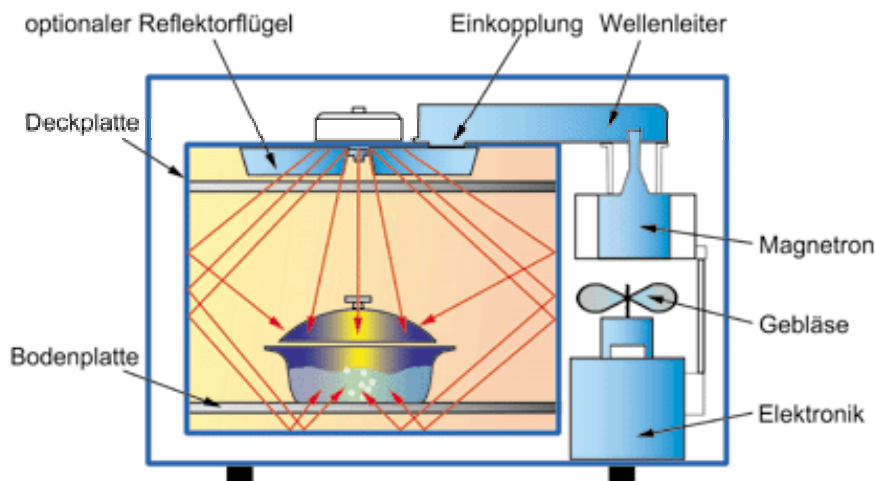


Mehr zur Physik der Haushaltsmikrowelle

KLAUS-PETER MÖLLMANN | MICHAEL VOLLMER

Dieses Dokument enthält Ergänzungen zum Artikel „Kochen mit Zentimeterwellen“ in **Physik in unserer Zeit**, 35. Jahrgang 2004, Nr. 1, S. 38.



Der Garraum als Mikrowellenresonator

Im Heft wird erklärt, wie der Garraum einer Haushaltsmikrowelle auf die Zentimeterwellen aus dem Magnetron als Resonator wirkt: Es bilden sich in ihm stehende Wellen, deren Knoten an den Wänden liegen. Interessant ist die nun Frage, wie diese durch die Geometrie bestimmten Moden zu den Wellenlängen passen, die das Magnetron emittiert.

Tabelle 1 zeigt das für das Beispiel eines Garraums, dessen Maße $L_x = 29$ cm, $L_y = 29$ cm und $L_z = 19$ cm sind. Aus diesen

TAB. 1 MODEN EINER MIKROWELLE

λ_0 / cm	l	m	n
11,527	0	4	2
11,527	4	0	2
11,600	0	5	0
11,600	5	0	0
11,600	3	4	0
11,600	4	3	0
11,608	0	2	3
12,103	1	1	3
12,274	2	4	1
12,274	4	2	1
12,277	2	3	2
12,277	3	2	2
12,375	0	1	3
12,667	0	0	3
12,864	3	3	1
12,969	2	4	0
12,969	4	2	0

Maßen ergeben sich bei den verschiedenen Moden (l, m, n) Wellenlängen λ_0 , (vergleiche Gleichungen (3,4) im Artikel) die die Tabelle unten auflistet. Die vom Magnetron emittierte Wellenlänge liegt hier im Intervall $11,5 \text{ cm} < \lambda_0 < 13 \text{ cm}$. Bei diesem Beispiel gibt es vier verschiedene Moden, die in dieses Intervall passen (farbig hervorgehoben).

Eine Abschätzung der Qualität einer Mikrowelle ist möglich über die Modendichte, also die Zahl der Moden, die bei vorgegebenen Abmessungen in einem vorgegebenen Frequenzintervall liegen. Im Beispiel wurden die verschiedenen Geräte nach dem Gerätevolumen spezifiziert [1]. Tabelle 2 zeigt einen Überblick für leere Geräte. Bei Beladung verschieben sich die Moden, sodass sich die dann angeregten Modenzahlen ebenfalls ändern können.

TAB. 2 MODENDICHTE UND INNENVOLUMEN

Maße jeweils in cm	Volumen in cm ³	Modenzahl im Bereich 1 11,50–13,00 cm	Modenzahl im Bereich 2 11,98–12,48 cm	Modenzahl im Bereich 3 11,11–12,35 cm
28/27/19	14 364	16	6	3
28/28/19	14896	15	5	1
29/28/19	15428	15	5	3
30/29/18	15660	15	5	2
31/30/17	15810	15	6	3
29/29/19	15979	17	6	4
30/29/19	16530	16	6	3
34/29/17	16762	15	6	4
30/28/20	16800	17	5	0
30/30/20	18000	19	7	1
33/31/21	21483	28	9	7
33/33/29	21780	25	8	7
35/33/19	21945	26	11	6

Die Modendichte wächst mit dem Innenvolumen der Geräte. Die Wellenlängenintervalle entsprechen grob folgenden Frequenzbreiten:

Bereich 1: $\Delta\lambda = \pm 0,75$ cm entspricht $\Delta\nu/\nu = 6$ %, d.h. $\Delta\nu = \pm 150$ MHz,

Bereich 2: $\Delta\lambda = \pm 0,25$ cm entspricht $\Delta\nu/\nu = 2$ %, d.h. $\Delta\nu = \pm 50$ MHz,

Bereich 3: $\Delta\lambda = \pm 0,12$ cm entspricht $\Delta\nu/\nu = 1$ %, d.h. $\Delta\nu = \pm 25$ MHz.

Absorption von Mikrowellen durch Wasser

In Ergänzung zu den Abbildungen im Artikel macht Tabelle 3 ungefähre Angaben für den Absorptionskoeffizienten in Wasser, Salzwasser und Eis für Mikrowellen bei verschiedenen Temperaturen. Sie sind berechnet aus den Daten der Abbildung 5 im Artikel und ähnlichen Kurven für Salzwasser [2].

Mit steigender Temperatur sinken sowohl der Real- als auch der Imaginärteil von ϵ für

TAB. 3 ABSORPTIONSKOEFFIZIENTEN UND EINDRINGTIEFEN

Frequenz	Material	Absorptionskoeffizient α	Eindringtiefe/cm
2,5 GHz ($\lambda = 12$ cm)	reines Wasser		
	0 °C	$\approx 1,13$ cm ⁻¹	0,9 cm
	20 °C	$\approx 0,71$ cm ⁻¹	1,4 cm
	60 °C	$\approx 0,26$ cm ⁻¹	3,8 cm
2, 5 GHz ($\lambda = 12$ cm)	H ₂ O+0,15M NaCl		
	0 °C	$\approx 1,93$ cm ⁻¹	0,52 cm
	20 °C	$\approx 2,61$ cm ⁻¹	0,46 cm
	60 °C	$\approx 3,36$ cm ⁻¹	0,30 cm
2,5 GHz ($\lambda = 12$ cm)	100 °C	$\approx 4,98$ cm ⁻¹	0,20 cm
	Eis	$< 10^{-2}$ cm ⁻¹	> 100 cm

$\nu = 2,45$ GHz ab. Dabei verschiebt sich zusätzlich das Maximum von ϵ_2 zu höheren Frequenzen. Der Grund liegt darin, dass bei steigender Temperatur die Dipole sich weniger gut im Feld ausrichten können, die erzeugte Polarisation ist nach der Debye-Theorie proportional zu $1/T$ [3,4]. In der Konsequenz vermindert dieser Effekt auch die Absorption und damit die Aufnahme von Energie: Folglich braucht das Erhitzen von (reinem) Wasser mit steigender Temperatur immer länger.

Tritt beim Öffnen der Tür Strahlung aus?

Bei einer typischen Güte eines Mikrowellenresonators von 10^4 im leeren Zustand (und $Q = 10^2$ im befüllten Zustand) lässt es sich einfach abschätzen, wie lange es dauern würde, bis das Feld abgeklungen ist. Aus

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\omega E}{Q}$$

findet man für die Energieabnahme bei Abschalten der Energiezufuhr

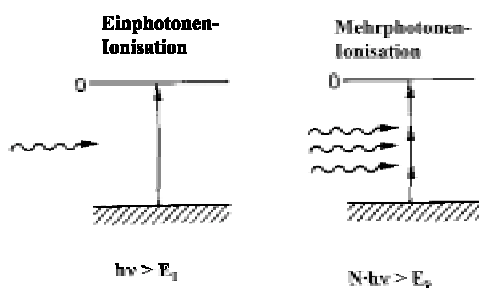
$$E(t) = E(0)e^{-\frac{\omega t}{Q}}$$

Daraus folgt, dass E innerhalb einer Zeitspanne 7τ , das entspricht $7Q/\omega$, auf weniger als ein Promille absinkt. Bei 2,45 GHz und $Q = 10^4$ findet man $7\tau = 4,5\mu\text{s}$, also eine Zeit unterhalb $1/100\,000$ s. Bei $Q = 100$ ergäbe sich sogar die weitaus kleinere Zeit von 45 ns. So schnell kriegt niemand die Tür seiner Mikrowelle auf.

Können Mikrowellen chemische Bindungen aufbrechen?

Der Hintergrund dieser Frage sind die immer wieder gehörten Mythen, die Nahrung in der Mikrowelle würde chemisch geändert. Die damit verknüpfte physikalische Frage lautet, ob die Feldstärken in einer Mikrowelle groß genug sind, um nichtlineare Prozesse wie Multiphotonenionisation oder Multiphotonendissoziation zu bewirken (Abbildung 1). Denn nur diese Prozesse wären in der Lage, reaktionsfreudige Radikale zu erzeugen, die die chemische Zusammensetzung der Nahrung verändern könnten.

ABB. 1 MEHRPHOTONENIONISATION



Bei der Mehrphotonenionisation von Wasser durch Mikrowellen müssen in sehr kurzer Zeit etwa 10^5 Photonen absorbiert werden (nach [5]).

Das Ionisationspotential von Wasser beträgt etwa 12,6 eV [6], die niedrigste Dissoziationsenergie für Wasser beträgt etwa 0,6 eV [7]. Bedenkt man, dass ein Mikrowellenphoton von 2,45 GHz eine Photonenenergie von etwa 10^{-5} eV besitzt, ist klar, dass nur extreme Multiphotonanregungen in Frage kommen.

Nichtlineare Anregungen wie Multiphotonionisation sind aus der Optik bekannt [5]. Sehr starke elektrische Felder führen dazu, dass die Elektronen nicht mehr als harmonisch gebunden angesehen werden können. Ab elektrischen Feldern von etwa 10^4 V/cm (also 10^6 V/m) treten nichtlineare Prozesse auf, zum Beispiel durch Erzeugung der zweiten Harmonischen, Frequenzmischung, etc.

Die elektrische Feldstärke von elektromagnetischen Wellen lässt sich aus der Bestrahlungsstärke in W/cm^2 (im Prinzip dem Poynting-Vektor) berechnen. In Tabelle 4 ist neben der Bestrahlungsstärke (Photonenfluss) und der daraus berechneten elektrischen Feldstärke auch noch die Photonenzahl pro Zeit und Fläche, also der Photonfluss durch eine vorgegebene Fläche angegeben. Abgesehen davon, dass die berechnete Feldstärke unter den für nichtlineare Optik üblichen Feldstärken liegt, gibt es verschiedene weitere Argumente, warum es in der Mikrowelle keine Mehrphotonenprozesse geben kann. Aufgrund der sehr viel geringeren Photonenenergie entspricht eine Leistung von 1000 W/cm^2 , dies liegt in etwa maximal beim Austritt aus dem Magnetron vor, immerhin $6 \cdot 10^{26}$ Photonen/s·cm². Obwohl durch die Modenverteilung sicher nur ein Bruchteil hiervon vorliegt (bestenfalls vielleicht 1/10 bis 1/100 an einem Maximum der Feldstärke innerhalb des Garraums), sei in dieser ungünstigsten Abschätzung ein Fluß von 10^{27} Photonen/s·cm² angenommen.

TAB. 4 ELEKTRISCHE FELDESTÄRKEN UND PHOTONENFLÜSSE

Bestrahlungsstärke $J = \frac{1}{2} \cdot c_0 \cdot \epsilon_0 \cdot E_0^2$	Elektrisches Feld in V/cm aus J berechnet	Photonenfluss $Q = J/h \cdot \nu$ in $1/\text{s} \cdot \text{cm}^2$	
		$\lambda = 694 \text{ nm}$	$\lambda = 12 \text{ cm}$
1 W/cm^2	27	$3,4 \cdot 10^{18}$	
10^6 W/cm^2	$2,7 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^{24}$	
10^3 W/cm^2	870		$6 \cdot 10^{26}$

Ein Molekül hat in etwa eine Querschnittsfläche von etwa 10^{-16} cm^2 , sodass auf diese Fläche etwa 10^{11} Photonen/s einfallen. Bei einer Eindringtiefe von etwa 1 cm werden etwa 10^8 Moleküle diesem Fluss ausgesetzt, jedes Molekül wird im Mittel also von etwa 10^3 Photonen pro Sekunde getroffen. Eine Mehrphotonenionisation oder -dissoziation braucht aber rund 10^5 Photonen.

Selbst wenn alle 10^{11} Photonen/s sich auf ein Molekül konzentrieren würden, wäre ein Multiphotonprozess praktisch unmöglich: Die erforderlichen 10^5 Photonen müssten nämlich alle auch noch in einem sehr kurzen Zeitraum absorbiert werden. Bei sichtbarem Licht geht man von maximal etwa 10^{-14} s aus [5], da bei Anregung in einen virtuellen Zwischenzustand wieder eine sehr schnelle Relaxation erfolgt.

Diese Zeitskala ergibt sich übrigens bereits aus der Betrachtung der Unschärferelation: Ein Photon, welches um ΔE gegen einen tatsächlichen Übergang verstimmt ist, kann nur für eine Zeit Δt gemäss $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$ leben, insofern ergibt sich bei $\Delta E \approx 1 \text{ eV}$ hier die Größenordnung $\Delta t \approx 10^{-14}$ s.

Die 10^{-14} s für sichtbares Licht entsprechen in etwa einer Schwingungsperiode des Feldes. Geht man wieder von etwa $4 \cdot 10^{-10}$ s als Schwingungsperiode des Mikrowellenfelds aus, so erfordert eine Absorption von 10^5 Photonen in $4 \cdot 10^{-10}$ s aber eine Photonenzahl von $2,5 \cdot 10^{14}$ /s. Das liegt um Größenordnungen über der tatsächlich vorhandenen Zahl von 10^{11} Photonen/s.

Als Fazit folgt also aus diesen Abschätzungen, dass Mehrphotonenprozesse bei den typischen Betriebsdaten einer Haushaltsmikrowelle nicht möglich sind. Damit bleibt die Nahrung auch chemisch unverändert.

Literatur

- [1] Stiftung Warentest, Test **2000**, 5, 47.
- [2] M. Chaplin, South Bank University, London: <http://www.sbu.ac.uk/water/microwave.html>.
- [3] H. Vogel, Gerthsen Physik, 18. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg 1995.
- [4] H. Föll, Universität Kiel: http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/makeindex.html.
- [5] H. Niedrig, Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3, Optik, 9. Aufl., de Gruyter, Berlin 1993.
- [6] H. Dickinson et al., Phys. Chem. Chem. Phys. **2000**, 2, 4669.
- [7] U. Buck, MPI Strömungsforschung in Göttingen, private Mitteilung.