

Zeitschrift: Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene = Travaux de chimie alimentaire et d'hygiène
Herausgeber: Bundesamt für Gesundheit
Band: 86 (1995)
Heft: 2

Artikel: Charakteristika der Erhitzung von Lebensmitteln durch Mikrowellen und industrielle Anwendungen = Characteristics of heating of foods by microwaves and industrial applications
Autor: Reuter, Helmut
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-983626>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Charakteristika der Erhitzung von Lebensmitteln durch Mikrowellen und industrielle Anwendungen*

Characteristics of Heating of Foods by Microwaves and Industrial Applications

Key words: Microwaves, Industrial application, Food

Helmut Reuter

Universität Kiel und vormaliges Institut für Verfahrenstechnik,
Bundesanstalt für Milchforschung, Kiel

Einleitung

In der häuslichen Zubereitung wie auch in der industriellen Lebensmittelverarbeitung hat das Erwärmen der Lebensmittel, das zu den verschiedensten Zwecken erfolgen kann, eine herausragende Bedeutung. Für viele Prozesse ist nicht nur die Höhe der Temperatur, sondern auch die Zeit der Wärmebehandlung von Einfluss auf die Qualität des Endproduktes. So findet heute in der industriellen Lebensmittelverarbeitung und zunehmend auch im Haushalt die allgemeine Grundregel stärkste Beachtung, wonach die Zeit der Wärmebehandlung möglichst kurz zu halten ist, um mit einer nur minimalen thermischen Degradierung ein qualitativ hochwertiges Produkt zu erhalten (1).

Das technologische Problem in der Realisierung dieses Grundsatzes besteht darin, den Wärmetransport in das Gut hinein entscheidend zu verbessern, um die benötigte Temperatur in kürzeren Zeiten zu erreichen. Bei Anwendung der konventionellen Wärmetransportvorgänge, die in irgendeiner Weise immer an die Wärmeleitung im Lebensmittel als dem zeitlimitierenden Faktor gebunden sind, kommt man sehr bald an eine technologische Grenze, die zu kürzeren Zeiten hin nicht zu unterschreiten ist. Hinzu kommt noch, dass jede Art des konventionellen Wärmetransportes nur unter der Wirkung eines Temperaturgradienten erfolgt, der insbesondere im festen Gut zu einer sehr ungleichmässigen Temperaturverteilung führt. Für einige Lebensmittel erweist sich dies als durchaus erwünscht, z. B. beim scharf gebratenen oder gegrillten Fleisch mit der aromatischen Kruste, bei Brot,

* Vortrag gehalten an der 27. Arbeitstagung der Schweiz. Gesellschaft für Lebensmittelhygiene und ETH, Zürich, 24. November 1994

Brötchen und beim Pizzaboden mit der knusprigen Kruste. Für viele technologische Prozesse ist jedoch eine gleichmässige Wärmebehandlung aller Produktteile durch eine gleichmässige Temperaturverteilung im Gut vorteilhafter.

Diese Barriere ist durch dielektrisches Erwärmen mittels Mikrowellen zu überwinden, indem nicht Wärme in das Lebensmittel transportiert wird, sondern die Energie der elektromagnetischen Welle, die im Inneren des zu behandelnden Gutes in fühlbare Wärme umgewandelt wird.

Die beiden wesentlichen Vorteile des dielektrischen Erwärmens bestehen darin, dass eine im Gut gewünschte Temperatur innerhalb einer wesentlich kürzeren Zeit erreicht werden kann als beim Erwärmen durch Wärmeleitung und sich über den Querschnitt und die Tiefe eines Gutes eine gleichmässige Temperaturverteilung einstellen kann. Aber auch beim dielektrischen Erwärmen können sich grosse Temperaturdifferenzen im festen Gut ergeben. Das hat einige Gründe, auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

Energieumwandlung im Dielektrikum

Im Frequenzbereich von 3 bis 3000 MHz, der für das dielektrische Erwärmen genutzt wird, bewirkt das elektromagnetische Wechselfeld in einem geeigneten Dielektrikum, wie in wasserreichen Lebensmitteln, durch ständige Umpolarisierung der Elementarteilchen (Dipolerregung) eine Umwandlung von elektrischer in Wärmeenergie, deren Betrag sich als dielektrischer Verlust berechnen lässt (2).

Im Dielektrikum können mehr oder weniger freibewegliche Ionen vorhanden sein. Im elektrischen Wechselfeld werden diese elektrisch geladenen Teilchen gleichfalls von der jeweils entgegengesetzt geladenen Richtung angezogen, d. h. sie werden im Takt der vorliegenden Frequenz vibrieren. Die dadurch bedingte Lageveränderung erzeugt einen geringen Beitrag an Reibungswärme, die bei geringer Ionenkonzentration in praktischen Anwendungsfällen gegenüber der durch Dipolerregung erzeugten Wärme vernachlässigt werden kann. Bei hoher Ionenkonzentration, z. B. in Salzlösungen oder stark gesalzenen Lebensmitteln, wird der Erwärmungseffekt jedoch merklich verstärkt.

Für die pro Volumen- und Zeiteinheit im Dielektrikum in fühlbare Wärme umgewandelte Energie, Verlustleistungsdichte P_V (W/cm^3) gilt:

$$P_V = k \epsilon_r'' E^2 f$$
$$\text{mit } \epsilon_r'' = \epsilon_r' \tan \delta$$
[1]

Hierin bedeuten: $k = 5,56 \cdot 10^{-13} \text{ A s/V cm}$ Umrechnungsfaktor, ϵ_r'' Verlustfaktor und Imaginärteil der relativen Dielektrizitätskonstante, ϵ_r' Realteil der relativen Dielektrizitätskonstante, δ effektiver Verlustwinkel, E (V/cm) elektrische Feldstärke, f (Hz) Frequenz.

Die Feldstärke E und die Frequenz f sind konstruktive Grössen, die sich aus der Bauweise des Gerätes ergeben. E und f können bedingt und in gewissen vorgege-

benen Grenzen verändert werden. Um eine ausreichende Wärmeentwicklung im Dielektrikum zu erzielen, benötigt man Frequenzen von 10 MHz bis in den GHz-Bereich. Wegen eventuell auftretender Hochfrequenzstörungen von Rundfunk- und Fernsehempfang sowie von kommerziellen Funkdiensten, die im gleichen Wellenlängenbereich arbeiten, sind erhebliche Massnahmen zur Funkentstörung der Geräte und Anlagen erforderlich. In beiden Bereichen sind weltweit und in den einzelnen Staaten unterschiedlich spezielle Frequenzen für technische, wissenschaftliche und medizinische Anwendungen freigegeben. Für diese Frequenzen gelten nach DIN 57 871 erhebliche Erleichterungen für den Entstöraufwand.

In Deutschland sind ohne besondere Genehmigung nur die Frequenzen 27,12, 433,92 und 2450 MHz für den Betrieb solcher Geräte freigegeben. In den USA und England werden industrielle Durchlaufanlagen mit der Betriebsfrequenz von 915 MHz betrieben, die jedoch schwierig gegen Abstrahlung nach aussen abzudichten sind. Die einzige weltweit für das Erwärmen von Stoffen zugelassene Frequenz ist diejenige von 2450 MHz, mit der auch die Haushaltsmikrowellengeräte und ebenfalls die meisten Industrieanlagen betrieben werden, wobei für einige osteuropäische Länder eine Frequenz von 2375 MHz gilt.

Nach Gleichung [1] erreicht man eine gute Heizwirkung im Gut, wenn die Apparatur eine hohe Feldstärke E erreichen lässt. Die Feldstärke lässt sich jedoch nicht unbegrenzt steigern. Im Hochfrequenzbereich (von 13 bis 40 MHz), in dem das Feld zwischen Elektroden nach dem Kondensatorprinzip erzeugt wird, muss man die Feldstärke unterhalb der sogenannten Durchbruchfeldstärke halten, da sonst elektrische Durchbrüche in Form von Funken- oder Lichtbogenentladungen auftreten, die zur Schädigung des Gutes oder der Verpackung führen. In homogenen und dichten Stoffen kann man Feldstärken bis 2000 V/cm anwenden.

Im Ultrahochfrequenzbereich (von 433 bis 2450 MHz), in dem die Energie über Hohlleiter in den Behandlungsraum geleitet wird, liegt die elektrische Grenzfeldstärke höher. Sie ist hier begrenzt durch die geringe Eindringtiefe der Strahlung, die eine an der Oberfläche des Gutes sich ausbildende Zone mit erhöhter Temperatur bewirkt.

Nach Gleichung [1] erreicht man weiter eine gute Energieumwandlung in Stoffen mit hohen Werten für ϵ_r' und δ , massgebend ist das als Verlustfaktor bezeichnete Produkt $\epsilon_r'' = \epsilon_r' \tan \delta$. Die diese dielektrischen Eigenschaften des Gutes charakterisierenden Grössen ϵ_r' und δ sind Stoffwerte, die von der Frequenz und der Temperatur abhängig sind. Das gleiche gilt für den daraus abgeleiteten Verlustfaktor ϵ_r'' .

Der Verlustfaktor ϵ_r'' eines Lebensmittels ist im wesentlichen abhängig vom Wassergehalt, dem Gehalt an gelösten Stoffen (vorzugsweise NaCl) und der chemischen Zusammensetzung. Allgemein gilt, je höher der Wassergehalt, desto mehr nimmt der Verlustfaktor zu. Trockene Lebensmittel, trockene Pulver oder Gewürze haben nur geringe Verlustfaktoren. Daher sind Bakteriensporen unter trockenen Milieubedingungen durch eine Mikrowellenerhitzung nicht zu inaktivieren. Mit zunehmendem Salzgehalt (NaCl) erhöht sich der Verlustfaktor stärker als mit steigendem Wassergehalt.

Abbildung 1 veranschaulicht die Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Temperatur für einige Lebensmittel nach (3). Für Wasser bzw. wasserreiche Lebensmittel steigt der Verlustfaktor in der Nähe von 0 °C sprunghaft an, da die Eisphase nur einen geringen Wert für ϵ_r'' aufweist.

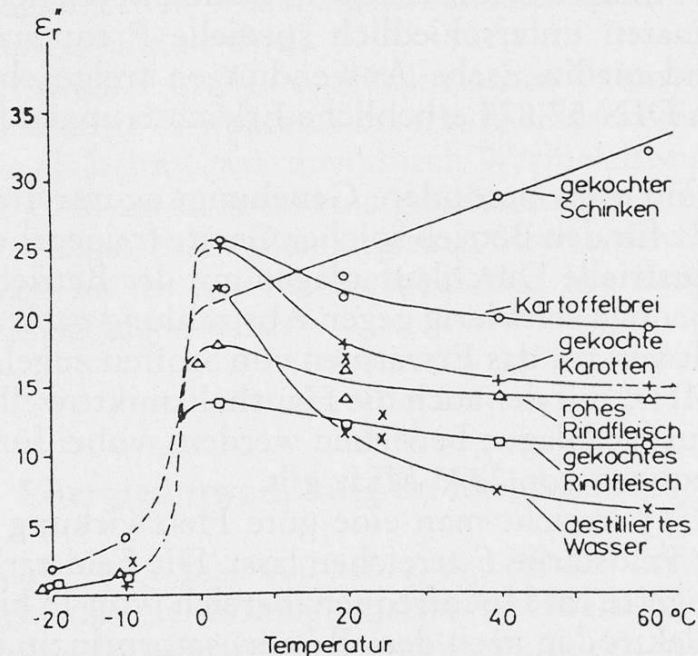


Abb. 1. Verlustfaktor ϵ_r'' für einige Lebensmittel in Abhängigkeit von der Temperatur für 2700 MHz nach Werten aus (3)

Temperaturänderung im Dielektrikum

Gleichung [1] sagt nichts aus über die lokal sich einstellende Temperatur im Gut. Betrachtet man die Energieumwandlung in einem Volumenelement unter adiabatischen Verhältnissen, führt sie in der Zeit dt zu einer lokalen differentiellen Temperaturerhöhung dT , die sich aus

$$\frac{dT}{dt} \rho c = P_V \quad [2]$$

ergibt, mit ρ (g/cm³) Dichte und c (J/g K) der spezifischen Wärmekapazität des Dielektrikums.

Aus Gleichung 2 ergibt sich die Temperaturänderung in einem Volumenelement.

$$dT = k \frac{\epsilon_r''}{\rho c} E^2 f dt \quad [3]$$

Nach Gleichung 3 ist die Temperaturänderung im Gut proportional dem aus den Stoffwerten ϵ_r'' , ρ und c gebildeten Faktor $\epsilon_r''/\rho c$. Werden in einem Mikrowellenfeld Lebensmittel unterschiedlicher Zusammensetzung aber gleicher Form und

Grösse mit konstanter Frequenz f und, wenn Feldverzerrungen ausser Betracht gelassen werden, mit gleicher Feldstärke E gemeinsam im Zeitintervall dt behandelt, dann ist die Temperaturänderung dT im Gut proportional dem Faktor $\epsilon_r''/\rho c$. Diese Verhältnisse werden in einem Mikrowellenherd mit Drehteller und rotierendem Wellenreflektor unter der Garraumdecke annähernd erreicht.

Der Faktor $\epsilon_r''/\rho c$ ist die den Temperaturanstieg im Gut bestimmende Grösse. Der aus drei Stoffwerten (dem Verlustfaktor ϵ_r'' , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c) gebildete Ausdruck $\epsilon_r''/\rho c$ ist mit der gleichfalls aus drei Stoffwerten (der Wärmeleitfähigkeit λ , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c) zusammengesetzten Temperaturleitfähigkeit $a = \lambda/\rho c$ eines Stoffes vergleichbar und kann daher als Temperaturänderungsfähigkeit eines Dielektrikums im Mikrowellenfeld bezeichnet werden.

Unterschiedliche Güter, wie Reis, Kartoffeln, Nudeln, Fleisch und Sauce, haben unterschiedliche Temperaturänderungsfähigkeiten und erwärmen sich im Mikrowellenfeld dementsprechend unterschiedlich. Eine hierauf zurückzuführende ungleichmässige Erwärmung kann bei Fertiggerichten, die aus Komponenten mit stark abweichender Temperaturänderungsfähigkeit zusammengesetzt sind, auftreten. Da Lebensmittel in sich meist heterogen sind, wie z. B. Fleisch mit Fett und Knochen, erwärmen sich die einzelnen Bestandteile ebenfalls unterschiedlich. Eine der Hauptforderungen für die industrielle Anwendung lautet daher, nur Lebensmittel mit ungefähr gleicher Temperaturänderungsfähigkeit gemeinsam erwärmen.

Ungleiche Erwärmung kann auch auftreten zwischen Mikroorganismenzellen und einer umgebenden wässrigen Phase. Die Temperaturunterschiede werden jedoch wegen der grossen Oberfläche der Zellen im Verhältnis zu ihrem Volumen schnell durch Wärmeleitung ausgeglichen. Dieser Effekt des unterschiedlichen Temperaturanstiegs zwischen Zelle und wässriger Phase kann sich bemerkbar machen, wenn Letalraten für sehr kurze Zeiten (im Sekundenbereich) gemessen werden.

Tabelle 1 zeigt für einige Lebensmittel, welchen Einfluss die einzelnen Stoffwerte ϵ_r'' , ρ und c auf die Temperaturänderungsfähigkeit $\epsilon_r''/\rho c$ haben. Die Dichte der feuchten bis wasserreichen Lebensmittel variiert in einem engen Bereich von 0,6 bis 1,1 g/cm³ (Faktor 2). Die spezifische Wärmekapazität korreliert mit dem Wassergehalt und variiert von etwa 1,9 bis 4,2 J/g K (ebenfalls Faktor 2). Die grösste Variationsbreite und damit den stärksten Einfluss auf die Temperaturänderung hat der Verlustfaktor ϵ_r'' , der unter den wenigen in Tabelle 1 angeführten Lebensmitteln eine Schwankungsbreite von 0,17 bis 50 (Faktor 300) zeigt.

Tafelöle und Fette haben die niedrigsten Verlustfaktoren und zeigen auch die niedrigsten Werte für $\epsilon_r''/\rho c$, sie erwärmen sich nur sehr mässig im Mikrowellenfeld. In einer Pizza, die mit gleicher Feldstärke erhitzt wird, ist die Temperaturänderung in der Pizzaaufgabe etwa 2,2fach höher als im Pizzateig. In einem Fertiggericht, bestehend aus Pommes frites, Karotten, Rindfleisch und Sauce, erreichen die ersten drei Komponenten etwa gleiche Temperatur, während die Sauce mit einer doppelt so hohen Temperaturänderungsfähigkeit vermutlich schon kocht.

Tabelle 1. Temperaturänderungsfähigkeit $\epsilon''/\rho c$ für einige Lebensmittel für 2800 MHz

	Temperatur K (°C)	Dichte ρ (g/cm ³)	spezifische Wärmekapazität c (J/g K)	Verlustfaktor ϵ'' (für 2800) MHz	Temperatur- änderungs- fähigkeit $\epsilon''/\rho c$ (K cm ³ /J)
Dest. Wasser	60	0,98	4,2	4,0	0,97
Wasser	0	1,0	4,2	25	5,95
0,1 M NaCl	60	0,98	4,2	14	3,4
Eis	-10	0,92	2,26	1,4	0,67
Maisöl	60	0,92	2,0	0,172	0,094
Rinderfett	60	0,87	2,3	0,145	0,07
Schinken, gekocht	60	1,05	2,1	52	23,6
Pommes frites	60	0,95	1,86	4,9	2,77
Kartoffelbrei	60	1,1	3,5	19,5	5,1
Sauce	60	1,01	3,9	26,6	6,8
Rindfleisch, gekocht	60	1,07	3,2	11	3,2
Karotten, gekocht	60	1,1	3,6	11,8	3,0
Pizzateig, gebacken	60	0,6	1,6	0,65	0,67
Pizzaauflage	60	1,1	2,2	3,55	1,5

Die Werte für ϵ'' wurden aus (4,5) entnommen. Die Werte für ρ und c wurden aus (6) entnommen oder auf der Basis der in (6) angegebenen Daten berechnet.

Temperaturverteilung im Dielektrikum

Durch Wechselwirkungen zwischen dem Dielektrikum und der elektromagnetischen Welle sowie zusätzlich durch die Bauart des technischen Gerätes ergeben sich einige Effekte, die in den mit Mikrowellen behandelten Lebensmitteln zu einer ungleichmässigen Temperatur führen. Geht man von einer idealisierten, gleichmässigen Feldstärke um das Gut aus, so sind es primär physikalische und durch die Stoffeigenschaften des Gutes bedingte Gründe, die im Inneren fester Produkte keine gleichmässige Temperatur entstehen lassen.

Im Mikrowellengerät können technische, durch die spezielle Konzeption bedingte Effekte auftreten, die ebenfalls zu einem ungleichmässigen Erwärmen der Last im Behandlungsraum (Applikator) eines Mikrowellengerätes oder einer industriellen Durchlaufanlage führen. Im allgemeinen kann keiner dieser Effekte für sich allein betrachtet werden, sondern in den praktischen Fällen überlagern sie sich.

Das macht es schwer bis unmöglich, die Temperaturen in einem durch Mikrowellen behandelten Gut vorherzubestimmen.

Eindringtiefe

Durch die Absorptionsfähigkeit des Gutes für die eingedrungene Energie nimmt mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche die Feldstärke ab. Die Energie der eingedrungenen Welle und damit ihre Fähigkeit, Wärme zu erzeugen, nimmt mit zunehmender Eindringtiefe ab. In Lebensmitteln mit hohem Verlustfaktor wird der grösste Teil der Energie der *auftreffenden* Welle kurz unter der Oberfläche bereits absorbiert. In einem wasserreichen oder salzhaltigen und stark absorbierenden Gut ergibt sich nur eine geringe Eindringtiefe. Das Gut wird an der Oberfläche stark überhitzt. In einem Gut mit geringem Wassergehalt und niedriger Absorption erreicht man daher eine grosse Tiefe für die eingedrungene Energie. Es tritt kaum Überhitzung der Randbereiche auf.

Als Eindringtiefe d bezeichnet man den Abstand von der Oberfläche des Gutes, an dem die Energie der eingedrungenen Wellen auf $1/e$ (mit $e = 2,718$ ist das auf ca. 37%) abgesunken ist. Für die Eindringtiefe d (cm) der elektromagnetischen Welle gilt die Beziehung:

$$d = \frac{\lambda_0}{2 \pi \sqrt{\epsilon_r'} \tan \delta} \quad [4]$$

mit λ_0 (cm) Freiraumwellenlänge.

Die Eindringtiefe d nimmt mit kleiner werdender Wellenlänge λ_0 oder mit wachsender Frequenz f (nach $\lambda_0 = c_L/f$, c_L [cm] Lichtgeschwindigkeit) ab. Die Eindringtiefe ist daher umgekehrt proportional der Frequenz, $d \sim 1/f$. Da sich jedoch auch ϵ_r' und δ mit der Frequenz ändern, ist die Eindringtiefe nur bei grossen Frequenzunterschieden merklich verändert.

Auf Abbildung 2 ist nach Werten aus (3) diese Frequenzabhängigkeit für rohes Rindfleisch dargestellt. Mit hohen Frequenzen sind im allgemeinen die Eindringtiefen erheblich niedriger. Es gibt Produkte, die innerhalb bestimmter Temperaturbereiche zwischen 915 und 2450 MHz keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Eindringtiefe aufweisen. Nach Abbildung 2 ergeben sich in rohem Rindfleisch zwischen den angeführten Frequenzen von 434 und 2450 MHz unter 60 °C angenähert die gleichen Eindringtiefen.

Durch die Temperaturabhängigkeit von ϵ_r' und δ ist eine wesentlich stärkere Änderung der Eindringtiefe mit der Temperatur vorhanden. Die Abbildung 2, deren Funktionsverlauf als charakteristisch für wasserreiche Lebensmittel angesehen werden kann, zeigt dies. Für Temperaturen, unter denen das Gut im gefrorenen Zustand (Eis) vorliegt, ergibt sich eine grosse Eindringtiefe, da der Verlustfaktor von Eis niedriger ist. Gegen 0 °C hin nimmt die Eindringtiefe jedoch schnell ab. Aufgrund dieses Verhaltens lassen sich in gefrorenem Gut für Auftauvorgänge

grosse Eindringtiefen erzielen. Hingegen ist für rohes Fleisch für 60 °C die Eindringtiefe mit 1,2 cm nur noch gering. Für die Frequenz von 2450 MHz und Temperaturen zwischen 30 und 90 °C liegt für die meisten Lebensmittel die Eindringtiefe nach Werten von (5) zwischen 0,5 bis 1,3 cm.

Die Betrachtung der Eindringtiefe d als wesentlichen Grund für ungleichmässiges Erwärmen eines Gutes im Mikrowellenfeld ist nur zulässig, wenn ein dielektrisch homogenes Gut mit grossen Abmessungen vorliegt.

Formeffekt

Ein weiterer Effekt, der in freiliegenden und allseitig bestrahlten sowie nahezu kugel- oder zylinderförmigen Gutsteilen mit kleinen Abmessungen zu einer ungleichmässigen Erwärmung führt, ergibt sich aus dem Wellencharakter der elektrischen Energie. Wenn der Radius von kugel- oder zylinderförmigen Gutsteilen in der Grösse der Eindringtiefe liegt, kommt es zu Überlagerungen der allseitig eingestrahlten Energie mit einer hohen Energiekonzentration im Zentrum. Folgende Abmessungen, die z. B. an Fleischbällchen gemessen wurden (7) oder an Kartoffelkugeln experimentell und durch eine Modellrechnung bestätigt wurden (8), können als grobe Richtwerte gelten:

- Einzelne oder herausragende Gutsteile, deren Radius $<$ als die Eindringtiefe ist, erwärmen sich schneller, es tritt Übererwärmen und Austrocknen auf. Dies gilt auch für beidseitig bestrahlte flache Scheiben (z. B. Fleisch) (9) oder dünne Schichten.
- In Gutsteilen mit einem Durchmesser von 2–6 cm, in denen der Radius etwa gleich der Eindringtiefe ist, wird das Zentrum sehr viel stärker erwärmt als die Oberfläche. Bei kugeligen Körpern in dieser Grösse (z. B. Kartoffeln, rohes Ei) kann durch die Energiekonzentration im Zentrum das Wasser im Inneren des Körpers verdampfen, so dass der Körper durch den inneren Überdruck platzt, dies u. U. auch noch nach Beendigung der Mikrowellenbehandlung. Für Produkte dieser Stückgrösse, die bei vielen Lebensmitteln vorliegt, kann es vorteilhaft sein, eine kontrollierte Mikrowellenbehandlung mit einer konventionellen Wärmezufuhr (über Dampf, Heissluft oder Infrarotstrahlung) zu kombinieren.
- Für Stückgrössen, deren Durchmesser zwischen 5,5 bis 7,5 cm liegt, erhält man sowohl im Zentrum als auch in den Randzonen eine relativ gleichmässige Erwärmung. Zur Halbkugel geformte Massen aus Kartoffelbrei von etwa 5,5 cm Durchmesser (9) wie auch Kartoffelkugel von 7,5 cm Durchmesser (8) zeigten diese nahezu gleichmässige Erwärmung.
- In Produkten mit einem Durchmesser > 8 cm (Eindringtiefe $<$ als der Radius) wird der Effekt der begrenzten Eindringtiefe wirksam. Es tritt an der Oberfläche eine stärkere Erwärmung auf als im Zentrum.

Ein Sonderfall des Formeinflusses ist der sogenannte Rand- oder Kanteneffekt. An scharfen Kanten und Ecken, an denen Flächen zusammenstossen, überlagert sich die von zwei bzw. drei Flächen eingedrungene Energie. Die Energieeinstrahlung ist in diesen Bereichen grösser als unter ebenen oder leicht gewölbten Ober-

flächen. Die Querschnitte zur Wärmeableitung in das Innere des Gutes sind kleiner als die bestrahlte Oberfläche. Dies führt zu einer starken Überhitzung von scharfen Kanten und Ecken (Abb. 3).

Beim Auftauen gefrorenen Gutes schmelzen die Ecken und Kanten zuerst ab, während das Innere noch gefroren ist. In den aufgetauten Stellen steigt nach Abbildung 1 der Verlustfaktor sprunghaft an und verstärkt die lokale Überhitzung. Einen Extremfall stellt das Auftauen eines kreissegmentförmigen Stückes einer Sahne- oder Cremetorte dar. Die scharfe Kante oder Spitze des Kuchenstückes schmilzt schon ab, während das hintere Ende des Stückes noch fest ist, wenn es einzeln erwärmt wird. Beim Garen oder Erwärmen werden scharfe Kanten oder Ecken gleichfalls überhitzt, trocknen als Folge davon aus oder werden braun. Der Effekt tritt auch auf, wenn schichtbares Gut in ein nichtmetallisches Gefäß mit scharfen Ecken gefüllt wird.

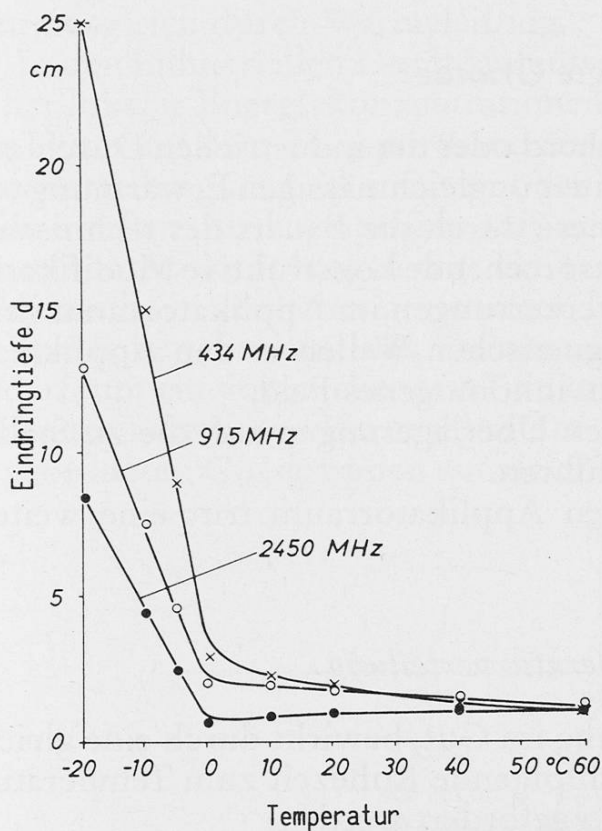


Abb. 2. Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen in rohes Fleisch in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz nach Werten aus (3)

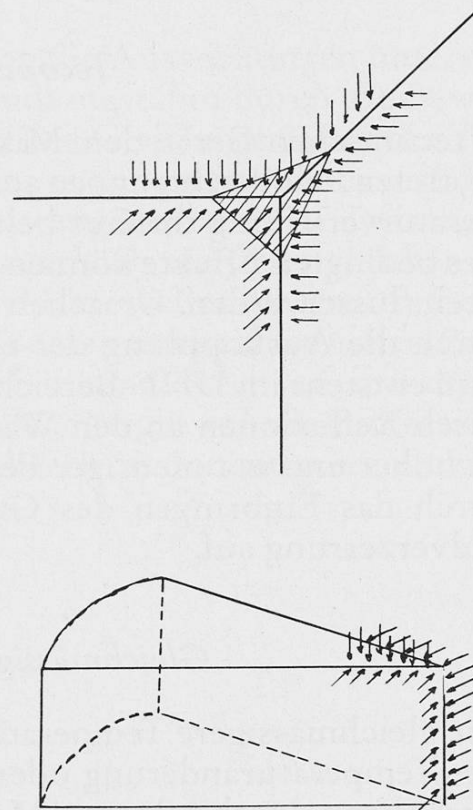


Abb. 3. Ecken- und Kanteneffekt

Dielektrische Inhomogenität der Lebensmittel

Ein weiterer Grund für eine ungleiche Erwärmung im Gut ergibt sich aus der dielektrischen Inhomogenität einiger Lebensmittel. Lebensmittel sind im allgemeinen makroskopisch heterogen zusammengesetzte Mischungen aus unterschiedli-

chen Komponenten, die sehr verschiedene dielektrische Eigenschaften aufweisen können. Es handelt sich um dielektrisch inhomogene Systeme, in denen sich kein homogenes elektromagnetisches Feld ausbildet. Soll der Energieumsatz in allen Partien des Gutes gleichmässig erfolgen, ist neben der Konstanz der Temperaturänderungsfähigkeit $\epsilon_r/\rho \cdot c$ auch eine an allen Orten gleiche Feldstärke im Gut notwendig.

In dielektrisch stark inhomogenen Gütern, z. B. Fleisch mit Fett und Knochen, wechseln Stellen mit hoher Dielektrizitätskonstante, in denen sich eine niedrigere Feldstärke einstellt, mit Stellen mit niedriger Dielektrizitätskonstante und entsprechend hoher Feldstärke. In einem derart inhomogenen Gut ist eine gleichmässige Feldverteilung nicht realisierbar. Da mit einer dielektrischen Inhomogenität Ungleichheit in der Temperaturänderungsfähigkeit verbunden ist, überlagern sich die Wirkungen aus beiden.

Technisch bedingte Gründe

Im technischen Gerät, dem Mikrowellenherd oder der industriellen Durchlaufanlage, treten Feldverzerrungen auf, die zu einer ungleichmässigen Erwärmung und Temperaturverteilung im Gut beitragen. Diese durch die Bauart des technischen Gerätes bedingten Effekte können durch entsprechende konstruktive Modifikationen beeinflusst werden. Ursachen für Feldverzerrungen im Applikatorraum sind:

- Durch die Auskopplung der elektromagnetischen Wellen in den Applikatorraum entsteht im UHF-Bereich schon ein inhomogenes Feld.
- Durch Reflexionen an den Wänden treten Überlagerungen auf, die zu Stellen mit hoher und mit niedriger Feldstärke führen.
- Durch das Einbringen des Gutes in den Applikatorraum tritt eine weitere Feldverzerrung auf.

Gleichmässigerer Temperaturverteilung

Eine gleichmässigerer Temperaturverteilung im Gut, bewirkt durch eine gleichmässige Temperaturänderung oder eine nachfolgende Ruhezeit zum Temperaturausgleich, kann durch folgende Massnahmen gefördert werden.

Vom Gut her durch

- Gemeinsames Erhitzen von Produkten, die möglichst gleiche Temperaturänderungsfähigkeit $\epsilon_r/\rho \cdot c$ aufweisen.
- Wahl der Gutsdicke nach der Eindringtiefe.
- Möglichst einfache Gutsform (Scheiben, Zylinder, Kugel) ohne stark herausragende Teile und scharfe Kanten.
- Homogenität des Gutes durch eine möglichst gleichmässige Wasserverteilung über das Gutsvolumen.

Von der Anlage her durch

- Möglichst gleichmässige Feldverteilung im Applikator.
- Intervallweises Einstrahlen der Mikrowellenenergie mit dazwischenliegenden Ruhezeiten für den Temperatúrausgleich durch Wärmeleitung.
- Bewegung des Gutes im Applikator.
- Ein- oder zweiseitige fokussierte Einstrahlung der Mikrowellenenergie.
- Anwendung verschiedener Frequenzen im Behandlungsraum.

Im chargenweise betriebenen Haushaltsmikrowellengerät dienen rotierende Metallreflektoren, auf die die elektromagnetische Welle nach der Auskopplung aus dem Hohlleiter auftrifft, zur Vermeidung von stehenden Resonanzgebieten. Ein Drehteller, auf dem das Gut rotiert, gleicht die Wirkung unterschiedlicher Energiekonzentrationen im Applikatorraum aus. Ein zeitliches Takten der Mikrowellenenergie durch periodisches Abschalten der Magnetrons führt zu einem Temperatúrausgleich durch Wärmeleitung.

In den industriellen Durchlaufanlagen werden die Auswirkungen unterschiedlicher lokaler Energiekonzentrationen im Behandlungsraum durch die Bewegung des Gutes auf dem Transportband ausgeglichen. Die Gleichmässigkeit der Temperaturverteilung im Gut steigt mit der Anzahl der entlang des Bandes installierten Mikrowellen-Auskopplungen mit geringer Leistungsdichte (10). Zwischen den einzelnen Auskopplungen tritt ein Temperatúrausgleich ein. Zum gleichen Effekt führt auch ein zeitliches gesteuertes Takten der Mikrowellenenergie. In Fertigerichten haben die einzelnen Komponenten meist einen unterschiedlichen Energiebedarf, um ein vorgegebenes ΔT zu erreichen. Hier kann durch aufeinander abgestimmtes taktweises Einstrahlen der Mikrowellenenergie auf die hintereinander angeordneten Gutsgruppen ein gleiches ΔT in allen Komponenten erzielt werden.

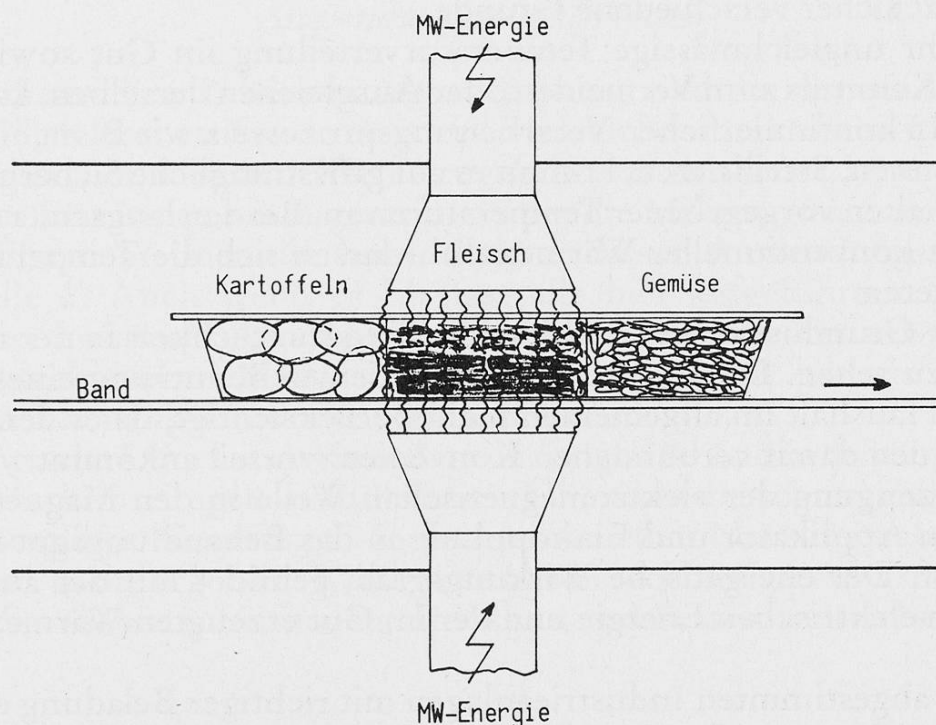


Abb. 4. Beidseitig fokussierte Mikrowelleneinstrahlung

Eine fokussierende Auskopplung der Mikrowellen wird durch einen Strahler erreicht, dessen Austrittsquerschnitt parallel und in geringem Abstand von der Gutsoberfläche angebracht wird (10). Abbildung 4 zeigt die Anordnung einer zweiseitig fokussierenden Auskopplung der Mikrowellenenergie.

Unterschiedliche Frequenzen im Behandlungsraum wurden mit dem zum Pasteurisieren von Joghurt im Becher entwickelten Bach-Verfahren angewendet (12).

Industrielle Anwendungen

Voraussetzungen

Die Anwendung der Mikrowelle zum Erwärmen von Lebensmitteln findet weltweit überwiegend im Haushalt statt, danach folgt der Gaststättenbereich und mit zunehmender Tendenz in Grossküchen und Kantinen. Die Verwendung ist in diesen Bereichen auf das Wiedererwärmen, Auftauen und Garen beschränkt. Es werden in grossen Serien und mit relativ niedrigen Stückkosten hergestellte Mikrowellenherde eingesetzt, deren Preise in den letzten beiden Jahrzehnten durch rationelle Massenfertigung, insbesondere des Magnetrons, laufend gesenkt werden konnten.

Demgegenüber liegt die Häufigkeit der Anwendungen in der Lebensmittelverarbeitung weit zurück. Obwohl in diesem Bereich die Anwendungsmöglichkeiten viel umfangreicher sind und es für fast alle ein Beispiel einer kommerziellen Anlage gibt, ist die Anzahl der Anlagen in der Lebensmittelindustrie noch überschaubar gering. Das hat sicher verschiedene Gründe.

Die oft sehr ungleichmässige Temperaturverteilung im Gut sowie eine nicht ausreichende Kenntnis zum Vermeiden oder Ausgleichen derselben, kann einer der Gründe sein. In kontinuierlichen Verarbeitungsprozessen, wie Blanchieren, Trocknen, Pasteurisieren, Sterilisieren, kommt es auf grösstmögliche Sicherheit im Erreichen und Einhalten vorgegebener Temperaturen an. Bei den langsamer ablaufenden Prozessen mit konventioneller Wärmezufuhr lassen sich die Temperaturen einfacher kontrollieren.

Der zweite Grund ist in einer fehlenden Wirtschaftlichkeit in der industriellen Anwendung zu sehen. Dieses Thema wird bei einer Benutzung eines Mikrowellenherdes im Haushalt im allgemeinen nicht berücksichtigt, da es dem Anwender hier mehr auf den damit verbundenen Konvenienzvorteil ankommt.

Bei der Erzeugung der elektromagnetischen Welle in den Magnetrons, deren Leitung in den Applikator und Einkopplung in das Behandlungsgut treten Energieverluste auf. Der energetische Wirkungsgrad, gebildet mit der aus dem Netz entnommenen elektrischen Energie und der im Gut erzeugten Wärme, beträgt nur 40 bis 50%.

In optimal abgestimmten Industrieanlagen mit richtiger Beladung erreicht man einen Gesamtwirkungsgrad von 50 bis 60% (10).

In unseren häuslichen Mikrowellenherden muss man bei stark wechselnder Beladung mit einem wesentlich niedrigeren Wert rechnen. Neben der geringen Wirtschaftlichkeit wird dadurch die Lebensdauer der Magnetrons herabgesetzt.

Ein weiterer in die Betriebskosten einer Anlage eingehender Faktor ist die begrenzte Lebensdauer der Magnetrons, für die heute vom Hersteller 5000–8000 Betriebsstunden für 6 kW Magnetrons und von etwa 2000–4000 Stunden für die wesentlich preisgünstigeren 1,2 kW Magnetrons angegeben werden. Im kontinuierlichen Betrieb und bei guter Anpassung der Sendeleistung an das durch den Applikator hindurchlaufende Behandlungsgut ist auch mit einer längeren Lebensdauer zu rechnen.

Mikrowellenanlagen für Anwendungen in der Lebensmittelindustrie werden heute überwiegend als kontinuierliche Durchlaufanlagen mit einem Metalltunnel mit Rechteck- oder Kreisquerschnitt konzipiert. Die Anlage wird aus einzelnen Einheitsmoduln zusammengesetzt. Dies erleichtert die Anpassung der Anlage an die benötigte Mikrowellenleistung und Behandlungszeiten und verbilligt die Fertigung.

Die Anwendung der Mikrowellentechnik in der Industrie ist von den Anlage- und den Betriebskosten her kein unbedingt billiges Verfahren. Eine Anwendung ist unter den gegenwärtigen Gegebenheiten nur für Produkte mit einem hohen Kilopreis interessant. Möglichkeiten für einen wirtschaftlichen Einsatz sind gegeben, wenn neuartige Produktentwicklungen oder Qualitätsverbesserungen mit konventionellen Verfahren nicht mehr auszuführen sind. Günstig hinsichtlich der erreichbaren Qualität und des Energieverbrauchs sind Anlagen, in denen die Mikrowelle mit den Methoden konventioneller Erwärmung kombiniert wird.

Anwendungsmöglichkeiten

In der industriellen Lebensmittelverarbeitung sind die Anwendungsmöglichkeiten des dielektrischen Erwärmens viel zahlreicher noch als im Haushalt. Viele Verarbeitungsstufen, in denen Wärme zugeführt werden muss, können auch durch dielektrisches Erwärmen, im allgemeinen über die Mikrowelle, durchgeführt werden. Eine Übersicht über die breite Palette dieser Anwendungsmöglichkeiten bringt Tabelle 2. Auch wenn es für fast alle hier aufgeführten Möglichkeiten Beispiele einer kommerziellen Nutzung oder zumindest eines anwendungsreifen und im halbtechnischen Massstab erprobten Verfahrens gibt, ist die Zahl der Anlagen in der Lebensmittelindustrie noch überschaubar.

Technologische Details einzelner Anwendungsfälle sind in den zurückliegenden Jahren mehrfach in einigen ausführlichen Übersichtsberichten gebracht worden (11–14). Wesentliche Neuerungen in der industriellen Nutzung haben sich in den letzten Jahren nicht ergeben. Wohl aber haben sich einige Anwendungsschwerpunkte auf den Gebieten Auftauen, Trocknen und Pasteurisieren herausgebildet.

Tabelle 2. Anwendungsmöglichkeiten des dielektrischen Erwärmens in der industriellen Lebensmittelverarbeitung

1. Temperaturerhöhen ohne Änderung der Produkteigenschaften	Auftauen von gefrorenen Produkten (Rohware, Fertiggerichte) Wiedererwärmen (zubereitete Speisen, Fertiggerichte)
2. Temperaturerhöhen zur Änderung der Produkteigenschaften	Gären von Hefeteig Blanchieren von Gemüse (Inaktivierung von Enzymen) Garen von Speisen aller Art Backen von Kleingebäck, Kuchen Expandieren von Mais Rösten von Nüssen, Bohnen
3. Trocknen	Lufttrocknen, unter Normaldruck Trocknen im Vakuum
4. Abtöten von Mikroorganismen	Pasteurisieren, unter Normaldruck Temperatur < 95 °C Sterilisieren, unter Überdruck Temperatur > 121 °C

Temperieren, Auftauen

Die häufigste Verbreitung der industriellen Anlagen ist zum Temperieren und Auftauen von gefrorener Rohware (Fleisch, Fisch, Butter) zu finden. Das dielektrische Erwärmen ist für diese Anwendung besonders geeignet, da sich der Verlustfaktor von Wasser beim Phasenwechsel fest/flüssig sprunghaft von einem sehr niedrigen Wert (Eis bei -10 °C , $\epsilon_r'' = 1,4$) zu einem hohen Wert (Wasser bei 0 °C , $\epsilon_r'' = 25$) ändert (Abb. 1). Man erreicht dadurch im gefrorenen Zustand eine hohe Eindringtiefe und kann grössere Blöcke (bei Fleisch von 25–30 kg) behandeln (Abb. 2). Ein deutlich niedriger Wert der spez. Wärmekapazität des Eises begünstigt seine Temperaturänderungsfähigkeit (Tabelle 1). Eine hohe Temperaturleitfähigkeit des Eises (bei -10 °C , $\alpha = 1,08 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$) gegenüber Wasser (bei 0 °C , $\alpha = 0,13 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$) begünstigt den Temperatúrausgleich und bedingt im Zusammenwirken mit den anderen Faktoren, dass sich in einem gefrorenen Gut von regelmässiger Form eine gleichmässige Temperaturverteilung (von $\pm 1\text{--}2\text{ °C}$) mit geringer Gefahr für lokale Überhitzung einstellen lässt.

Für Auftauvorgänge ist wegen der grösseren Eindringtiefe die Frequenz von 915 MHz, die in den USA und in England genutzt werden kann, günstiger als die Frequenz von 2450 MHz.

Kritisch wird der Vorgang, sobald in gewissen Bereichen des Gutes eine flüssige Phase mit sprunghaft ansteigender Temperaturänderungsfähigkeit und deutlich abfallender Eindringtiefe entsteht; prädestiniert hierfür ist die Oberfläche. An diesen Stellen tritt bei weiterer Energiezufuhr Überhitzung ein. Um dieses Risiko

auszuschalten, wird das gefrorene Gut vielfach nur bis auf eine Temperatur von -4 bis -1 °C temperiert. Um bei vollständigem Auftauen eine Überhitzung der Oberfläche zu vermeiden, wird dem Mikrowellenfeld eine Strömung mit bis zu -30 °C kalter Luft überlagert, wodurch die Oberfläche und herausragende Teile kühl gehalten werden.

Garen

Dem Garen im Mikrowellenherd sind Grenzen gesetzt. Die Speisen werden zwar schneller gar, aber für viele Speisen lässt sich der Zustand, wie er mit herkömmlichen Garmethoden – Kochen, Backen, Braten, Rösten, Grillen – erreicht wird, nicht erzielen. Dieser Nachteil lässt sich ausgleichen, wenn das Erwärmen mittels Mikrowellen mit den konventionellen Erwärmungsmethoden kombiniert wird. Im häuslichen Mikrowellenherd mit eingebautem Grill wird dies partiell ermöglicht, im industriellen Massstab lässt sich dies weit konsequenter realisieren.

Ein Beispiel bietet ein neuartiger kontinuierlich arbeitender Gartunnel für Grossküchen, in dem die Mikrowelle mit Dampf, Heissluft und Infrarotstrahlung zum Garen der Speisen kombiniert wird (15). Die Speisen liegen in flachen, offenen Edelstahlpfannen und werden im Tunnel durch mehrere aufeinander folgende Zonen geführt, in denen sie mit den vier verschiedenen Arten der Wärmezufuhr einzeln oder kombiniert behandelt werden. Jede Speise kann durch einen Computer vorprogrammiert mit der für sie richtigen Garart gekocht, gebraten oder gegrillt werden. Auf diese Weise lassen sich die recht unterschiedlichen Speisen, die für ein Gericht benötigt werden, kontinuierlich hintereinander zubereiten und mit Hilfe der Mikrowelle sogar das Frühstücksei in der Schale garen.

Trocknen

Beim Trocknen kann eine erhebliche Qualitätsverbesserung des Endproduktes erreicht werden, wenn es gelingt, die langen Trocknungszeiten, insbesondere im 2. Trocknungsabschnitt, verbunden mit erhöhter Produkttemperatur, abzukürzen. Wenn die äusseren Randschichten der Gutsteilchen weitgehend abgetrocknet sind, bilden sie Zonen mit sehr niedriger Wärmeleitfähigkeit und eine Barriere für den konventionellen Wärmetransport durch Wärmeleitung von aussen nach innen. Insbesondere beim Gefriertrocknen führt diese Trockenzone zwischen Teilchenoberfläche und Trocknungsfront mit einer ausgeprägt porösen Struktur zu den langen Trocknungszeiten.

In den ersten Anlagen wurde die Mikrowelle allein als Wärmequelle eingesetzt. Bekannt sind Vakuumtrockner und unter atmosphärischem Druck arbeitende Bandtrockner mit reiner Mikrowellenerwärmung. Durch Mikrowellenerwärmung unter Vakuum können die Trocknungszeiten auf 30% und weniger gesenkt werden. Trocknungsfähig im Vakuumtrockner mit Mikrowellenerwärmung sind pumpfähige Produkte, rieselfähige Schüttgüter und stückige Produkte. Anlagen mit Druckschleusen und internem Förderband, wie sie von normalen Vakuumtrocknern bekannt sind, erlauben einen quasi kontinuierlichen Betrieb. Die Anwendung der Mikrowelle beim Gefriertrocknen hat nach Erprobung im kleinen Massstab

den Durchbruch in die Dimension der industriellen Grossanlage noch nicht geschafft, dies wohl offenbar wegen der damit verbundenen Kosten.

Mikrowellenanlagen zum Trocknen unter atmosphärischen Bedingungen, im allgemeinen kontinuierliche Bandanlagen, haben sich ebenfalls aus wirtschaftlichen Gründen nicht richtig durchgesetzt. Schwierigkeiten bereitet auch die geringe Absorptionsfähigkeit des Trockengutes unter niedrigem Wassergehalt.

Zunehmend Anwendung finden dagegen Anlagen der konventionellen Luft- und Vakuumtrocknung, in die eine zusätzliche Wärmezufuhr über Mikrowellen integriert wird. In batchweise arbeitende Kammertrockner und kontinuierliche Bandtrockner, die mit den in der Trocknungstechnik üblichen Luftführungen ausgestattet sind, werden Mikrowellenmodule eingebaut, die den Trocknungsvorgang beschleunigen und zu niedrigeren Trocknungstemperaturen führen. Durch programmierbare Steuerung der zugeführten Mikrowellenenergie können die Trocknungsbedingungen an das Trockengut angepasst werden. Ein breites Anwendungsgebiet eröffnet sich zurzeit in der pharmazeutischen Industrie zum Trocknen von Granulaten in herkömmlichen Vakuummischtrocknern (Kegel- oder Schaufeltrockner) mit kombinierter Einleitung von Mikrowellenenergie.

Pasteurisieren

Die interessanteste Entwicklung hat in den letzten Jahren auf dem Gebiet des Pasteurisierens stattgefunden. Beim Pasteurisieren durch Mikrowellenerwärmung hat sich ein Schwerpunkt der Anwendung für abgepacktes Schnittbrot herausgebildet. Die Pasteurisierung führt bei in Folien verpacktem Brot zu einer zwei- bis dreifachen Haltbarkeitszeit, ohne einen vom Verbraucher nicht mehr akzeptierten Zusatz von chemischen Konservierungsstoffen. Gegenüber einer Pasteurisierung mit Heissluft erweist sich die Mikrowellenbehandlung durch eine wesentlich kürzere Erhitzungszeit mit geringerer Übertemperatur am Rand der Packung als qualitätsschonender. Werte aus der Produktion ergeben für pasteurisiertes Schnittbrot, an dem nur Hefen und Schimmel abzutöten sind, bei einer Mindesttemperatur von 65 °C, die in ca 5 min erreicht werden kann, und einer Heisshaltezeit von 5–10 min eine Haltbarkeit von ca. 3 Wochen unter 20 °C (16). Abgekühlt werden muss jedoch auf konventionelle Weise mit Luft.

Neben der vor etwa 15 Jahren eingeführten Pasteurisierung von abgepacktem Schnittbrot werden seit etwa 8 Jahren andere halbfeuchte Lebensmittel wie Pasta-Produkte, Pizzen und seit etwa 4 Jahren Fertiggerichte im Produktionsmassstab durch Mikrowellenerwärmung pasteurisiert. In der Industrie eingeführte Mikrowellenanlagen werden zum Pasteurisieren von abgepackten Fertiggerichten – Ein- und Mehrkomponentenmenüs mit Nudeln, Reis, Kartoffeln, Fleisch mit Sauce und Gemüse – eingesetzt. Für hermetisch versiegelte Fertiggerichte (Ein- und Mehrkomponentenmenüs) werden für $T_{\min} = 75\text{ °C}$ und $t_H = 5\text{ min}$ Haltbarkeitszeiten von 10 Tagen bis 6 Wochen unter 4 °C Lagertemperatur angegeben (16). Beim Einsatz einer atmosphärischen Mikrowellenanlage ist zu berücksichtigen, dass die Produkttemperatur in versiegelten Packungen im Mittel 95 °C nicht überschreiten darf, um ein Platzen der Packungen durch erhöhten Innendruck zu vermeiden (10).

Sterilisieren

Weniger erfolgreich waren bisher die Bemühungen, das Erwärmen durch Mikrowellen zum schonenden Sterilisieren auszunutzen, obwohl es einige gute Ansätze, z. B. mit dem Bach-Verfahren (12) oder dem Alfa-star-Verfahren, gegeben hat. Das Sterilisieren von neutralen bis schwachsauren Lebensmitteln muss im Temperaturbereich ab 121 °C erfolgen, um die Sporen von *Cl. botulinum* mit Sicherheit und mit kurzer Sterilisationszeit inaktivieren zu können. Sterilisieren ist problematischer und apparativ aufwendiger als das Pasteurisieren unterhalb von 100 °C. Für wasserhaltige Lebensmittel, und nur diese lassen sich mit der Mikrowelle erwärmen, muss im Druckbehälter unter einem der Temperatur entsprechenden Überdruck (bei 121 bis 130 °C von 2 bis 2,7 bar) gearbeitet werden.

Vorrangig einzuhaltende Forderung für das Sterilisieren ist

- das Erreichen der geforderten Sterilisationstemperatur in jedem Punkt des Gutes, um den erforderlichen F_0 -Wert einhalten zu können,
- bei gleichmässiger Temperaturverteilung, um Übersterilisation durch zu hohe Temperatur zu vermeiden.

Diese Forderung lässt sich mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand wohl am ehesten in kontinuierlichen Bandanlagen, eingebaut in ein Überdruckrohr, verwirklichen. Bei günstiger Auskopplung der Mikrowellen aus dem Wellenleiter, einer computergestützten Dosierung der Energie und einer verfahrensgemässen Produktentwicklung und Verpackung soll es möglich sein, im Produkt eine Temperaturstreuung von ± 5 °C zu erhalten (17).

Das Sterilisieren von Fertiggerichten mit Hilfe von Mikrowellen und evtl. auch in Kombination von Mikrowelle und Dampf sollte eine bessere Produktqualität im Vergleich mit herkömmlichen Sterilisationsverfahren ergeben. Erste kommerziell betriebene Anlagen und Erfolg versprechende Versuchsanlagen lassen aber auch auf diesem Sektor in der nächsten Zeit einen Durchbruch erwarten.

Zusammenfassung

Mikrowellen werden in der Lebensmittelindustrie zu folgenden Zwecken im technischen Massstab eingesetzt: Auftauen und Temperieren, Garen, Trocknen, Pasteurisieren und Sterilisieren. Für das Pasteurisieren und Sterilisieren können die notwendigen gleichmässigen Temperaturen im Lebensmittel am ehesten mit kontinuierlich betriebenen Bandanlagen erreicht werden, die mehrere hintereinander positionierte Magnetronen enthalten. Dazu sind Temperaturstreuungen von bis zu ± 5 °C im Produkt zu erwarten. Die technischen Entwicklungen in diesem Bereich sind noch nicht abgeschlossen.

Résumé

Les micro-ondes sont utilisées dans l'industrie alimentaire pour atteindre les objets techniques suivants: décongelation, contrôle de la température, cuisson, dessiccation, pasteurisation et stérilisation. Lors d'une pasteurisation ou d'une stérilisation, des températures constantes peuvent être obtenues dans l'aliment grâce à un procédé en continu comprenant

plusieurs magnétrons en série. Les écarts de température des produits ainsi traités sont d'ordre de $\pm 5^\circ\text{C}$. Les développements techniques dans ce domaine sont en cours constant.

Summary

Microwaves are applied by the food industry for the following technical purposes: thawing and temperature control, cooking, drying, pasteurization and sterilization. For the latter processes, the necessary even temperatures in the heated food can be achieved in continuously working process lines containing several magnetrons in a row. The temperature ranges in products treated in such lines may be within $\pm 5^\circ\text{C}$. The technical developments in this area are still in progress.

Literatur

1. Reuter, H.: Aseptic processing of foods. Behr's Verlag, Hamburg 1993.
2. Reuter, H.: Das dielektrische Erwärmen von Lebensmitteln, Teil 1, Grundlagen. Z. Lebensm.-Technol.-Verfahrenstechn. **30**, 242–246 (1979).
3. Ohlsson, T., Bengtsson, N.E. and Risman, P.O.: The frequency and temperature dependence of dielectric food data as determined by a cavity perturbation technique. J. Microwave Power **9**, 129–145 (1974).
4. Ohlsson, T. and Bengtsson, N.E.: Dielectric food data for microwave sterilisation processing. J. Microwave Power **10**, 93–108 (1975).
5. Bengtsson, N.E. and Risman, P.O.: Dielectric properties of foods at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique. J. Microwave Power **6**, 107–123 (1971).
6. Tschubik, I.A. und Maslow, A.M.: Wärmephysikalische Konstanten von Lebensmitteln und Halbfabrikaten. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1973.
7. Ohlsson, T. and Risman, P.O.: Temperature distribution of microwave heating – Spheres and cylinders. J. Microwave Power **13**, 303–310 (1978).
8. Schubert, H. und Grünewald, Th.: Wärmequellenverteilung in Modellkörpern bei der Mikrowellen-Erhitzung. Chem. Ing.-Techn. **55**, 553–555 (1983).
9. Ohlsson, T. und Thorsell, U.: Wiedererwärmen gekühlter Lebensmittel und Speisen mittels Mikrowelle. Ernähr.-Umschau **32**, 104–108 (1985).
10. Koch, K.: Über den Einsatz der Mikrowellentechnik zum Haltbarmachen von Lebensmitteln. Firmenschrift Hermann Berstorff, Maschinenbau GmbH, Hannover 1988.
11. Bengtsson, N.E. und Ohlsson, T.: Industrielles Erhitzen mit Mikrowellen und seine Bedeutung für gefrier- und hitzebehandelte Lebensmittel. Z. Lebensm.-Technol.-Verfahrenstechn. **37**, 394–399 (1986).
12. Reuter, H.: Das dielektrische Erwärmen von Lebensmitteln, Teil 2. Neuere Anwendungen. Z. Lebensm.-Technol.-Verfahrenstechn. **31**, 7–12 (1980).
13. Reuter, H.: Die Mikrowellentechnik in der Lebensmittelverarbeitung. Gordian **80**, 44–50 (1980).
14. Ehlermann, D.A.E. und Grünewald, Th.: Bestrahlung und Mikrowellenerwärmung von Lebensmitteln. Fortschr. Verfahrenstechn. **21**, 541–557 (1983).
15. Anonymus: Multi-Energie-Tunnel. Firmeninformation Bonnet/Cidelcem Industries, Marne la Vallée, Frankreich 1992.

16. Koch, K.: Einsatz des Mikrowellen-Erhitzungsverfahrens für Lebensmittel und Fertiggerichte. GDL-Jahrbuch «Spektrum» 4, 173–191. Rhenania Fachverlag, Hamburg 1991.
17. Koch, K.: Pasteurization and sterilization of unpacked liquid food containing solid parts in a continuous process by means of microwaves. In: Reuter, H., Aseptic processing of foods, pp. 107–117. B. Behr's Verlag, Hamburg 1993.

Prof. Dr. Helmut Reuter
Dorfstede 23
D-24113 Molfsee