identifiziert (Wang et al., 2013).

Bezüglich des Qualitätserhalts der LM zeigten sich unterschiedliche Studienergebnisse. Für viele Parameterkombinationen konnten äußerst positive Ergebnisse im Sinne von zufriedenstellender Haltbarkeitsverlängerung und/oder Abtötung von pathogenen MO bei keinen bis minimalen Qualitätsverlusten erzielt werden. Die Haltbarkeit von Erdbeeren ließ sich ohne merkliche Qualitätsverluste um zwei Tage verlängern. Ein erfolgsentscheidender Faktor scheint dabei eine geringe Oberflächentemperatur zu sein, die z.B. in genanntem Versuch durchgehend unter 42° C lag (Luksiene et al., 2013). Auch für *fresh-cut*-Mangos unter PL-Behandlung waren nach dreitägiger Lagerung keine Veränderungen hinsichtlich Textur, Farbe und Carotenoidgehalt feststellbar (Charles et al., 2013). In Trockenwürsten wurde bei der durch die FDA erlaubte Maximalenergiedichte von 12 J/m<sup>2</sup> kein Einfluss auf die Qualität festgestellt (Ganan et al., 2013).

Als wesentliches Defizit einer PL-Behandlung wurde die mögliche Überhitzung der Oberfläche mit diversen daraus resultierenden Effekten identifiziert. Eine Behandlung von Tomaten (1 Puls mit 2,68 J/cm<sup>2</sup>) ergab ab dem dritten Lagertag eine deutliche Erweichung, Gewichtsverlust und Faltenbildung verglichen mit der unbehandelten Kontrollprobe (Aguilo-Aguayo et al., 2013).

In Rind- und Thunfischcarpaccio, sowie in Schinkenaufschnitt führte PL zu deutlichen Qualitätseinbußen hinsichtlich Sensorik, Farbe und Textur (Hierro et al., 2012; Wambura & Verghese, 2011).

Unter PL-Behandlung wurde die Keimfähigkeit von Weizen um 14 – 15% reduziert (Maftei et al., 2014).

### **Kombinationen**

Die nachteilige Beeinflussung durch die Oberflächenbeschaffenheit der Lebensmittel lässt sich durch wasserunterstützte PL-Behandlung verbessern (Huang & Chen, 2014).

Zur weiteren Erhöhung der Mikroorganismen -Inaktivierungseffizienz wurden folgende Methoden für geeignet befunden:

- Erhöhung der Prozesstemperatur analog der UV-Behandlung (siehe Kap. 2.8.1.4): Angesichts der nachteiligen Qualitätsveränderungen bei hohen Temperaturen für einige Lebensmittel, sollten die derart behandelten Lebensmittel allerdings sorgfältig gewählt werden. Für Molke etwa konnte in einem Durchfluss-PL-System mit Erhitzung auf 60°C ein klar positiver, synergistischer Effekt der PL-Hitzebehandlung erzielt werden (Antigüez et al., 2015).
- Osmotischer Schock: Hefezellen, die in Medien mit hohem Zuckergehalt (≥ 30%) gezüchtet wurden, sind sensitiver für eine nachfolgende PL-Behandlung (Hayes et al., 2012).
- Hypericin-basierte Photosensibilisierung: Die Kombination Hypericin-PL soll die Inaktivierung von gramnegativen und grampositiven Bakterien gleichermaßen bewerkstelligen, wie für *L. monocytogenes* und *S. enterica* exemplarisch aufgezeigt wurde (Kairyte et al., 2012; Pataro et al., 2011).
- Bacteriocine: *Listeria innocua* konnte auf Wurst mittels PL um 1,37 log, mittels Nisin um 2,35 log, in Kombination PL-Nisin um deutlich erhöhte 4,03 log vermindert werden (Uesugi & Moraru, 2009).

### Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz

In den USA hat die FDA bereits 1996 die PL-Behandlung als Technologie zugelassen (FDA, 1996). Wie bereits oben erwähnt, spielt bei typischen Oberflächenverfahren, wie der PL-Behandlung, wohl auch die Eindringtiefe eine Rolle für die Einordnung. Diese ist bei PL grundsätzlich gering. Die FDA hat diesen Aspekt bereits etwas einbezogen und PL zu Dekontaminationszwecken nur bis 12 J/cm<sup>2</sup> erlaubt (FDA, 2014).

Die rechtliche Einordnung von PL in der EU ist derzeit noch unklar.

Ein Unterschied von PL zu der für bestimmte Lebensmittel zugelassenen UV-Strahlung ist ihre „höhere Wirksamkeit“ gegenüber Mikroorganismen. Daher stellt sich die Frage, ob das durch wesentlichere Veränderungen verursacht wird. Der zweite Unterschied zur UV-Strahlung ist der Beitrag der Strahlung anderer Wellenlängen. Dies kann nun einerseits als „höhere Natürlichkeit“ angesehen werden, weil sozusagen das ganze (Sonnen-) Lichtspektrum genutzt wird; andererseits aber auch als „undefinierter und damit risikoreicher“ interpretiert werden.

Hinsichtlich der Konsumentenakzeptanz gelten die gleichen Überlegungen, wie für eine UV-Bestrahlung. Es wird auch davon abhängen, wie dieses Verfahren gegenüber den Konsumentinnen und Konsumenten kommuniziert wird. Wenn es als Lebensmittelbestrahlung (ähnlich einer UV-Bestrahlung) erklärt wird, was es richtigerweise auch ist, wird die Akzeptanz darunter leiden. Eine Bezeichnung als „Beleuchtung“ der Lebensmittel, was auch nicht ganz unrichtig ist, weil ein Teil der verwendeten Strahlung im sichtbaren Bereich liegt, ergäbe sicher eine höhere Akzeptanz.

#### 2.8.1.6. Hochbogenentladung (*high voltage arc discharge hydrodyne* – HVADH)

Hochbogenentladungen („*high voltage arc discharge hydrodyne*“) haben sich als potentielle Methode zur Pasteurisation einiger flüssiger Lebensmittel und zur Verbesserung der Fleischtextur erwiesen.

##### Prinzip

Im Grundprinzip handelt es sich bei HVADH um die Erzeugung eines elektrohydraulischen Schocks im Lebensmittel durch Applikation rascher Spannungsentladungen über einen Elektrodenspalt. Die Temperaturerhöhung im Lebensmittel beträgt dabei vernachlässigbare, wenige Zehntel Grad Celsius.

Bei der HVADH-Behandlung treten zweierlei Arten an Effekten auf:

- Physikalische Effekte durch intensive Schockwellen, also starkem Druck;
- Chemische Effekte durch eine auftretende Elektrolyse, wodurch chemisch reaktive Substanzen gebildet werden (z.B. freie Radikale und Ozon), die dann weiter reagieren.

##### Mögliche Effekte, Hintergründe, Risiken und Forschungsbedarf

HVADH wurde in Versuchen bereits erfolgreich zur Pasteurisation von Milch und diversen Zitrus-säften eingesetzt, wobei in diesen wässrigen Systemen Inaktivierungsraten von 5 – 7 log für unterschiedlichste schädliche Mikroorganismenarten (*E.coli*, *Enterococcus faecalis*, *Micrococcus radiodurans*, *Bacillus subtilis*, *Listeria monocytogenes*, *Chlostridium sporogenes*, *Salmonella typhimurium*, *Lactobacillus lactis*, *Aspergillus niger*, *Penicillium digitatum*) erzielt wurden. Der antimikrobielle Effekt soll dabei eher nicht auf die physikalische Wirkung der Schockwellen, sondern auf die Bildung und Weiterreaktion der Elektrolyseprodukte zurückzuführen sein. Die gebildeten freien Radikale, Ozon und UV-Strahlen sind zelltoxisch, weil sie letztlich für den Zellstoffwechsel unerlässliche, intrazelluläre Komponenten zerstören, Enzyme (z.B. Lactatdehydrogenase, Trypsin

und Proteinasen) der Bakterien inaktivieren und die Zellmembran irreversibel abbauen (Barbosa-Canovas et al., 1999). Die Firma FABCO Technologies, die Ende der 1990er Jahre den kommerziellen Vertrieb von HVADH-Anlagen anstrebte, führte Studien zur Effektivität der Anlagen durch. Dabei sollen in Orangensäften pathogene MO um 5 – 7 log ohne negativen Einfluss auf Farbe und Geschmack reduziert und die mikrobielle Belastung in frisch-gepresstem Grapefruitsaft um 50% gesenkt werden können. Dadurch ließ sich die Haltbarkeit auf 100 Tage unter Kühlung verlängern (FABCO Technologies, 1998). Von anderen Autoren wurde kritisch angemerkt, dass es sich dabei um Einzelstudien eines Anlagenbauers handelt und die Ergebnisse von unabhängigen Experten validiert werden sollten (Barbosa-Canovas et al., 1999). Für die Behandlung fester Lebensmittel scheint die Behandlung mittels HVADH kaum zur Dekontamination geeignet zu sein. Während Williams-Campbell & Solomon (2001) und Campbell & Solomon (2002) Reduktionen von 1,7 bis 3 log in Fleisch unter EHSW-Behandlung (Vorgängermethode der HVADH, bei der die Schockwellen explosiv statt elektrisch generiert werden) beobachteten, konnten Lorca et al (2002) keinen Unterschied in der Belastung mit psychotropen Keimen, Coliformen und *E.coli* zwischen HVADH-behandeltem und unbehandeltem Fleisch feststellen. Die Autoren empfehlen allerdings weitere Experimente unter mehrfacher sequentieller Behandlung, welche bislang wegen der raschen Degradierung der Verpackung unter den Behandlungsbedingungen scheiterte.

Neben der Pasteurisation von flüssigen Lebensmitteln ist die Texturverbesserung von Fleisch ein weiteres mögliches Anwendungsfeld der HVADH, wobei hierfür die Intensität der Druckwellen die Ursache ist. Dabei lässt sich die Zartheit des Fleisches nach der Totenstarre erhöhen, ähnlich wie durch das üblichere Marinieren oder durch elektrische Stimulation oder Druckeinwirkung (Lorca et al., 2003). Ferner soll unter HVADH ein Auftauen homogener und rascher stattfinden können (He et al., 2014).

Mögliche Probleme beim Einsatz von HVADH könnten sich aus der Komplexität der unterschiedlichen Reaktionsprodukte der Elektrolyse (freie Radikale, Ozon) und deren unkontrollierten Weiterreaktionen ergeben, weil diese meist oxidativen Reaktionen zur Zerstörung diverser natürlicher Lebensmittelkomponenten führen. Deshalb wurde die Methode um 1990 für die Behandlung von Lebensmitteln für ungeeignet befunden, wobei man dieser Technologie aber nun wieder etwas Potential einräumt. Jedenfalls ist noch gewaltiger Forschungsbedarf gegeben, den die FDA folgendermaßen in einer Stellungnahme zusammenfasst: „*Understanding how delivery of highly reactive ozone and UV radiation by electric arc discharge inactivates microorganisms, quantifying the inactivation kinetics and mechanisms, identifying reaction process products generated during the submerged arc discharge process due to the highly reactive nature of ozone and UV radiation, defining maximum allowable dose in a manner similar to food irradiation*“ (FDA, 2014).

#### **Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz**

Der noch hohe Forschungsbedarf, der relative Stillstand in der Forschung und das mangelnde Interesse von Lebensmittelbetrieben werden, wenn überhaupt, den praktischen Einsatz dieses Verfahrens in naher Zukunft sicher nicht ergeben.

#### **2.8.1.7. Hochspannungs-Elektroimpulsverfahren (*high intensity pulsed electric fields - PEF*)**

Unter *pulsed electric fields* (PEF) versteht man in der Lebensmittelverarbeitung die Durchleitung kurzer, elektrischer Pulse durch eine Lebensmittelmatrix mit dem Ziel der schonenden Haltbarmachung, sowie der Beschleunigung von Massetransportprozessen.

##### **Prinzip**

Die Hochspannungsimpulse bewirken in den Zellen der MO aber auch in pflanzlichen und tierischen Zellen eine erhöhte Permeabilität der Zellmembranen. Wenn die Belastung unter einem



bestimmten Niveau liegt, entsteht lediglich eine reversible Porenbildung in den Zellwänden bzw. -membranen ( $\Rightarrow$  Elektroporation). Bei höherer Belastung kommt es zu einer irreversiblen Porenbildung. Im Fall von MO-Zellen bedeutet das im Allgemeinen eine letale Schädigung, weil der überlebenswichtige Massetransport in und aus der Zelle, sowie innerhalb der Zelle gestört ist. Dieser Effekt wird für Dekontaminationsaufgaben genutzt. Für pflanzliche oder tierische Lebensmittel-Zellen bedeutet eine Elektroporation ebenfalls, dass Ein- und Austritt von Substanzen vereinfacht werden. Dieser Aspekt wird für Aufgaben zur Verbesserung des Massetransportes genutzt.

Technisch werden zur PEF-Behandlung ein leistungsfähiger Pulserzeuger, zwei Behandlungselektroden und eine geerdete Elektrode, sowie eine dem Lebensmittel angepasste Behandlungszelle benötigt. Der äußerst leistungsfähige Pulsgenerator (mittlerweile sind Anlagen bis 80 kW realisiert) bewirkt, dass sich das Feld zwischen den Elektroden, durch welches das zu behandelnde Lebensmittel hindurchbewegt wird, entsprechend rasch verändert, um eine maximale Elektroporation zu erzielen. Anlagen sind bereits sowohl als „Förderbandvarianten“ für Stückgut als auch in Form von Durchflussanlagen für pumpfähige Güter realisiert.

### **Nutzungsrelevanz und Einsatzmöglichkeiten**

- Haltbarkeitsverlängerung und Reduktion von pathogenen Mikroorganismen: Beim Einsatz des PEF-Verfahrens zur Keimzahlreduktion ist der wesentliche Vorteil gegenüber der klassischen Hitzebehandlung die Produktschonung durch den verbesserten Erhalt einiger temperatursensitiver Vitamine, Aromen und phenolischer Substanzen aufgrund der niedrigeren Behandlungstemperaturen. Grundsätzlich kann PEF durchaus als „nichtthermisches“ Verfahren bezeichnet werden. Eine unvorteilhafte Geometrie der Behandlungszelle, die Zusammensetzung des Produktes bzw. die Produktströmung und/oder eine unzureichende Isolierung/Kühlung bei hohem Energieeintrag etc. können die Temperatur allerdings in gewissem Ausmaß erhöhen. Eine erhöhte Temperatur kann aber auch absichtlich synergistisch zur verbesserten Effizienz der Keimzahlreduktion genutzt werden. Alles in allem ist die Hitzebelastung unter PEF-Behandlung selbst in diesen Fällen mit typischerweise 50 – 60° C für einige zehntel Sekunden gegenüber einer herkömmlicher Hitzepasteurisation äußerst gering. Typischerweise arbeitet man zum Zweck der Keimzahlreduktion mit einem Energieeintrag im Bereich von 50 – 250 kJ/kg, und zur Inaktivierung von Enzymen mit dem etwa 4 – 5-fachen Energieeintrag.

Das MHD von frisch-gepressten Fruchtsäften lässt sich mittels PEF-Behandlung unter Kühlung von wenigen Tagen auf 2 – 5 Monate, und bei Raumtemperatur auf etwa 3 – 5 Wochen erhöhen (Buckow et al., 2013). Dabei zeigte sich, dass der Gehalt an Vitamin C und phenolischen Substanzen gegenüber hitzebehandelten Säften besser erhalten wird. In Tomaten- und Erdbeersäften zeigte sich zudem ein deutlich verbesserter Erhalt diverser aromatischer Substanzen (Odriozola-Serrano et al., 2013). Proteinbasierte Lebensmittel sind im Allgemeinen resistenter gegenüber einer PEF-Behandlung, wobei erwiesen ist, dass mit steigendem Proteingehalt, insbesondere jenem an micellärem Casein, die Inaktivierungseffizienz durch PEF sinkt (Jäger et al., 2009). Nichtsdestotrotz lässt sich für Milch und Flüssigei mit 25 – 40 kV/cm in einigen Zehntel bis Hundertstel Sekunden die Zahl an relevanten Keimen um 3 – 6 log reduzieren und die Haltbarkeit auf 3 – 4 Wochen unter Kühlung steigern (Zhao et al., 2012). Cheddarkäse aus PEF-pasteurisierter Milch zeigte eine bessere Textur und sensorische Eigenschaften als jener aus hitzepasteurisierter Milch (Sepulveda-Ahumada et al., 2008). Während sich PEF zur Inaktivierung der Enzyme Peroxidase, Polyphenoloxidase, Pectinmethylesterase und Hydroperoxidlyase mit 85 – 90 %-iger Inaktivierungsrate als äußerst effektiv erwies, sind Polygalacturonase, Lipoxygenase und  $\beta$ -Glucosidase mit „lediglich“ 50% vergleichsweise resistent gegenüber einer Elektroporation (Zhao et al., 2012). Erwähnenswert ist dabei, dass die sonst äußerst thermoresistente Per-

oxidase mittels PEF sehr einfach und zuverlässig zu inaktivieren ist. Das zeigt einerseits, dass sich die Inaktivierungskinetik der bekannteren thermischen Methodik nicht auf PEF übertragen lässt, und damit hier Forschungsbedarf besteht; und andererseits ein hohes Synergiepotential zwischen thermischer und elektrischer Energie zur Enzyminaktivierung existiert.

- Erhöhung der Extraktionseffizienz: PEF ist neben den häufig genutzten thermischen und enzymatischen Vorbehandlungen eine Möglichkeit des gezielten Zellaufschlusses zur Verbesserung der Extraktionseffizienz. Für die Gewinnung von Obst- und Gemüsesäften wird dabei in der Praxis eine Steigerung der Saftausbeute um 4 – 8% erreicht. Eine PEF-Vorbehandlung von Raps resultiert in einer Erhöhung der Ölausbeute beim Pressen von 34 auf 42%. Die Gewinnung von Zucker aus Zuckerrüben lässt sich ebenfalls verbessern. Neben diesen meistgenutzten Extraktionsaufgaben der Lebensmittelindustrie eignet sich PEF auch zur Effizienzsteigerung der Extraktion von natürlichen Lebensmittelfarbstoffen etwa aus Roten Rüben (FINCAN et al., 2004) und der Gewinnung von Vitaminpräparaten aus Algen (Pulsemax, 2014) und Karotten (Roohinejad et al., 2014).
- Erhöhung der Trocknungseffizienz: Die Perforierung von tierischen bzw. pflanzlichen Zellen der Lebensmittel führt zur Aufhebung der Stofftransportbarriere, womit u.a. die Diffusion von Wasser in anschließenden Trocknungsprozessen verbessert wird.
- Verbesserung der Stoffinfusion: Bedingt durch die erhöhte Durchlässigkeit ergibt sich eine Effizienzsteigerung beim Marinieren und Pökeln von Kochpökelfleisch. Ein weiterer Vorteil dabei ist die verbesserte Homogenität der Salzverteilung unter PEF, was wiederum mit einer gleichmäßigeren Wasserbindungsfähigkeit und letztlich mit einer Verringerung des Kochverlustes einhergeht.
- Reifung und Zartmachung: Insbesondere für Rindfleisch eignet sich PEF zur Beschleunigung der Reifung und zur Zartmachung durch gezielte „Zellzerstörung“ (z.B. Soliva-Fortuny, 2007).
- Vereinfachung von Schneidprozessen: Ein PEF-induzierter Zellaufschluss kann Schneidprozessen vorangestellt werden und diese beschleunigen. Die Schneidenergie und der Messerverschleiß werden verringert und damit höhere Durchsätze unter Kostenreduktion bewirkt. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Zellen des Lebensmittels irreversibel perforiert, also leicht „zerstört“ sind, womit sich dafür Lebensmittel nicht eignen, deren einwandfreie Oberflächenbeschaffenheit sehr qualitätsentscheidend ist, etwa bei Frischgemüse.
- Verringerung der Fettaufnahme und Verringerung der Blanchierdauer für Pommes frites: Neben der Verringerung der Schneidenergie können bei der Pommes frites Herstellung noch zwei weitere, positive Effekte mittels PEF erzielt werden. Zum einen beschleunigt die Aufhebung der Stofftransportbarriere den Blanchierprozess und die Vortrocknung; zum anderen lässt sich die Fettaufnahme beim Frittierprozess bei vergleichbarer Knusprigkeit verringern. Der Ölbedarf und damit verbundene Kosten werden damit gesenkt und für die Konsumentinnen und Konsumenten ein Gesundheitsnutzen erzielt. Die Hintergründe für diese Vorgänge sind noch nicht endgültig geklärt. Eine Hypothese basiert auf einer beschleunigten Krustenbildung der durch PEF in der Oberflächenstruktur veränderten Kartoffelstücke.
- Bildung von bioaktiven Substanzen: Behandlungsparameter, die lediglich eine reversible Porenbildung hervorrufen, führen zur Induzierung einer Abwehrreaktion des lebenden Gewebes im Sinne der Bildung von Stressabwehrsubstanzen in Form von als gesundheitsfördernd (antientzündlich, anticancerogen usw.) bekannten, phenolischen Inhaltsstoffen. Dazu wurde ein spezifischer Energieeintrag von etwa 0,6 – 1,3 V/cm als geeignet befunden (z.B. Soliva-Fortuny et al., 2009). Im Speziellen lässt sich in diesem Zusammenhang für Wein neben

der Erhöhung der Pressausbeute mittels PEF die gesteigerte Bildung von Anthocyanen in den Trauben induzieren und damit die Farbe verbessern (Puertolas et al., 2010). Die beiden Effekte, PEF-induzierte Bildung antioxidativer Substanzen und PEF-induzierte Erhöhung der Extraktionsausbeute, resultierte für Rotkohl (bei 2,5 kV/cm, 15  $\mu$ s, 50 Pulsen) in einer 2,15-fachen Ausbeuteerhöhung an Anthocyanen gegenüber unbehandeltem Gut (Gachovska et al., 2010).

- Erhöhung der Membranfiltrationseffizienz: Mittels PEF lässt sich der Permeatfluss in Membranfiltrationsprozessen deutlich erhöhen. Dadurch ergibt sich eine kürzere Reinigungszeit und eine Einsparung von Reinigungsmitteln, und die durchgehende Betriebsdauer verlängert sich. Konkret konnte für die *cross-flow*-Ultrafiltration von Apfelsaft zum Zweck der Klärung der Permeatfluss unter optimierten Bedingungen am Ende der 50-minütigen Filtrationszeit von 3,75 auf 7,3 l/m<sup>2</sup> h erhöht werden, wobei die Schichtdicke der Ablagerungen von 6,84  $\mu$ m auf 4,85  $\mu$ m gesenkt wurde (Sarkar, 2014). Der Hintergrund dafür ist, dass Ablagerungen geladen sind und solche geladenen Partikel bestrebt sind der Orientierung des Feldes zu folgen und so von der Membran „abwandern“.

### Derzeitiger Einsatz

Obgleich die Wirkung gepulster elektrischer Felder bereits seit Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt ist (1920 war mit dem sogenannten „*electropure*“- Prozess bereits ein Verfahren zur Milchpasteurisation im Einsatz), hat PEF bis vor wenigen Jahren nicht den Weg in die Industrie gefunden. Die wesentliche technologische Beschränkung, das Nichtvorhandensein entsprechend leistungsfähiger Pulsgeneratoren, wurde vor kurzem gelöst, was sich nun in einer stetigen Verbreitung von industriellen Anlagen bemerkbar macht. Die ersten industriellen Anlagen zur Fruchtsaftkonservierung wurden 2005 mit einer Kapazität von etwa 200 l/h durch die Firma Genesis, USA in Betrieb genommen. 2006 folgte die kommerzielle Nutzung zur Saftextraktion und Ölgewinnung mit Durchsätzen von 10 t/h. 2011 befanden sich weltweit bereits etwa 30 Systeme vorwiegend zur Haltbarmachung von Säften und Smoothies in den Niederlanden und Großbritannien, sowie zum Aufschluss von Kartoffeln in Deutschland, den Niederlanden und den USA im Einsatz. Hersteller werben mit einer 80 %-igen Energie- und einer 90 %-igen Zeitersparnis gegenüber Alternativprozessen bei Prozesskosten inkl. Anschaffungskosten von lediglich 1 - 2 Cent/l für die Pasteurisierung. Führend in Forschung wie auch Bau und Vertrieb maßgeschneiderter industrieller Anlagen ist das Deutsche Institut für Lebensmitteltechnik eV, kurz DIL, bzw. dessen *spin-off*, die Firma ELEA, welches PEF- Anlagen mit Hochspannungsgeneratoren und Behandlungszellen unter dem Markennamen ELCRACK<sup>®</sup> vertreibt (DIL, 2014). Die neue Generation der Pulsgeneratoren am DIL (Durchschnittsleistungen von 5 kW bzw. 30 kW bzw. 80 kW) ermöglicht dabei Anlagendurchsätze von bis zu 5.000 l/h bei der Pasteurisation pumpfähiger Lebensmittel, und bis zu 30 t/h für Aufgaben des Zellaufschlusses. Unterschiedlich konstruierte Behandlungszellen bewerkstelligen die maßgeschneiderte Behandlung diverser Produktbeschaffheiten. Eine weitere PEF-Anlagen bauende Firma im europäischen Raum ist Cool Wave Processing (Wageningen, NL), deren Anlage unter dem Namen PurePulse (oder PEF 2.0) bekannt ist (PurePulse, 2014). Diese umfasst im Wesentlichen eine schonende Vorerwärmung mit dem Ziel der Erweichung der Zellmembranen, die eigentliche PEF-Behandlung (Durchfluss, 1 – 4 ms, 20 – 40 kV/cm, max. Temperaturanstieg in Behandlungszelle von 5 – 15° C) und eine rasche Abkühlung. Damit sollen für pumpfähige, homogene Güter im Durchflussverfahren (~2.000 L/h) pathogene MO um 5 – 6 log reduziert und die Haltbarkeit auf 4 – 6 Wochen verlängert werden. Ebenfalls über Sitz in den Niederlanden (und den USA) verfügt die Firma Pulsemaster, die – ähnlich wie das DIL – über Anlagen für alle wesentlichen Anwendungszwecke verfügen soll. Vor allem die Anwendung von PEF zur Vorbehandlung von Pommes frites, womit eine deutliche Fettreduktion gegenüber herkömmlich mit Hitze vorbehandelten Pommes frites erzielt werden kann, wird durch Pulsemaster offensiv beworben.

PEF-behandelte Produkte haben 2014 mit Säften der Vertriebsfirma Ali Juus (Abb.4.2.10), welche in Filialen der Wiener Bäckerei Ströck erhältlich sind und eine Haltbarkeit von 18 Tagen unter Kühlung (gegenüber 5 Tagen ohne Behandlung) aufweisen sollen (Ali Juus, 2015), anscheinend erstmals offensichtlich den österreichischen Markt erreicht. Dabei ist jedoch nicht auszuschließen, dass weitere Produkte am Markt sind, bei denen der Einsatz von PEF nicht derart offensichtlich beworben wird.

Der Markt für PEF behandelte Produkte, welche laut Herstellern eine gewisse Lagerfähigkeit mit der Qualität und Sensorik vergleichbarer frischgepresster Säfte mitbringen, scheint im Steigen. Dies hat seine Hintergründe darin, dass man von der seit Jahrzehnten üblichen Rückverdünnung aus (importierten) Konzentraten zur Saftherstellung in Richtung (lokal produzierter) Frisch- bzw. Direktsäfte übergeht (Buckow et al., 2011).



Abb. 4.2.10: PEF-Testanlage PurePulse (Wageningen), Werbung Ali Juus „ultrafresh mit PEF“ (Pure Pulse, 2014; Ali Juus, 2015)

### Kritische Parameter und Beschränkungen

Die wichtigsten, relativ gut steuerbaren Parameter beim PEF-Einsatz sind die Behandlungszeit und –temperatur, sowie der Energieeintrag, deren Erhöhung eine Effizienzsteigerung zur Folge hat. Daneben bestehen für Dekontaminationsaufgaben Abhängigkeiten der Effizienz von der Zusammensetzung der Zellmembranen, der Zellgröße, der Verteilung der Zellen im Gut und der Zusammensetzung des zu behandelnden Lebensmittels. Unterschiede in der Zusammensetzung der Zellmembranen sind auch der Grund für die unterschiedliche Sensitivität der Mikroorganismen gegenüber der Elektroporation. Große Zellen sind grundsätzlich besser zu behandeln.

Die Homogenität des elektrischen Feldes, also die zuverlässig gleichmäßige Wirkung auf möglichst alle Zielzellen bei gleichzeitiger homogener Produktbelastung (= Qualitätserhalt), wird komplex beeinflusst durch:

- Verteilung der MO-Zellen im Gut: Voraussetzung für eine effiziente Inaktivierung ist, dass alle Zellmembranen der „Perforation“ bzw. der „Poration“ zugänglich sind. Im Fall von sogenannten „inclusion oder insulating particles“, das sind (MO-)Zellen, die von anderen vollständig eingeschlossen sind, und Zellagglomeraten funktioniert dieser Aufschluss unzureichend bis nicht (z.B. Töpfl et al., 2007). Zellen schützen sich sozusagen gegenseitig vor Elektroporation oder „verstecken“ sich zwischen Fettpartikeln etc.
- Zusammensetzung der Lebensmittel: Allgemein sind erwartungsgemäß partikelhaltige Lebensmittel, sowie stark viskose Lebensmittel schlecht mittels PEF zu behandeln (Cool wave processing, 2012). Eine inhomogene Verteilung von Gasbläschen im Lebensmittel kann ebenso Einfluss nehmen. Generell ist jede Lebensmittelparameter-Anlagenkombination in-

dividuell zu betrachten, zumal sich selbst in ähnlichen LM, wie Tomaten/Karottensaft Unterschiede in der Inaktivierungseffizienz zeigten. Relativ gut untersucht ist der Effekt von PEF in proteinbasierten Lebensmitteln. Eine hohe Konzentration an Proteinen (z.B. Milch insbesondere micelläres Casein) soll einen Schutzeffekt gegenüber einer PEF-Behandlung haben, die Mikroorganismen -Inaktivierung also erschweren, wie etwa am Beispiel *Lactobacillus rhamnosus* aufgezeigt wurde (Jäger et al., 2009). Zudem werden viele Proteine unter PEF in ihrer Konformation und folglich in ihrer Funktionalität verändert. Die wesentlichen beobachteten Effekte sind dabei die verstärkte Aggregation von Milchproteinen, hinter der eine Auffaltung von Proteinketten unter Exposition von SH-Gruppen, die sich anschließend zusammenlagern und/oder die Polarisierung bestimmter Gruppen mit folgender Anziehung der Gegenladungen vermutet wird. Diese verstärkte Aggregation zeigt sich in einer Verringerung der Löslichkeit unter zu exzessiven PEF-Bedingungen, wie beispielsweise bei Sojaproteinisolat (Li et al., 2007). Im Fall von Flüssigei kann daraus eine verringerte Aufschlagfähigkeit resultieren (Marco-Moies et al., 2011). Unter den Enzymen neigt insbesondere Lysozym zu verstärkter Aggregation und Präzipitation unter PEF, womit es sich der PEF-Inaktivierung entziehen kann. Dem lässt sich allerdings durch Zugabe von Zitronensäure vorbeugen (Wu et al., 2015).

- **Anlagendesign und Kontrolle:** Nicht nur im Sinne der Sicherstellung einer ausreichenden Inaktivierung von Mikroorganismen ist eine homogene Behandlung wichtig, auch die Vermeidung einer lokalen Überhitzung und damit einer unnötigen Zerstörung von Lebensmittelbestandteilen ist Grund für ein vorteilhaftes Anlagendesign. Eine gewisse Hitzeentwicklung um die Elektroden ist methodisch bedingt (quasi *ohmic heating*), kann jedoch durch entsprechend effiziente Kühlmaßnahmen verhindert werden. So wurde etwa die Integrierung eines Mantelwärmetauschers um die geerdete Elektrode für geeignet befunden (Meneses et al., 2011). Die Strömungseigenschaften und damit die Homogenität der Behandlung ließ sich beispielsweise durch Turbulenzbildung mittels in die Behandlungszelle eingebauten Gittern verbessern (Jäger et al., 2009). Ein weiterer Trick ist die Nutzung mehrerer Behandlungszellen hintereinander, um Fehler in der Inhomogenität in einzelnen Zellen auszugleichen. Eine gewisse Kontrolle über die Effizienz der Behandlung lässt sich mittels Systemen gewinnen, die abgegebene Anlagenleistung, Produktstrom und Temperatursteigerung während dem Prozess messen und rückkoppeln, welche etwa in Anlagen des DIL Standard sind. Lokale Inhomogenitäten sind damit jedoch nicht zu kontrollieren.

### Kombinationen

Synergistische Effekte mit der PEF-Behandlung wurden für folgende Ansätze aufgezeigt:

- **Hitze:** Die Effizienz der PEF induzierten Mikroorganismen -Inaktivierung nimmt grundsätzlich mit steigender Behandlungstemperatur zu, wobei sich Temperaturen von 50 – 60° als sinnvoller Kompromiss zwischen effektiver Abtötung und Produktschonung erwiesen haben (z.B. Heinz et al., 2003; Töpfl et al., 2007). Mit dieser Kombination lässt sich der Energieaufwand senken, die Inaktivierung PEF- und/oder hitzeresistenter Mikroorganismen bzw. Enzyme gleichermaßen bewerkstelligen und die Abtötung relativ kleiner, der PEF schlecht zugänglicher Zellen (z.B. Listerien) realisieren.
- **Antimikrobielle Substanzen und Konservierungsmittel:** Benzoate, Sorbate und Zitronensäure erhöhen ebenso die MO-Inaktivierungsraten (Gurtler et al., 2011). Nisinzusatz (100 U/ml) bewirkte eine deutlich erhöhte Abtötungseffizienz. Konkret konnte bei relativ schonenden PEF-Bedingungen (80 kV/cm, 20 Pulse, 44° C) eine Absenkung der Gesamtkeimzahl in Orangensaft von 1,75 log auf >6 log erzielt werden (Hodgins et al., 2002).
- **UV bzw. pulsed light:** Ein Hürdenprinzip aus der Kombination PEF/UV bzw. PEF/PL ist den Einzelmethoden überlegen, wohingegen die Kombination PEF/Ultraschall wenig vielversprechend sein soll (Caminti et al., 2011).

## Mögliche Risiken

Methodisch bedingt sind folgende potentielle Risiken zu berücksichtigen:

- Elektrodenerosion: Wie bei allen Methoden mit involvierten Elektroden stellt die Korrosion von Elektrodenmaterial in das Gut ein potentielles Problem dar. In der Vergangenheit viel genutzte Edelstahlelektroden lösen sich u.a. in gesundheitlich bedenkliche Bestandteile wie Eisen, Nickel, Chrom und Cadmium auf. In modernen Anlagen ist daher Titan als Elektrodenmaterial im Einsatz, dessen Abbauprodukt Titandioxid (auch als Lebensmittelzusatzstoff verwendet) gesundheitlich als unbedenklich eingestuft wird.
- Inhomogene Feldverteilung: Kritisch für die Lebensmittelsicherheit ist bei Dekontaminationsaufgaben die Gewährleistung einer homogenen Behandlung (siehe auch kritische Parameter). Laufende Forschungsaktivitäten untersuchen dabei die optimale Strömung in den Behandlungszellen und die Wirkung von mehreren in Serie genutzten Behandlungszellen.

## Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz

PEF-Behandlung wird in der europäischen Lebensmittelindustrie sowohl für Pasteurisations-/Sterisationsaufgaben als auch zum Zellaufschluss genutzt. Selten, aber doch, wird auch offensiv damit geworben („ultrafresh durch PEF“ – Ali Juus). Einerseits lassen sich methodisch die Bildung von unerwünschten, reaktiven Zersetzungsprodukten – ausgelöst durch hohen Energieeintrag – und folgende Redoxreaktionen unter Bildung freier Radikale etc., sowie eine gewisse Migration von Elektrodenmaterial nicht ausschließen. Andererseits existieren bereits relativ „sichere“ Elektrodenmaterialien und die Gleichwertigkeit wurde für Apfelsaft aus mittels PEF aufgeschlossenen Äpfeln zu konventionell hergestelltem Apfelsaft schon bewiesen, womit im Falle der Notwendigkeit einer NF-Zulassung zumindest das verkürzte Gleichwertigkeitsverfahren angewandt werden könnte. Als Qualitätsparameter von Apfelsaft, also als Kriterium zur Beurteilung der Gleichwertigkeit gegenüber herkömmlich hergestelltem Apfelsaft, wurden dabei Phenolgehalt, Gesamtsäure und Trubstabilität herangezogen (SKLM, 2008).

Im Fall von „gepulsten elektrischen Feldern“ scheint die Elektrizität im Namen auf. Das könnte durch eine damit assoziierte Gefahr bei der Bevölkerung eine gewisse Skepsis gegenüber dem Verfahren hervorrufen (Olsen, 2010). Die meisten Konsumentinnen und Konsumenten werden mit diesem Verfahren derzeit aber kaum etwas anzufangen wissen.

### 2.8.1.8. Oszillierende Magnetfelder (*oscillating magnetic fields*) (OMF)

Eine Methode, die in den Anfängen des mittlerweile deutlich aufstrebenden PEF-Verfahrens als weitere vielversprechende Methode zur Dekontaminierung von Lebensmitteln untersucht wurde, sind oszillierende, magnetische Felder (OMF). Im Gegensatz zu PEF ist ihr praktischer Nutzen allerdings bislang nicht zulänglich wissenschaftlich bestätigt.

#### Prinzip

Das in Kunststoffmaterialien verpackte Lebensmittel wird 1 – 100 Pulsen eines magnetischen Wechselfeldes ausgesetzt, wobei Intensitäten zwischen 0 und 50 Tesla und Frequenzen (⇒ Häufigkeit des Ladungswechsels) von 5 – 500 kHz empfohlen werden. Ab 500 kHz soll die Temperatursteigerung durch die Behandlung bereits recht hoch sein, im empfohlenen Bereich beträgt sie zwischen 2 und 5°C zwischen Anfang und Ende der Behandlung, womit es sich aber klar um ein nichtthermisches Verfahren handelt. Die Ausgangstemperatur beträgt im Allgemeinen 0 – 50°C, die Behandlungsdauer 10 µs bis einige ms. Über die Hintergründe der möglichen Dekontaminierung weiß man nach wie vor nicht Bescheid. Diskutiert wurde eine Auflösung der

Bindungen zwischen Ionen und Proteinen durch Anlegen eines schwachen OMF, was in Folge den Zellstoffwechsel stören könnte, weil an diesem viele Protein-Ionen-Konstrukte beteiligt sind. Analog sollen Calcium-bindende Ionen in Calcium-bindenden Proteinen wie Calmodulin in deren Funktion gestört werden, welche in viele zellinterne Signalwege involviert sind. Zudem könnte das OMF magnetisch aktive Teile der DNA derart beeinflussen, dass kovalente Bindungen zerstört werden (Barbosa-Canovas et al., 1993). In einem Patent, das die Anwendung von OMF zur Wirkungsunterstützung von medizinischen Wirkstoffen und Therapien schützt, wird die Wirkung oberflächlich damit erklärt, dass Reizströme die Zellmembran beeinflussen, intrazelluläre Abläufe stören, und Bakterien durch den verursachten Stress leichter angreifbar sind (Praschelik & Sturm, 2011).

### **Mögliche Effekte und Forschungsbedarf**

Studien zeigten Inaktivierungsraten für Bakterien zwischen 2 und 3 log bei Behandlung durch einen einzigen OMF-Puls in Milch, Joghurt, Orangensaft und Brotteig (Hoffmann, 1985). Vergleichbare Inaktivierungsraten (Reduktion von 3 log für die Bakterien *Ervinia carotovora* und *Streptomyces scabies* und 2 log für den Pilz *Alternaria solani*) wurden auch in einer neueren Studie erzielt (LIPIEC et al., 2004). Dabei ist anzumerken, dass es sich beim behandelten Material um zuvor auf sehr hohe Zelldichten angezüchtete Flüssigkulturen handelte. Daneben sind unter den insgesamt äußerst wenigen publizierten Studien, jedoch ähnlich viele zu finden, in welchen nach OMF-Behandlung das Zellwachstum unbeeinträchtigt blieb oder gar stimuliert wurde (Barbosa-Canovas et al. 1993; Pothakamury et al. 1993).

Als mögliche Einflussfaktoren auf die induzierten Wirkungen wurden die magnetische Felddichte, die Pulszahl, die Frequenz und die Eigenschaften des Lebensmittels (konkret Widerstand, elektrische Leitfähigkeit und Form/Schichtdicke) genannt. Der Forschungsbedarf ist unbestritten hoch (Barbosa-Canovas et al., 1993; Butz & Tauschner, 2002). Vor dem Hintergrund der unsicheren Wirkung, der Unbekanntheit der Wirkmechanismen und der Einflussfaktoren, ist ein industrieller Einsatz demnächst nicht zu erwarten. Die FDA fasst den erheblichen Forschungsbedarf folgendermaßen zusammen: *“Identify key resistant pathogens, establish the effects of magnetic fields on microbial inactivation, elucidate the destruction kinetics of magnetic fields, determine the mechanisms of action of magnetic fields, determine critical process factors and effects on microbial inactivation, validate the process and evaluate indicator organisms and appropriate surrogates, identify process deviations and determine ways to address them”* (FDA, 2014).

Ein neuerer Ansatz ist die Nutzung magnetischer Hyperthermie als Desinfektionsmethode zur Bekämpfung von pathogenen MO. Dabei wurde eine Lösung mit *Pseudomonas fluorescens* und Magnetit-Nanopartikeln versetzt und anschließend mit einer Frequenz von 873 kHz OMF-behandelt (relativ hoch), wobei durch die entstehende Erhitzung der Magnetit-Nanopartikel eine vollständige Abtötung der Keime nach 8 min (untypisch lange Zeit) bei 55°C erfolgte (Banobre-Lopez et al., 2013).

Der postulierte Effekt eines vorteilhaften, effizienteren, homogenen Gefrierens unter Nutzung eines OMF konnte in Versuchen mit Knoblauch nicht bestätigt werden (James et al., 2014).

### **Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz**

Der Einsatz von OMF wird derzeit nicht forciert, zumal eine technologische Nutzungsrelevanz nicht sicher ist. Die rechtliche Einordnung und die Akzeptanz sind deshalb nicht relevant.

### 2.8.1.9. Induktionserhitzung (*inductive heating*) (IE)

Unter *Inductive-heating* (IH) versteht man Erhitzen mittels elektromagnetischer Induktion.

#### Prinzip

Unterhalb der Kochplatten ist eine Drahtspule angeordnet durch welche elektrischer Strom geleitet wird. Die Spule ist damit ein starker, hochfrequenter Elektromagnet. Wenn nun ein Behältnis aus einem magnetischen (z.B. eisenhaltigen) Material oberhalb von diesem Element positioniert wird, wird das starke elektrische Feld des Elektromagneten auf dieses Behältnis und in weiterer Folge in das darin befindliche Lebensmittel transferiert. Die durch das Gut aufgenommene, elektrische Energie wird in Wärme umgewandelt ( $\Rightarrow$  dissipiert), wodurch sich das Lebensmittel erhitzt. Die kontrollierbare Stärke des Magnetfelds bestimmt letztlich die Erhitzungsrate. Über mögliche Nebeneffekte zusätzlich zur Erhitzung, die mikrobiologische Inaktivierungskinetik der Methode, Veränderungen in Lebensmittelinhaltsstoffen etc. sind derzeit kaum wissenschaftliche Publikationen und damit Daten zu erhalten.

#### Nutzungsrelevanz und derzeitige Nutzung

Nichtsdestotrotz befindet sich die IH in Gastronomie und Haushalten als Alternative zu Gas- und herkömmlichen Elektroherden in regem Einsatz. Folgende bedeutendste Vorteile wurden gegenüber den herkömmlichen Systemen angeführt:

- Raschere, effizientere Erhitzung: Im Gegensatz zu Gas/Elektroherdplatten, wird nicht die ganze vorgesehene Kochfläche erhitzt, sondern nur spezifisch das Behältnis bzw. das darin befindliche Gut. Zudem lässt sich das Magnetfeld ohne Verzögerung ein- und ausschalten. Hersteller beziffern die tatsächlich genutzte „Kochenergie“ der eingebrachten Energie für die IH mit etwa 84% im Vergleich zu 40% für Gasherde.
- Kühlere Küche, keine Verbrennungsgefahr am Kochtopf und an der Herdplatte: Dadurch, dass sich die Platte nicht und der Topf nur geringfügig aufheizen, bleibt die Küche kühler, Verbrennungen an der Platte sind ausgeschlossen.

Geworben wird weiter mit dem Schlagwort des „*zoneless*“ cooking. Das bedeutet, dass man eine große Oberfläche mit Behältnissen unterschiedlichster Anzahl, Größe, Form und Orientierung nutzen kann, und damit an Flexibilität gegenüber einer vorgegebener Anzahl und Größe bei herkömmlichen Kochflächen gewinnt. Da sich lediglich die Behältnisse (nicht jedoch die Flächen dazwischen) erhitzen, verliert man durch große Freiflächen bei dieser Methode keine Energie.

Neben typischen Kochplatten werden auch beispielsweise Pizzawarmhaltetaschen bereits mit IH-Systemen ausgestattet (Firma Cooktek), auch IH-Öfen sind bereits kommerziell erhältlich (Abb. 4.2.11).



Abb. 4.2.11: von links nach rechts: spezifische Erhitzung des magnetischen Behältnisses, Pizzawarmhaltebags auf IH-Basis der Firma Cooktek, Induktionsherd der Firma Samsung (Cooktek, 2014; Samsung, 2015)



### Mögliche Risiken

Die Methode an sich und damit auch die mit ihr einhergehenden Risiken wurden bislang kaum wissenschaftlich untersucht. Kritiker befürchten eine Gesundheitsgefährdung der Anwender durch das starke elektromagnetische Feld. Diesbezüglich gibt es einen Grenzwert der ICNIRP (*International Commission on non-ionising radiation protection*) von 6,25  $\mu\text{T}$  (Microtesla- Maß für die magnetische Feldstärke), wofür man einen Abstand von 30 cm von der Herdplatte einhalten müsste. Kritisiert wird nun, dass dieser Mindestabstand von unkundigen Hobbyköchen normalerweise nicht eingehalten wird, was für Schwangere, Stillende und Kinder problematisch sein könnte. Letztlich ist diese Diskussion mit derjenigen um eine mögliche Gesundheitsgefährdung durch Starkstrommasten in der Nähe von Wohngebieten ident.

### Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz

Induktionsöfen sind bereits seit längerer Zeit in den Küchen eine Realität. Zur breiten Akzeptanz trägt wohl u.a. die Tatsache bei, dass „nur der Topf“ erhitzt wird, das Lebensmittel aber mit dem „Wirkungsprinzip nicht in Berührung kommt“.

## 2.8.1.10. Ohm'sche Erhitzung (*ohmic heating*) (OH)

Ohm'sche Erhitzung (OH) ist eine Möglichkeit, Lebensmittel durch Durchleitung von elektrischem Strom rasch zu Erhitzen (Kochen, Pasteurisieren, Sterilisieren, Trocknen, Auftauen), sowie Fermentations- und Extraktionsprozesse zu beschleunigen.

### Prinzip

Elektrischer Strom wird direkt durch das Lebensmittel geleitet, wodurch im Lebensmittel Hitze generiert wird. Meistens werden dabei Frequenzen von 50 – 60 Hz und Spannungen zwischen 20 und 50 V/cm genutzt. Im Gegensatz zu *radio-frequency* Erhitzung ist direkter Elektrodenkontakt erforderlich. Gerätetechnisch wird zwischen statischen und Durchflussanlagen differenziert. Die bedeutendsten Elektrodenmaterialien sind (rostfreier) Stahl, Aluminium und Titan. Bei Durchflussanlagen ist daneben noch in der Elektrodenanordnung zu unterscheiden.

Großer Vorteil der Ohm'schen Erhitzung sind die erzielbaren hohen gleichmäßigen Aufheizraten, welche sich vor allem aus der sogenannten „volumetrischen Erhitzung“ ergeben: Die Wärme wird im Lebensmittel selbst generiert und muss demnach nicht – wie bei herkömmlicher konduktiver oder konvektiver Erhitzung – von den Randschichten ins Innere geleitet werden. Letzteres führt bei herkömmlichen Prozessen oft zu Überhitzung der äußeren Schichten mit allen daraus resultierenden Qualitätseinbußen, was bei OH entfällt.

Der einflussreichste Parameter für alle Anwendungen ist das Ausmaß der Erhitzung, die sich von gewöhnlichen Erhitzungsverfahren nur in der Art der Entstehung unterscheidet. Es wurde jedoch festgestellt, dass bei identer Temperatur eine OH-Behandlung eine etwas höhere Keimreduktion gegenüber der herkömmlichen Hitzebehandlung ergibt, was auf einen zusätzlichen nicht-thermischen Effekt hinweist (z.B. Somavat et al., 2013). Hypothesen hierzu besagen, dass in Dekontaminationsapplikationen neben der generierten Hitze die Elektroporation von Keimen eine Rolle spielt. Als möglicher Hintergrund wurde die im Gegensatz zu Mikrowellen und Radiofrequenzbehandlung geringere Frequenz ( $\sim 50$  Hz) verantwortlich gemacht. Die geringe Frequenz soll dabei die Aufladung der Zellwände und die anschließende Porenbildung in diesen ermöglichen, wofür bei hoher Frequenz die Zeit zwischen den Ladungswechseln nicht ausreichen würde.

## Effekte und Nutzungsrelevanz

Bei der OH handelt es sich um ein volumetrisches Verfahren mit dem methodischen Vorteil der homogeneren und schnelleren Erhitzung verglichen mit „klassischen“ Erhitzungsverfahren, zumal Wärmeverluste an den Phasengrenzen bei heterogenen Lebensmitteln weitgehend entfallen. So konnte beispielsweise durch eine OH-Vortrocknung von Tomatenmark von 90 auf 70 % Feuchtigkeit die Trocknungszeit um beachtliche 80 – 97 % gegenüber einer Heißlufttrocknung reduziert werden (Hosainpour et al., 2014). Bei der Milchpasteurisation wurde die Behandlungszeit gegenüber herkömmlicher Pasteurisation um 18 % reduziert (Shivmurti et al., 2014). Versuche zur Abtötung von *Alicyclobacillus acidoterrestris*-Sporen in Orangensaft ergaben für alle untersuchten Temperaturen (70, 80 und 90° C) eine raschere und effizientere Abtötung für OH-behandelte Proben (58, 12 und 6 min) gegenüber den Referenzproben (83, 15 und 8 min) (Baysal & Icier, 2010).

Die kürzere Prozesszeit geht dabei tendenziell mit einer Verbesserung des Qualitätserhalts einher. Eine vergleichende Studie zwischen OH-, Mikrowellen- und IR-Behandlung, sowie konventioneller Pasteurisation von Orangensaft ergab für alle beobachteten Temperaturen den besten Vitamin-C Erhalt für OH (Vikram et al., 2005). Die Ergebnisse von Demirdöven & Baysal (2012) bestätigen einen geringfügig höheren Vitamin-C-Gehalt in Orangensaft für OH gegenüber klassischer Pasteurisation. Für mittels OH sterilisierte und anschließend aseptisch verpackte Marillen n Sauce wurde über die Lagerdauer von 52 Wochen ein zufriedenstellendes mikrobiologisches Ergebnis und eine den frischen Früchten ähnliche Qualität erzielt. Der Vitamin--Gehalt sank dabei unter der Behandlung von ursprünglich 50 auf etwa 35 mg/100 g, wobei dieses Niveau über die gesamte Lagerdauer gehalten wurde (Pataro et al., 2011). Am Modell Acerola-Mus wurde kein signifikanter Unterschied in der Anthocyanabbaukinetik zwischen OH- und herkömmlicher Erhitzung beobachtet (Mercali et al., 2011). Ebenso wiesen OH- und herkömmlich pasteurisierte Granatapfelsäfte keine signifikanten Unterschiede in Rheologie, Farbe und Phenolgehalt auf (Yildiz et al., 2009). Der  $\beta$ -Carotingehalt in mittels OH-, Mikrowellen und konventioneller Wasserbadbehandlung blanchierten Karotten unterschied sich ebenfalls unwesentlich zwischen den Methoden (Lemmens et al., 2009).

Für Fleischprodukte zeigen Studien für OH gegenüber einer konventionellen Erhitzung einerseits einen geringeren Saftaustritt/Kochverlust, homogenere Mikrostruktur und festere Textur, andererseits hellere Farbe und das Ausbleiben der für viele Produkte erwünschten Krustenbildung (z.B. Bozkurt & Izier, 2010; Yildiriz-Turp et al., 2013; Engchuan et al., 2014; Zell et al., 2012). Letzteres ist auf die Hitzegenerierung im Produkt (volumetrische Erhitzung) zurückzuführen, also sozusagen die Negativseite der homogenen Erhitzung.

Die Enzyminaktivierung (Alkalische Phosphatase, Pectinmethylesterase und Peroxidase) in Milch, Frucht- und Gemüsesäften durch OH entspricht etwa derjenigen der konventionellen Hitzebehandlung. Lediglich für Karottensaft zeigte sich für OH eine höhere Peroxidaseinaktivierungsfähigkeit (Jakob et al., 2010).

Analog zu Garung und Dekontamination wird durch OH auch der Tauvorgang bei niedrigerem Tauverlust deutlich gegenüber dem herkömmlichen Tauen beschleunigt, was sich insbesondere für größere Fleischstücke positiv bemerkbar macht (Bozkurt & Izier, 2009).

Eine OH unterstützte Hydrodestillation zur Extraktion der essentiellen Öle aus Thymian wurde ebenfalls klar beschleunigt (Gavahian et al., 2011). Eine solche Behandlung vor der Lösungsmittelextraktion von Reisöl führte zu einer Reduktion der Extraktionszeit um 70 – 75 % bei vergleichbarer Qualität und Ausbeute (Nair et al., 2012). Die OH-Behandlung von Reisstärke und -mehlen resultierte in Produkten mit niedrigeren Verkleisterungstemperaturen, verbesserter Kochstabilität und geringerer Retrogradationstendenz (An & King, 2006). Als Alternative zur Pasteurisation von Milch in herkömmlichen Wärmetauschern bietet OH den Vorteil geringerer Ablagerungen in den

Apparaten und damit verbundener einfacherer Reinigung und eines geringeren Energieaufwandes (Ayadi et al., 2003).

### Derzeitiger praktischer Einsatz

Ohm'sche Erhitzung wird bereits seit vielen Jahren weltweit zur Dekontamination von Fruchtzubereitungen in großem Umfang genutzt; darüber hinaus zur Pasteurisation von Joghurt in Japan, sowie zur Behandlung von Flüssigei und einigen Convenienceprodukten in den USA (Ruan et al., 2001). Kommerzielle Anlagen werden beispielsweise von den Firmen APV Baker (UK) (Abb. 4.2.12) und Raztek Corp (USA) vertrieben. Da aber noch beachtlicher Forschungsbedarf besteht, ist die weitere Verbreitung jedoch noch eingeschränkt (siehe Forschungsbedarf). Des Weiteren ist die Anwendung derzeit auf Durchflusssysteme mit anschließender aseptischer Abfüllung begrenzt, weil die Möglichkeiten entsprechender *in-pack* Anwendungen gegenwärtig nicht erforscht sind. Die Notwendigkeit der Kombination mit einer aseptischen Abfüllung ist mit zusätzlichen Kosten und dem Risiko einer Rekontamination verbunden. Da aber die aseptische Abfüllung immer mehr im Kommen ist, wird auch die OH in Zukunft noch breitere Anwendung finden.

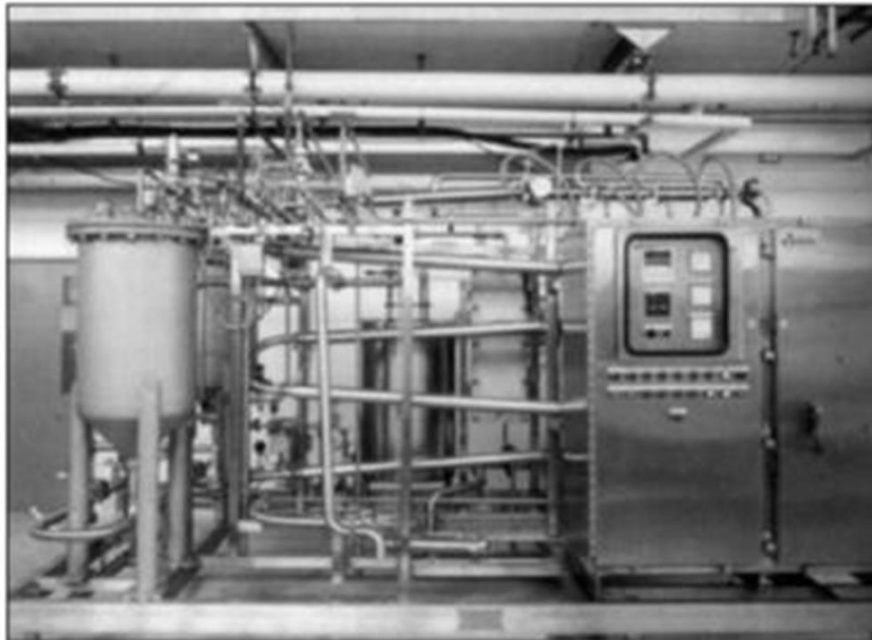


Abb. 4.2.12: OH-System APV Baker (UK)

### Kritische Parameter, Beschränkungen und Forschungsbedarf

Der erfolgsentscheidende Faktor bei der OH-Behandlung ist, wie bei allen Erhitzungsverfahren, die generierte Temperatur und insbesondere der Zeit/Temperaturverlauf im *cold-spot*, also dem „am schlechtesten zu erhitzenden Bereich“ des Lebensmittels. Dabei ist zu beachten, dass sich die Lokalisation von *cold-spots* unter OH nicht aus der Erfahrung mit klassischen Garverfahren ableiten lässt, da andere Faktoren mitspielen, wie:

- Leitfähigkeit der zu behandelnden Lebensmittelmatrix: Unbestritten ist, dass die Temperaturerhöhung durch OH der Leitfähigkeit des zu behandelnden Lebensmittels direkt proportional ist. Nun ist die Leitfähigkeit von Lebensmitteln an und für sich sehr verschieden. Äpfel weisen beispielsweise eine klar niedrigere Leitfähigkeit gegenüber anderen Früchten auf, was auf deren hohen Luftgehalt zurückgeführt wird (Sarang et al., 2008). Umgekehrt ergibt eine Erhöhung der Temperatur im Lebensmittel eine Erhöhung der Leitfähigkeit. Wenn nun

die Leitfähigkeit im gesamten Lebensmittel homogen ist, lassen sich auf dieser Basis sinnvolle Behandlungsparameter bestimmen. Problematisch wird es, wenn ein Lebensmittel eine in sich heterogene Leitfähigkeit aufweist. Dieser Fall kann in heterogenen Mischungen aus Sauce/Partikeln, wie Suppen und diversen anderen Convenienceprodukten durchaus auftreten, aber auch bereits durch die Verteilung der chemischen Zusammensetzung im Rohstoff selbst determiniert sein. Beispielsweise besitzt Fett eine deutlich geringere Leitfähigkeit als Muskelfleisch, was dazu führt, dass Fettansammlungen in Fleischstücken durch OH weniger rasch erhitzt werden (Sarang et al., 2008; Yildiriz-Turp et al., 2013). Auch für Eiscreme wurde die negative Korrelation zwischen Fettgehalt und Erhitzungsrate aufgezeigt (Icier & Tayman, 2006). Für die Pasteurisierung von Flüssigeiprodukten gilt, dass Eiweiß leitfähiger als Dotter und Vollei ist (Darvishi et al., 2012).

- Partikelart, -lokalisierung und -orientierung: Wie bereits erwähnt, haben Differenzen in der Leitfähigkeit zwischen Grundmatrix und diversen Partikeln eine bedeutende Rolle zur Gewährleistung einer homogenen Erhitzung und damit Auswirkung auf die Qualität und Lebensmittelsicherheit. In gewissem Umfang lassen sich Unterschiede (z.B. bei heterogenen Convenienceprodukten) durch Zugabe von Salzen zu einzelnen Bestandteilen ausgleichen (Sarang & Sastry, 2005). Zudem wurden Unterschiede in der Erhitzungskinetik der Einzelbestandteile in gerührten und statischen Systemen beobachtet. Ferner scheint die Orientierung der Partikel im elektrischen Feld Einfluss auf die Erhitzungseffizienz und -differenzen zu nehmen.
- Elektrische Feldstärke und Frequenz: Die Erhitzungsrate und damit die Dekontaminationseffizienz ist der angelegten elektrischen Feldstärke direkt proportional (z.B. Sastry & Paliappan, 1992; Darvishi et al., 2011; Lee et al., 2012). Daneben bestimmt auch die Frequenz die Effizienz der Methode. Eine hohe Frequenz (100 Hz bzw. sogar 1 kHz gegenüber der ursprünglich viel genutzten 50 – 60 Hz) bewirkt dabei geringere Ablagerungen und Korrosionen an den Elektroden. Das führt zu längerer Haltbarkeit, geringerem Reinigungsaufwand, verbesserter Wärmeübertragung und damit zu einer verbesserten Energieeffizienz und geringerem Gesundheitsrisiko durch Absenkung der Migration des Elektrodenmaterials in die Lebensmittel (z.B. Wang & Farid, 2015, Lee et al., 2013, Wang et al., 2012). Auch eine erhöhte Erhitzungsrate wurde unter Erhöhung der Frequenz beobachtet (Lee et al., 2013). In einer Studie zur Untersuchung des Einflusses der Frequenzen (50 Hz bis 1 MHz) auf die Qualität von Pfirsichen wurde eine höhere Frequenz als vorteilhaft für den Erhalt der Gewebestruktur identifiziert (Shynkaryk et al., 2010).
- Elektrodenmaterial, -dicke und -anordnung: Ein wesentlicher Grund dafür, dass sich OH in seinen Anfängen nicht durchgesetzt hat, war die Korrosion des Elektrodenmaterials und die nachgewiesene Migration von Elektrodenmaterialien in die Lebensmittel. Die Identifizierung geeigneterer Materialien, Elektrodendimensionierungen, -isolierungen und die Maßnahme mit erhöhter Frequenz zu arbeiten, um die Korrosion gering zu halten, macht OH wieder interessant. Es bestehen in diesem Zusammenhang deutliche Unterschiede in der Erhitzungsrate zwischen den Elektrodenmaterialien. Ein geringer Elektrodendurchmesser sowie höhere Frequenzen sollen grundsätzlich vorteilhaft sein (Lee et al., 2013). Für die Milchpasteurisation wurden verringerte Materialablagerungen für Elektroden aus Graphit gegenüber Elektroden aus rostfreiem Stahl beobachtet (Stanel & Zitny, 2010). In mit gepulstem OH durch Elektroden aus rostfreiem Stahl behandelten Mahlzeiten soll der Gehalt an Metallionen, die aus Elektroden migrieren, jedenfalls nicht höher als in konventionell sterilisierten Kontrollen sein (Jun et al., 2007). Eine weitere Möglichkeit, die Problematik der Elektrodenmaterialkorrosion zu umgehen, ist die Ausführung als Hochfrequenzerhitzung. Dabei werden nicht, wie beim „herkömmlichen“ OH geringe, sondern hohe Frequenzen (Mikrowellenbereich) genutzt. Damit ist die Durchdringung größer und ein direkter Elektro-

denkontakt unnötig. Die Elektroden können beispielsweise an der Außenseite der Durchflussrohre lokalisiert sein.

Sehr ähnliche Lebensmittel können durch diese vielen Einflussparameter durchaus sehr unterschiedliche Erhitzungsverläufe unter OH aufweisen, wie für Orangensaft und Tomatensaft gezeigt wurde (Lee et al., 2012). Dabei wurde in Tomatensaft die Keimzahl von *E.coli* bei einer Feldstärke von 25 V/cm innerhalb von 30 s um 5 log reduziert, wohingegen für denselben Effekt in Orangensaft 30 V/cm eine Dauer von 60 s notwendig war.

Zusammenfassend ergibt sich noch ein erheblicher Forschungsbedarf in der Überwachung (z.B. Crattelet et al., 2013) und der mathematischen Simulation und Modellierung der Behandlungsparameter in Kombination mit den jeweiligen Lebensmittels.

### **Mögliche Risiken**

- Migration von Elektrodenmaterial in die Lebensmittel: Wenngleich es mittlerweile Ansätze zur Vermeidung der Elektrodenkorrosion gibt, ist darauf weiterhin Augenmerk zu legen (Dauer des Einsatzes etc.).
- Gewährleistung ausreichender Dekontamination: Zur Garantie der hygienischen Sicherheit besteht vor dem Hintergrund der komplexen Zusammenwirkung der vorhergehend beschriebenen Parameter grundsätzlich noch Forschungsbedarf. Besonders relevant ist das in Bezug auf hochpathogene Mikroorganismen. Mögliche subletale Schädigungen sind hier in Betracht zu ziehen.
- Risiko durch eine mögliche Elektrolyse (Wasserzerlegung): Grundsätzlich kann eine Durchleitung von Strom durch ein Lebensmittel zur Zerlegung des lebensmitteleigenen Wassers führen, wobei Wasserstoff und Sauerstoff entstehen. Genau das ist das Ziel der Wasserelektrolyse zur Gewinnung von Wasserstoff. Diese mögliche Problematik gilt für OH als untersucht und wird in der wissenschaftlichen Literatur nicht thematisiert, die Möglichkeit der Weiterreaktion von entstehenden Sauerstoffradikalen für Kaltplasma (siehe Kap. 2.8.1.11) dagegen schon. Im Grunde entsteht eine Art elektrolysiertes Wasser (siehe Kap. 2.8.1.12), das sich im Allgemeinen innerhalb einer gewissen Zeitspanne wieder in seinen Ursprungszustand zurückentwickelt.

### **Kombinationen**

In wenigen Einzelstudien wurden folgende synergistische Effekte mit anderen Technologien festgestellt:

- Druckunterstütztes ohmic-heating (POTS): OH in Kombination mit Hochdruck (500 MPa) erwies sich in Versuchen zur Sterilisation von Gemüse bezüglich des Texturerhalts für eine optimale Knackigkeit der OH-Einzelbehandlung leicht überlegen (Park et al., 2014).
- Pulsed ohmic-heating: Wie bereits im Zusammenhang mit der Bedeutung der Wahl des Elektrodenmaterials erwähnt, lässt sich durch Anwendung von OH im gepulsten Modus die Elektrodenkorrosion senken (z.B. Samaranayake et al., 2005).
- Mikrowellen/OH: Die Kombination MW/OH zeigte Potential zur Verringerung der Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Komponenten innerhalb eines heterogenen Lebensmittels (Nguyen et al., 2013).

### **Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz**

Für OH wird argumentiert, dass es bereits vor 1995 im Einsatz war und demnach grundsätzlich nicht unter die *Novel Food*-Verordnung fällt. Erforderlich wäre eine diesbezügliche Evaluierung für

Produkte, die sich wesentlich von herkömmlich erhitzten unterscheiden. Das ist weder aufgrund der Methodik noch aus Kenntnis der bislang hergestellten Produkte zu erwarten.

OH ist dem Durchschnittsverbraucher momentan kein Begriff, weil es weder in den einschlägigen Medien kursiert noch gekennzeichnet werden muss. Bei Erklärung könnte es vom Konsumenten ähnlich dem bekannteren induktiven Erhitzen eingeordnet werden, aber auch Angst vor mit Elektrizität behandelten Lebensmitteln hervorrufen.

### 2.8.1.11. Kaltplasma (*cold plasma* - CP)

Kaltplasma (CP) verspricht im Lebensmittelbereich Anwendungsmöglichkeiten zur Modifizierung und Entkeimung von Verpackungsmaterialien, sowie zur Oberflächendekontamination von Lebensmitteln für die Haltbarkeitsverlängerung und Reduktion von pathogenen Keimen.

#### Prinzip

Plasma ist grundsätzlich bekannt als der 4. Zustand der Materie (neben fest, flüssig und gasförmig), welcher 99% des Weltalls ausmacht, aber auch in Blitzen, Energiesparlampen und PlasmaTV-Geräten vorkommt. Plasma entsteht durch Energiezufuhr zu einem Gas, wodurch dieses in seine Einzelbestandteile „zerlegt“ wird. Es entsteht ein Mix aus freien Elektronen, Ionen und vielen anderen geladenen und/oder hochreaktiven Teilchen wie Ozon, Singulett-Sauerstoff, Stickoxiden, Hydrogenperoxiden etc. und UV-Strahlung. Die detaillierte letale Wirkung bzw. der Beitrag der einzelnen „Teile“ des Plasmas dazu ist nicht vollständig entschlüsselt. Eine „Ätzwirkung“ durch die hochreaktiven Teilchen, ein Zusammenbruch des Membranpotentials durch die Ladungsträger (Elektroporation ähnlich PEF) und die bekannte Dimerbindung in der DNA durch UV-Strahlung (siehe Kapitel 2.8.1.4.) werden als Hypothese genannt.

Plasmen im Weltall sind thermische Plasmen, die dadurch definiert sind, dass ausreichend Energie zugeführt wurde, um das Gas in seiner Gesamtheit zu ionisieren, womit alle Teile des Plasmas extrem hohe Temperaturen (etwa 5.000 – 6.000° C) aufweisen. Im Gegensatz dazu ist das erst seit den 1990er Jahren als solches erkannte, bei Atmosphärendruck erzeugbare, nichtthermische oder „Kaltplasma“ nur teilweise ionisiert. Das bedeutet, dass lediglich die winzigen Elektronen des Plasmas in Bewegung versetzt und dabei einige Tausend Grad heiß werden, wohingegen größere Teilchen unbeeinflusst bleiben. Die Gesamtheit des Gases behält dabei annähernd Raumtemperatur, eine Wirkung ist aber durch die in Kettenionisierungsreaktionen entstehenden reaktiven Teilchen dennoch gegeben. Die Energiezufuhr zur Plasmaerzeugung kann in Form von Hitze, Elektrizität oder Strahlung (u.a. Mikrowellen und *radio-frequency*-Strahlung) erfolgen. Für Anwendungen in Medizin- und Lebensmittelbereich sind folgende Plasmaerzeugungsarten gängig:

- Dielektrisch behinderte Entladung (DBD) (= Entladung zwischen zwei durch eine Isolierschicht getrennte Elektroden);
- *radio-frequency*-Strahlung;
- Korona-Entladung (= „kranzförmige“ Entladung an einer Elektrodenspitze Richtung einer langgestreckten Elektrodenplatte)
- und der am meisten verwendete Plasmajet (= Entladung zwischen zwei konzentrischen Elektroden, wobei die innere häufig an eine RF-Quelle gekoppelt ist.). Das generierte Plasma wird zur Spitze des Jets beschleunigt (siehe Abb. 4.2.14).

Als Trägergase, welche durch Energiezufuhr letztlich zu entsprechenden Plasmen werden, sind im Wesentlichen Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Helium und Argon, sowie deren Mischungen in Verwendung.

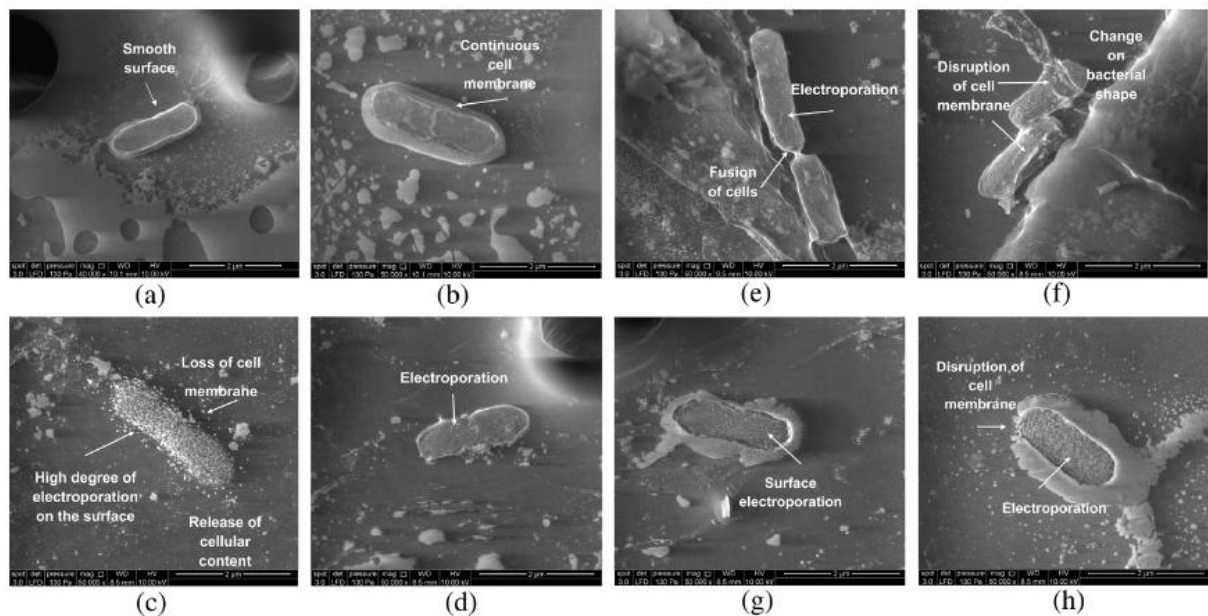


Abb. 4.2.13: Diverse inaktivierende Effekte von Kaltplasma auf *E.coli*-Zellen (a und b-Kontrolle, c-h: diverse Auswirkungen einer Behandlung mit CP für 10 min, 12,83 kV) (Bermudez-Aguirre et al., 2013)

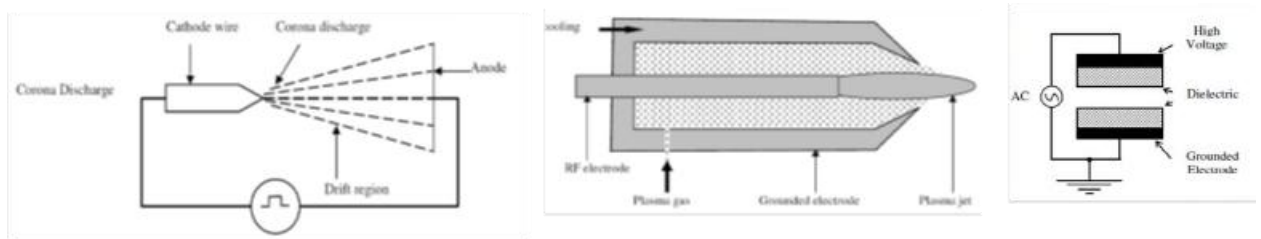


Abb. 4.2.14: Diverse Arten zur Erzeugung von Kaltplasma (von links nach rechts: Korona-Entladung, Plasmajet, dielektrisch behinderte Entladung (Sarghini, 2013)

### Nutzungsrelevanz und Einsatzmöglichkeiten

Die bedeutendste Anwendung von Kaltplasma ist die Abtötung von Keimen auf thermolabilen Oberflächen. Im Medizinbereich wurden CP-Plasma-Pens zur Keimabtötung hartnäckiger, antibiotikaresistenter Keime in chronischen Wunden entwickelt. Für die Handdesinfektion von Krankenhauspersonal sind Plasmaanwendungen erforscht. Zudem wurden Plasmadeos zum Abtöten der schweißbildenden Bakterien und Anti-Pickelanwendungen etc. getestet. Im Lebensmittelbereich führt CP zu Haltbarkeitsverlängerung durch Abtötung von Verderbniserregern und Bräunungsreaktionen- und *off-flavour* induzierenden Enzymen sowie zur Gewährleistung der Lebensmittelsicherheit durch Abtötung von pathogenen Mikroorganismen. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Entkeimungsverfahren sind u.a. die qualitätsschonende, nicht-thermische und rasche (Sekunden bis Minuten) rückstandsfreie Prozessierung.

In zahlreichen wissenschaftlichen Studien wurden vielversprechende Mikroorganismen - Inaktivierungsraten aufgezeigt: Innerhalb von 60 s konnte *E. coli* auf Salat, Gurke, Apfel und Tomate gleichermaßen zuverlässig (um 4,1/4,7/4,7 bzw. 3,3 log) reduziert werden (Baier et al., 2014).

Die Möglichkeit zur Salatentkeimung ohne Qualitätsverluste wurde ebenso durch Jahid (2015) bestätigt. Für die äußerst Verderb anfälligen, in Thailand verbreiteten Riegel aus braunem Reis konnte die Haltbarkeit durch 20-minütige Plasmabehandlung von 5 Tagen auf 20 Tage bei Raumtemperatur erhöht werden, wobei das Wachstum des maßgeblichen Schimmelpilzes *Aspergillus flavus* klar verzögert wurde (Suem et al., 2013). CP mit dem Hauptzweck der Mehilentkeimung resultierte in verbesserten allgemeinen Teigeigenschaften, u.a. in einer erhöhten Viskoelastizität der aus dem behandelten Mehl bereiteten Teige. Als möglicher Hintergrund wurde die bewiesene Verringerung von  $\alpha$ -Helices bei gleichzeitiger Erhöhung der  $\beta$ -Faltblätter in der sekundären Proteinstruktur des Gluten identifiziert (Misra et al., 2015).

Die Inaktivierung der die Haltbarkeit verringernden Enzyme Peroxidase (POD) und Polyphenoloxylase (PPO) gelang innerhalb von 180 s um 90% für PPO, und innerhalb von 240 s zu 85% für POD (Surowsky et al., 2013). Bei verpackten Tomaten konnte POD ebenfalls zerstört werden (Pankaj et al., 2013).

Der Vergleich diverser, oberflächenwirksamer Entkeimungsverfahren weist auf eine relativ hohe Universalität der Plasmaanwendung hin. Im Vergleich zwischen Ultraschall, UV-C-Strahlung, Zitronensäure-, Malonsäure- und Chlorbehandlung zeigte CP gleichauf mit UV-C die besten Inaktivierungsergebnisse für Listerien auf Salat und Kohl (Srey et al., 2014). Selbiges wurde für die universelle Wirkung auf Bakterienporen zweier Bacillusarten, sowie *G.stearothermophilus* in einer vergleichenden Studie mit Hitze, Hydrogenperoxid, Hypochlorit, UV, Stickstoff und Stickstoff-CP untermauert. Dabei war die CP die einzige Methode, die insignifikante Unterschiede in den Inaktivierungsraten der drei Testsporen zeigte (Bockhorst van den Veen et al., 2015).

Wenngleich Plasma methodisch als Oberflächendekontaminationsverfahren gilt, wurde auch seine Wirkung in flüssigen Medien belegt. In Apfelsaft konnte *Citrobacter freundii* um die durch die FDA geforderten 5 log innerhalb von 7 min. mittels Argonplasma (0,1% O<sub>2</sub>-Zusatz) inaktiviert werden, was die Autoren u.a. auf die Bildung von Wasserstoffperoxid und Hydroxyperoxidradikalen zurückführten (Surowsky et al., 2014). Als alternative Milchpasteurisationsmethode könnte sich Plasma ebenfalls eignen. Es konnte eine Absenkung der Gesamtkeimzahl von 7,78 log um 3,63 log unter 20-minütiger Behandlung ohne signifikante Qualitäts-Farb- und pH-Änderung gezeigt werden (Gurol et al., 2012).

Mittlerweile wurde auch die Anwendung von Kaltplasmen für verpackte Lebensmittel (= *inpack*-Anwendung) erschlossen. Das bietet den Vorteil, dass eine üblicherweise an Sterilisationsmaßnahmen anschließende, zeit- und kostenaufwendige, aseptische Abfüllung entfallen kann. So konnten etwa Cherrytomaten *inpack* ohne signifikante Qualitätseinbußen mit CP behandelt werden (Misra et al., 2014). Die Eignung gängiger Verpackungsmaterialien wird momentan getestet, wobei sich auf biologisch abbaubarem Casein und Zein basierende Folien bereits als plasmastabil erwiesen haben. Für Caseinfilme wurde eine erhöhte Oberflächenrauheit und gesteigerte Hydrophilie bei gleichbleibender Wasserdampf- und Sauerstoffdurchlässigkeit beobachtet (Pankaj et al., 2014) (Abb. 4.2.16).





Abb. 4.2.15: Plasmaanwendungen (Von links nach rechts: Plasma-Pen zur Wundheilung der Firma neoplas; Plasmajet auf Lebensmitteln; CP-inpack-Anwendung) (neoplas tools GmbH, 2011; ATB, 2011; Astley, 2011)

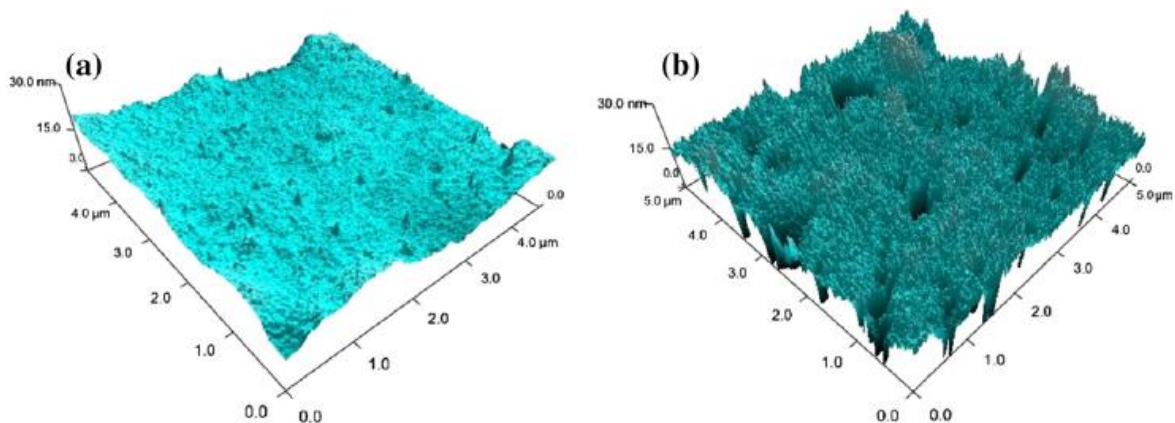


Abb. 4.2.16: Strukturmodifizierung einer Caseinverpackung nach CP-Behandlung (Pankaj et al., 2014)

Ein weiterer Anwendungszweck von Kaltplasmen ist die Behandlung von Verpackungsmaterialien. Damit können diese nicht nur vor Gebrauch entkeimt, sondern auch in ihrer Struktur modifiziert werden. Konkret lässt sich mittels CP die Bedruckbarkeit verbessern, die Gasdurchlässigkeit regeln (z.B. Ankopplung von Siliciumoxidbeschichtung durch Plasma), sowie die chemische und mikrobiologische Sicherheit, z.B. durch Aufbringen antimikrobieller Gruppen mittels Reaktion im Plasma, erhöhen (siehe dazu Teil 5 – Lebensmittelverpackung und -kennzeichnung).

#### Kritische Parameter und Beschränkungen

Unbestritten ist eine Effizienzsteigerung mit steigender Plasma-Behandlungsdauer, erhöhtem Energieeintrag und sinkendem Abstand des Lebensmittels zur Plasmaquelle. Folgende, bislang identifizierte Einflüsse sind noch Gegenstand der Forschung:

- **Art des Trägergases:** Die Art des Trägergases bestimmt wesentlich die Zusammensetzung des entstehenden Plasmas. In einer vergleichenden Studie mit Erdbeeren unter Behandlung mit Plasmen unterschiedlicher Trägergasgemische (*high oxygen*: 65% O<sub>2</sub>, 16% N<sub>2</sub> und 19% CO<sub>2</sub>; *low oxygen*: 90% N<sub>2</sub> und 10% O<sub>2</sub>) wurden ein höherer Qualitätserhalt, höhere Festigkeit und eine erhöhte Atmungsrate für die *high-oxygen*-Variante bei vergleichbarer MO-Inaktivierung beobachtet (Misra et al., 2014). In mit reinem Stickstoff Argon- bzw. Heliumplasma behandeltem Fleisch wurde mit Helium eine Inaktivierung psychotroper Bakterien von 3 log, und mit Argon von etwa 2 log erzielt, während mit stickstoffbasiertem Plasma die Wirkung auf oberflächlich inokulierte psychotrope MO völlig ausblieb (Ulbin-

Figlewic et al., 2013). Weiter lassen sich *Bacillus subtilis* Sporen durch Plasmen mit geringem UV-Anteil nur unzureichend inaktivieren (SKLM, 2012). Luftplasma erwies sich gegenüber N<sub>2</sub>-Plasma zur Inaktivierung von *E.coli* auf Mandeln als überlegen (Niemira, 2012). Die Inaktivierung von *Listeria innocua* scheint mit einem gewissen Sauerstoffanteil im Gas erfolgreicher (Noriega et al., 2011).

- **Eigenschaften der zu behandelnden Lebensmittel:** Während in einigen Versuchen die Inaktivierungsraten auf diversen Matrices keine wesentlichen Unterschiede aufwiesen, gibt es dazu auch ebenso viele Gegenstudien. Bei identen Behandlungsparametern konnten die Ausgangskeimzahlen der pathogenen Bakterien *Salmonella* (3,5 log), *E. coli* (6,3 log) und *Listeria monocytogenes* (6,7 log) auf Tomaten innerhalb von 10 bis 120 min unter die Nachweisgrenze gesenkt werden, wohingegen für Erdbeeren eine auf 300 s erhöhte Behandlungszeit lediglich eine Absenkung um 3,5 bzw. 3,8 bzw. 4,2 log ergab (Ziuzina et al., 2014). Identische CP-Bedingungen führten unter 15-minütiger CP-Behandlung zur Verringerung von *Listeria monocytogenes* von 2,72 log für Salat, geringeren 1,76 log für Erdbeeren und stark verringerten 0,91 log für Kartoffeln (Fernandez et al., 2015). In identem Argonplasma zeigte sich eine Keiminaktivierungseffizienz in der Reihenfolge Tomate > Salat > Karotte (Bermudez-Aguirre et al., 2013). Optimierte CP-Bedingungen resultierten bei der Behandlung von enthäutetem Hühnerfleisch in einer ~3 log Listerienreduktion innerhalb von 4 min, währenddessen sich Hühnerhaut mit einer log-Reduktion von lediglich ~1 nach 8-minütiger Behandlung als deutlich resistenter gegenüber CP erwies (Noriega et al., 2011). Außerdem gibt es Hinweise darauf, dass für den Erhalt der produktspezifischen Qualitätseigenschaften die Art des Lebensmittels ebenfalls eine Rolle spielt. Während für Fleisch und Salat (z.B. Ulbin-Figlewic et al., 2013, Jahid et al., 2015) keine wesentlichen Änderungen in Festigkeit und Farbe festgestellt wurden, ergab eine Studie bei Heidelbeeren eine geringere Festigkeit und verringerten Anthocyangehalt und damit einhergehend, einen schlechteren Farberhalt (Lacombe et al., 2015). Die Vergleichbarkeit solcher Einzelstudien ist jedoch durch Unterschiede in der Versuchsanordnung nur bedingt gegeben. Eine vergleichende Studie zur Dekontamination von Kräutern und Gewürzen ergab bei identen Bedingungen für alle getesteten Korngrößen für roten Paprika einen deutlichen Farbverlust, wohingegen die Farbe für schwarzen Pfeffer sowie Oregano unbeeinflusst blieb (Hertwig et al., 2015). Eine gewisse Plasmasensibilität für rötliche Pflanzenfarbstoffe könnte demnach gegeben sein.

### Derzeitiger praktischer Einsatz

Der Einsatz der Kaltplasmatechnologie gilt gegenwärtig im Lebensmittelbereich als nicht marktreif. Das ist vor allem darin begründet, dass die optimalen Anwendungsparameter noch nicht gefunden und die Gewährleistung von zuverlässigen, reproduzierbaren Behandlungsergebnisse noch nicht gegeben sind (Stellungnahme SKLM, 2012). Die Gerätetechnik ist nicht ausgereift und nicht *in-line*-fähig. Das Interesse der Industrie ist allerdings als relativ hoch einzustufen, was in der Anzahl an beteiligten Firmen in themenrelevanten Forschungsprojekten abzulesen ist. Laufende bzw. kürzlich abgeschlossene Großprojekte (vor allem auf EU-Ebene) sind beispielsweise NOVEL-Q, SAFE-BAG, RECAPT, FriPLas und GreenFooDec, wobei im deutschsprachigen Raum das Leibniz-Institut für Agrartechnik („ATB“, Potsdam-Bornim, D), das Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie („INP“, Greifswald D), sowie das Max-Planck Institut für extraterrestrische Physik (Garching bei München, D) maßgeblich an der Erforschung von CP beteiligt sind.

### Mögliche Risiken, Konsumentenakzeptanz und rechtliche Aspekte

Die Tatsache, dass Plasmaanwendungen auch zur Wundheilung, also direkt am Menschen, genutzt werden, und die Eindringtiefe in Lebensmittel gering ist könnte auf ein geringes Risiko und eine hohe Akzeptanz hindeuten. Mediale Darstellungen, wie „aus der Raumfahrtforschung auf den Teller“, sollen insbesondere die Bewertung durch technikbegeisterte Personen positiv beeinflussen. Die mediale Präsenz der Entwicklung von Heimanwendungsplasmajets in der Größe einer

Taschenlampe zur Inaktivierung von EHEC (*E.coli* O104:H4) in heimischen Küchen (Max Plack Gesellschaft, 2011), könnte ebenfalls zu einem positiven Image beitragen.

Ein Risiko besteht derzeit noch in der Unkenntnis der Reaktionen in Plasmen, deren Auswirkungen, sowie der noch nicht steuerbaren Zeitspanne bis zur Rückentwicklung in den Ausgangsgaszustand. Da selbst die (Aus)Wirkungen von reinen Strahlungsmethoden (z.B. UV, RF), rein elektrischen (z.B. PEF) und rein chemischen Methoden noch unzureichend geklärt sind, ist das für diesen „Mix aus allem“ nicht besser. Der bisher einzige konkrete Hinweis auf mögliche nachteilige Wirkungen ist die Beeinflussung der Photosynthese durch CP (Schlüter, 2015).

Rechtlich ist die Einstufung der Kaltplasmabehandlung als neues Verfahren nach der Novel Food-Verordnung sehr wahrscheinlich. Das beruht darauf, dass die Bildung und Wirkung noch weitgehend unerforscht sind, aber entsprechende Stellungnahmen den hohen Forschungsbedarf vor allem bezüglich der oxidativen Veränderungen von Lebensmittelbestandteilen herausstreichen. Neben der Novel Food Verordnung könnte die VO über Lebensmittelkontaktmaterialien (siehe auch Teil 5) zur Anwendung kommen, da man dazu übergeht, die Anwendung von Plasma auch in der Verpackung (*in-pack*-Behandlung) zu erschließen. Dabei wird die Oberfläche von dem generierten Gas gestreift bzw. eine Art „Schutzgas aus Kaltplasma“ in der Verpackung integriert.

### 2.8.1.12. Aktiviertes, elektrolysiertes Wasser (*activated & electrolyzed water*)

Die Anwendung von teilweise elektrolysiertem Wasser dient zur Hygienisierung bis zur Desinfektion von Lebensmittelkontaktflächen und -materialien und Prozesswasser, sowie zur Senkung der Ausgangskeimzahl in diversen Lebensmitteln.

#### Prinzip

Wenn durch Wasser Gleichstrom geleitet wird, spaltet sich dieses in Wasserstoff und Sauerstoff auf. Dieser Vorgang wird als Elektrolyse bezeichnet. Im Wesentlichen gibt es zwei Stufen dieser Anwendung, die sich methodisch durch zusätzliche Nutzung/Nichtnutzung von NaCl und letztlich wesentlich in ihrer Wirkungseffizienz unterscheiden:

- Activated water: Hierbei wird dem Wasser eine geringe Menge an elektrischer Energie zugeführt, wobei durch Elektrolyse negativ und positiv geladene Wasserionen, sowie geladene Gasbläschen im Nanomaßstab entstehen. Diese geladenen Teilchen heften sich an Schmutzpartikel an, verleihen ihnen eine Ladung und erleichtern ihre Entfernung von Oberflächen durch nachfolgendes „Wegwischen“. Daneben werden Bakterien durch auftretende Elektroporation eliminiert. Dabei generiert das elektrisch geladene (meist aufgesprühte) Wasser Löcher in den Zellwänden der Bakterien, wodurch diese abgetötet werden. Laut Herstellern soll das aktivierte Wasser innerhalb von 30 – 45 s wieder in seinen ursprünglichen (ungeladenen) Zustand zurückkehren.
- Electrolyzed water (anolyte): Zur Herstellung von *electrolyzed water* wird – im Gegensatz zum *activated water* – nicht Wasser sondern eine verdünnte NaCl-Lösung durch eine Elektrolyseeinheit geschleust. Dabei entstehen Ionen, wobei die negativ geladenen Ionen (Chlorid bzw. Hydroxyd) zur Anode wandern und Gase (Sauerstoff und Chlor) und Hypochlorsäure entstehen. Diese Mischung, die durch ein hohes Redoxpotential (steuerbar, aber meist im Bereich zwischen 700 und 800 mV) und je nach Anwendungszweck einen mehr oder weniger geringen pH-Wert charakterisiert ist, nennt man auch Anolyt. Das hohe oxidative Potential öffnet bakterielle Zellwände, womit die geladene Lösung eintreten kann. Die eintretende Lösung führt letztlich zum Platzen der Zellen, wobei einerseits die Menge der eintretenden Flüssigkeit an sich aber auch osmotische Effekte eine Rolle spielen.

## Nutzungsrelevanz

Gegenüber der chemischen Desinfektion ist das wesentliche Einsatzargument der Verzicht auf chemische Zusätze mit allen daraus resultierenden Vorteilen, wie z.B. „keine Toxizität zu erwarten“, gutes Image, Einbettung in die „go green“-Nachhaltigkeitsstrategien („aus Wasser wird wieder Wasser“) und keine Entsorgungskosten. Die Anschaffungskosten der nötigen Elektrolyseeinheiten sollen sich laut Herstellern (Viking Pure’s) bereits nach einem Jahr amortisieren. Die Erzeugung vor Ort aus den günstigen, überall erhältlichen Rohstoffen Wasser und NaCl vermeidet weitere Transportkosten und Kosten für teurere Chemikalien.

## Einsatzgebiete

*Activated* und *electrolyzed water* ist eine japanische Erfindung und dort seit den 1980er Jahren im Einsatz. Auch in den USA sind Anlagen vor allem an Orten mit „frequently touched materials“, welche als Krankheitsüberträger bekannt sind, wie etwa in Großküchen, Kantinen, Spitälern, Kindergärten etc. zum Zweck der Oberflächendesinfektion bereits weit verbreitet. Für Applikationen in der Lebensmittelindustrie ist *electrolyzed water* derzeit noch Gegenstand der Forschung, wobei die Verringerung der Ausgangskeimzahl für mikrobiologisch besonders kritische Produktgruppen sinnvollerweise im Vordergrund steht:

- **Obst, Gemüse, Nüsse:** Das Tauchen von Datteln für 4 min. in 3 %-ige Anolytlösung konnte die Keimzahl an mesophilen Bakterien um 99,5% reduzieren, und Hefen/Schimmel vollständig eliminieren. Eine sensorische und chemische Analyse ergab keine signifikanten Unterschiede über sechs Monate nach dieser Behandlung (Bessi et al., 2014). Für Cherrytomaten wurde eine Reduktion der aeroben Bakterien um 1,45 log und der Hefen/Schimmel um 1 log bei simultaner Verzögerung der Atmungsrate und Inhibierung der Spaltung zu *total soluble solids* (TSS-also etwa Gewebszerstörung), bei unveränderter Textur, Säure- und Vitamin-C -Gehalt beobachtet (Ge et al., 2014). Analog konnte der Einsatz von *electrolyzed water* als Nacherntetechnologie in Kombination mit Ultraschall die Haltbarkeit von Ananas durch Verhinderung der Reifung von Fusariumsporen bei gleichbleibenden Produkteigenschaften verlängern (Khayankarn et al., 2013). Aflatoxin B1 (Toxin des *Aspergillus flavus*) wurde in kontaminierten Erdnüssen mittels *electrolyzed water* um 90% reduziert, wobei eine etwas hellere Farbe resultierte (Xiong et al., 2014). Die bislang angeführten Beispiele beschreiben die Oberflächendesinfektion intakter Früchte. In gewissem Rahmen eignet sich *electrolyzed water* auch zur stark nachgefragten Haltbarkeitsverlängerung von *fresh-cut*-Produkten durch Senkung der Ausgangskeimzahl um bis zu 2,6 log (HATI et al., 2012). *E. coli* und *Salmonella enteritidis* konnten um je 2,6 log auf *fresh-cut* Brokkoli reduziert werden, was einen ähnlichen Effekt wie eine Peroxyessigsäurebehandlung entsprach (Martinez-Hernandez et al., 2015). *In line*-Versuche im industriellen Maßstab erzielten für geraspelten Kohl und Karotten eine Reduktion an Coliformen um ~1 log, wobei bei einer Behandlung ab einer Dauer von 10 min. klare Farbveränderungen sichtbar wurden (Lee et al., 2014). In *fresh-cut*-Salaten konnte eine Behandlung von 5 min. psychotrope Keime um 3,3 log, Milchsäurebakterien um 2,6 log und Enterobakterien um 1,9 log reduzieren (Ongeng et al., 2006). In der Primärproduktion könnte *electrolyzed water* neben einer Keim- (und damit) Pestizidreduktion auch eine erhöhte Biomasse, sowie verbesserte Photosynthese und höhere Resistenz gegenüber Wassermangel bewirken (Zhou et al., 2014).
- **Fisch und Meeresfrüchte:** In Welsen konnte die Behandlung zwar über eine Lagerdauer von 8 Tagen Salmonellen um ~ 1 log reduziert halten, wohingegen auf *Listeria monocytogenes* kein Effekt nachweisbar war (Rajkowski et al., 2012). Wang et al (2014) beobachteten für Shrimps, die auf *electrolyzed water*-Eis dunkel gelagert wurden, während einer Lagerdauer von 6 Tagen eine Inhibierung der bei der Kontrollprobe den Verderb anzeigenden pH-Senkung, der Bildung von TVBN (*total volatile basic nitrogen*) und der Keimvermehrung. Diese Inhibierung des Fischverderbs konnte durch Kombination mit MAP-Verpackung (siehe

auch Kap. 5) weiter gesteigert werden. Dabei war beim Öffnen der Packung der Chlorge-  
ruch deutlich wahrnehmbar, welcher sich allerdings durch den anschließenden Kochschritt  
entfernen ließ (Zhang et al., 2014). Für Lachsfilets konnte die Kombination von *electrolyzed*  
*water* und Behandlung mittels essentieller Öle (siehe auch Kap 2- Extrakte) die Haltbarkeit  
unter Kühlung von 5 auf 13 Tage verlängern (Abou-Taleb, 2007).

- **Geflügel:** Neben Sprühen und Tauchen der Fleischteile wurde auch die Zugabe geringer  
Mengen an *electrolyzed water* zum Trinkwasser des Geflügels untersucht. Dabei konnte er-  
wartungsgemäß eine Senkung der Gesamtkeimzahl und *E. coli* in diesem Trinkwasser nach-  
gewiesen werden, womit auch die geringere Mortalitätsrate in Zusammenhang gebracht  
wurde (Bügener et al., 2014).
- Eine weitere alternative Applikationsform von *electrolyzed water* in der Lebensmittelindust-  
rie ist der Einsatz in CIP-(*cleaning in place*) Anlagen. Hier wurden bei Melkanlagen gegen-  
über herkömmlichen Säuren/Laugenprogrammen im Pilotmaßstab vergleichbare Effekte  
erzielt (Wang et al., 2014).

### Beschränkungen und kritische Parameter

Lebensmittelsicherheit und eine hohe Haltbarkeit durch Nutzung von Wasser klingt erstmal per-  
fekt, ist es aber nicht. Die Nutzung von *activated water* funktioniert nur in Kombination mit der ef-  
fektiven physikalischen Entfernung („Abwischen“) der zu desinfizierenden Oberflächen. Für Le-  
bensmittel ist die ausschließliche Nutzung dieser milden Form von elektrisch geladenem Wasser  
also ungeeignet (Yang et al., 2013). Weiter ist zu beachten, dass die Wirkung, wie für alle durch  
Sprühen bzw. Tauchen applizierten Reagenzien, von der Matrix des zu behandelnden Lebensmit-  
tels abhängt. Während bei kontaminierten Prozesswassern eine vollständige Abtötung der Bakte-  
rien erfolgte, wurden für *fresh-cut*-Salat derselben Linie nur eine 1 – 3 log Keimreduktion erzielt  
(Ongeng et al. 2006). Ausgehend von dieser in zahlreichen Studien bestätigten Reduzierung der  
Ausgangskeimzahl um nur etwa 1 – 3 log bei *fresh-cut* -Produkten ist zu hinterfragen, welchen tat-  
sächlichen praktischen Wert diese eher geringe Keimreduktion hat (Martinez-Hernandez et al.,  
2015). Außerdem ist an dieser Stelle anzumerken, dass *electrolyzed water* als einmalige Behand-  
lung keinen Langzeiteffekt hat, also keinen Schutz vor erneuter Kontamination bietet.

Die wesentlichen Prozessparameter scheinen die Dauer der Einwirkung auf das Lebensmittel, der  
pH-Wert der Lösung sowie vor allem der Gehalt an freiem Chlor im Anolyten zu sein. Für *minimal-  
ly processed*-Gemüseprodukte wurden die MO-Reduktionsraten für drei ausgewählte Keime ge-  
steigert (Ongeng et al., 2006). Das Anheben der Einwirkungsdauer führte dabei bei einigen Le-  
bensmitteln zu Farbveränderungen (Xiong et al., 2014, Lee et al., 2014). Das Ausmaß an Generie-  
rung von freiem Chlor bei der Elektrolyse ist vor allem für Lebensmittel in der EU relevant, zumal  
hier gesetzliche Beschränkungen und Bedenken seitens der Verbraucher und Verbraucherinnen  
vorliegen, wie die gegenwärtige Debatte um das sogenannte „Chlorhuhn“ aus den USA bestätigt.  
Dies wird in einer britischen *in-line* Studie von Burfoot et al. (2015) am Beispiel von *electrolyzed*  
*water*-Behandlung von Hühnern mit dem Ziel der Reduktion von *Campylobacter* aufgezeigt und  
kritisiert, wobei eine Konzentration von freiem Chlor von nur 20 ppm kaum Effekte (0,3 log Re-  
duktion) zeigte. In einer vergleichenden Studie mit 50 ppm bzw. 200 ppm freiem Chlor enthal-  
tendem Anolyt zur Behandlung von oberflächenkontaminierten Äpfeln (mit in Fruchtsäften proble-  
matischen *Alicyclobacillus acidoterrestris*-Sporen) konnten mit 50 ppm keine Effekte, für 200 ppm  
dagegen eine beachtliche Reduktion um 5 log-Einheiten erzielt werden (Torlak, 2014).

### Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz

Elektrolysewasser darf als „Desinfektionsmittel“, also quasi als wirksameres Waschwasser genutzt  
werden. Im Endprodukt soll es allerdings nicht mehr nachweisbar sein. Ebenso wird durch die

EFSA darauf hingewiesen, dass Waschen mit EW nicht als Ersatz für mangelnde Lebensmittelhygiene dienen soll.

Konsumentinnen und Konsumenten werden nach und nach mit der Möglichkeit der Verwendung von aktiviertem Wasser – auch für den Heimgebrauch – konfrontiert werden. Es wäre denkbar, dass der Vorteil einer besseren Hygiene darin gesehen wird, wodurch die Akzeptanz steigen würde.

## 2.8.2. Nutzung mechanischer Energie

### 2.8.2.1. Hochdruckbehandlung (*high pressure* - HP) (*Pascalisation*)

Hochdruckbehandlung (HP) wird im Lebensmittelbereich vor allem zur Inaktivierung von Mikroorganismen und Enzymen zum Zwecke der Haltbarkeitsverlängerung genutzt. Daneben bietet HP aber auch Potential für eine gezielte Texturierung von Lebensmitteln, zur Verbesserung von Extraktionen und zum schonenden Gefrieren/Auftauen.

#### Prinzip und Nutzungsrelevanz

Wie der Name vermuten lässt, versteht man unter HP-Behandlung ein Lebensmittel hohem Druck (bis zu 1.000 MPa = 10.000 bar) auszusetzen. HP kann als nichtthermisches Verfahren bezeichnet werden, weil sich die Temperatur ohne Kühlmaßnahmen um lediglich durchschnittlich 3° C pro 100 MPa erhöht. Bei den oft genutzten 400 – 600 MPa bedeutet das eine Temperaurationsteigerung von nur 12 – 18° C). Mittlerweile lässt sich durch Kühleinrichtungen der Temperaturanstieg in deutlich geringeren Grenzen halten; selbst die Druckbeaufschlagung unter gleichzeitiger Abkühlung auf Gefriertemperaturen ist realisiert.

Die Grundlagen der Effekte einer HP-Behandlung lassen sich im Wesentlichen mittels zweier Gesetze beschreiben. Das erste ist das **“isostatische Prinzip”**, welches besagt, dass Druck gleichmäßig und unmittelbar auf das gesamte zu behandelnde Gut wirkt. Daraus geht der wesentliche Vorteil gegenüber der herkömmlichen Hitzebehandlung hervor, indem kein Wirkungsgradient vom Äußeren ins Innere eines Lebensmittels besteht. Damit kann das Lebensmittel unabhängig von Größe und Form gleichmäßig behandelt werden. Im Gegensatz dazu muss bei der Erhitzung die Wärme von außen nach innen geleitet werden, wodurch eine ungleichmäßige Einwirkung resultiert.

Das zweite wirksame physikalische Gesetz ist das **“Prinzip von Le Chatelier und Braun”**, auch als **“Prinzip des kleinsten Zwanges”** bekannt. Danach laufen unter hohem Druck bevorzugt Reaktionen ab, die mit einer Volumenabnahme einhergehen; wohingegen Reaktionen, die mit einer Volumenzunahme assoziiert sind, tendenziell unterdrückt werden. Konkret bedeutet das, dass große Moleküle, die durch relative labile, nichtkovalente Van der Waals-Bindungen zusammengehalten werden (z.B. Proteine), durch Druckeinwirkung stark beeinflusst werden. Kleinere, vor allem durch relative starke, kovalente Atombindungen zusammengehaltene Moleküle (Vitamine, Farb- und Aromastoffe etc.) bleiben dagegen weitgehend unbeeinflusst. Auch Dissoziations-/Protonierungsreaktionen zählen zu den mit einer Verringerung des Volumens einhergehenden und damit beschleunigten Reaktionen. Der pH Wert des Lebensmittels wird demnach während der Behandlung gesenkt. Diese matrixabhängige pH-Reduktion von durchschnittlich 0,2 – 0,3 pH-Einheiten pro 100 MPa leistet ebenfalls einen Beitrag zur Inaktivierung von Mikroorganismen. Weitere Beiträge zur Dekontamination/Haltbarkeitsverlängerung ergeben sich aus der physikalischen Denaturierung vegetativer Zellen unter hohem Druck, sowie der Denaturierung einer Vielzahl überlebenswichtiger MO-Proteine (z.B. Enzyme). Für das Einfrieren bedeutet ein hoher Druck nach dem „Prinzip

des kleinsten Zwanges“, dass die gebildeten Eisformen eine höhere Dichte als Wasser besitzen, also kleiner als bei Normaldruck gebildete Eiskristalle sind. Allgemein bekannt ist, dass kleinere Eiskristalle mit einer geringeren Gewebeschädigung, also verbesserter Qualität von Gefriergut, assoziiert sind. Der anschließende Auftauprozess lässt sich unter Druck um ca. das Fünffache beschleunigen und deutlich homogener gestalten. Außerdem werden Verderbsreaktionen, die bei herkömmlich aufgetauten, großen Lebensmitteln auftreten können (Inneres noch gefroren, während äußere Schichten bereits aufgetaut und „besiedelbar“), weitgehend vermieden.

Die **hydrostatische Druckbehandlung** erfolgt bei Drücken zwischen 100 und 1.000 MPa (1.000 – 10.000 bar), wobei Pasteurisierungsaufgaben meist im Bereich 400 – 600 MPa realisiert werden. Der Druck kann dabei direkt im Druckbehälter über einen Kolben aufgebaut oder indirekt in einem Druckerzeuger generiert und über eine Druckleitung übertragen werden. Das Druckübertragungsmedium kann dabei Wasser sein. Sehr oft wird aber eine Frostschutzflüssigkeit eingesetzt, um auch im tieferen Temperaturbereich arbeiten zu können.

Wenig bekannt und erforscht und mit geringerem funktionellen und wirtschaftlichen Potential ist die Nutzung von „**hydrodynamischem Druck**“ (HDP). Dabei wird Druck (meist im Bereich 70 – 100 MPa) in Form einer Schockwelle aufgebaut, welche durch eine Unterwasser-Detonation eines Sprengstoffes hervorgerufen und letztlich durch das Lebensmittel geleitet wird. Der Effekt auf MO ist uneinheitlich und grundsätzlich geringer als bei der hydrostatischen Hochdruckbehandlung (Sharma et al., 2008).

Eine weitere interessante Art, um HP anzuwenden, ist *ultra-high pressure water jet*, also HP mit einem Wasserstrahl aufzubringen. Damit ließ sich Bier mit Drücken zwischen 150 und 300 MPa sterilisieren (Liu et al., 2013).

### **Einsatzmöglichkeiten**

Das am besten erforschte Einsatzgebiet der HP-Behandlung ist die Hochdruckpasteurisation (HPP). Für flüssige bis pastöse Obst- und Gemüseprodukte funktioniert diese mittlerweile zuverlässig unter hohem Qualitätserhalt (z.B. Hiremath et al., 2012; Katsaros et al., 2010). Für Obst und Gemüseprodukte ist der wesentliche Vorteil ein verbesserter Erhalt der allgemeinen Sensorik sowie des Gehalts an temperaturlabilen, gesundheitsfördernden Substanzen [wie Vitaminen (insb. Vitamin A, E und C) und sekundären Pflanzeninhaltsstoffen (insb. phenolischer Substanzen wie Anthocyane etc.)] (z.B. Chakraborty et al., 2014; Jung et al., 2013; Wang et al., 2011; Keenan et al., 2012). Der Erhalt dieser Substanzen wird neben der allgemeinen Schonung durch die nichtthermische Behandlung, die diese kleinen Moleküle weitgehend unbeeinflusst lässt, mit der nachgewiesenen Verringerung der Aktivität von oxidierenden Enzymen [z.B. Polyphenoloxidase (PPO) und Peroxidase (POD)] erklärt (z.B. Jung et al., 2013; Ferrari et al., 2010). Auch Enzyme, die im Verlauf der Lagerung das pflanzliche Zellgewebe bzw. dessen Textur zerstören und damit für Schädigungen durch MO angreifbarer machen [z.B. Pectinmethylesterase (PME)], werden unter Hochdruck zumindest gehemmt (Spilimbergo & Ciola, 2010).

Für Lebensmittel mit strukturgebenden Proteinen, wie Milchprodukte, Fleisch und Fisch ergeben sich komplexere Zusammenhänge, die noch Gegenstand der Forschung sind und für Praxisanwendungen ausgedehnte Einzelfallstudien erfordern. Das gilt für Lebensmittel, deren Qualität wesentlich auf Fetten und Kohlenhydraten basiert ebenso, wobei hier der HP-Einfluss weniger stark und komplex als für proteinreiche Lebensmittel ist. Bei fettreichen Lebensmitteln sind die Parameter, unter denen Oxidationsreaktionen durch HP gefördert werden, zu eruieren.

Proteinhaltige Lebensmittel (z.B. Fleisch, Fisch und Eier) neigen zu „gekochtem“ Aussehen und gummiartiger Textur, weil Proteine und der rote Fleischfarbstoff Myoglobin ab 200 MPa denaturieren. Das Ausmaß ist allerdings stark vom Ausgangs-Lebensmittel und den genutzten Prozesspa-

parametern abhängig. Beispielsweise konnten in *ready to eat*-Fleischprodukten unter HP-Behandlung bei Raumtemperatur mit 600 MPa für 180 s keine sensorischen Veränderungen festgestellt werden, wohingegen eine sechsminütige Behandlung bei 600 MPa von Schinkenaufschnitt eine erhöhte Härte, hellere Farbe, intensiveren Geschmack und einen erhöhten Salzgeschmack ergab (Chen et al., 2012). Letztere Tatsache bringt als weiteren, werbewirksamen Effekt bei der Nutzung der HP-Behandlung zur Haltbarkeitsverlängerung von Fleisch- und Fischprodukten die mögliche Verringerung des Salzgehalts in einigen Produkten mit sich.

Neben der Verbesserung des Texturerhalts während der Lagerung durch Inaktivierung von texturschädigenden Enzymen wie PME etc., lässt sich der starke Einfluss von Hochdruck auf Proteine auch gezielt zur Texturmodifikation in den strukturgebenden Proteinen des Gutes nutzen. Im Fleischbereich lassen sich Saftigkeit, Zähheit und Zartheit gezielt beeinflussen, die Kenntnis der dazu nötigen Parameter im Einzelfall vorausgesetzt. Die dahinterstehenden Vorgänge sind Denaturierung, Aggregation und/oder Gelierung von Fleischproteinen, auf molekularer Ebene das Aufbrechen von kovalenten Bindungen und der Bildung neuer hydrophober und Disulfid-Bindungen (z.B. Sun & Holley, 2010).

Untersuchungen zur Wirkung auf Milchproteine ergaben starke Strukturveränderungen unter HP. Caseine werden unter Zerstörung der Calcium-Phosphat-Bindungen denaturiert. Die beiden Molkeproteine  $\alpha$ -Lactalbumin und  $\beta$ -Lactoglobulin gehen mit zunehmendem Druck in den sogenannten „*molten globule*“-Zustand über. Das ist eine aufgelockerte Proteinstruktur, in die umgebendes Produktwasser eindringen kann, was sich texturmäßig, parameterabhängig in der Bildung einer weichen bis festen Gallerte bemerkbar machen kann (Heinrich & Koluzik, 2009). Darin wurde das interessante Anwendungsfeld der Produktion von maßgeschneiderten „Designed“-Desserts ausgehend von reinen Molkeproteinpulvern oder konzentrierter Milch erkannt. Diese können auch fett-/zucker- und damit kalorienreduziert, äußerst gute homogene, stabile Texturen aufweisen, worin traditionell aus Milch hergestellte *light*-Produkte bislang den Vollvarianten hinterherhinken (Orlien, 2010). Fermentierte Produkte, wie z.B. Weichkäse kann man unter Hochdruck ebenfalls maßgeschneidert ohne aufwändige Fällung mittels Säure und/oder Labenzym produzieren (Hongmai et al., 2014).

Eine wichtige Frage im Zusammenhang mit einer Technologie, die Proteinstrukturen maßgeblich beeinflusst, ist diejenige nach dem Einfluss auf die Allergenität. Diese konnte bislang nur exemplarisch für einige Lebensmittel-Allergen-Parameterkombinationen beantwortet werden. Die Allergenität von Tropomyosin Tod p1 in Tintenfischen konnte durch HP Behandlung bei 400 bzw. 600 MPa reduziert werden (JIN et al., 2015). Auch für Sojaallergene soll die Allergenität unter Behandlung bei 200 MPa deutlich gesenkt werden, wobei bei diesen Bedingungen die relevanten Proteine dissoziierten, während sie bei 300 – 500 MPa zu größeren Aggregaten agglomerierten (Yang et al., 2014). Die Konzentration von biogenen Aminen in Rohmilchkäse konnte im Vergleich zur Kontrolle durch HP-Behandlung um bis zu 65% (600 MPa) am Lagertag 60 und um bis zu 76% am Lagertag 240 gemindert werden (Calzada et al., 2013). Demnach könnte sich die Wahrscheinlichkeit einer Reaktion histaminsensitiver Personen mittels HP minimieren lassen.

Während unter Hitzebehandlung der auf dem Vorhandensein von Methylglyoxal beruhende antimikrobielle Effekt von Honig gesenkt wird, wird er unter HP-Behandlung erhöht (Alhabsi & Niranjana, 2012).

Der Gehalt der als Ballaststoff fungierenden, resistenten Stärke wurde durch HP-Behandlung in Weizen- und Quinoastärke gesteigert, wohingegen ihr Gehalt in Amaranthstärke gegenüber der nativen Form reduziert wurde (Linsberger-Martin et al., 2011). Die Modifizierung in Richtung funktioneller Stärken scheint demnach matrixabhängig möglich.



## Beschränkungen

Im Lebensmittel selbst erfolgt die Druckübertragung im enthaltenen Wasser, was voraussetzt, dass ausreichend Wasser vorhanden ist. Trockene Lebensmittel sind daher von der HP-Behandlung ausgeschlossen. Ebenso nicht HP-behandelbar sind Lebensmittel mit gasgefüllten Hohlräumen, beim Verpacken sind solche durch z.B. Evakuieren auszuschließen.

Die Inaktivierung von MO ist neben deren Art auch von der Wachstumsphase abhängig. So ist bekannt, dass lebende MO in der exponentiellen Wachstumsphase deutlich empfindlicher als in der *lag*-Phase befindliche MO auf HP reagieren. Die Inaktivierung von Sporen (also eine Sterilisation) erfordert eine ausgeklügelte Kombination aus geringem Druck (~90 MPa) zur „Vorschädigung“, sehr hohem Druck (600 MPa), geringem Druck in mehreren Zyklen. Eine Sterilisation kann aber auch im Rahmen eines Hürdenverfahrens durch die Kombination von HP mit geringer Temperatur von 50 – 70° C erfolgen, also bei weit niedrigeren Temperaturen als bei alleiniger Hitzesterilisation.

Außerdem ist festzuhalten, dass die Erreichung des haltbarkeitsverlängernden Effektes allein nicht immer ausschlaggebend ist. HP-behandelte Avocadopaste etwa wies eine außerordentlich hohe mikrobiologische Stabilität über 49 Tage unter Kühlung auf, wobei aber ab dem Tag 19 das Produkt von einem Sensorikpanel als ungenießbar im Sinne von stark sauer und ranzig befunden wurde (Jacobo-Velazquez & Hernandez-Brenes, 2011). Die aromatischen und textuellen Veränderungen in HP-behandelten Muscheln wurden im Test nur von einer sehr kleinen Personengruppe akzeptiert, die breite Masse bevorzugte unbehandelte (Narwankar et al., 2011).

## Derzeitiger praktischer Einsatz

Schätzungen zufolge soll der Weltmarkt für HP-behandelte Lebensmittel 2018 auf etwa 12 Milliarden Dollar ansteigen. Dies wird vorwiegend auf das Bedürfnis nach frisch schmeckenden und aussehenden, gesunden Lebensmitteln ohne „chemischen“ Zusätzen, aber dennoch mit langer Haltbarkeit zurückgeführt. Bei der Nutzung herkömmlicher thermischer Verfahren ergibt sich hier ein deutlicher Widerspruch (Spinner, 2014). Die HP-Behandlung als nichtthermisches Verfahren ist dabei eine anerkannte Möglichkeit, Lebensmittel unter hohem Erhalt der natürlich in den Rohstoffen enthaltenen Vitamine, Aroma- und Farbstoffen anzubieten. Daneben eröffnet HP für Hersteller von hitzeempfindlichen Rohstoffen eine zuverlässige Keimabtötung und damit Haltbarkeitsverlängerungsoption für Produkte, für die es bislang keine gab. Der griechische Hersteller von *fresh-cut*-Fleisch und *fresh-cut*-Salaten Ifantis beispielsweise gibt seit Einführung der HP-Behandlung eine Verkaufssteigerung um 30 % bei Rückgang der Retourware gegen Null an (Harrington, 2010).

Obgleich die Anwendung von HP zur Entkeimung grundsätzlich seit Ende des 19. Jahrhunderts bekannt ist, kam es erst Ende der 1980er Jahren zur Marktreife des Verfahrens. Im Jahr 2000 war im HP-Vorreiterland Japan bereits der Einsatz von 120 industriellen Anlagen vor allem zur Entkeimung von Fruchtprodukten, Milchdesserts und Reisprodukten bekannt. Die USA, wo die HP-Behandlung zur Erreichung der von der FDA geforderten 5-log Reduktion pathogener Keime in Obst- und Gemüseprodukten als geeignet befunden und damit zugelassen wurde, hat mittlerweile ebenfalls nachgezogen. In der EU wird HP für Fruchtzubereitungen unter Kennzeichnung mit „hochdruckpasteurisiert“ seit 2001 ebenfalls legal genutzt. HP-pasteurisierte „*fresh-like*“ Fruchtsaft findet sich auch in Österreich auf dem Markt. Auch Fleischprodukte, wie Aufschnitte und andere Fleisch/Geflügelzubereitungen, aber auch Convenienceprodukte werden in Europa mit HP behandelt. Die spanische Firma NC Hyperbaric etwa produziert Anlagen mit Durchsätzen von stündlich etwa 600 kg Schinkenaufschnitt, welche z.B. die spanische Firma Espuna nutzt um damit die Haltbarkeit von Rohschinken von 3 auf 8 Wochen unter Kühlung zu erhöhen (Byrne, 2000).

Das spezielle Verfahren erfordert auch spezielle Verpackungssysteme. Die Entwicklung von HP-Verpackungen ist ein Produktfeld der deutschen Firma Multivac, welche die HP-Technologie mit Verpackungskonzepten in vollautomatisierte Anlagen integriert. Dabei lassen sich laut Firmenangaben unter optimierten Bedingungen bereits 2 – 4 Tonnen verpacktes Gut/h behandeln (Harrington, 2011) (Multivac-Anlage siehe Abb. 4.2.17). Vakuum- und sogar MAP-Verpackungslösungen in Kombination mit HP sind automatisiert realisiert (Harrington et al., 2011). Mondi-Packaging (Ö) konnte in Zusammenarbeit mit dem DIL (Deutsches Institut für Lebensmitteltechnik e.V.) „Tray-in Tray“-Verpackungslösungen entwickeln, die eine irreversible Deformation im Kopfraumbereich der Verpackung am Objekt geräucherte Forellenfilets unter HP verhindern kann, womit die Schutzfunktion derartiger Verpackungen *post*-HP gewährleistet bleibt. Diese Verpackungskombination konnte die Haltbarkeit der geräucherten Forellenfilets von drei auf 36 Wochen unter Lagerung bei 8° C verlängern (Lebensmitteltechnik, 8/2014).

Die Kosten sind mittlerweile produkt- und parameterabhängig mit etwa 0,1 bis 0,5 €/kg Produkt inklusive Investitions- und Betriebskosten in einem akzeptablen Rahmen angelangt. Die Systeme sollen in existierende Produktionslinien bereits gut integrierbar sein (Harrington, 2010). Die hohen Investitionskosten (Hyperbaric gibt etwa 800.000 € für industrielle Anlagen mit etwa 500 kg Durchsatz/h an) schrecken österreichische KMUs derzeit dennoch von der Anschaffung eigener Anlagen ab. Man greift aber zunehmend auf Lohnbehandlung in deutschen und holländischen Anlagen zurück, womit HP-behandelte Lebensmittel längst im österreichischen Markt, auch unter der Flagge inländischer Hersteller, verbreitet sind.

### Kombinationen

Synergistische Effekte im Sinne einer Erhöhung der MO- und Enzymaktivierungseffizienz wurden durch Kombination mit Ultraschall etwa für Karottensaft und Apfelsaft aufgezeigt (Jabbar et al., 2014; Abid et al., 2014). Ebenso ist die Nutzung von Hitze zur Abtötung von Sporen in wenig sauren Hochrisikoprodukten geeignet. Diese Methode wird als PATP (*pressure-assisted thermally processing*) bezeichnet (z.B. Bravo et al., 2012). HP kann ferner die Hydrolyse von Proteinisolaten zusätzlich zur enzymatischen Behandlung unterstützen und Hydrolysate mit erhöhtem antioxidativen Potential produzieren (Zhang et al., 2012).



Abb. 4.1.17: Kommerziell erhältlicher, in eine Produktionslinie integrierbarer HP-Teil der Firma Multivac (D)

### Mögliche Risiken, Akzeptanz und rechtliche Aspekte

Ein mögliches Risiko der HP-Behandlung besteht darin, dass zwar die Grundregel des „Prinzips des kleinsten Zwanges“ und eine entsprechende Formel zur Berechnung der theoretischen Reaktionskinetik bekannt ist, jedoch nicht explizit geklärt ist, welche Reaktionen nun tatsächlich praktisch gefördert/beschleunigt bzw. gehemmt werden. Insbesondere im Fall der HP-Hitzekombination sind die Effekte des Zusammenspiels zwischen hohem Druck, dem durch diesen induzierten pH-Abfall und hohen Temperaturen nicht hinreichend geklärt. Die Befürchtung, dass die Acrylamidbildung gefördert werden könnte, gilt als widerlegt. Es wurde sogar eine deutliche Absenkung beobachtet (Bravo et al., 2012). Für diverse andere Maillard-Reaktionsprodukte (etwa PAH, heterocyclische Amine und NOC) fehlen derzeit Ergebnisse praktischer Versuche.

Für Sterilisations- und Pasteurisationsaufgaben ist die HPP-Behandlung bei Obst-/Gemüseprodukten (Fruchtzubereitungen, Fruchtsäfte) zugelassen. Sie wird daneben aber auch im Fleischbereich viel genutzt. Bei Konsumentinnen und Konsumenten gilt die HPP unter allen neuartigen Haltbarkeitsverfahren als bestakzeptiertes Verfahren, deutlich vor der Nanotechnologie, und den „elektrisch-/elektromagnetisch generierten Methoden“, sowie „Strahlungsmethoden“. Die wesentlichen Vorteile, „Natürlichkeit“ und gesundheitlicher Zusatznutzen durch Vitamin-/Aromastoffgehalt („Säfte wie frischgepresst“) werden vom Endverbraucher wahrgenommen. Risiken sind nicht bekannt. Damit ist das Verhältnis der wahrgenommenen Benefits zu möglichen Risiken sehr günstig. Die relativ hohe Präsenz (Produkte werden mit dem Verfahren in Zusammenhang gebracht) und die mit der Markteinführung stattgefundene Erklärung des HP-Prinzips dürften dazu einen wesentlichen Beitrag geleistet haben.

Die Möglichkeiten zur Texturierung können sowohl rechtlich als auch hinsichtlich der Akzeptanz derzeit noch nicht eingeschätzt werden. Ob die damit mögliche Produktion von neuen Designermilchprodukten auf Akzeptanz stoßen würde, bleibt daher abzuwarten (neuer „Analogkäseskandal“?).

#### 2.8.2.2. *Thermosonication* (TS)

Ultraschall kann – neben zahlreichen anderen in der Lebensmittelindustrie nutzbaren Möglichkeiten (siehe dazu Kapitel 1.4) – auch zur Inaktivierung von Mikroorganismen und Enzymen zur Haltbarkeitsverlängerung genutzt werden.

##### Prinzip

Üblicherweise werden Schallwellen im Frequenzbereich von 20 kHz bis 100 kHz verwendet. Diese akustischen Schallwellen rufen Kavitationen im Lebensmittel hervor, es entstehen Luftbläschen, die rasch abfolgende Zyklen der Expansion und des Kollabierens durchlaufen. Dadurch entstehen lokal äußerst hohe Drücke (bis zu 50.000 kPa) und äußerst hohe Temperaturen (bis zu 500° C), die letztlich zur Inaktivierung der MO und Enzyme führen (Schädigung bis Bersten der Zellmembranen, Denaturierung der Proteine etc.). Ein weiterer Wirkmechanismus resultiert aus der Bildung von freien Radikalen, z.B. Hydroperoxidradikalen, die in folgenden, oxidativen Reaktionen keimaktivierend wirken (z.B. Bilek et al., 2013). Die ausschließliche Nutzung von Ultraschall ist allerdings erwiesenermaßen nicht effektiv genug, um die gewünschte Haltbarkeitsverlängerung zu erzielen (Piyasena et al., 2003). Daher arbeitet man zu diesem Zweck im „Hürdenprinzip“, indem Ultraschall mit erhöhter Temperatur (meist 50 – 70° C = Kompromiss Schädigung/Wirkung) kombiniert wird. Die Kombination mit Hochdruck oder sogar die Dreierkombination Ultraschall/Temperatur/Hochdruck sind ebenfalls möglich. Diese Verfahren werden entsprechend mit *Thermosonication* (TS), *Manosonication* (MS) und *Manothermosonication* (MTS) bezeichnet, wo-

bei *Thermosonication* am einfachsten zu realisieren ist und ihr auch die meiste Aufmerksamkeit der Forschung und Industrie zukommt.

### **Nutzungsrelevanz und Einsatzmöglichkeiten**

Der wesentliche Vorteil der *Thermosonication* ergibt sich aus der Tatsache, dass durchschnittlich 20 – 30° C geringere Temperaturen im Vergleich zur ausschließlichen Hitzebehandlung ausreichen, um den identen Keim- und/oder Enzyminaktivierungseffekt zu erzielen. Folglich können temperaturinduzierte Qualitätsverluste verringert werden. In vergleichenden Studien konnte mittels TS gegenüber reiner Hitzebehandlung bei gleicher Temperatur die nötige Zeit für eine definierte Keimreduktion bzw. Enzyminaktivierung um durchschnittlich das 1,5 – 3-fache gesenkt werden (z.B. Cheng et al., 2013; Xin et al., 2013; Ali et al., 2014; Aadil et al., 2015). Die Inaktivierung der gewebsschädigenden bzw. oxidativen (und damit Vitamine, Farb- und Aromastoffe degradierenden) Enzyme PME, PPO, POD, lassen sich bei Temperaturen von etwa 60 – 85° C Zeit- und Material-abhängig zu 90 – 97%, also praktisch auf „wirkungslos“ inaktivieren (z.B. Aadil et al., 2015; Xin et al., 2013). Durch diesen kombinierten Effekt auf haltbarkeitsvermindernde Mikroorganismen und Enzyme konnte beispielsweise die Haltbarkeit von gekühlt gelagertem Karottensaft mittels TS (für 10 min. bei 58°C) von 4 auf 20 Tage verlängert werden (Martinez-Flores et al., 2015). Auch zur Abtötung der pathogenen Keime *E.coli* O157:H7 und *Salmonella enteritidis* erwies sich TS bei Temperaturen von nur 50 – 60° C in Mangosaft als geeignet (Kiang et al., 2012; Lee et al., 2009; Al-Juboori et al., 2012). Während reine Hitzebehandlung erst ab 60° C eine gewisse Wirksamkeit gegenüber pathogenen Keimen entfaltet, ist mit TS bereits bei 40° C ein deutlicher Effekt zu erzielen, wie für *E.coli* in diversen Medien aufgezeigt wurde (Lee et al., 2009). Der verbesserte Qualitätserhalt zeigte sich unter TS-Pasteurisation (58° C, 10 min) in 100%-igem Vitamin C-Erhalt, 98%-igem Carotinoidgehalt und erhöhtem Phenolgehalt bezogen auf unbehandelten Karottensaft (Martinez-Flores et al., 2015). Ebenso resultierte die Methode in einem 97 %-igem Chlorophyllerhalt beim TS-Blanchieren von Blattgemüse (Xin et al., 2013) und in verbessertem Anthocyanerhalt in Erdbeeren bei TS-Behandlung von 3 – 6 min. bei 10 – 60° C gegenüber der klassischen Hitzebehandlung (Dubrovic et al., 2011). In aus TS-pasteurisierter Milch (45°C, 10 min.) hergestellten Joghurts wurde gegenüber herkömmlich produzierten eine verbesserte Wasserhaltekapazität, also geringere Syneräseigung (Maß für den Wasseraustritt, also Phasentrennung), beobachtet (Riener et al., 2010). Der Grad der Verbesserung war dabei bei Magerjoghurts besonders hoch, womit TS eine Möglichkeit zur Herstellung fettreduzierter Joghurts/Milchdesserts etc. mit guten Textureigenschaften eröffnet. Als weiteres Anwendungsgebiet wurde die Verringerung von Membranablagerungen bei Membrantrennverfahren identifiziert, womit der Durchsatz in Membrandurchflussverfahren, wie etwa Reversosmose zur Klärung von Apfelsaft, erhöht werden kann (Al-Juboori et al., 2009).

### **Derzeitiger praktischer Einsatz**

Zur Wasserbehandlung sind bereits kommerzielle Systeme wie „Sonoxide™“ (Ashland Inc., 2014) erhältlich, für die Anwendung bei Lebensmittel selbst sind keine industriellen Anlagen bekannt.

### **Kombinationen**

Neben Hochdruck (*Manothermosonication*) wurde für *pulsed-light*/TS sowie die Kombination mit dem Konservierungsmittel Kaliumsorbat sowie dem natürlichen antimikrobiellen Stoff Vanillin eine synergistische Wirkung festgestellt (Munoz et al., 2011; Munoz et al., 2012; Lopez-Maco et al., 2005).

### **Rechtliche Aspekte und Konsumentenakzeptanz**

Die Thermosonication ist bei Lebensmitteln momentan noch nicht industriereif, weshalb sich die Frage der rechtlichen Einordnung nicht stellt. Konsequenterweise würden Fragen ähnlich der Plasmabehandlung, was die unkontrollierbare Bildung freier Radikale angeht, zu stellen sein. In Sachen Konsumentenakzeptanz ist zu vermuten, dass mangels Hintergrundwissen, Ultraschall grundsätzlich als harmlos betrachtet wird.

### 3. Literatur

Abdanan Mehdizadeh S., Minaei S., Karimi Torshizi M.A. and Mohajerani E. (2014): Effect of UV irradiation, sample thickness and storage temperature on storability, bacterial activity and functional properties of liquid egg. *Journal of Food Science and Technology* (article in press)

Abou-Taleb M. (2007): Effect of combined treatment with electrolyzed NaCl solutions and essential oil compounds on the quality of salmon fillets during cold storage. *Global Journal of Biotechnology & Biochemistry* 2, 54-62

Aguilo-Aguayo I., Charles F., Renard C.M.G.C., Page D. and Carlin F. (2013): Pulsed light effects on surface decontamination, physical qualities and nutritional composition of tomato fruit. *Postharvest Biology and Technology* 86, 29-36

Alberti F., Quaglia, N.C., Spremulli, L., Dambrosio A., Todaro E., Tamborrino C., Lorusso V. and Celano G.V. (2011): *Italian Journal of Food Science* 23, SUPPL., 146-148

Ali Juus (2015): <http://www.alijuus.com/pef>; Zugriff 01/2015.

An H.J. and King M. (2006): Pasting properties of ohmically heated rice starch and rice flours. *Journal of Food Science* 71, C440

Anonym (2005): Geschmacksexplosion im Schokoladenpulver. ([www.chemiereport.at/Geschmacksexplosion-im-Schokoladenpulver](http://www.chemiereport.at/Geschmacksexplosion-im-Schokoladenpulver), Zugriff 13.02.2015)

Anonym (2006): Reinraumtechnik bei der Lebensmittelherstellung. *Der Lebensmittelbrief* 11/12, 222-223

Anonym (2013 a): RECAPT: Retailer and consumer acceptance of promising novel technologies and collaborative innovation management. *New Food* 16, 40-41

Anonym (2014 a): 3D Printing. ([www.explainingthefuture.com/3dprinting.html](http://www.explainingthefuture.com/3dprinting.html), last update 30th November 2014)

Anonym (2014 b): Barilla launches 3d printed pasta contest to find their next product. ([www.texturally.org/3DPrinting/2014/08/033043.htm](http://www.texturally.org/3DPrinting/2014/08/033043.htm))

Anonym (2014 c): Ultraschall und bessere Tiefkühlkost. ([http://cordis.europa.eu/result/rcn/92367\\_de.html](http://cordis.europa.eu/result/rcn/92367_de.html))

Anonym (2015 a): Food cutting flow waterjet pure water robotics. ([www.flowaterjet.com/en/waterjet-cutting/applications](http://www.flowaterjet.com/en/waterjet-cutting/applications); Zugriff 16.02.2015)

Anonym (2015 b): KTM waterjet cutting food – produce meats and much more ([www.kmtwaterjet.com/videos-kmt-waterjet-cutting-foodproduce.aspx](http://www.kmtwaterjet.com/videos-kmt-waterjet-cutting-foodproduce.aspx); Zugriff 16.02.2015)

Aquanova (2015): [www.aquanova.de/Product\\_Range](http://www.aquanova.de/Product_Range), Zugriff 08.02.2015

Artiaga G., Ramos K., Ramos L., Cámara C. and Gómez-Gómez M. (2015): Migration and characterisation of nanosilver from food containers by AF-ICP-MS. *Food Chem.* 166, 76-85

Artiguez, M.L. and Maranon, I.M. (2015): Improved process for decontamination of whey by a continuous flow-through pulsed light system. *Food Control* 47, 599-605

Askew K. (2014): US: Hershey in „multi-year“ 3D printing initiative. Aroq-Just Food.com (Global News) 6/14, 4

Astley (2011): Pathogen inactivating plasma can lead to double shelf-life –expert. (<http://www.foodproductiondaily.com>; Zugriff 01.02.2015)

ATB Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (2011): <http://www.atb-potsdam.de>; Zugriff 02.02.2015 01/2015.

Awad T.S., Moharram H.A., Shaltout O.E., Asker D. and Youssef M.M. (2012): Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. Food Research Int. 48, 410-427.

Ayadi, M.A., Bouvier, L., Chopard, M. and Leuliet, J.C. (2003): Heat treatment improvement of dairy products via ohmic heating processes: thermal and hydrodynamic effect on fouling. ECI Digital Archives, 2003 (<http://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1018&context=heatexchanger>)

Aymerich T, Picouet P.A. and Monfort J.M. (2007): Decontamination technologies of meat products. Meat Sciences 78, 114-129

Baier, M., Görgen, M., Ehlbeck, J., Knorr, D., Herppich, W.B. and Schlüter, O. (2014): Non-thermal atmospheric pressure plasma: Screening for gentle process conditions and antibacterial efficiency on perishable fresh produce. Innovative Food Science and Emerging Technologies 22, 147-157

Baldwin D.E. (2011): Sous vide cooking: A review. Int. J. Gastronomy and Food Science 1, 15-30

Banobre-Lopez M., Rodrigues D., Espina B., Azeredo J. and Rivas J. (2013): Control of bacterial cells growth by magnetic hyperthermia. IEEE Transactions on Magnetics 49, 3508-3511

Barbieri S., Elustondo M. and Urbicain M. (2004): Retention of aroma compounds in basil dried with low-pressure *superheated steam*. Journal of food engineering 65, 109-115

Barbosa-Canovas G.V., Schaffner D.W., Pierson M.D. and Zhang, Q.H. (1993): Oscillating magnetic fields. Journal of Food Science - SUPPLEMENT

Barbosa-Canovas G.V., Zhang Q.H., Pierson M.D. and Schaffner D.W. (1999): High voltage arc discharge. JFS Supplement: Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies, 80-81

Barnatt, C. (2014): 3D Printing. Published by ExplainingTheFuture.com®, ISBN-10: 1-5028-7979-4

Basaran-Akgul N. and Rasco B.A. (2013): Effect of marination in gravy on the *radio frequency* and microwave processing properties of beef. Journal of Food Science and Technology 52, 1-9

Baysal A.H. and Icier F. (2010): Inactivation kinetics of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in orange juice by ohmic heating: Effects of voltage gradient and temperature on inactivation. Journal of Food Protection 73, 299-304

Behbahani M., Bagheri A., Taghizadeh M., Salarian M., Sadeghi O., Adlnasab L. and Jalali K. (2012): Synthesis and characterization of nano structure lead (II) ion-imprinted polymer as new sorbent for selective extraction and preconcentration of ultra trace amounts of lead ions from vegetables, rice, and fish samples. Food Chem. 138, 2050-2056

- Bendik, I. Friedel A., Roos F.F., Weber B. and Eggersdorfer M. (2014): Vitamin D: A critical and essential micronutrient for human health. *Front in Physiology* 5, 248
- Bessi H., Debbabi H., Grissa K. and Bellagha S. (2014): Microbial reduction and quality of stored date fruits treated by electrolyzed water. *Journal of Food Quality* 37, 42-49
- Beyer D.L., Jach T., Jerome, R.A. and Debrincat F.P. (1998): Edible products having inorganic coatings. US-Patent 5.471.505.
- Biosuisse (2013): Nanotechnologie-Anwendungen im Lebensmittelbereich am Beispiel von Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) als E551, E551a, E551b. (<http://www.bio-suisse.ch/de/nanodossier.php>, Zugriff 8.2.2015)
- BLL (2014): Bund für Lebensmittelrecht und Lebensmittelkunde e.V. – Nanotechnologie ([www.bll.de/print/de/lebensmittel/nanotechnologie](http://www.bll.de/print/de/lebensmittel/nanotechnologie), Zugriff 10.10.2014)
- Bockhorst van de Veen H., Xie H., Esveld E., Abee T., Mastwijk H. and Groot M.N. (2015): Inactivation of chemical and heat resistant spores of *Bacillus* and *Geobacillus* by nitrogen cold atmospheric plasma evokes distinct changes in morphology and integrity of spores. *Food Microbiology* 45, 26-33
- Boluda-Aguilar M., Taboada-Rodríguez A., López-Gómez A., Marin-Iniesta F. and Barbosa-Cánovas G.V. (2013), Quick cooking rice by high hydrostatic pressure processing. *LWT – Food Sci. & Techn.* 51, 196-204
- Bonar A. (2014): 3D printed food for the elderly may hit shelves in 2016. ([www.foodnavigator.com/content/view/print/979632](http://www.foodnavigator.com/content/view/print/979632), Zugriff 21.10.2014)
- Borison R. (2014): From Oreos to Nutella – The latest 3D printed foods are all 100% edible. *Business Insider Inc.* ([www.businessinsider.com/3d-printed-foods-2014-9?IR=T](http://www.businessinsider.com/3d-printed-foods-2014-9?IR=T))
- Bozkurt H. and Icier F. (2010): Ohmic cooking of ground beef: Effects on quality. *Journal of Food Engineering* 96, 481-490
- Bozkurt H. and Icier F. (2012): Ohmic thawing of frozen beef cuts. *Journal of Food Process Engineering* 35, 16-36
- Buckow R., Ng S. and Töpfl S. (2013): Pulsed electric field processing of orange juice: a review on microbial, enzymatic, nutritional and sensory quality and stability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 12, 455-467
- Bügener E., Kump A.W.S., Casteel M. and Klein G. (2014): Benefits of neutral electrolyzed oxidizing water as a drink water additive for broiler chicken. *Poultry Science* 93, 2320-2326
- Buonomenna M.G. (2013): Nano enhanced reverse osmosis membranes. *Desalination* 314, 73-88
- Burfoot D., Mulvey E., Jewell K., Foy E. and Howell M. (2015): Effect of electrolysed water on *Campylobacter* numbers on poultry carcasses under practical operating conditions at processing plants. *Food Control* 50, 472-476
- Caminti I.M., Noci F., Munoz A., Morgan D.J., Cronin D.A. and Lyng J.G. (2011): Impact of selected combinations of non-thermal processing technologies on the quality of an apple and cranberry juice blend. *Food Chemistry* 124, 1387-1392



- Can F.O., Demirci A., Puri V. and Gourama H. (2014): Decontamination of hard cheeses by pulsed UV-light. Conference paper, American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual Meeting 2014, 2, 946-961
- Cárcel J.A., García-Pérez J.V., Bededito J. and Mulet A. (2012): Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *J. Food Eng.* 110, 200-2007
- Castillo-Santaella T., Sanmartin E., Cabrerizo-Vilchez M.A., Arboleya J.C. and Maldonado-Valderrama J. (2014): Improved digestibility of beta-lactoglobulin by pulsed light processing: a di-lateral and shear study. *Soft Matter* 10, 9702-9714
- Ceigh C.I., Hwang H.J. and Chung M.S. (2013): Intense pulsed light (IPL) and UV-treatments for inactivating *Listeria monocytogenes* on solid medium and seafoods. *Food Research International* 54, 745-752
- Cenkowski S., Pronyk C., Zmidzinska D. and Muir W.E. (2007): Decontamination of food products with *superheated steam*. *Journal of Food Engineering* 83, 68-75
- Chanamai R. (2007): Microemulsions for use in food and beverage products. WO2007047239 A1
- Charcosset C. (2009): Preparation of emulsions and particles by membrane emulsification for the food processing industry. *J. Food Eng.* 92, 241-249
- Charles, F., Vidal, V., Olive, F., Figueiras, H. and Sallanon, H. (2013): Pulsed light treatment as a new method to maintain physical and nutritional quality of fresh-cut mangoes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 18, 190-195
- Chen C., Michael M., Phebus R.K., Thippareddi H., Subbiah J., Birla S.L. and Schmidt K.A. (2013): Short communication: *Radio frequency* dielectric heating of nonfat dry milk affects solubility and whey protein nitrogen index. *Journal of Dairy Science* 96, 1471-1476
- Chiba K. and Takahashi M. (2015): Fantastic properties of nano-bubbles. (<https://staff.aist.go.jp/m.taka/nano-bubble.pdf>; Zugriff 08.02.2015)
- Cho K.Y. and Rizvi S.S.H. (2010): New generation of healthy snack food by supercritical fluid extrusion. *J. Food Proc. Preserv.* 34, 191-218
- Choudhary R. and Bandla S. (2012): Ultraviolet pasteurization for food industry. *International Journal of Food Science and Nutrition Engineering* 2, 12-15
- Chua K.J., Mujumdar A.S. and Chou S.K. (2003): Intermittent drying of bioproducts- an overview. *Bioresource Technology* 90, 285-295
- Cooktec (2015): (<http://www.cooktec.com>; Zugriff 03.02.2015)
- Craeyveld V. van, Holopainen U., Selinheimo E., Poutanen L., Delcour J.A. and Courtin C.M. (2009): Extensive dry ball milling of wheat and rye bran leads to *in situ* production of arabinoxylan oligosaccharides through nanoscale fragmentation. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 57, 8467-8473
- Crattelet J., Ghnimi S., Debreyne P., Zaid I., Boukabache A., Esteve D., Auret L. and Fillaudeau L. (2013): On-line local thermal pulse analysis sensor to monitor fouling and cleaning: Application to dairy product pasteurisation with an ohmic cell jet heater. *Journal of Food Engineering* 119, 72-83
- DaRo Ltd (2010): (<http://www.darouv.co.uk>; Zugriff 10.01.2015)

Darvishi H., Hosainpur A., Nargesi F., Khoshtaghaza M.H. and Torang H. (2011): Ohmic processing: Temperature dependent electrical conductivities of lemon juices. *Modern Applied Science* 5, 209-216

Darvishi H., Khoshtaghaza M.H., Zarein M. and Azadbakht M. (2012): Ohmic processing of öiquid whole egg, white egg and yolk. *Agricultural Engineering International* 14, 224-230

DATAMONITOR-Consumer (2015): ([www.datamonitor.com](http://www.datamonitor.com))

Datta, A.K. and Rakesh, V. (2012): Principles of microwave combination heating. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 12, 24-38

De Souza P.M., Müller A., Fernandez A. and Stahl M. (2014): Microbial efficiency in liquid egg products of a UV-C treatment in a coiled reactor. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 21, 90-98

deGrootte, Y. (2006): Small Chance. *The World of Food Ingredients*. March, 34-38

DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 1363/2013 DER KOMMISSION vom 12. Dezember 2013 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates betreffend die Information der Verbraucher über Lebensmittel im Hinblick auf die Begriffsbestimmung für „technisch hergestellte Nanomaterialien“. *EU-Amtsblatt L 275/40*, 20.10.2011

Demirdöven A. and Baysal T. (2012): Optimization of ohmic heating applications for pectin methylesterase inactivation in orange juice. *Journal of Food Science and Technology* 49, 1-10

dePaz E., Martin A. and Cocero M.J. (2012): Formulation of  $\beta$ -carotene with soybean lecithin by PGSS. *J. Supercritical Fluids* 72, 125-133

Deutsche Lebensmittelbestrahlungsverordnung (2000): Verordnung über die Behandlung von Lebensmitteln mit Elektronen-, Gamma- und Röntgenstrahlen, Neutronen oder ultravioletten Strahlen (Lebensmittelbestrahlungsverordnung - LMBestrv) vom 14. Dezember 2000 (BGBl. I S. 1730), geändert zuletzt durch Artikel 7 der Verordnung vom 13. Dezember 2011 (BGBl. I S. 2720)

DFG Senatskommission zur gesundheitlichen Bewertung von Lebensmitteln SKLM (2012): Stellungnahme zum Einsatz von Plasmaverfahren zur Behandlung von Lebensmitteln, 25.05.2012

DIL (2014): <http://www.dil-ev.de>; <http://www.elea-technology.eu>; Zugriff 10.01.2015)

DIL (2015): Forschungsplattform Robotik am Deutschen Institut für Lebensmitteltechnik, Quakenbrück ([www.dil-ev.de/forschung/robotik.html](http://www.dil-ev.de/forschung/robotik.html), Zugriff 25.02.2015)

Doymaz I. (2012): Drying of pomegranate seeds using infrared radiation. *Food Science and Technology* 21, 1269-1275

Doymaz I. (2012): Infrared drying of sweet potato slices. *J Food Sci Technology* 49, 760-766

Doymaz I. (2014): Infrared drying of button mushroom slices. *Food Science and Biotechnology* 23, 723-729

Düsmen E., De Almeida I.V., Lucchetta L. and Vicentini V.E.P. (2014): Effect of processing, post-harvest irradiation and production system on the cytotoxicity and mutagenicity of *Vitis labrusca* L. juices in HTC cells. *PLoS ONE* 9(9):e107974

- Echegoyen Y. and Nerin C. (2013): Nanoparticle release from nano-silver antimicrobial food containers. *Food Chem. Toxicol.* 62, 16-22
- EFSA CEF Panel (2014): Panel on Food Contact Materials, Flavourings and Processing Aids, 2014. Statement on the safety assessment of the substance silicon dioxide, silanated, FCM Substance No 87 for use in food contact materials. *EFSA Journal* 2014;12(6):3712,7pp. d
- EHDG (2004): Gestaltungskriterien für hygienegerechte Maschinen, Apparate und Komponenten. Doc 8, 2. Auflage, April 2004 ([http://www.ehedg.org/uploads/DOC\\_08\\_D\\_2004.pdf](http://www.ehedg.org/uploads/DOC_08_D_2004.pdf))
- El-Mesery H.S. and Mwithiga G. (2014): Performance of a convective, infrared and combined infrared-convective heated conveyor-belt dryer. *Journal of Food Science and Technology* (DOI 10.1007/s13197-014-1347-1, 1-10)
- Engchuan W., Jittanit W. and Garnjanagoonchorn W. (2014): The ohmic heating of meat ball: Modellig and quality determination. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 23, 121-130
- Erfanian A., Mirhosseini H., Abd Manap M. Y., Rasti B. and Bejo, M. (2014): Influence of nano-size reduction on absorption and bioavailability of calcium from fortified milk powder in rats. *Food Research Int.* 66, 1-11
- Euromonitor (2013): <http://www.euromonitor.com/microwaves>; Zugriff 10.01.2015)
- Euromonitor International (2008-2013): Country report: Microwaves in Austria.
- Europäische Kommission (2010): Europeans and Biotechnology in 2010. Winds of change?
- Europäische Kommission (2011): Empfehlung der Kommission vom 18. Oktober 2011 zur Definition von Nanomaterialien. *Amtsblatt der EU* L275/38
- Europäische Kommission (2013): Vorschlag für Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über neuartige Lebensmittel. COM (2013) 894 final – 2013/0435 (COD), 18.12.2013
- FABCO Technologies (1998): PulsePower disinfects fresh juices, extends shelf-life. *Food Eng.* 10, 47-50
- Falguera V., Quintero J.P., Jimenez A., Munoz J.A. and Ibarz A. (2011): Edible films and coatings: Structures, active functions and trends in their use. *Trends in Food Science and Technology* 22, 292-303
- FDA (Food and Drug Administration) (1996): Code of Federal Regulations (CFR) Title 21 Part 179. Irradiation in the production, processing and handling of food. Office of the Federal Register, US Government Printing Office, Washington DC. FDA 21CFR179.41.
- FDA (Food and drug Administration) (2014): Safe Practices for food process. ([www.fda.gov/food/foodscienceresearce/safepacticesforfoodprocesses.htm](http://www.fda.gov/food/foodscienceresearce/safepacticesforfoodprocesses.htm); Zugriff 10.09.2014)
- Felke K., Pfeiffer T., Eisner P. and Schweiggert U. (2011): *Radio-frequency* heating: A new method for improved nutritional quality of tomato puree. *Agro Food Industry High-Tech* 22, 29-32

Fernandez A., Noriega E. and Thompson A. (2013): Inactivation of *Salmonella enterica* serovar typhimurium on fresh produce by cold atmospheric gas plasma technology. *Food Microbiology* 33, 24-29

Fernandez M., Ganan M., Guerra C. and Hierro E. (2014): Protein oxidation in processed cheese slices treated with pulsed light technology. *Food Chemistry* 159, 388-390

Ferrentino G., Balzan S., Dorigato A., Pegoretti A. and Spilimbergo S. (2012): Effect of supercritical carbon dioxide pasteurization on natural microbiota, texture, and microstructure of fresh-cut coconut. *J. Food Sci.* 77, 137-143

Fiore A., Di Monaco R., Cavella S., Visconti A., Karneili O., Bernhardt S. and Fogliano V. (2013): Chemical profile and sensory properties of different foods cooked by a new radiofrequency oven. *Food Chemistry* 139, 515-520

Fraunhofer IGB (2012): Überhitzter Dampf trocknet Lebensmittel. Presseinformation Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB.

Fraunhoferinstitut TEG (2015): Mit Wasserdampf trocknen.  
<http://www.chemlin.de/news/jul05/2005071801.htm> (2005); Zugriff 12.01.2015)

Fries R., Greßler S., Simkó M., Gázsó A., Fiedeler U. und Nentwich M. (2009): Nanosilber. Nr. 10, April 2009

Gachovska T., Cassada D., Subbiah J., Hanna M., Thippareddi H. and Snow D. (2010): Enhanced anthocyanin extraction from red cabbage using pulsed electric field processing. *Journal of Food Science* 75, 323

Ganan M., Hierro E., Hospital X.F., Barroso E. and Fernandez M. (2013): Use of pulsed light to increase the safety of ready-to-eat cured meat products. *Food Control* 32, 512-517

Garcia-Gonzalez L., Geeraerd A.H., Spilimbergo S., Elst K., Van Ginneken L., Debevere J., Van Impe J.F. and Devlieghere F. (2007): High pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms in foods: The past, the present and the future. *Int. J. Food Microbiology* 117, 1–28

Gaskell G., Stares S., Allansdottir A., Allum N., Castro P., Esmer Y., Fischler C., Jackson J., Kronberger N., Hampel J., Mejlgaard N., Quintanilha A., Rammer A., Revuelta G., Stoneman P., Torgersen H. and Wolfgang Wagner (2010): Europeans and biotechnology in 2010. Winds of change? A report to the European Commission's Directorate-General for Research, October 2010

Gavashian M., Farahnaky A., Majzoobi M., Javidnia K., Saharkhiz M.J. and Mesbahi G. (2011): Ohmic-assisted hydrodistillation of essential oils from *Zataria multiflora* Boiss (Shirazi thyme). *Food Science and Technology* 46, 2619-2627

Gayan E., Garcia-Gonzalo D. and Condon A.S. (2014): Resistance of *Staphylococcus aureus* to UV-light and combined UV-heat treatments at mild treatments. *International Journal of Food Microbiology* 172, 30-39

Gaytan-Martinez M., Figueroa J.D.C., Morales-Sanchez E., Vazquez-Landaverde P.A. and Martinez-Flores H.E. (2011): Physicochemical properties of masa and corn tortilla made by ohmic heating. *African Journal of Biotechnology* 10, 16028-16036

Ge Z., Ding T., Xu Y. and Liu D. (2014): The application of ultrasound, slightly acidic electrolyzed water (SAEW) in the preservation of cherry tomatoes. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology* 14, 149-154

GEA Process Engineering (2015):  
([www.barrosin/technologies/superheated\\_steam\\_drying\\_ssd.asp](http://www.barrosin/technologies/superheated_steam_drying_ssd.asp); Zugriff 15.01.2015)

Gessner B.D. and Beller M. (1994): Protective effect of conventional cooking versus use of microwave ovens in an outbreak of salmonellosis. *Am J Epidemiol* 139, 903-909

Gomez P.I., Garcia-Loredo A., Nieto A., Salvatori D.M., Guerrero S. and Alzamora S.M. (2012): Effect of pulsed-light combined with an anti-browning pretreatment on quality of fresh apple. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 16, 102-112

Gomez-Lopez V.M., Ragaert P., Debevere J. and Devlieghere F. (2007): Pulsed light for food decontamination: a review. *Trends in Food Science and Technology* 18, 464-473

Gouin S. (2004): Microencapsulation: Industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends in Food Science and Technology* 15, 330-347

Gouma M., Alvarez I., Condon S. and Gayan E. (2014): Modelling microbial inactivation kinetics of combined UV-H treatments in apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 27, 111-120

Greßler S., Gzásó A., Simkó M., Nentwich M. und Fiedeler U. (2008): Nanopartikel und nanostrukturierte Materialien in der Lebensmittelindustrie. *Nano Trust Dossier Nr. 4*, Mai 2008.

Grobe A. and Rissanen M.E. (2012): Nanotechnologies in agriculture and food – an overview of different fields of applications, risk assessment and public perception. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture* 4, 176-186

Guo Q., Piyasena P., Mittal G.S., Si W. and Gong J. (2006): Efficiency of *radio frequency* cooking in the reduction of *Escherichia coli* and shelf life stability of ground beef. *Food Microbiology* 23, 112-118

Gurol C., Ekinci F.Y., Aslan N. and Korachi M. (2012): Low temperature plasma for decontamination of *E.coli* in milk. *International Journal of Food Microbiology* 157, 1-5

Gurtler J.B., Bailey R.B., Geveke D.J. and Zhang H.Q. (2011): Pulsed electric field inactivation of *E. coli* O157:H7 and non-pathogenic surrogate *E.coli* in strawberry juice as influenced by sodium benzoate, potassium sorbate and citric acid. *Food Control* 22, 1689-1694

Ha J. W., Kim S.Y., Ryu S.R. and Kang D.H. (2013): Inactivation of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium and *Escherichia coli* O157: H7 in peanut butter cracker sandwiches by *radio-frequency* heating. *Food Microbiology* 34, 145-150

Ha J.W. and Kang D.H. (2013): Simultaneous near-infrared radiant heating and UV radiation for inactivating *E.coli* O157:H7 and *Salmonella enterica* serovar typhimurium in powdered red pepper. *Applied and Environmental Microbiology* 79, 6568-6575

Harten U. (2006): Slicing with water jet. *Sugar Industry/Zuckerindustrie* 131, 698-703

Hati S., Mandal S., Minz P.S., Vij S., Khetra Y., Singh B.P. and Yadav D. (2012): Electrolyzed oxidized water: Non-thermal approach for decontamination of food borne microorganisms in food industry. *Food and Nutrition Sciences* 3, 760-768

- Hayes J.C., Laffey J.G., McNeil B. and Rowan N.J. (2012): Relationship between growth of food-spoilage yeast in high-sugar environments and sensitivity to high-intensity pulsed UV-light irradiation. *Food Science and Technology* 47, 1925-1934
- He X., Liu R., Tatsumi E., Nirasawa S. and Liu H. (2014): Factors affecting the thawing characteristics and energy consumption of frozen pork tenderloin meat using high-voltage electrostatic field. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 22, 110-115
- Head D.S., Cenkowski S., Holley R. and Blank G. (2008): Effects of *superheated steam* on *Geobacillus stearothermophilus* spore viability. *Journal of Applied Microbiology* 104, 1213-1220
- Heinz V., Töpfl S. and Knorr D. (2003): Impact of temperature on lethality and energy efficiency of apple juice pasteurization by pulsed electric fields treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4, 167-175
- Heinrich V., Zunabovic M., Varzakas T., Bergmair J. and Kneifel W. (2015): Pulsed Light Treatment of Different Food Types with a Special Focus on Meat: A Critical Review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, DOI: 10.1080/10408398.2013.826174
- Heraeus Noblelights (2015):  
([http://www.heraeusnoblelight.com/de/products\\_1/infrarot\\_1/infrared\\_products.aspx](http://www.heraeusnoblelight.com/de/products_1/infrarot_1/infrared_products.aspx); Zugriff 13.01.2015)
- Hertwig C., Reineke K., Ehlbeck J., Erdogdu B., Rauh C. and Schlüter O. (2015): Impact of remote plasma treatment on natural microbial load and quality parameters of selected herbs and spices. *Journal of Food Engineering* (article in press)
- Hicsasmaz Z., Dogan E., Chu C. and Rivzi S.S.H. (2003): Leavened dough processing by supercritical fluid extrusion (SCFX). *J. Agric. Food Chem.* 51, 6191-6197
- Hierro E., Ganan M., Barroso E. and Fernandez M. (2012): Pulsed light treatment for the inactivation of selected pathogens and the shelf-life extension of beef and tuna carpaccio. *International Journal of Food Microbiology* 158, 42-48.
- Hill A. (1997): Microwave ovens. ILSI Europe Concise Monograph Series (ISBN 0-944398-86-3)
- Hirth T. (2014): Trocknung mit überhitztem Dampf bei Atmosphärendruck. Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB.
- Hong H.J., Kim A.J., Park H.R. and Shin J.K. (2013): Changes in physicochemical properties of paprika by intense pulsed light treatment. *Korean Journal of Food Science and Technology* 45, 339-344
- Horagai Y., Hung L.H., Kimura Y. and Adachi S. (2008): Decomposition and discoloration kinetics of L-ascorbic acid powders in *superheated steam*. *LWT-Food Science and Technology* 41, 2113-2117
- Hosainpur A., Darvishi H., Nargesi F. and Fadavi A. (2014): Ohmic pre-drying of tomato paste. *Food Science and Technology International* 20, 193-204
- Huang L and Sites J. (2010): New automated microwave heating process for cooking and pasteurization of microwavable foods containing raw meats. *JFS: Food engineering and physical properties*, *Journal of Food Science* 75, 110-115
- Huang T.C., Ho C.T. and Fu H.Y. (2004): Inhibition of lipid oxidation in pork bundles processing by *superheated steam* frying. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52, 2924-2928

- Huang Y. and Chen H. (2014): A novel water-assisted pulsed light processing for decontamination of blueberries. *Food Microbiology* 40, 1-8
- Hüser T. (2012): Effiziente Lebensmittelrocknung mit überhitztem Wasserdampf. Prozess Vogel (press release)
- Hüser T. (2012): Heißdampf anstatt heißer Luft. Prozess Vogel (press release)
- Icier F. and Tavman S. (2006): Ohmic heating behaviour and rheological properties of ice cream mixtures. *International Journal of Food Properties* 9, 679-689
- Iyota H., Konishi Y., Yoshida K., Nishimura N., Nomura T. and Yoshida M. (2003): Drying of carbohydrate food in *superheated steam* and hot air – characteristics of coloring of potato slice surfaces. *Kagaku Kogaku Ronbunshu* 29, 94-99
- Jafari S.M., Yinghe H. and Bhandari B. (2007): Production of sub-micron emulsions by ultrasound and microfluidization techniques. *J. Sci. Food Eng.* 82, 478-488
- Jäger H., Schulz A., Karapetkov N. and Knorr D. (2009): Protective effect of milk constituents and sublethal injuries limiting process effectiveness during PEF inactivation of *Lb. rhamnosus*. *International Journal of Food Microbiology* 134, 154-161
- Jahid I.K., Han N., Zhang C.Y. and Ha S.D. (2015): Mixed culture biofilms of *Salmonella typhimurium* and cultivable indigenous microorganisms on lettuce show enhanced resistance of their sessile cells to cold oxygen plasma. *Food Microbiology* 46, 383-394
- Jakob A., Bryjak J., Wojtowicz H., Illeova V., Annus J. and Polakovic M. (2010): Inactivation kinetics of food enzymes during ohmic heating. *Food Chemistry* 123, 369-376
- James C., Reitz B. and James S.J. (2014): The freezing characteristics of garlic bulbs (*Allium sativum* L.) frozen conventionally or with the assistance of an oscillating weak magnetic field. *Food and Bioprocess Technology* 8, 702-708
- Jean J., Morales-Rayas R., Anoman M.N. and Lamhoujeb S. (2011): Inactivation of hepatitis A virus and norovirus surrogate in suspension and on food-contact surfaces using pulsed UV-light. *Food Microbiology* 28, 568-572
- Jeong S.G. and Kang D.H. (2014): Influence of moisture content on inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella enterica serovar Typhimurium* in powdered red and black pepper spices by *radio-frequency* heating. *International Journal of Food Microbiology* 176, 15-22
- Jiang W., Chen X., Niu Y. and Pan B. (2012): Spherical polystyrene-supported nano Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> of high capacity and low-field separation for arsenate removal from water. *J. Hazardous Material* 243, 319-325
- Jiao Y., Tang J. and Wang S. (2014): A new strategy to improve heating uniformity of low moisture-foods in *radio frequency* treatment for pathogen control. *Journal of Food Engineering* 141, 128-138
- Jin Y., Hengl N., Baup S., Pignon F., Gondrexon N., Maginin A., Sztucki M., Naraynan T., Michot L. and Cabane B. (2014): Effects of ultrasound on colloidal organization at nanometer length scale during cross-flow ultrafiltration probed by in-situ SAXS. *J. Membrane Science* 453, 624-635
- Jones P.L. (1985): Dielectric heating in food industry. IEE colloquium (digest), 1985/86, 1.1-1.2

Jones Soda (2015): (<http://www.jonessoda.com/jones-candy/jones-soda-electric-lemonade-sour-candy.html>, Zugriff 08.02.2015)

Jumah R. (2005): Modelling and simulation of continuous and intermittent *radio-frequency* assisted fluidized bed drying of grains. Food and Bioproducts Processing 83, 203-210

Jun S., Sastry S. and Samaranayake C. (2007): Migration of electrode components during ohmic heating of foods in retort pouches. Innovative Food Science and Emerging Technologies 8, 237-243

Kadoma T., Kishimoto T., Tanaka M. and Takami S. (2005): Development of healthy cooking technology with *superheated steam*. Shapu Giho/Sharp Technical Journal 91,40-44

Kadoma T., Sakai N., Nakado C., Fukuoka M. and Takami S. (2006): Water and oil transfer in meat during the *superheated steam* cooking. Shapu Giho/Sharp Technical Journal 94, 10-15

Kaiyta K., Lapinskas S., Gudelis V. and Luksiene Z. (2012): Effective inactivation of food pathogens *Listeria monocytogenes* and *Salmonella enterica* by combined treatment of hypericin-based photosensitization and high power pulsed light. Journal of Applied Microbiology 112, 1144-1151

Kalares M.D., Beelman R.B. and Elias R.J. (2011): Effects of postharvest pulsed UV light treatment of white button mushrooms on Vitamin D2 content and quality attributes. J. Agric. Food Chem. 60, 220-225

Kannan S. Dev S.R.S., Gariep Y. and Vijaya Raghavon G.S. (2013): Effect of radiofrequency heating on the dielectric and physical properties of eggs. Progress in Electromagnetics Research 51, 201-220

Kantrong H., Tansakul A. and Mittal G.S. (2012): Drying characteristics and quality of shitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared-drying. Journal of Food Science and Technology 49, 1-15.

Karimi F. (2010): Applications of *superheated steam* for the drying of food products (Review). International Agrophysics 24, 195-204

Khayankarn S., Uthaibutra J., Setha S. and Whangchai K. (2013): Using electrolyzed oxidizing water combined with an ultrasonic wave on the postharvest diseases control of pineapple fruit. Crop Protection 54, 43-47

Kim M.J., Lee J.H. and Lee J.S. (2014): Effect of ultraviolet-B irradiation on antioxidative properties of aqueous extracts from shiitake mushrooms. International Journal of Food Science and Technology 49, 2276-2282

Kintsel (2013): Vielseitig einsetzbar: Mikrowellentechnik in der Lebensmittelindustrie. 3. März, 2013. <http://www.linn-high-therm.de>; Zugriff 14.01.2015)

Kintsel N. (2013): Vielseitig einsetzbar: Mikrowellentechnik in der Lebensmittelindustrie. Verfahrenstechnik 3/2013, 2-3

Kirmaci B. and Singh R.K. (2012): Quality of chicken breast meat cooked in a pilot-scale *radio frequency* oven. Innovative Food Science and Emerging Technologies 14, 77-84

Kocabiyik H. and Tezer D. (2009): Drying of carrot slices using infrared-radiation. International Journal of Food Science and Technology 44, 953-959



- Kocadagli T., Koray Palazoglu T. and Gökmen V. (2012): Mitigation of acrylamide formation in cookies by using Maillard reaction products as recipe modifier in a combined partial conventional baking and *radio-frequency* post-baking process. *European Food Research and Technology* 235, 711-717
- Koch R.-R. (2009): Designed for cleanability: Hygienic design enclosure meets high demands of the food industry. *Trends in Science and Food Technology* 20, 53-56
- Koutchma T. (2008): UV light processing foods. *IUVA News* 10, 24-29
- Kozanoglu B., Vazquez A.C., Chanes J.W. and Patino J.L. (2006): Drying of seeds in a *superheated steam* vacuum fluidized bed. *Journal of Food Engineering* 75, 383-387
- Kraus S., Rother M., Steimle P., Gaukel V., Schuchmann H.P. and Merk D. (2011): Modularer Trocknungsprozessor zur Anwendung kombinierter Trocknungsverfahren. *Chemie Ingenieur Technik* 83, 888-892
- Krishnamurthy K., Jun S., Irudayaraj J. and Demirci A. (2008): Efficiency of infrared heat treatment for inactivation of *Staphylococcus aureus* in milk. *Journal of Food Process Engineering* 31, 798-816
- Krishnamurthy K., Khurana H.K., Jun S., Irudayaraj J. and Demirci A. (2008): Infrared heating in food processing: An Overview. *Comprehensive reviews in food science and food safety* 7, 2-13
- Kühn J., Schutkowski A., Hirche F., Baur A.C., Mielenz N. and Stangl G.I. (2014): Non-linear increase of vitamin D content in eggs from chicks treated with increasing exposure times of ultraviolet light. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 148, 7-13
- Lack E., Weidner B.Z., Knez C.S., Grüner D.B., Weinreich D.H. and Seidlitz A. (2005): Particle generation with supercritical CO<sub>2</sub>. ([www.natex.at/download/CPF-PGSS-article.pdf](http://www.natex.at/download/CPF-PGSS-article.pdf))
- Lacombe A., Niemira B.A., Gurtler J.B., Fan X., Sites J., Boyd G. and Chen H. (2015): Atmospheric cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effect on quality attributes. *Food Microbiology* 46, 479-484
- Lane K.E., Weili L., Smith C. and Derbyshire E. (2014): The bioavailability of an omega-3-rich algal oil is improved by nanoemulsion technology using yoghurt as a food vehicle. *Int. J. Food Sci. and Techn.* 49, 1264–1271
- Lasagabaster A. and Maranon I.M. (2014): Survival and growth of *Listeria innocua* treated by pulsed light technology: Impact of post-treatment temperature and illumination conditions. *Food Microbiology* 41, 76-81.
- Lee N.Y., Kim N.H., Jang I.S., Jang S.H., Lee S.H., Hwang I.G. and Rhee M.S. (2014): Decontamination efficiency of neutral electrolyzed water to eliminate indigenous flora on a large-scale of cabbage and carrot both in the laboratory and on a processing line. *Food Research International* 64, 234-240
- Lee S.Y., Ryu S. and Kang D.H. (2013): Effects of frequency and waveform on inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella enterica serovar typhimurium* in salsa by ohmic heating. *Applied and Environmental Microbiology* 79, 10-17
- Lee S.Y., Sagong H.G., Ryu S. and Kang D.H. (2012): Effect of continuous ohmic heating to inactivate *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium* and *Listeria monocytogenes* in orange juice and tomato juice. *Applied Microbiology* 112, 723-731

Lemmens L., Tibäck E., Svelander C., Smout C., Ahrne L., Langton M., Alming M., Van Loey A. and Hendricks M. (2009): Thermal pretreatments of carrot pieces using different heating techniques: Effect on quality related aspects. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 10, 522-529

Li X., Pan Z., Atungulu G.G., Zheng X., Wood D., Delwiche M. and McHugh T.H. (2014): Peeling of tomatoes using novel infrared radiation heating technology. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 21, 123-130

Li Y., Chen Z. and Mo H. (2007): Effects of pulsed electric fields on physicochemical properties of soybean protein isolates. *LWT - Food Science and Technology* 40, 1167-1175

Li Y.B., Seyed-Yagoobi J., Moreira R. and Yamasengsung R. (1999): *Superheated steam* impingement drying of tortilla chips. *Drying Technology* 17, 191-213

Linsberger-Martin, G.; Lukasch, B. and Berghofer, E. (2011): Effects of high hydrostatic pressure on the RS content of amaranth, quinoa and wheat starch. *Strach/Stärke*, 00, p 1-9.

Lipiec J., Janas P. and Barabasz W. (2004): Effect of oscillating magnetic field pulses on the survival of selected microorganisms. *Int. Agrophysics* 18, 325-328

Lipson H. and Kurman M. (2013): *Fabricated – The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-1-118-35063-8

Liu Y., Tang J., Mao Z., Jae-Hyung M. and Wang S. (2009): Comparison between combined *radio frequency* and hot air treatment and hot air treatment on bread fresh-keeping. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 25, 323-328.

Lloyd D.M., Norton I.T. and Spyropoulos F. (2014): Processing effects during rotating membrane emulsification. *Journal of Membrane Science* 466, 8-17

Lorca T.A., Claus J.R., Eifert J.D., Marcy J.E. and Sumer S.S. (2003): Penetration of surface-inoculated bacteria as a result of electrically generated hydrodynamic shock wave treatment of boneless skinless chicken breasts. *The Journal of Poultry Science* 82, 1205–1210

Lorca, T., Claus, J., Eifert, J. and Sumer, S. (2002): Effects of explosively-generated hydrodynamic shock wave treatments on the microbial flora of beef, steaks, ground beef and *Listeria innocua*. *Appl. Environ. Microbiol.* (<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07292002-153950/unrestricted/applenviro-micro.pdf>)

Lorca, T.A., Claus, J.R., Eifert, J.D., Marcy, J.E. and Sumer, S.S. (2002): Effects of electrically-generated hydrodynamic shock waves on the microbial flora of ground beef. (<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07292002-153950/unrestricted/jfoodscience>)

Lucchesi M.E., Chemat F. and Smadja J. (2004): Solvent-free microwave extraction of essential oil from aromatic herbs: comparison with conventional hydrodistillation. *Journal of Chromatography A* 1043, 323-327

Luksiene Z., Buchovec I. and Viskelis P. (2013): Impact of high-power pulsed light on microbial contamination, health promoting components and shelf life of strawberries. *Food Technology and Biotechnology* 51, 284-292

Luksiene Z., Buchovec I., Kaiyrte K., Paskeviciute E. and Viskelis P. (2012): High-power pulsed-light for microbial decontamination of some fruits and vegetables with different surfaces. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 10, 162-167

Lyndhurst B. (2009): An evidence review of public attitudes to emerging food technologies. Social Science Research Unit Food Standards Agency (UK), March 2009

Macias-Rodriguez B., Yang W., Schneider K. and Rock C. (2014): Pulsed UV light as a postprocessing intervention for decontamination of hard-cooked peeled eggs. *International Journal of Food Science and Technology* 49, 2472-2480

Maftei N.A., Ramos-Villaruel A.Y., Nicolau A.I., Martin-Belloso O. and Soliva-Fortuny R. (2013): Pulsed light inactivation of naturally occurring moulds on wheat grain. *J Sci. Food Agric.* 94, 721-726

Manzocco L., Panozzo A. and Nicoli M.C. (2013): Inactivation of polyphenoloxidase by pulsed light. *Journal of Food Science* 78, E1183-E1187

Marcelo Coelho Studio (2015): Digital Chocolatier Prototype ([www.cmarcelo.com/cornucopia](http://www.cmarcelo.com/cornucopia), Zugriff 10.02.2015)

Marra F., Zhang L. and Lyng J.G. (2009): *Radio frequency* treatment of foods: Review of recent advances. *Journal of Food Engineering* 91, 497-508

Martinez-Hernandez G.B., Navarro-Rico J., Gomez P.A., Oton M., Artes F. and Artes-Hernandez F. (2015): Combined sustainable sanitising treatment to reduce *Escherichia coli* and *Salmonella enteritidis* growth on fresh-cut kalia-hybrid broccoli. *Food Control* 47, 312-317

Massier S., Bouffartigues E., Rince A., Maillot O., Feuilloley M.G.J., Orange N. and Chevalier S. (2013): Effects of pulsed-light induced stress on *Enterococcus faecalis*. *Journal of Applied Microbiology* 114, 186-195

Max Planck Gesellschaft (2011): Kaltes Plasma beseitigt EHEC-Bakterien. <http://www.mpg.de>; Zugriff 01/2015.

Meneses N., Jäger H. and Knorr D. (2011): Minimization of thermal impact by application of electrode cooling in a co-linear PEF treatment chamber. *Journal of Food Science* 76, E536-E543

Mercali G.D., Jaeschke D.P., Tessaro I.C. and Marczak L.D.F. (2013): Degradation kinetics of anthocyanins in acerola pulp: Comparison between ohmic and conventional heat treatment. *Food Chemistry* 136, 853-857

MICROFLUIDICS (2015): How It Works: Particle Size Reduction. (<http://www.microfluidicscorp.com/our-technology/how-it-works>, Zugriff 20.02.2015)

MICROPAST (2015): A new high-speed method revolutionises the world of pasteurisation (<http://www.micropast.com/kaltgasinjektion.html>, Zugriff 22.2.2015)

Miller B.M., Sauer A. and Moraru C.I. (2012): Inactivation of *Escherichia coli* in milk and concentrated milk using pulsed-light treatment. *Journal of Dairy Science* 95, 5597-5603

Misra N.N., Kaur S., Tiwari B.K., Kaur A., Singh N. and Cullen P.J. (2015). *Food Hydrocolloids* 44, 115-121

Misra N.N., Moiseev T., Patil S., Pankaj S.K., Bourke P., Mosnier J.P., Keener K.M. and Cullen P.J. (2014): Cold plasma in modified atmospheres for post-harvest treatment of strawberries. *Food and Bioprocess Technology* 7, 3045-3054

- Misra, N.N., Keener, K.M., Bourke, P., Mosnier, J.P. and Cullen, P.J. (2014): In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 118, 177-182
- Molina B., Saez M.I., Martinez T.F., Guil-Guerrero J.L. and Suarez M.D. (2014): Effect of ultraviolet light treatment on microbial contamination, some textural and organoleptic parameters of cultured sea bass fillets. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (article in press)
- Möller M., Eberle U., Hermann A., Moch K. und Stratmann B. (2009): *Nanotechnologie im Bereich der Lebensmittel*. VDF Hochschulverlag AG, ETH Zürich
- MONDI (2015): The best of two innovations: Mondi packaging flexibles presents NeoSteam™ MAP (<http://www.mondigroup.com/PortalData/1/Resources/newsroom/NeoSteamMAPEN.pdf>); Zugriff 22.2.2015)
- Moreira R.G. (2001): Impingement drying of foods using hot air and *superheated steam*. *Journal of Food Engineering* 49, 291-295
- Müller N. (2011): Nanoenhanced membranes for improved water treatment. *ObservatoryNANO Briefing No. 16*, June 2011
- Nair G.R., Divya V.R., Prasanna L., Habeeba V., Prince M.V. and Raghavan G.S.V. (2012): Ohmic heating as a pretreatment in solvent extraction of rice bran. *Journal of Food Science and Technology* 51, 1-7
- NANOPINION (2015): Monitoring public opinion on Nanotechnology in Europe ([http://results.nanopinion.eu/download/nanopinion\\_D6\\_Report\\_on\\_comparative\\_data.pdf](http://results.nanopinion.eu/download/nanopinion_D6_Report_on_comparative_data.pdf)); Zugriff 30.05.2015)
- Nasabi M., Labbafi M., Nezhad M.H., Kanmohammadi M. and Garmarudi A.B. (2012): Investigation of TiO<sub>2</sub> nanoparticle efficiency on decolourisation of industrial date syrup. *International Journal of Food Science & Technology* 48, 316–323
- Nedovic V., Kalusevic A., Manojlovic V., Levic S. and Bugarski B. (2011): An overview of encapsulation technologies for food applications. *Proceida Food Science* 1, 1806-1815
- Nelson S.O. and Trabeisi S. (2009): Influence of water content on RF and microwave dielectric behavior of foods. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 43, 65-70
- Neoplas Tools GmbH (2011): <http://www.neoplas-tools.eu>; Zugriff 01/2015.
- Nesterenko A., Alric I., Silvestre F. and Durrieu V. (2013): Vegetable proteins in microencapsulation: A review of recent interventions and their effectiveness. *Industrial Crops and Products* 42, 469-479
- Nguyen L.T., Choi W., Lee S.H. and Jun S. (2013): Exploring the heating patterns of multiphase foods in a continuous flow, simultaneous microwave and ohmic combination heaters. *Journal of Food Engineering* 116, 65-71
- Niamnuy C., Nachaisin M., Laohavanich J. and Devahastin S. (2011): Evaluation of bioactive compounds and bioactivities of soybean dried by different methods and conditions. *Food Chemistry* 129, 899-906

- Nielsen H., Sonne A.M., Grunert K.G., Banati D., Pollak-Toth A. and Lakner Z. (2009): Consumer perception of the use of high-pressure processing and pulsed-electric-field technologies in food production. *Appetite* 52, 115-126
- Niemira B. A. (2012): Cold plasma reduction of *Salmonella* and *Echerichia coli* O157:H7 on almonds using ambient pressure gas. *Journal of Food Science* 77, M171–M175
- Ning X. and Han C. (2013): Drying characteristics and quality of taegeuk ginseng (*Panax ginseng* C.A. Meyer) using far-infrared rays. *Food Science and Technology* 48, 477-483
- Ning X., Han C., Cho S., Lee J. and Yoon S. (2013): Far-infrared drying characteristics and quality assessment of *Ligularia fischeri*. *Food Science and Technology* 22, 281-288
- Nowak D. and Lewicki P.P. (2005): Quality of infrared dried apple slices. *Drying Technology* 23, 831-846
- ÖAW, 2015: Nano-Trust-Dossiers. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (<http://epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers>)
- Ochoa-Velasco C.E., Cruz-Gonzalez M. and Guerrero-Beltram J.A. (2014): Ultraviolet-C light inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium* in coconut milk. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* (article in press)
- Ordiozola-Serrano I., Aguilo-Aguayo I., Soliva-Fortuny R. and Martin-Belloso O. (2013): Pulsed electric fields processing effects on quality and health-related constituents of plant-based foods. *Trends in Food Science and Technology* 29, 98-107
- Ohlsson T. (1994): Minimal processing-preservation methods of the future. *Trends in Food Science and Food Technology* 5, 341-344
- Olsen N.V., Grunert K.G. and Sonne A.M. (2010): Consumer acceptance of high-pressure processing and pused-electric-field: a review. *Trends in Food Science and Technology* 21, 464-472
- Ongeng D., Devlieghere F., Debevere J., Coosemans J. and Ryckeboer J. (2006): The efficacy of electrolyzed oxidizing water for inactivating spoilage microorganisms in process water and on minimally processed vegetables. *Journal of Food Microbiology* 109, 187-197
- Österr. Bestrahlungsverordnung (2000): 327. Verordnung der Bundesministerin für soziale Sicherheit und Generationen über die Behandlung von Lebensmitteln und Verzehrprodukten mit ionisierenden Strahlen. BGBl. 2000/237
- Österreichisches Lebensmittelbuch (2007): Codexkapitel B 1 - Trinkwasser, IV. Auflage, Veröffentlicht mit Geschäftszahl: BMGFJ-75210/0009-IV/B/7/2007 vom 15.6.2007
- Österreichisches Lebensmittelbuch (2013): Codexkapitel A 5 - Kennzeichnung, Aufmachung Abschnitt Lagerbedingungen, IV. Auflage, Veröffentlicht mit Geschäftszahl: BMG-75210/0010-II/B/13/2013 vom 10.9.2013
- Pan Z., Atungulu G. and Li X. (2013): Infrared heating. *Resource: Engineering and Technology for Sustainable World* 20, 14-17
- Pan Z., Shih C., McHugh T.H. and Hirschberg E. (2008): Study of banana dehydration using sequential infrared radiation heating and freeze-drying. *LWT- Food Science and Technology* 41, 1944-1951

- Pankaj S.K., Bueno-Ferrer C., Misra N.N., O'Neill L., Tiwari B.K., Bourke P. and Cullen P.J. (2014): Physicochemical characterization of plasma-treated sodium caseinate film. *Food Research International* 66, 438-444
- Pankaj S.K., Misra N.N. and Cullen P.J. (2013): Kinetics of tomato peroxidase inactivation by atmospheric pressure cold plasma based on dielectric barrier discharge. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 19, 153-157
- Park S.H., Balasubramaniam V.M. and Sastry S.K. (2014): Quality of shelf-stable low-acid vegetables processed using pressure-ohmic thermal sterilization. *LWT- Food Science and Technology* 57, 243-252
- Pascual-Pineda L.A., Flores-Andrade E., Jiménez-Fernández M. and Beristain C.I. (2015): Kinetic and thermodynamic stability of paprika nanomeulsions. *Int. J. Food Sci. Techn.*  
doi:10.1111/ijfs.12750
- Pataro G., Donsi G. and Ferrari G. (2011): Aseptic processing of apricots in syrup by means of a continuous pilot scale ohmic unit. *LWT- Food Science and Technology* 44, 1546-1554
- Pataro G., Munoz A., Palgan I., Noci F., Ferrari G. and Lyng J.G. (2011): Bacterial inactivation in fruit juices using a continuous flow pulsed light (PL) system. *Food Research International* 44, 1642-1648
- PEN (2015): The Project on Emerging Nanotechnology. Woodrow Wilson Int. Center ([www.nanotechproject.org](http://www.nanotechproject.org))
- Pérez-Esteve E., Bernardos A., Martínez-Máñez R. and Barat J.M. (2013): Nanotechnology in the development of novel functional food or their package. An overview based in patent analysis. *Recent Patents on Food, Nutrition and Agriculture* 5, 35-43
- Perino-Issartier S., Huma Z., Abert-Vian M. and Chemat F. (2011): Solvent free microwave-assisted extraction of antioxidants from sea buckthorn food by-products. *Food and Bioprocess Technology* 4, 1020-1028
- Perrut M. (2015): Supercritical fluid applications: Industrial development and economic issues. (<http://www.futurechemtech.com/data/SCF%20Applications%20and%20Economic%20Issues.pdf>)
- Pingret D., Fabiano-Tixier A.-S. and Chemat F. (2013): Degradation during application of ultrasound in food processing: A review. *Food Control* 31, 593-606
- Pinheiro J., Alegria C., Abreu M., Goncalves E.M. and Silva C.I.M. (2014): Use of UV-C treatment for extending fresh whole tomato shelf-life. *Journal of Food Science and Technology* (article in press)
- Poovarodom N., Junsrisuriyawong K., Sangmahamad R. and Tangmongkollert P. (2014): Effects of microwave heating on the migration of substances from melamine formaldehyde tableware. *Food additives and contaminants- part A* 31, 1616-1624
- Pothakamury U.R., Barbosa-Canovas G.V. and Swanson B.G. (1993): Magnetic-field inactivation of microorganisms and generation of biological changes. *Food Technology* 47, 85-93
- Prachayawarakorn S., Prachayawasin P. and Soponronnarit S. (2006): Heating process of soybean using hot-air and *superheated steam* fluidized bed-dryers. *LWT- Food Science and Technology* 39, 770-778

Pronyk C., Cenkowski S. and Muir W.E. (2004): Drying foodstuffs with *superheated steam*. *Drying Technology* 22, 899-916

Pronyk C., Cenkowski S., Muir W.E., Lukow O.M., Wyatt J. and Nicholson D. (2007): Effects of dough resting time and saturated steam pre-treatment on the textural properties of *superheated steam* processed instand asian noodles. 2007 ASABE Annual International Meeting, Technical papers., 13, 12p.

Pszczola E. (2007): Problem-solving with dairy. *Food Technology* 2, 47-57

Puertolas E., Lopez N., Condon S., Alvarez I. and Raso J. (2010): Potential applications of PEF to improve red wine quality. *Trends in Food Science and Technology* 21, 247-255

PurePulse (2015): <http://www.purepulse.eu>; Zugriff 01/2015.

QBTEC BV (2015): [www.hifri.com](http://www.hifri.com); Zugriff 01/2015.

Qian P.J., Yang X.T., Wu X.M., Zhao L., Fan B.L. and Xing B. (2012): A traceability system incorporating 2 D barcode and RFID technology for wheat flour mills. *Computers and Electronics in Agriculture* 89, 76-85.

Quintero Ruiz, N.A., Demarchi, S.M. and Giner, S.A. (2014): Effect of hot air, vacuum and infrared drying methods on the quality of rose hip leathers. *International Journal of Food Science and Technology* 49, 1799-1804

Rajkowski K.T. and Sommers C.H. (2012): Effect of anolyte on background microflora, salmonella and *Listeria monocytogenes* on catfish fillets. *Journal of Food Protection* 75, 765-770

Ramos-Villaruel A., Aron-Mafte, N., Martin-Belloso O. and Soliva-Fortuny R. (2014): Bacterial inactivation and quality changes of fresh-cut avocados as affected by intense light luses of specific spectra. *Food Science and Technology* 49, 128-136

Ramos-Villaruel A.Y., Aron-Maftei N., Martin-Belloso O. and Soliva-Fortuny R. (2012): The role of pulsed light spectral distribution in the inactivation of *Escherichia coli* and *Listeria innocua* on fresh-cut mushrooms. *Food Control* 24, 206-2013

RICHTLINIE 1999/2/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Februar 1999 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über mit ionisierenden Strahlen behandelte Lebensmittel und Lebensmittelbestandteile

RICHTLINIE 1999/3/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Februar 1999 über die Festlegung einer Gemeinschaftsliste von mit ionisierenden Strahlen behandelten Lebensmitteln und Lebensmittelbestandteilen

Ringus D.L. and Moraru C.I. (2013): Pulsed light inactivation of *Listeria innocua* on food packaging materials of diferent surface roughness and reflectivity. *Journal of Food Engineering* 114, 331-337

Rivzi S.S.H., Mulvaney S.J. and Sokhey S.J. (1995): The combined application of supercritical fluid and extrusion technology. *Trends in Food Science and Technology* 6, 232-240

Rizotti L., Levav N., Fracchetti F., Felis G.E. and Torriani S. (2015): Effect of UV-C treatment on the microbial population of white and red wines as revealed by conventional platin and PMA-qPCR methods. *Food Control* 47, 407-412

- Rojas-Graü M.A., Soliva-Fortuny R. and Martin-Belloso O. (2009): Edible coatings to incorporate active ingredients to fresh-cut fruits: A Review. *Trends in Food Science and Technology* 20, 438-477
- Roknul A.S.M., Zhang M., Mujumdar A.S. and Wang Y. (2014): A comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.). *Drying Technology* 32, 657-666
- Rollin F., Kennedy J. and Wills J. (2011): Consumers and new food technology. *Trends in Food Science and Technology* 22, 99-111
- Roohinejad S., Everett D.W. and Oey I. (2014): Effect of pulsed electric field processing on carotenoid extractability of carrot puree. *International Journal of Food Science and Technology* 49, 2120-2127
- Routray W. and Orsat V. (2012): Microwave-assisted extraction of flavonoids: A review. *Food and Bioprocess Technology* 5, 409-424
- Ruan R., Ye X., Chen P. and Doona C.J. (2001): Ohmic heating. Woodhead Publishing.
- Ruiz-Garcia L. and Lunadei L. (2011): The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture* 79, 42-50
- Saengrayap R., Tansakul A. and Mittal G.S. (2014): Effect of far-infrared radiation assisted microwave-vacuum drying on drying characteristics and quality of red chili. *Journal of Food Science and Technology* (article in press)
- Sagalowicz L., Leser M.E., Watzke H.J. and Michel M. (2006): Monoglyceride self-assembly structures as delivery vehicles. *Trends in Food Science and Technology* 17, 204-214
- Sakr M. and Liu S. (2014): A comprehensive review on applications of ohmic heating. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, 262-269
- Saldana do Carmo C., Nunes A.N., Serra A.T., Ferreira-Diaz S., Nogueira I. and Duarte C.M.M. (2015): A way to prepare a liposoluble natural pink colourant. *Green Chemistry* (DOI: 10.1039/C4GC01801J)
- Salengke S. and Sastry S.K. (2007): Models for ohmic heating of solid-liquid mixtures under worst-case heating scenarios. *Journal of Food Engineering* 83, 347-355
- Sales J.M. and Resurreccion A.V.A. (2010): Phenolic profile, antioxidants and sensory acceptance of bioactive-enhanced peanuts using ultrasound and UV. *Food Chemistry* 122, 795-803
- Samaranayake C.P., Sastry S.K. and Zhang H. (2005): Pulsed ohmic heating- A novel technique for minimization of electrochemical reactions during processing. *Journal of Food Science* 70, E460-E465
- Samsung (2015): <http://www.samsung.com>; Zugriff 02/2015.
- Sangasuri P. and Agustin M.A. (2006): Nanoscale materials development – a food industry perspective. *Trends in Food Science and Technology* 17, 547-556
- Sarang S., Sastry S.K. and Knipe L. (2008): Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering* 87, 351-356



- Sarang S.S. and Sastry S. (2005): Salt diffusion into vegetable tissue as a pretreatment for ohmic heating. AIChE Annual Meeting, Conference Proceeding, p 12232
- Sarkar B. (2014): Enhanced cross-flow ultrafiltration of apple juice using electric field. Journal of Food Processing and Preservation, DOI: 10.1111/jfpp.12356
- Sastry S.K. and Barach J.T. (2000): Ohmic and inductive heating. Journal of Food Science, Supplement 65, 42-46
- Schlisselberg D.B., Kler E., Kalily E., Kisluk G., Karniel O. and Yaron S. (2013): Inactivation of food-borne pathogens in ground beef by cooking with highly controlled *radio frequency* energy. International Journal of Food Microbiology 160, 219-226
- Schneider Y., Zahn S., Hofmann J., Wecks M. and Rohm H. (2006): Acoustic cavitation induced by ultrasonic devices. A preliminary study. Ultrasonics Sonochemistry 13, 117-120
- Schossler K, Jäger H. and Knorr D. (2012): Novel contact ultrasound system for the accelerated freeze-drying of vegetables. Innovative Food Science and Emerging Technologies 16, 113-120
- Scott-Thomas C. (2014): Rejected nano labelling law goes back to square one. ([www.foodnavigator.com/content/view/print893864](http://www.foodnavigator.com/content/view/print893864))
- Seitz D. (2015): Der simple Trick der Sternköche. Focus-online (2015), ([http://www.focus.de/panorama/videos/kochen-fuer-angeber-1-der-simple-steak-trick-der-sterne-koeche\\_vid\\_36463.html](http://www.focus.de/panorama/videos/kochen-fuer-angeber-1-der-simple-steak-trick-der-sterne-koeche_vid_36463.html); Zugriff 22.02.2015)
- Sengun I.Y., Yildiz-Turp G., Kendirci P. and Kor G. (2014): Effects of ohmic heating for pre-cooking of meatballs on some quality and safety attributes. LWT- Food Science and Technology 55, 232-239
- Seo M.H. Lee S.Y., Chang Y.H. and Kwak H.S.: Physicochemical, microbial and sensory properties of yoghurt supplemented with nanopowdered chitosan during storage. Journal of Dairy Science 92, 5907-5916
- Sepulveda-Ahumada D.R., Ortega-Rivas E. and Barbosa-Canovas G.V. (2000): Quality aspects of cheddar cheese obtained with milk pasteurized by pulsed electric fields. Transactions of the Institution of Chemical Engineers 78, 65-71
- Sharp Corporation (2015): [http://sharp-world.com/shs\\_oven/contents/what\\_SHS.html](http://sharp-world.com/shs_oven/contents/what_SHS.html); Zugriff 01/2015
- Shivmurti S., Harshit P., Rinkita P. and Smith P. (2014): Comparison of chemical properties of milk when conventionally and ohmically heated. International food research journal 21, 1425-1428
- Shriver S., Yang W., Chung S.Y. and Percival S. (2011): Pulsed ultraviolet light reduces immunoglobulin E binding to Atlantic white shrimp extract. Int. J. Environ. Res. Public Health 8, 2569-2583
- Shynkaryk M.V., Ji T., Alvarez V.B. and Sastry S.K. (2010): Ohmic heating of peaches in the wide range of frequencies (50 Hz to 1 MHz). Journal of Food Sciences 75, E493- E500
- Siegrist M. (2008): Factors influencing public acceptance of innovative food technologies and products. Trends in Food Science and Technology 19, 603-608
- Siegrist M., Cousin M.E., Kastenholz H. and Wiek A. (2007): Public acceptance of nanotechnology foods and food packaging: The influence of affect and trust. Appetite 49, 459-466

- Siegrist M., Stampfli N., Kastenholz H. and Keller C. (2008): Perceived risks and perceived benefits of different nanotechnology foods and nanotechnology food packaging. *Appetite* 51, 283-290
- Simon R.R., Borzelleca J.F., DeLuca H.F. and Weaver C.M. (2013): Safety assessment of the post-harvest treatment of button mushrooms (*Agaricus bisporus*) using ultraviolet light. *Food and Chemical Toxicology* 56, 278-289
- Singkhornart S., Gu B.J. and Ryu G.H. (2012): Physicochemical properties of extrudes germinated wheat and barley as modified by CO<sub>2</sub> injection and difference extrusion conditions. *Int. J. Food Science Technology* 143, 122-131
- Sinhal K., Ghoshdastidar P.S. and Dasgupta B. (2010): Computer simulation of drying of food products with *superheated steam* in a rotary kiln. 2010 4th International Heat Transfer Conference, IHTC 14
- SKLM DFG Senate Commission on food safety (2008): Statement on the treatment of food using a pulsed electric field.
- Soliva-Fortuny R., Balasa A., Knorr, D. and Martin-Belloso O. (2009): Effects of pulsed electric fields on bioactive compounds in foods: A review. *Trends in Food Science and Technology* 20, 544-556
- Somavat R., Kamonpatana P., Mohamed H.M.H. and Sastry S.K. (2012): Ohmic sterilization inside a multi-layered laminate pouch for long duration space missions. *Journal of Food Engineering* 112, 134-143
- Somavat R., Mohamed H.M.H. and Sastry S. K. (2013): Inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores under ohmic and conventional heating. *LWT- Food Science and Technology* 54, 194-198
- Sommerergerger J. (2010): Flavoring system for low-fat margarine. Master Thesis, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna
- Soria A.C. and Villamiel M. (2010): Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of Food: A review. *Trends in Science and Food Technology* 21, 323-331
- Sotoma I. and Isobe S. (2011): Food processing and cooking with new heating system combining *superheated steam* and hot water spray. *Japan Agricultural Research Quarterly* 45, 69-76
- Sotome I., Suzuki K., Koseki S., Sakamoto K., Takenaka M., Ogasawara Y., Nadachi Y. and Isobe S. (2006): Blanching of potato with *superheated steam* containing micro-droplets of hot water. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi* 53, 451-458
- Sotome I., Takenaka M., Koseki S., Ogasawara Y., Nadachi Y., Okadome H. and Isobe S. (2009): Blanching of potato with *superheated steam* and hot water spray. *LWT - Food Science and Technology* 42, 1035-1040
- Spyropoulos F., Lloyd D.M., Hancocks R.D. and Pawlil A.K. (2009): Advances in embrane emulsification. Part A: Recent developments in processing aspects and microstructural design approaches. *J. Sci. Food Agric.* 94, 613-627
- Srey S., Park S.Y., Jahid I.K. and Ha A.D. (2014): Reduction effect of the selected chemical and physical treatments to reduce *L. monocytogenes* biofilms formed on lettuce and cabbage. *Food Research International* 62, 484-491
- Stancl J. and Zitny R. (2010): Milk fouling at direct ohmic heating. *Journal of Food Engineering* 99, 437-444

- Suhem K., Matan N., Nisoa M. and Matan N. (2013): Inhibition of *Aspergillus flavus* on agar media and brown rice cereal bars using cold atmospheric plasma treatment. *International Journal of Food Microbiology* 161, 107-111
- Suhem K., Matan N., Nisoa M. and Matan N. (2013): Low pressure *radio frequency* plasma effects on the mould control, physical quality, nutritional value, mineral content and trace element content of brown rice snack bars. *Journal of Food and Nutrition Research* 52, 87-94
- Surowsky B., Fischer A., Schlüter O. and Knorr D. (2013): Cold plasma effects on enzyme activity in a model food system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 19,146-152
- Surowsky B., Fröhling A., Gottschalk N., Schlüter O. and Knorr D. (2014): Impact of cold plasma on *Citrobacter freundii* in apple juice: Inactivation kinetics and mechanisms. *International Journal of Food Microbiology* 174, 63-71
- TAKIGAWA (2015). DreamSteam ([www.takigawa-corp.com/eng/products/dreamsteam.html](http://www.takigawa-corp.com/eng/products/dreamsteam.html))
- Thomakapanich O., Suvarnakatu O. and Devahastin S. (2007): Study of intermittent low-pressure *superheated steam* and vacuum drying of heat-sensitive material. *Drying Technology* 25, 205-223
- Tiwari G., Wang S., Tang J. and Birla S.L. (2011): Analysis of *radio frequency* (RF) power distribution in dry food materials. *Journal of Food Engineering* 104, 548-556
- Töpfl S. (2007): Pulsed electric fields - industrielle Anwendungen. Fresenius FoodTech Tagung Frische und Haltbarkeit, Mainz, 23.-24.10.2007
- Töpfl S., Heinz V. and Knorr D. (2007): High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical Engineering and Processing* 46, 536-546
- Torlak E. (2014): Inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in aqueous suspension and on apples by neutral electrolyzed water. *International Journal of Food Microbiology* 185, 69-72
- Turtoi M. and Nicolau A. (2007): Intense light pulse treatment as alternative method for mould spores destruction on paper-polyethylene packaging material. *Journal of Food Engineering* 83, 47-53
- Uemura K., Takahashi C. and Kobayashi I. (2014): Inactivation of enzymes in packed miso paste by *radio-frequency* heating. *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi* 61, 95-99
- Uesugi A.R. and Moraru C.I. (2009): Reduction of *Listeria* on ready-to-eat sausages after exposure to a combination of pulsed light and nisin. *Journal of Food Protection* 72, 247-353
- Ulbin-Figlewicz, N., Brychcy, E. and Jarmoluk, A. (2013): Effect of low-pressure cold plasma on surface microflora of meat and quality attributes. *Journal of Food Science and Technology* (DOI:10.1007/s13197-013-1108-6)
- Ulbin-Figlewicz, N., Zimoch-Korzycka, A. and Jarmoluk, A. (2014): Antibacterial activity and physical properties of edible chitosan films exposed to low-pressure plasma. *Food and Bioprocess Technology* 7, 3646-3654
- Unluturk S. and Atilgan M.R. (2014): UV-C irradiation of freshly squeezed grape juice and modelling inactivation kinetics. *Journal of Food Process Engineering* 37, 438-449

Uyar R., Bedane T.F., Erdogdu F., Koray Palazoglu T., Farag K.W. and Marra F. (2015): *Radio-frequency* thawing of food products – a computational study. *Journal of Food Engineering* 146, 163-171

Van Remmen UV Techniek BV (2014): [www.http://:vanremmen.nl](http://vanremmen.nl); Zugriff 01/2015.

Veggi, P.C., Martinez, J. and Meireless, M.A.A. (2013): Fundamentals of microwave extraction. In: *Microwave-assisted extraction for bioactive compounds: Theory and Practice*. DOI 10.1007/978-1-4614-4830-3\_2.

VERORDNUNG (EG) Nr. 258/1997 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über neuartige Lebensmittel und neuartige Lebensmittelzutaten vom 27. Januar 1997

VERORDNUNG (EG) Nr. 1935/2004 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27. Oktober 2004 über Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen und zur Aufhebung der Richtlinien 80/590/EWG und 89/109/EWG

VERORDNUNG (EG) Nr. 1333/2008 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. Dezember 2008 über Lebensmittelzusatzstoffe

VERORDNUNG (EU) Nr. 257/2010 DER KOMMISSION vom 25. März 2010 zur Aufstellung eines Programms zur Neubewertung zugelassener Lebensmittelzusatzstoffe gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1333/2008

VERORDNUNG (EU) Nr. 1169/2011 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. Oktober 2011 betreffend die Information der Verbraucher über Lebensmittel.....

Vikram V.B., Ramesh M.N. and Prapulla S.G. (2005): Thermal degradation kinetics of nutrients in orange juice heated by electromagnetic and conventional methods. *Journal of food engineering* 69, 31-40

Vishwanathan K.H., Hebbar H.U. and Raghavarao K.S.M.S. (2010): Hot air assisted infrared drying of vegetables and its quality. *Food Science and Technology Research* 16, 381-388

Vishwanthan K.H., Giwari G.K. and Hebbar H.U. (2013): Infrared assisted dry-blanching and hybrid drying of carrot. *Food and Bioproducts Processing* 91, 89-94

Wambura P. and Verghese M. (2011): Effect of pulsed ultraviolet light on quality of sliced ham. *LWT - Food Science and Technology* 44, 2173-2179

Wan J., Liu C., Liu W., Tu Z., Wu W. and Tan H. (2015): Optimization of instant edible films based on dietary fiber processed with dynamic high pressure microfluidization for barrier properties and water solubility. *LWT - Food Science and Technology* 60, 603

Wang B., Khir R., Pan Z., El-Mashad H., Atungulu G.G., Ma H., McHugh T.H., Qu W. and Wu B. (2014): Effective disinfection of rough rice using infrared radiation heating. *Journal of Food Protection* 77, 1538-1545

Wang J., Luechapattanaorn K., Wang Y. and Tang J. (2012): *Radio-frequency* heating of heterogeneous food- meat lasagna. *Journal of Food Engineering* 108, 183-193

Wang J.J., Lin T., Li J., Liao C., Pan Y.J. and Zhao Y. (2014): Effect of acidic electrolyzed water ice on quality of shrimp in dark condition. *Food Control* 35, 207-212

- Wang L., Zhang M., Fang Z. and Xu B. (2014): Application of intermediate-wave infrared drying in preparation of mushroom chewing tablets. *Drying Technology* 32, 1820-1827
- Wang R. and Farid M.M. (2015): Corrosion and health aspects in ohmic cooking of beef meat patties. *Journal of Food Engineering* 146, 17-22
- Wang R., Wang T., Zhu M. Zhang S., Ren J. and Li F. (2012): Effect of power supply frequency on electrode adhesion during soybean milk continuous ohmic heating. *Nongye Gongcheng Xuebao* 28, 287-291
- Wang X., Demirci A.M., Puri V.M. and Graves R.E. (2014): Optimization of a blended electrolyzed oxidizing water-based cleaning-in-place technique using a pilot scale milking system. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*, 3, 1582-1596
- Wang Y., Zhang L., Johnson J., Gao M., Tang J., Powers J.R. and Wang S. (2014): Developing hot air-assisted *radio frequency* drying for in-shell macadamia nuts. *Food and Bioprocess Technology* 7, 278-288
- Wang Z., Qi X., Cao S. and Yuan Y. (2013): The effect of pulsed light on the activity of polyphenol oxidase from bayberry. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology* 13, 25-30
- Wanga Y., Tanga J., Rascob B., Wanga S., Alshamia A.A. and Kong F. (2009): Using whey protein gel as a model food to study dielectric heating properties of salmon (*Oncorhynchus gorboscha*) fillets. *LWT- Food Science and Technology* 42, 1174-1178
- Watson E. (2014): The slow death of the microwave and the rise of the crock-pot: can food be too convenient? *Food Navigator* ([www.foodnavigator-usa.com/Markets/The-slow-death-of-the-microwave-and-the-rise-of-the-Crock-Pot-Can-food-be-too-convenient](http://www.foodnavigator-usa.com/Markets/The-slow-death-of-the-microwave-and-the-rise-of-the-Crock-Pot-Can-food-be-too-convenient); Zugriff 02-04-2015)
- Weir A., Westerhoff P., Fabricius L. and von Goetz N. (2012): Titanium dioxide nanoparticles in food and personal care products. *Environ. Sci. Techn.* 46, 2242-2250
- Wendt T., Brandin G., Weidner E. and Petermann M. (2007): PGDD- The innovative production of fluid-filled microcapsules for the food industry. *Proc. of Euroean Congress of Chemical Eng. Copenhagen*, 16-20 September
- WILD (2015): [www.wildflavors.com/NA-EN/innovations/emulsions](http://www.wildflavors.com/NA-EN/innovations/emulsions), Zugriff 8.2.2015
- Williams-Campbell A. and Solomon M. (2001): New non-thermal postharvest technology to improve food safety: Hydrodynamic pressure processing. In: *Photonic detection and intervention technologies for safe food. Proc. Int. Soc. Opt. Eng.* 4206, 167-173
- Williams-Campbell, A. and Solomon, M. (2002): Reduction of spoilagemicroorganisms in fresh beef using hydrodynamic pressure processing. *J. Food Prot.*, 65, p 571-574.
- Witrowa-Rajchert D., Wiktor A., Sledz M. and Nowacka M. (2014): Selected emerging technologies to enhance the drying process: A review. *Drying Technology* 32, 1386-1396
- Wu J., Chen J., Liu W., Zhong Y., Luo D., Li Z. and Huang Z. (2014): Selective peroxidase inactivation of lightly milled rice by *superheated steam*. *Journal of Cereal Science* (article in press)
- Wu L., Zhao W., Yang R. and Yan W. (2015): Pulsed electric field (PEF)-induced aggregation between lysozyme, ovalbumin and ovotransferrin in multi-protein systems. *Food Chemistry* 175, 115-120

- Xie X., Li X., Zhang C., Wang J., Wang C., Wang Z. and Mu G. (2014): Moisture mobility mechanism of beef jerky during combined mid-infrared and hot air drying. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 30, 322-330
- Xiong K., Li X., Liu H. and Li L. (2014): Studies on the elimination of aflatoxin B1 by electrolyzed oxidizing water. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology* 14, 165-173
- Yada R.Y., Buck N., Canady R., DeMerlis C., Duncan T., Janer G., Juneja L., Lin M., McClements J., Noonan G., Oxley J., Sabliov C., Tsytsikova L., V´azquez-Campos S., Yourick J., Zhong Q. and Thurmond S. (2014): Engineered Nanoscale Food Ingredients: Evaluation of Current Knowledge on Material Characteristics Relevant to Uptake from the Gastrointestinal Tract. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 13, 730-743
- Yang H., Feirtag J. and Diez-Gonzalez F. (2013): Sanitizing effectiveness of commercial “active water” technologies on *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella enteritidis* and *Listeria monocytogenes*. *Food Control* 33, 232-238
- Yang J., Pan Z., Takeoka G., Mackey B., Bingol G., Brandl M.T., Garcin K., McHugh T.H. and Wang H. (2013): Shelf-life of infrared dry roasted almonds. *Food Chemistry* 138, 671-678
- Yang W.W., Chung S.Y., Ajayi O., Krishnamurthy K., Konan K. and Goodrich-Schneider R. (2010): Use of pulsed ultraviolet light to reduce the allergenic potency of soybean extracts. *International Journal of Food Engineering* 6, 1-12
- Yang W.W., Mwakatage N.R., Goodrich-Schneider R., Krishnamurthy K. and Rababah T.M. (2012): Mitigation of major peanut allergens by pulsed ultraviolet light. *Food and Bioprocess Technology* 5, 2728-2738
- Yang Y., Liao X., Hu X., Zhang Y. Chen F. and Wu J. (2011): The contribution of high pressure carbon dioxide in the inactivation kinetics and structural alteration of myrosinase. *Int. J. Food Science and Techn.* 46, 1545-1553
- Yildiz H., Bozkurt H. and Icier F. (2009): Ohmic and conventional heating of pomegranate juice: Effects on rheology, color and total phenolics. *Food Science and Technology Journal* 15, 503-512
- Yildiz-Turp G., Sengun L., Kendirci P. and Icier F. (2013): Effect of ohmic treatment on quality characteristic of meat: A review. *Meat Science* 91, 441-448
- Yilmaz N. and Tuncel N.B. (2010): An alternative strategy for corn drying (*Zea mays*) resulted in both energy savings and reduction of fumosin B1 and B2 contamination. *International Journal of Food Science and Technology* 45, 621-628
- Zahn U. (2009): Ultraschallschneiden von Lebensmitteln. Dissertation an der TU Dresden (2009)
- Zaman W. and Yang T.A. (2014): Moisture, color and texture changes in cocoa beans during *superheated steam* roasted. *Journal of Food Processing and Preservation* 38, 1364-1370
- Zell M., Lyng J.G., Cronin D.A. and Morgan D.J. (2009): Ohmic cooking of whole beef muscle- optimisation of meat preparation. *Meat Science* 81, 693-698
- Zell M., Lyng J.G., Morgan D.J. and Cronin D.A. (2011): Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid foods. *Food and Bioproducts Processing* 89, 128-134

- Zell M., Lyng J.G., Morgan D.J. and Cronin D.A. (2012): Quality evaluation of an ohmically cooked ham product. *Food and Bioprocess Technology* 5, 265-272
- Zhang B., Ma L.K., Deng S.G., Xie C. and Qiu X.H. (2015): Shelf-life of white pacific shrimp (*Litopenaeus vannamei*) as affected by weakly acidic electrolyzed water ice-glazing and modified atmosphere packaging. *Food Control* 51, 114-121
- Zhang L., Lyng J.G. and Brunton N.P. (2007): The effect of fat, water and salt on the thermal and dielectric properties of meat batter and its temperature following microwave and *radio frequency* heating. *Journal of Food Engineering* 80, 147-151
- Zhang T. and Darren D. (2013). Removal of arsenic from water using multifunctional micro-/nano-structured MnO<sub>2</sub> spheres and microfiltration. *Chem. Eng. J.* 255, 271-279
- Zhao W., Yang R. and Zhang H.Q. (2012): Recent advances in the action of pulsed electric fields on enzymes and food component proteins. *Trends in Food Science and Technology* 27, 83-96
- Zhao X., Yang W., Chung S.Y., Sims C.A., Otwell S.W. and Rababah T.M. (2014): Reduction of IgE immunoreactivity of whole peanut after pulsed light illumination. *Food and Bioprocess Technology* 7, 2637-2645
- Zhou C., Pei L., Zhao J., Gao W., Qi F., Ye Z. and Zhu S. (2014): Effect of irrigating with slightly acidic electrolyzed water on lettuce photosynthesis under mild water stress. *Applied Engineering in Agriculture* 30, 789-795
- Zhou R., Wang F., Guo Z. and Zhao Y.L. (2012): Preparation and characterization of resveratrol/hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin inclusion complex using supercritical antisolvent technology. *J. Food Proc. Eng.* Volume 35, 505-686
- Zhu X., Guo W. and Wang S. (2014): Dielectric properties of gound hazelnuts at different frequencies, temperatures and moisture contents. *Transactions of ASABE* 57, 161-168
- Zhu, Y., Koutchma, T., Warrimer, K. and Zhou, T. (2014): Reduction of patulin in apple juice products by UV light of different wavelengths in the UVC range. *Journal of Food Protection* 77, 963-971
- Zielinska, M., Blaszczyk, W. and Devahastin, S. (2014): Effect of *superheated steam* pre-frying treatment on the quality of potato chips. *International Journal of Food Science and Technology* (DOI: 10.1111/ijfs.12613)
- Zimmer R., Hertel R. und Böhl G.-F. (2008): BfR-Delphi-Studie zur Nanotechnologie. Berlin, 2009, ISBN 3-938163-45-3
- Zimmer R., Hertel R. und Böhl G.-F. (2008): Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung. Bundesinstitut für Risikobewertung. Berlin, 2008, ISBN 3-938163-35-6
- Ziuzina D., Patil S., Cullen P.J., Keener K.M. and Bourke P- (2014): Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica serovar Typhimurium* and *Listeria monocytogenes* inoculated on fresh produce. *Food Microbiology* 42, 109-116.