

Mehr Experimente mit der Haushaltsmikrowelle

DETLEF KARSTÄDT | KLAUS-PETER MÖLLMANN | MICHAEL VOLLMER

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zum Artikel „Eier im Wellensalat“ in **Physik in unserer Zeit**, 35. Jahrgang 2004, Nr. 2, S. 90.

Zum Umgang mit Mikrowellengeräten

Ein Haushaltsmikrowellengerät – im folgenden kurz als Mikrowelle bezeichnet – sollte nicht leer betrieben werden, um Rückkopplungen des Mikrowellenfelds in das Magnetron zu verhindern. Diese könnten zu Defekten führen. Im Zweifelsfall sollte man immer ein kleines Wassergefäß mit einem Löffel gegen Siedeverzug in den Garraum stellen.

Einige der beschriebenen Experimente bergen auch Gefahren, zum Beispiel durch explosionsartig siedendes Wasser, durch Explosion von Eiern, Glühlampen etc. oder plötzliches Entflammen. Wir versuchen, bei der Beschreibung der einzelnen Experimente auf solche Gefahren hinzuweisen. Trotzdem: **Jede Nachahmung geschieht auf eigene Gefahr!**

Neben vielen einfach durchführbaren Experimenten haben wir auch Versuche aufgeführt, bei denen eine *Infrarotkamera* die Temperaturunterschiede sichtbar macht.

Um die Vorgänge im Innern einer Mikrowelle bei Betrieb beobachten und Leckagen durch die Tür genauer untersuchen zu können, haben wir eine kommerzielle Mikrowelle umgebaut: Dazu haben wir in der Tür einen Teil des Drahtgitters durch ein Infrarot transparentes NaCl-Fenster ersetzt. Die so präparierte Mikrowelle emittiert natürlich erheblich höhere Strahlungsleistungen, weshalb während des Betriebs alle Menschen einen entsprechenden Sicherheitsabstand einhalten müssen. Von der Nachahmung dieser speziellen Experimente raten wir ausdrücklich ab.

Die hier aufgeführten Experimente sind eine Ergänzung zu unserem Artikel „Eier im Wellensalat“. Sie ist ebenfalls wieder nur eine kleine Auswahl von vielen weiteren möglichen Versuchen. Einige dieser Versuche sind auch im Internet und in den Literaturangaben unseres Artikels genauer beschrieben.

Weihnachtsmann

Nach der Legende soll der Erfinder der Mikrowelle, Percy Spencer, durch Schmelzen eines Schokoriegels auf die erwärmende Wirkung der Mikrowellenstrahlung aufmerksam geworden sein. Den Wahrheitsgehalt der Legende kann man einfach prüfen, indem man beispielsweise einen Weihnachtsmann oder Osterhasen in eine Mikrowelle stellt und im Betrieb bei voller Leistung beobachtet. Dabei empfiehlt es sich zunächst, die Aluminiumfolie um die Figur zu entfernen. Sobald die Folie nämlich dicker ist als die typische Eindringtiefe der Wellen in Aluminium von etwa $1\ \mu\text{m}$, schirmt sie die Strahlung ab. Die Wartezeit, bis das Schmelzen einsetzt hängt übrigens vom Wassergehalt der Schokolade ab – was einfach zu verstehen ist (vergleiche „Kochen mit Zentimeterwellen“ in **Physik in unserer Zeit** 2004, 35(1), 38). Man könnte also auf diese Weise die Qualität verschiedener Schokoladen vergleichen. Ungeduldige Experimentatoren können auch „operativ“ Wasser in den hohlen Bauch der Figur injizieren.

Wir haben dieses Experiment zur besseren Beobachtung vor unserer präparierten Mikrowelle durchgeführt, es funktioniert genauso gut im Inneren eines normalen Geräts.



Abb. 1 Weihnachtsmann
a) mit Folie, b) ohne Folie
und c) nach Betrieb der
Mikrowelle.

Abbildung 1 zeigt den Weihnachtsmann noch in Folie (a), nach Entfernen der Folie (b) sowie nach dem Betrieb von etwa einer Minute (c). Die Schokolade wird beim Erwärmen weich, weshalb der Schokonikolaus in die Knie geht. Man kann für Percy Spencer nur hoffen, dass der Schokoriegel in seiner Tasche noch in Papier eingewickelt war.

Siedeverzug

Achtung: spritzendes heißes Wasser!

Mikrowellen erwärmen eine Flüssigkeit direkt, das heißt ohne Wärmekontakt mit dem Gefäß. Insofern ist es möglich, Wasser in sehr sauberen Gefäßen ohne Siedekeime auch über die Siedetemperatur hinaus zu erhitzen. Holt man derart überhitztes Wasser aus der Mikrowelle und wirft etwa einen Teebeutel, Zucker oder Instantkaffee hinein, werden sofort viele Siedekeime angeboten: Das Wasser kann nahezu explosionsartig sieden (Achtung!). Gegebenenfalls bleibt nur eine kleine Menge Wasser übrig – und eine große Sauerei.

Tipp: Wie entfernt man am besten Siedekeime? In einem normalen Glas siedet Wasser in der Mikrowelle bei der normalen, zu erwartenden Temperatur. Kleine Bläschen am Boden und der Wand des Glases machen die Siedekeime sichtbar. Durch vorsichtiges Klopfen können diese Bläschen sich von der Wand lösen. Erneutes Erhitzen desselben Wassers in der Mikrowelle führt schon zu erheblich größeren Blasen. Nach zweimaliger Wiederholung sind meist nur noch wenige Siedekeime vorhanden. Nun kann das eigentliche Experiment starten. Wir empfehlen das Gefäß mit dem überhitztem Wasser nur mit Schutzhandschuhen anzufassen, um sich bei einem plötzlichen Siedeverzug nicht zu verbrühen.

Im zugehörigen **Video** sieht man ein gerade der Mikrowelle entnommenes Becherglas mit Wasser. Der Nachweis der Erhitzung über die Siedetemperatur erfolgt durch Eintauchen eines dünnen Drahts. Sobald er ins Wasser eintaucht, siedet das Wasser.

Ein zweites **Video** zeigt ein ähnlich präpariertes Becherglas, in das ein wenig Salz geschüttet wird. Erfreulicherweise – für die Benutzer von Mikrowellen – passiert doch recht selten ein Siedeverzug außerhalb des Geräts. Dafür muss man den „richtigen“ Moment abpassen: Wartet man zu lange, siedet das Wasser bereits in der Mikrowelle. Das einzige Mal, als das Wasser nahezu vollständig aus unserem Glas heraus kochte, haben wir leider nicht gefilmt.

Wie dicht ist eine Mikrowelle?

Mikrowellengeräte haben in der Tür ein Metallgitter. Das lässt zwar sichtbares Licht hindurch, Mikrowellen sind mit einer Wellenlänge von $\lambda \approx 12$ cm jedoch groß gegen die Maschenbreite von etwa 1 mm und werden deshalb stark unterdrückt. Ein solches Gitter verhält sich übrigens wie zwei zueinander senkrechte Polarisationsfilter. Das Restgehäuse der Mikrowelle aus Metall wirkt als Faradayscher Käfig und lässt die Zentimeterwellen nicht durch. Wegen dieser Konstruktion emittiert eine eingeschaltete Mikrowelle kaum Strahlung.

Mit einem kommerziellen Mikrowellenempfänger (Gunn-Diode), lässt sich die – entsprechend der Modenverteilung und Qualität des Gitters – an verschiedenen Stellen aus der Tür austretende Strahlung detektieren. Man kann zeigen, dass die austretende Strahlung mit $1/\text{Abstand}^2$ abfällt und unter den vorgegebenen Emissions-Grenzwerten liegt (**Physik in unserer Zeit** 2004, 35(1), 38). Mit dieser Methode kann man auch eine eventuell vorhandene Restpolarisation der austretenden Strahlung einfach nachweisen. Auch ohne Gunn-Diode kann man die Störstrahlung einer Mikrowelle nachweisen: Dazu stellt man einen Computermonitor direkt neben sie, beim Betrieb der Mikrowelle treten dann leichte Bildstörungen auf.

Es gibt auch eine einfache Möglichkeit, um die – wenn auch geringe – Leckage von Mikrowellen qualitativ zu demonstrieren. Denn wenn durch das Gehäuse noch etwas Strahlung nach außen dringt, sollte es auch möglich sein, dass Mikrowellen von außen nach innen eindringen. Man benötigt dazu einen sehr empfindlichen Mikrowellendetektor, den jeder hat: ein Handy. Handys haben typische Betriebsfrequenzen im Bereich von 900 MHz (D-Band) oder 1,8 GHz (E-Band), das heißt, $\lambda_D \approx 33$ cm oder $\lambda_E = 16,7$ cm. Sie liegen somit recht nahe an der Betriebsfrequenz von 2,45 GHz ($\lambda = 12,2$ cm) der Mikrowelle. Man legt ein eingeschaltetes Handy in die Mikrowelle (Abbildung 2a) und schließt die Tür. Wichtig: Die Mikrowelle bleibt bei dem Versuch ausgeschaltet! Nun ruft man das Handy an. Falls der Empfang nicht bereits im Gebäude stark eingeschränkt war, etwa durch viel Metall im Mauerwerk, wird das Handy klingeln.

Man kann mit einem Handy auch halbquantitativ die Absorption der entsprechenden Mikrowellen in Wasser nachweisen. Dazu legt man das Handy in einen guten Faradayschen Käfig und stellt auf diesen ein großes Aquarium (Abbildung 2b). Füllt man Wasser ein, so wird ab einer bestimmten Füllhöhe (je nach Senderstärke im Raum zum Beispiel 10–20 cm) das Handy nicht mehr empfangen können.



Abb. 2 Handy a) in der Mikrowelle und b) in einem Faradayschen Käfig mit Aquarium als Abdeckung.

Toastbrot und Knäckebrot

Lebensmittel erhitzen sich in einer Mikrowelle entsprechend ihrem Wassergehalt. Knäckebrot zum Beispiel fühlt sich sehr trocken an, während Toastbrot viel feuchter zu sein scheint. Tatsächlich belegt dies ein Experiment sehr eindrucksvoll. Dazu stellt man je eine Scheibe (nebeneinander gegen Bechergläser gelehnt) in die Mikrowelle und misst nach einer gewissen Zeitspanne die Temperaturerhöhung. Nun könnten die Temperaturunterschiede natürlich dadurch verursacht sein, dass die Brotscheiben nicht am exakt gleichen Ort stehen, denn die Schwingungsmoden sind ja im Garraum räumlich sehr heterogen verteilt. Um das auszuschließen, kann man den Versuch auch hintereinander in der gleichen Anordnung durchführen – oder mit Drehteller, wobei man dann mindestens eine komplette Umdrehung warten muss. Ist nachgewiesen, dass die Position der Brote das Ergebnis nicht wesentlich beeinflusst, kann man auch direkt im Betrieb – also *in situ* – das unterschiedliche Aufheizen beobachten. Dazu braucht man allerdings die spezielle, mit einem NaCl-Fenster präparierte Mikrowelle. Abbildung 3 zeigt ein IR-Bild nach etwa 10 s Heizen bei voller Leistung.

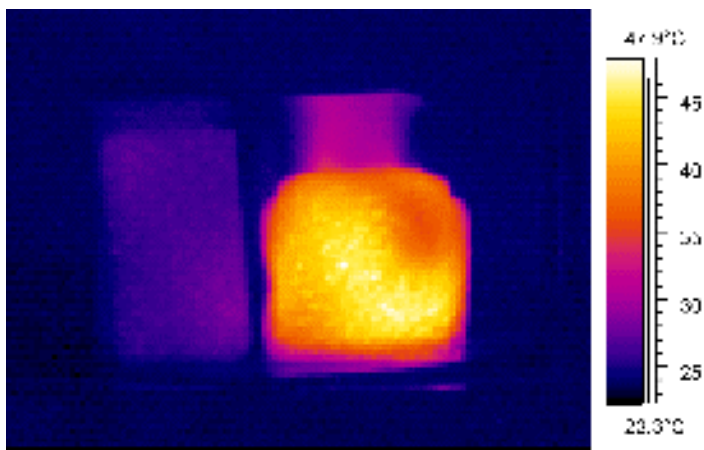


Abb. 3 Knäckebrot (links) und Toast: Dieser hat sich deutlich stärker erwärmt.

Wirkungsgrade von Wasserkocher und Mikrowelle im Vergleich

Die Wirkungsgrade von Mikrowellengeräten liegen in Bezug auf Erwärmen von Wasser deutlich unter denen eines Wasserkochers, der letztlich in etwa einem Tauchsieder entspricht. Solche Versuche sind einfach durchführbar. Dazu misst man die elektrische Leistung und die Zeit die das Erhitzen von Wasser, zum Beispiel in einem Becherglas – um eine definierte Temperaturdifferenz ($T_{\text{Ende}} - T_{\text{anfang}}$) braucht. Diesen Versuch führt man in der Mikrowelle und parallel mit derselben Wassermenge in einem Wasserkocher durch.

Typische Messdaten sind zum Beispiel: 500 ml Wasser ($m = 500\text{g}$) erwärmen sich in $t = 100\text{ s}$ in der Mikrowelle um $\Delta T = 25\text{ °C}$, im Wasserkocher dagegen um $\Delta T = 75\text{ °C}$. Um den Wirkungsgrad zu bestimmen, benötigt man noch die von den Geräten aufgenommene elektrische Leistung. Entweder man nutzt Herstellerangaben oder misst je nach zur Verfügung stehenden Messgeräten den fließenden Strom oder direkt die aufgenommene elektrische Leistung.

In unserem Fall betrug $P_{\text{el}}(\text{Kocher}) \approx 1850\text{ W}$ und $P_{\text{el}}(\text{Mikrowelle}) \approx 1260\text{ W}$ bei Herstellerangaben von 2000 W beziehungsweise 1200 W . Häufig ist bei Mikrowellengeräten nicht die elektrische Leistung sondern die maximale Mikrowellenleistung angegeben. In unserem Fall betrug sie laut Herstellerangabe 800 W , folglich geht schon ein Drittel der elektrischen Energie bei der Umwandlung in Mikrowellen verloren!

Der Wirkungsgrad η berechnet sich dann gemäß

$$\eta \cdot P_{\text{el}} \cdot t = c \cdot m \cdot \Delta T,$$

wobei die spezifische Wärmekapazität von Wasser $c = 4,182\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ist. In unserem Beispiel fanden wir $\eta = 41,5\%$ für die Mikrowelle (bezogen auf die elektrische Leistung) und für den Kocher $\eta = 84,8\%$. Die Absolutwerte schwanken zwar, im Allgemeinen liegt der Kocher aber immer etwa einen Faktor 2 über der Mikrowelle. Selbst wenn man nur die reine Mikrowellenleistung von 800 W angesetzt hätte, wäre der Wirkungsgrad nur auf etwa 65% gestiegen. Das bedeutet, dass elektrische Kocher Wasser deutlich effizienter erhitzen als Mikrowellen.

Lampen und Glas in der Mikrowelle

Achtung: Lampen platzen oder sind danach meist defekt

Wie in „Eier im Wellensalat“ erläutert, leuchten Glühlampen vor dem Platzen hell auf (**Video**), wobei man bei klaren Birnen auch Gasentladungen beobachten kann. Die Erwärmung der Birne bis zum Platzen kann mit Hilfe der Infrarotkamera auch direkt während des Heizens beobachtet werden (**Video**).

Glühlampen eignen sich auch dazu, den Auftaumodus zu visualisieren. Im Auftaumodus arbeitet das Gerät bei niedriger Leistung. Diese reicht zum Leuchten des Filaments, ist aber im Allgemeinen niedrig genug, um ein Durchbrennen zu verhindern. Insofern leuchtet die Glühbirne im Takt des Ein- und Ausschaltens der Mikrowellenleistung.

Durch die starken elektrischen Felder in einer Mikrowelle werden auch Entladungslampen zum Leuchten angeregt (Abbildung 4). Solche Lampen bieten sich auch für Demonstrationen der Absorption der Mikrowellen durch Wasser an (vergleiche Versuch mit Handy). Hierzu haben wir eine Entladungslampe in einem Becherglas vor die Öffnung der präparierten Mi-

krowelle gestellt. Bei Betrieb leuchtet die Lampe hell auf. Bringt man jedoch ein Wasser gefülltes „Aquarium“, das etwa 10 cm dick ist, zwischen die Öffnung und die Lampe, erlischt diese (**Video**). Die starke Dämpfung durch Absorption zeigt sich auch im Bild der Videokamera: Die austretenden Mikrowellen stören es – aber nur so lange, bis das Wasser die Öffnung abschirmt. Je nach gewählter Entfernung der Lampe vor der Öffnung reicht bereits eine Wasserschicht von 1 cm für eine ausreichende Abschwächung der Mikrowellen (**Video**).



Abb. 4 Leuchtende Entladungslampe in einer laufenden Mikrowelle, rechts vor einem präparierten Gerät.

Solche Experimente lassen sich auch direkt im Innern eines Geräts zeigen. Dazu füllt man beispielsweise einfach Wasser in das Becherglas mit der Entladungslampe. Alternativ kann man das kleine Becherglas mit der Lampe auch in ein größeres Glas mit Wasser stellen. Um zu gewährleisten, dass die Lampe überall von Wasser umgeben ist, kann man noch ein flaches Gefäß darüber legen (Abbildung 5).



Abb. 5 Aufbauten zur Demonstration der Absorption von Wasser mit einer Entladungslampe:
a) einfach in Wasser getaucht;
b) trocken in zweitem, inneren Becherglas.

Letztlich kann man mit Entladungslampen auch die Teilpolarisation der aus der präparierten Mikrowelle austretenden Strahlung nachweisen. Dazu führt man zwischen die Lampe und die Öffnung ein Gitter, welches als Mikrowellenpolarisator wirkt. Bei Drehen des Gitters erlischt die Lampe (**Video**).

Achtung: Energiesparlampen haben Elektronik im Sockel, die durch Mikrowellen stark beschädigt werden kann!

Stan Micklavzina (University of Eugene, Oregon) hat mehrere Versuche recherchiert, bei denen Gläser in der Mikrowelle hell leuchten: Wie beim konventionellen Experiment zur Demonstration der elektrischen Leitfähigkeit wird Glas, etwa ein Glasstab, mit einem Brenner erhitzt, bis es elektrisch leitet. Im konventionellen Experiment führt dann eine äußere Spannung zu einem Stromfluss durch das Glas, wobei dieses aufleuchtet. Ähnlich kann man den Glasstab (oder eine Flasche) direkt nach dem Erhitzen ohne Anlegen einer Spannung in die Mikrowelle legen und diese schnell einschalten. Auch hierbei wird der Glasstab hell aufleuchten, da nun das Mikrowellenfeld frei bewegliche Ladungsträger im Glas findet, die die Strahlung absorbieren. Übrigens können auch vulkanische Gläser bis in den zähflüssigen Zustand erhitzt werden, man kann so Mini-Lavaströme in der Mikrowelle beobachten.

Achtung: Der Glasstab kann beim Abkühlen in viele Scherben zerspringen – deshalb einige Minuten warten, bis man die Tür öffnet. Sicherheitshalber Schutzbrille tragen.

Wunderkerzen, dünne Metallschichten und Zigaretten

Dünne Metalle können sich durch Absorption von Mikrowellen sehr schnell aufheizen. Dabei können schnell Temperaturen von mehreren hundert Grad erreicht werden. So lassen sich Wunderkerzen problemlos entzünden (**Video**). Ähnlich rasch erwärmen sich auch dünne Metallschichten, beispielsweise Goldränder auf Tellern, Schichten auf CDs oder Christbaumkugeln. Je nach lokaler Verteilung des Felds brennen sich unter Leuchterscheinungen Muster auf der Oberfläche der Schichten ein (Abbildung 6). Dabei verdampft ein Großteil des Metalls und schlägt sich in der Mikrowelle nieder. Übrigens kann man nach dem Platzen von Glühbirnen ebenfalls sehen, dass die dünnen Drähte in einer Glühlampe fast vollständig verdampft sind.



Abb. 6 Eine CD nach dem Erhitzen in der Mikrowelle.

Wird eine Mikrowelle leer betrieben, sind natürlich keine spektakulären Erscheinungen zu beobachten. Verursacht man jedoch eine Vorionisation, zum Beispiel durch die heiße Glut einer Zigarette, so können Entladungen im Gerät auftreten (**Video**).

Luftballon mit Wasser

Es gibt eine Vielzahl von physikalischen Möglichkeiten, Luftballons aufzublasen. Auch mit der Mikrowelle ist dies möglich. Dazu füllt man zum Beispiel 10 ml Wasser in einen leeren Ballon und knotet diesen zu. Wird er in eine Mikrowelle gelegt, erwärmt sich das Wasser, bis es verdampft. Dabei bläst sich der Ballon auf einige Liter Volumen auf.

Achtung: Man sollte den Luftballon und die Wassermenge so wählen, dass der Luftballon nicht platzt (typisch ist ein Faktor 1000 zwischen Flüssigkeit- und Gasvolumen).

Seife in der Mikrowelle: Die Duftmaschine



Abb. 7 Eine Seife vor und nach der Erwärmung in der Mikrowelle. Unten links: Ein besonders bizarr geformtes Versuchsergebnis.

Wird Seife in der Mikrowelle erhitzt, verdampft das enthaltene Restwasser. Da das Wasser recht gleichmäßig verteilt ist, bilden sich viele kleine Poren mit Gasblasen, sodass sich die Seife langsam und kontinuierlich ausdehnt. Dabei platzt die Seife auf und kann ihr ursprüngliches Volumen um ein Vielfaches vergrößern (Abbildung 7).

Achtung: Der intensive Seifengeruch bleibt noch eine Weile im Garraum hängen!

Nicht nur in der Küche

Es gibt auch viele Einsatzmöglichkeiten für Mikrowellengeräte außerhalb der Küche, wie zum Beispiel die Verschweissung von Polymeren, Anregung von Plasmen, Glaserwärmung über 450 °C, Kunststoffblasverfahren, Aushärteverfahren, Datenträgervernichtung, Sputeranlagen zur Scheinwerfer-Verspiegelung und vieles mehr. Einige Informationen hierzu findet man beispielsweise unter www.ict.fhg.de/deutsch/scope/pt/pt-mikro.html.