Physikalische Grundlagen und Konstruktionsprinzipien von Mikrowellenherden = Physical fundamentals and principles for construction of microwave ovens

Autor(en): **Windhab, Erich J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen aus dem Gebiete der Lebensmitteluntersuchung und Hygiene = Travaux de chimie alimentaire et d'hygiène**

Band (Jahr): **86 (1995)**

Heft 2

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-983625

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Mitt. Gebiete Lebensm. Hyg. **86,** 89–100 (1995)

Physikalische Grundlagen und Konstruktionsprinzipien von Mikrowellenherden*

Physical Fundamentals and Principles for Construction of Microwave ovens

Key words: Physics of microwaves, Microwave oven, Food, Construction principles

Erich J. Windhab
Eidg. Technische Hochschule Zürich, Institut für Lebensmittelwissenschaft,
Laboratorium für Lebensmittel-Verfahrenstechnik, Zürich

Mikrowellen – Natur/Eigenschaften

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 300 GHz. Die Wellenlängen im Vakuum betragen entsprechend 1 m bis 1 mm (vgl. Abb. 1).

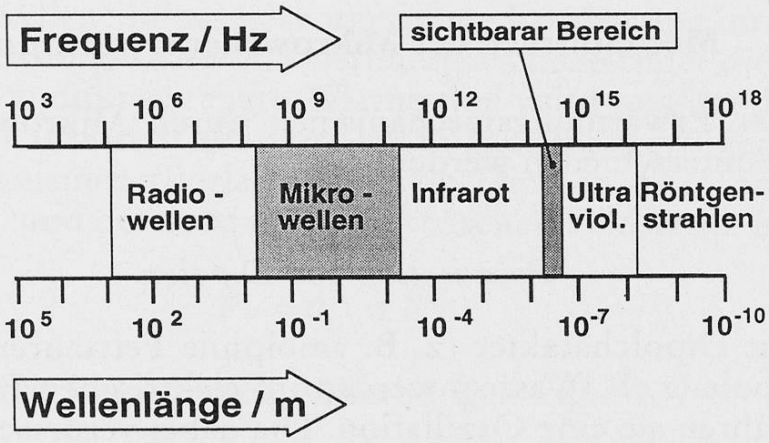

Abb. 1. Mikrowellen/Definition

Weltweit erlaubte Mikrowellenfrequenzen für wissenschaftliche und technische Einsatzfälle sind: 2,45 GHz, 5,8 GHz 24, 125 GHz (in Deutschland zusätzlich

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

433.92 MHz und in den USA 915 MHz). In Europa hat sich 2,45 GHz weitestgehend durchgesetzt.

Als entscheidende Eigenschaften von Mikrowellen bezüglich der Erwärmung von Lebensmitteln sind die nachfolgend aufgelisteten zu betrachten:

a) An elektrischen Leitern werden Mikrowellen reflektiert (Metalle). Hieraus ergibt sich, dass in Metallbehältern keine Erwärmung erfolgen kann. Darüber hinaus resultiert hieraus die Möglichkeit, durch metallische Werkstoffe eine Abschirmung (Schutz) zu gewährleisten. Ferner kann mit metallischen Hohlleitern ein «Transport» von Mikrowellen erfolgen.

b) Elektrische Isolatoren werden von Mikrowellen nahezu verlustfrei (ohne Absorption) durchdrungen (z. B. Glas, Keramik, Kunststoffe, Karton). Bei der Konstruktion von Mikrowellenherden ist es deshalb zwingend notwendig, dass Glasfenster mit einem in der Regel metallischen «Gittergewebe» als Schutz kombiniert werden.

c) Schwach leitende Materialien (Dielektrika) werden unter stoffspezifisch unterschiedlich starker Absorption durchdrungen. Die Absorption hat eine Erwärmung des Dielektrikums zur Folge. Der Grad der Erwärmung ist zusätzlich abhängig von Form und Grösse des Gutes.

d) An Grenzflächen zwischen Dielektrika werden Mikrowellen zum Teil gebrochen oder reflektiert. Dies hat zur Folge, dass in strukturierten Dielektrika (z. B. Lebensmitteln) eine Erwärmung durchaus verstärkt gegenüber der Erwärmung von reinem Wasser erfolgen kann.

e) Mikrowellen können gebündelt werden (z. B. Hornstrahler) und lassen sich mittels Hohlleitern transportieren (vgl. Punkt 1).

Mechanismen der Mikrowellenerwärmung

Bezüglich der Erwärmungsmechanismen durch Mikrowellen können zwei Hauptvorgänge unterschieden werden:

Polarisation von Dipolen

Moleküle mit Dipolcharakter (z. B. ambiphile Fettsäuren, Triglyzeride) und permanente Dipole (z. B. Wasser) werden im elektrischen Feld ausgerichtet. Im Wechselfeld erfahren sie eine Oszillation. Die dabei verursachte intermolekulare Reibung führt zur Wärmeentwicklung (vgl. Abb. 2).

Als massgeblich für die Produkterwärmung kann die Grösse «Dipol-Leitfähigkeit» σ_{pol} nach Gleichung 1 beschrieben werden.

$$\sigma_{pol} = 2\,\pi\, f\, \varepsilon_0\, \varepsilon_r'\, tg\delta^{*} \qquad [1]$$

Ionenleitung

Insbesondere in Lebensmitteln mit erhöhtem Anteil an gelösten Salzen spielt die Ionenleitfähigkeit eine zusätzlich wichtige Rolle für die Mikrowellenerwärmung. Diese ist proportional zur Ladung der Ionen q, der Ionendichte n sowie zur Ionenbeweglichkeit μ (vgl. Abb. 3).

In analoger Weise wie für die Polarisation von Dipolen kann auch für die Ionenleitung eine sogenannte Ionenleitfähigkeit σ_{ion} definiert werden (vgl. Gl. 2).

$$\sigma_{ion} = q \cdot n \cdot \mu \qquad [2]$$

(q = Ionenladung, n = Ionendichte, μ = Ionenbeweglichkeit)

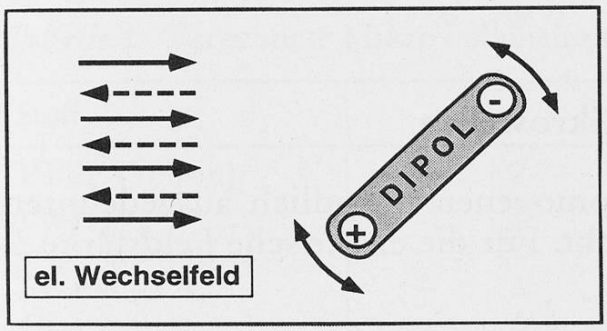

Abb. 2. Polarisation von Dipolen durch elektromagnetische Wechselfelder

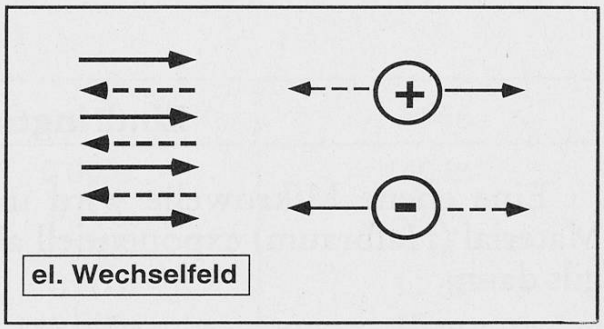

Abb. 3. Schematische Darstellung der Ionenleitung im elektrischen Wechselfeld

Die durch Mikrowelleneinfluss hervorgerufene Erwärmung im Gut wird über die Grösse «Verlustleistungsdichte P_v» definiert. P_v bezeichnet die pro Zeit- und Volumeneinheit im Produkt erzeugte Wärme und wird aus der Leitfähigkeit σ berechnet, welche sich ihrerseits aus den Leitfähigkeiten, hervorgerufen durch die beschriebenen Mechanismen (Porlarisation von Dipolen σ_{pol}, Ionenleitfähigkeit σ_{ion}), zusammensetzt, und der maximalen elektrischen Feldstärke E (vgl. Gl. 3).

$$Pv = 0{,}5\ \sigma\ E^2 \qquad [3]$$

damit resultiert unter Einsetzen der Gleichungen 1 und 2:

$$Pv = 0{,}5\ (\sigma_{ion} + 2\ \pi\ f\ \varepsilon_0\ \varepsilon_r'\ tg\ \delta^*)\ E^2 \qquad [4]$$

Die Einführung eines <u>effektiven</u> Verlustfaktors $tg\delta$ (nach Gleichung 5)

$$tg\ \delta = tg\ \delta^* + \sigma_{ion} / (2\ \pi\ f\ \varepsilon_0\ \varepsilon_r') \qquad [5]$$

führt zu der verkürzten Beziehung

$$Pv = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r' \, tg\, \delta \, E^2 \qquad [6]$$

mit $E = \sqrt{2}\, E_{eff}$ und $\varepsilon_r' = \varepsilon_r'' \, tg\delta$ lässt sich schreiben:

$$P_v = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \, E_{eff}^2 \qquad [7]$$

Daraus folgt für die Erwärmung des Gutes, ausgedrückt durch die sich ergebende Temperaturdifferenz:

$$\Delta T = P_v / (\rho \, c_p) \, \Delta t \qquad [8]$$

Eindringtiefe von Mikrowellen

Eine ebene Mikrowelle wird in einem homogenen unendlich ausgedehnten Material (Halbraum) exponentiell abgeschwächt. Für die elektrische Feldstärke E gilt dann:

$$E = E_0 \exp\{-\beta x\} \qquad [9]$$

Hierin bezeichnen x den Eidringweg, E_0 die Feldstärke bei $x = 0$ (Oberfläche) und β die Dämpfungskonstante, welche wie folgt definiert ist:

$$\beta = \pi \sqrt{2\, \varepsilon_r} / \lambda_o \left(\sqrt{1 + tg^2\delta} - 1\right)^{0.5} \qquad [10]$$

Als theoretische Eindringtiefe $s_{th,E}$ lässt sich ableiten:

$$S_{th,E} \approx \lambda_o \sqrt{\varepsilon_r'} / (\pi \, \varepsilon_r'') \qquad [11]$$

$s_{th,E}$ bezeichnet diejenige Eindringtiefe, bei welcher die elektrische Feldstärke auf dem 1/e-ten Teil (= 0,37) abgeschwächt ist.

Für die Eindringtiefe, bei welcher die Verlustleistungsdichte P_v auf ihren 1/e-ten Teil abgefallen ist, ergibt sich $s_{th,Pv}$ gemäss Gleichung [12]

$$S_{th,Pv} = 0{,}5\, S_{th,E} \approx \lambda_0 \sqrt{\varepsilon_r'} / (\pi \, \varepsilon_r'') \qquad [12]$$

Abbildung 4 veranschaulicht die Abschwächung der Mikrowelle im Gut.

In Tabelle 1 sind nach *Schubert* (1) berechnete Werte für die theoretische Eindringtiefe $s_{th,Pv}$ sowie die zugehörigen dielektrischen Kennwerte ε', ε'', für eine Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz bei 25 °C aufgezeigt. Aus Tabelle 1 kann das

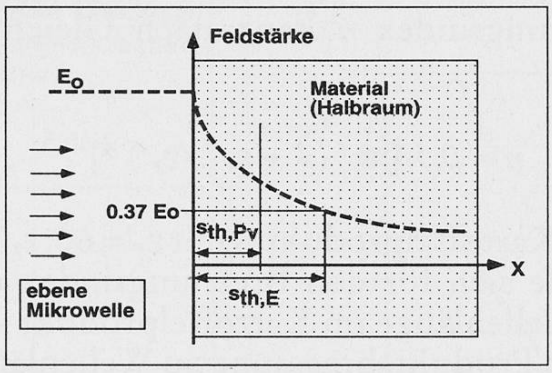

Abb. 4. Schematische Darstellung der Abschwächung von Mikrowellen in einem unendlich ausgedehnten Halbraum

Tabelle 1. Berechnete Mikrowelleneindringtiefen (1)

Stoff	ε_r'	ε_r''	S_{theor}
PTFE (Teflon)	2	0,0002	140 m
Polyethylen	2	0,001	28 m
Naturgummi	2	0,003	9 m
Eis bei –2 °C	3	0,003	11 m
Glas	6	0,005	10 m
dest. Wasser	77	11	16 mm
Rindfleisch gekocht	35	12	10 mm
Rindfleisch roh	50	15	9 mm
Kartoffelpüree	65	21	7 mm
Schinken gekocht	45	25	5 mm

deutlich unterschiedliche Absorptionsverhalten (-> Wärmeerzeugung) von Mikrowellen in Isolatoren und Dielektrika nachvollzogen werden.

Absorption von Mikrowellen

Die in einem Körper absorbierte Mikrowellenenergie hängt ausser von den dielektrischen Eigenschaften des Gutes (ε_r', ε_r''), vor allem von seiner Grösse und Form ab.

Für die Grössenabhängigkeit ist insbesondere das Verhältnis charakteristische Produktabmessung x / Wellenlänge λ entscheidend. Die Wellenlänge bei f = 2,45 GHz beträgt im Vakuum λ_o = 12,2 cm. Die Wellenlänge im Dielektrikum (Lebensmittel) wird berechnet nach

$$\lambda = \lambda_o / n \qquad [13]$$

(n = komplexer Brechungsindex)

Der komplexe Brechungsindex n kann nach Gleichung 14 näherungsweise berechnet werden.

$$n \approx 0{,}5\ [\ \varepsilon_r'\ (4 + \varepsilon_r''\ /\varepsilon_r')^{\ 2}]^{\ 0{,}5} \qquad [14]$$

Für das Beispiel eines Kartoffelproduktes mit $\varepsilon_r' = 60$; $\varepsilon_r'' = 20$, bei einer Frequenz von f = 2,45 GHz würde sich für den Brechungsindex n der Wert 7,8 ergeben. Daraus resultierte eine Wellenlänge im Kartoffelprodukt von 1,5 cm (1).

Für das Verhältnis von Produktabmessung zu Wellenlänge x/λ können folgende Bereiche unterschieden werden:

$x/\lambda << 1$	RAYLEIGH-Bereich	-> geringe MW-Absorption
$x/\lambda \approx 1$	«MIE-Bereich»	-> maximale Absorption
$x/\lambda >> 1$	Bereich der Gültigkeit der Gesetze der geometrischen Optik	-> mittlere, mit x abnehmende Absorption

Zur Berechnung der Absorption im Bereich 2 (nach der Mie-Theorie, welche in Analogie zur Berechnung von Lichtstreueffekten angewendet werden kann) erfolgt die Einführung des sogenannten Mie-Faktors a. Für diesen gilt:

$$a = 2 \cdot \pi \cdot R\ /\ \lambda \qquad [15]$$

Unter Annahme eines ebenen Mikrowellenfeldes lässt sich der Absorptionskoeffizient für regelmässige Körper nach der Mie-Theorie näherungsweise berechnen. Für eine homogene Kugel (mit ε'. = 60, ε'' = 20; nach (1)) in einem ebenen Mikrowellenfeld mit der Frequenz f = 2,45 GHz, resultiert die in Abbildung 5 dargestellte durchmesserabhängige Absorption der Mikrowellenenergie (Mie-Faktor: $a = 2\ \pi\ R\ /\ \lambda$).

Von *Schubert* et al. (1) wurde auch für verschiedene Flüssigkeiten in Bechergläsern, in welchen eine Grössenvariation des Fluidvolumens bei konstantem Einfüllhöhe/Durchmesser-Verhältnis (h/d) (verschieden grosse Bechergläser) realisiert wurde, die von der «Objektgrösse» abhängige «Absorptionseffizienz» experimentell ermittelt. Hierbei konnte bei allen dielektrischen Medien eine entsprechende Zunahme der Mikrowellenenergieaufnahme mit grösserem Volumen gemessen werden. In einer Arbeit von *Grüneberg* (2) wurde auf Basis vereinfachender Randbedingungen eine Abschätzungsmethode für die Ermittlung lokaler Mikrowellenerwärmung in regelmässigen Körpern (Kugel) entwickelt.

Unter der Annahme, dass sich um die Kugel ein stochastisches Mikrowellenfeld befindet und die auf der Oberfläche auftreffenden Wellen in die Kugel hineingebrochen werden, ergibt sich das in Abbildung 6 gezeigte Ergebnis für das Verhältnis der lokalen Feldstärke bezogen auf die Feldstärke an der Kugeloberfläche (E^2/E_a^2) in Abhängigkeit des dimensionslosen Kugelradius. Für verschiedene Kugeldurchmesser (2 bis 5 cm ε' = 60, ε'' = 20, f = 2,45 GHz) lässt sich abschätzen, dass bei

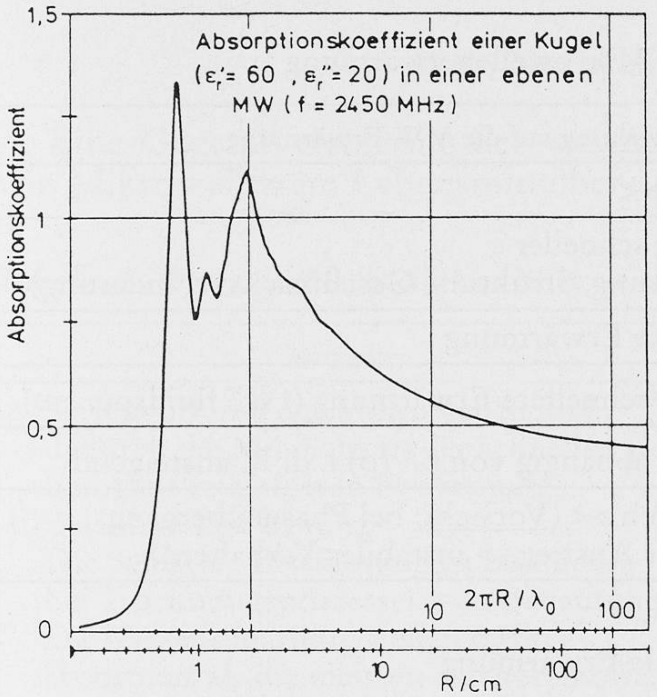

Abb. 5. Absorption von Mikrowellenenergie in kugelförmigen Probekörpern ($\varepsilon_r' = 60$, $\varepsilon_r'' = 20$, $f = 2{,}45$ GHz) (1)

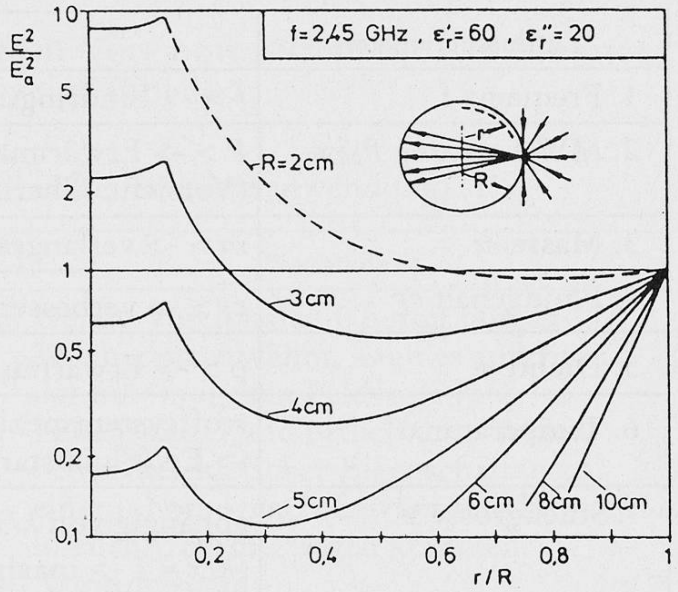

Abb. 6. Feldstärkenverteilung in kugelförmigen Proben unterschiedlichen Durchmessers ($\varepsilon_r' = 60$, $\varepsilon_r'' = 20$, $f = 2{,}45$ GHz) (1)

kleineren Objekten (< 3 cm) im Zentrum der Kugel eine stärkere Erwärmung erfolgt, als dies in der Randzone der Fall ist. Zwischen Randzone und Zentrum ist die Temperatur noch weiter abgesenkt. Bei grösseren Objekten (Durchmesser ≥ ca. 5 cm) zeigt sich ein umgekehrter Sachverhalt, d.h. die Erwärmung im Zentrum ist deutlich erniedrigt gegenüber der Erwärmung am Rand.

Dass diese qualitative Abschätzung näherungsweise zutrifft, konnte unter Einsatz temperaturempfindlicher Folien (mit temperaturempfindlichen Flüssigkristallen belegt) nachgewiesen werden. Die Temperaturzonen zeigen im Experiment unterschiedliche «Farbentwicklung», was die beschriebenen Tendenzen nachvollziehen lässt (2).

Übersicht zum Einfluss verschiedener physikalischer Parameter auf die Mikrowellenerwärmung

Tabelle 2 gibt einen umfassenden Überblick über die Auswirkungen bzw. den Einfluss verschiedener anwendungsrelevanter physikalischer Grössen auf den Grad der Mikrowellenabsorption bzw. entsprechender Erwärmung.

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft einige der in Tabelle 2 bezeichneten Abhängigkeiten auf.

Schiffmann (3) beschreibt dielektrische Verlustfaktoren ε" als Funktion des Feuchtegehaltes für eine Holzmatrix bei verschiedenen Temperaturen (20–80 °C).

Tabelle 2. Physikalische Einflussparameter auf Mikrowellenerwärmung

Einflussparameter	Auswirkung auf die MW-Erwärmung
1. Frequenz f	f > -> Eindringtiefe <
2. MW-Leistung P_{MW}	P > -> Erwärmung schneller (Vorsicht: Überhitzung, Struktur-, Geschmacksveränderung)
3. Masse m	m > -> verlangsamte Erwärmung
4. Fluidgehalt c_F	c_F > -> verbesserte/schnellere Erwärmung (f (ε" fluidspez., υ)
5. Dichte ρ	ρ > -> Erwärmung abhängig von ε_r" (ρ) i. d. R. ansteigend
6. Temperatur υ	stoffsystemspezifisch >< (Vorsicht: bei Phasenübergang -> Eis/Fluid starker Anstieg -> instabiles Verhalten!)
7. Stückgrösse x	abhängig von λ/x ($\lambda/x \approx 1$ -> maximale Erwärmung << -> geringe >> -> mittlere, abnehmend)
8. Stückform	Überhitzung in Ecken und Kanten (komplexe Abhängigkeit von Geometrie)
9. Wärmeleitfähigkeit λ	λ > verbesserte Wärmeausbreitung
10. spez. Wärme c_v	c_v > schnellere Erwärmung (auch bei evtl. kleinerem ε_r")

Ohlsson (4) fand einen ausgeprägten Temperatureinfluss auf den Verlustfaktor ε_r", der starke Unterschiede bei verschiedenen Lebensmitteln aufzeigt.

Insbesondere zeigt sich eine starke Zunahme von ε_r" bei der Phasenumwandlung des Wasseranteils in den betrachteten Lebensmitteln (Eis -> Wasser bei ca. 0 °C). Beim Auftauen von Lebensmitteln kann sich daraus die Problematik ergeben, dass bereits teilweise aufgetaute Bereiche verstärkt Wärme absorbieren und somit dort eine Überhitzung stattfindet, während in den noch gefrorenen Bereichen deutlich weniger Mikrowellenenergie absorbiert wird.

Einen deutlichen Einfluss der spezifischen Wärme c_v auf das Aufheizverhalten verschiedener Flüssigkeiten konnte *Ohlsson* nachweisen. Obwohl eine Ölprobe eine deutlich geringere Mikrowellenabsorption (aufgrund kleinerer dielektrischer Verlustfaktoren ε") aufweist, ergibt sich aufgrund der deutlich erniedrigten spezifischen Wärme des Öls gegenüber Wasser (Wasser c_v = 4,2 kJ/kg: Öl = 2,0 kJ/kg) eine signifikant schnellere Erwärmung des Öls gegenüber den Wasserproben. Lebensmittel, welche sowohl Fett wie Wasseranteile enthalten, liegen im Bereich zwischen Öl und Wasser.

Vor-/Nachteile der Mikrowelle

Eine Gegenüberstellung der wesentlichen Vor- bzw. Nachteile des Einsatzes von Mikrowellen im Lebensmittelbereich zeigt Tabelle 3:

Tabelle 3. Vor- und Nachteile der Mikrowelle (bei Lebensmittelanwendung) (1)

Vorteile	Nachteile
a) Tiefenwirkung der Mikrowellen und dadurch die Möglichkeit der schnelleren und gleichmässigeren Erwärmung b) Selektive Erwärmung Die Selektive Erwärmung ist besonders bei Trocknungsprozessen von Bedeutung. Da Wasser die Mikrowellen stärker absorbiert als die meisten anderen Stoffe, werden die feuchten Stellen am stärksten erwärmt. c) Wärmeerzeugung in erster Linie im Produkt Während konventionelle Öfen vorgeheizt werden müssen, ist bei Mikrowellenherden ein direktes Dosieren der Hitze möglich.	a) Gefahr von lokalen Überhitzungen Wie bereits erwähnt, kann es aufgrund der inhomogenen Feldverteilung im Lebensmittel und örtlich unterschiedlicher dielektrischer Eigenschaften zu einer inhomogenen Erwärmung bzw. zu lokalen Überhitzungen kommen. b) Wirkungsgrad Ein weiterer Nachteil ist der relativ geringe Wirkungsgrad der Umwandlung von elektrischer Energie zu Wärme im Produkt, welcher zurzeit nicht wesentlich über 50% liegt. c) Verwendung von Metallbehältern nicht oder nur bedingt möglich d) Angst einiger Verbraucher vor der komplizierten und für sie unverständlichen Technik

Ausführung von Mikrowellenöfen

Nachfolgend soll auf die prinzipiellen Konstruktionsprinzipe von Mikrowellenöfen im Bereich der Haushaltsanwendung sowie für den industriellen Einsatz eingegangen werden.

Aufgrund der kurzen Wellenlänge sind sogenannte Streu- und Kondensatorfelder, wie sie z. B. bei der Hochfrequenzerhitzung (1–100 MHz) Anwendung finden, nicht mehr sinnvoll. (Stehende Wellen, Schwierigkeit der Übertragung grosser Leistungen bei hohen Frequenzen im geschlossenen Stromkreis.)

Bei Mikrowellen erfolgt die Erwärmung im sogenannten «fortschreitenden Feld», wobei beim Durchdringen des Produktes eine Schwächung der Welle bis zu deren Auslöschung stattfindet. Die genannten fortschreitenden Felder können in verschiedener Weise erzeugt werden:

A in metallischen Hohlleitern,

B bei Abstrahlung von einem «Antennenkörper» (vergleichbar zu Infrarotstrahlern),

C im geschlossenen Hohlraumresonator durch Überlagerung mehrerer stehender Wellen (typisches Konstruktionsprinzip für Haushaltsmikrowelle).

In Abbildung 7 sind diese grundsätzlichen Konstruktionsprinzipe nach A–C schematisch dargestellt.

In der industriellen Anwendung haben sich insbesondere kontinuierliche Verfahren für den Einsatz von Mikrowellen bewährt. Anwendung findet die Mikrowelle neben Erwärmungs-/Erhitzungsverfahren insbesondere bei der Trocknung von Lebensmitteln. Häufig findet sich bei Trocknungsapparaten der parallele (synergistische) Einsatz verschiedener Trocknungsprinzipe (Mikrowelle, Infrarottrocknung, Konvektionstrocknung). Darüber hinaus wurden Verfahren entwickelt, welche als weiteren Mechanismus eine Überlagerung von Vakuum zulassen (6).

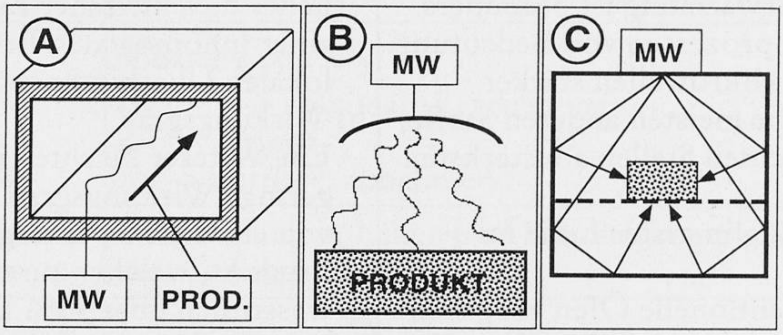

Abb. 7. Grundprinzipe für die Konstruktion von Mikrowellenöfen

Menschliche Gefährdung durch Mikrowellen (?)

Häufig diskutiert in der Literatur sind sogenannte nichtthermische Effekte von Mikrowellen. Über deren Existenz bzw. Auswirkungen konnte bislang kein haltbarer Nachweis geliefert werden. Entsprechende Veröffentlichungen wurden in der Regel bislang widerrufen. Für die thermischen Effekte der Mikrowelle bestehen eindeutige Vorschriften in bezug auf den Anwenderschutz.

Zur Definition eines Grenzwertes orientiert man sich an der «Heizleistung» des menschlichen Grundumsatzes. Dieser entspricht ca. 70 Watt. Hieraus berechnet sich eine frequenzabhängige Absorptionsrate $\leq$ 1 W/kg. Der hieraus abgeleitete Grenzwert ist oberflächenbezogen: 2,5 mW/cm^2 bei 6 min Einstrahldauer.

Nach der VDE-Richtlinie 0700 dürfen in 5 cm Abstand zu einem Mikrowellenherd im Haushaltseinsatz sowie auch im industriellen Einsatz Leckstrahlungsdichten von 5 mW/cm^2 nicht überschritten werden. Dies bedeutet aufgrund einer mit dem Quadrat des Abstandes abfallenden Leistungsdichte, dass z. B. in 0,5 m Abstand zu einer Mikrowelle nur noch 1/50 des «Sicherheitswertes» angetroffen wird. Damit kann auch eine Gefährdung des Verbrauchers durch thermische Einflüsse von Mikrowellen eindeutig beherrscht werden.

Wirkungsgrad von Mikrowellenöfen

Der Gesamtwirkungsgrad von Mikrowellenöfen ergibt sich aus dem Produkt des Wirkungsgrades für die Mikrowellenerzeugung (Magnetron) sowie dem Wirkungsgrad des Applikators (z. B. Mikrowellenherd). Die Gesamtwirkungsgrade betragen in der Regel maximal 0,5–0,6 (industrieller Einsatz). Bei Haushaltsmikrowellenherden, insbesondere auch bei nicht optimaler Anwendung (vgl. physikalische Einflussfaktoren), wird der mittlere Wirkungsgrad bei ca. 0,2 bis 0,3 liegen.

Zusammenfassung

Zunächst werden physikalische Natur und allgemeine physikalische Eigenschaften von Mikrowellen, als elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich zwischen ca. 300 MHz und 300 GHz, beschrieben. Danach wird auf die spezifischen Mechanismen der Erwärmung durch Mikrowelleneinwirkung auf die Lebensmittelmatrix eingegangen. Von besonderer Wichtigkeit in der Applikation von Mikrowellen im Industrie- und Haushaltsbereich sind deren Eindringtiefe sowie die Abhängigkeit der absorbierten Energie, welche die Erwärmung bewirkt, von Grösse und Form der zu erwärmenden «Objekte». Diese Abhängigkeiten werden im Zusammenhang mit den theoretischen Grundlagen sowie am experimentellen Beispiel erläutert. Eine Übersicht zum Einfluss typischer produktspezifischer, physikalischer Einflussgrössen (Masse, Wassergehalt, Dichte, Temperatur, Stückgrösse, Stückform, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme) auf Gleichmässigkeit und Effizienz der Erwärmung wird angeschlossen und anhand experimenteller Daten aus der Literatur bestätigt.

In der Folge wird auf die unterschiedlichen technischen Ausführungsformen von Mikrowellenöfen Bezug genommen, welche sich unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften in diesem Wellenlängenbereich und technisch vertretbare Wirkungsgrade durchgesetzt haben. In einem abschliessenden Kapitel werden Vor- und Nachteile der Mikrowellenanwendung resümiert. In diesem Zusammenhang wird auch auf das menschliche Gefährdungspotential aus technischer Sicht Bezug genommen.

Résumé

Dans un premier temps, la nature physique et les propriétés physiques générales, comme les ondes électromagnétiques de fréquences situés entre environ 300 MHz et 300 GHz, sont décrites. Ensuite, les méchanismes spécifiques de l'échauffement des aliments par micro-ondes sont traités.

La profondeur de pénétration ainsi que l'énergie absorbée, dépendant de la forme et de la grandeur du produit à chauffer, relève d'une importance particulière dans l'application des micro-ondes dans l'industrie et dans les ménages. Les corrélations sont démontrées à l'aide des bases théoriques et illustrées par des exemples pratiques. Un aperçu de l'influence des paramètres physiques spécifiques aux produits (masse, teneur en eau, densité, température, grandeur, forme, conductivité thermique, chaleur spécifique) sur l'uniformité et l'efficacité de l'echauffement est également présenté, et confirmé a l'aide de données expérimentales.

Ensuite, les différents types de fours à micro-ondes utilisés avec succès, sont présentés en fonction de leurs propriétés physiques et de leur rendements. Dans un chapitre final, les

avantages et désavantages, ainsi que les risques potentiels d'ordre technique de l'utilisation de micro-ondes seront discutés.

Summary

In the first chapter the physical nature and general physical properties of microwaves, as electromagnetic waves in the frequency range from 300 MHz to 300 GHz, are described. Then the specific mechanisms for food microwave heating are discussed.

For the application of microwaves in industry and households, the parameters of main importance are the wave penetration depth and the dependency of the absorbed microwave energy from size and shape of the products to be heated. These dependencies are explained theoretically and illustrated by experimental data. An overview of typical physical food product parameters (mass, water content, density, temperature, size, shape, heat conductivity, specific heat) and their influence on homogeneity and efficiency of heating is enclosed, and related experimental results from literature are demonstrated.

Furthermore the different technical design principles for microwave ovens are explained, which have been succesful in use. In the last chapter a summary of the advantages and disadvantages of microwave ovens is given, and facts concerning the potential of human risk in use of microwaves, from the technical point of view, are added.

Literatur

1. *Schubert, H., Grüneberg, M.* und *Walz, E.:* Erwärmung von Lebensmitteln durch Mikrowellen. Z. Lebensmitteltechnik ZFL **42,** 14–20 (1991).
2. *Grüneberg, M.:* Untersuchungen und Modellbildung zur Mikrowellenerwärmung. Dissertation, Technische Universität Karlsruhe 1992.
3. *Schiffmann, H.:* Application of microwave energy to doughnut production. Food Technol. **25** (7), 58–63 (1971).
4. *Ohlsson, T.:* Fundamentals of microwave cooking. Microwave world **4** (2), 4–10 (1983).
5. *Smith, D.P.:* Heat treatment of food products. US-Patent 4 154 861 (1979).
6. *Heindl, A., Holley, W.* und *Rebmann, D.:* Mikrowellen- und Hochfrequenztechnik bei der industriellen Lebensmittelherstellung. Z. Lebensm.-Technol.-Verfahrenstechn. **44,** 320–327 (1993).

Prof. Dr.-Ing. Erich J. Windhab
Institut für Lebensmittelwissenschaft
ETH Zürich-Zentrum
Laboratorium für Lebensmittel-Verfahrenstechnik
Universitätsstrasse 2
CH-8092 Zürich