

Wie funktioniert die Mikrowelle?

Untersuchungen am Mikrowellenofen im Physikunterricht der Sekundarstufe I

Von Roland Berger

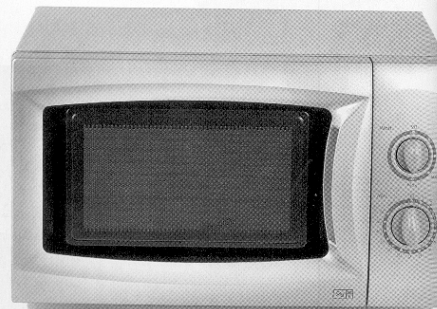


Foto: rgbdigital.co.uk – Fotolia.com

KLASSENSTUFE:	10
SCHULFORM:	Realschule
ZEITUMFANG:	3–4 Stunden (inkl. Doppelstunde)
THEMEN:	Elektrizitätslehre: elektr. Leitung, Energieumwandlungen; Wärmelehre: Innere Energie, Energieumwandlungen, spez. Wärmekapazität, Wirkungsgrad; evtl. Teilchenmodell
METHODEN:	Frontalunterricht mit Demonstrationsversuchen; Lernen an Stationen mit Schülerversuchen
WEITERES MATERIAL:	Materialien für die 12. Klasse: http://www.physikdidaktik.uni-osnabrueck.de/mikrowelle.htm ; Applets zu elektromagnetischen Wellen: http://www.walter-fendt.de/ph11d/emwelle.htm und http://www.walter-fendt.de/ph14d/stwellerefl.htm (stehende Welle); Animation zur Rotationsanregung: http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/microwaves/water_rotates3.html Farbbild des Teststäbchens (Arbeitsblatt 4 und Wissenstest unter http://www.unterricht-physik.de

Mikrowellengeräte sind heute aus vielen Haushalten nicht wegzudenken. Für die meisten Schülerinnen und Schüler ist ihre Nutzung eine Selbstverständlichkeit, nicht wenige verwenden die Mikrowelle sogar jeden Tag. Damit eröffnet sich dem Physikunterricht die günstige Gelegenheit, wichtige physikalische Inhalte in einem motivierenden Alltagskontext zu behandeln. Der Mikrowellenofen als Lerngegenstand bietet außerdem die Gelegenheit, Aspekte aus der Elektrizitätslehre mit Inhalten der Wärmelehre zu verbinden.

Ein Unterrichtsvorschlag für die Sekundarstufe II wurde bereits vielfach erfolgreich umgesetzt [1]. Doch auch in der Sekundarstufe I lassen sich die dem Mikrowellenofen zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien vermitteln, indem man sich im Wesentlichen auf die

Phänomene beschränkt, die beim Betrieb des Mikrowellenofens zu beobachten sind. Eine eingehende Interpretation dieser Phänomene z. B. auf der Ebene des Teilchenmodells kann unabhängig davon als Vertiefung hinzugenommen werden.

Um dieses Vorgehen zu illustrieren, wird in diesem Beitrag ein entsprechender Unterrichtsgang vorgestellt. Basis- und Hintergrundwissen zum Mikrowellengerät sind in den Kästen 3–4 zusammengestellt (weiterreichende Informationen finden sich in [2] und im Internet¹⁾; einen Überblick über die benötigten Experimentiermaterialien gibt **Kasten 1**. Wir schlagen vor, die Grundlagen des Mikrowellenofens in frontaler Form zu unterrichten und weiterführende Aspekte im Rahmen eines Lernzirkels oder ähnlicher Gruppenarbeitsformen zu vermitteln. Die Erarbeitung des Themas erfolgt anhand verschiedener Leitfragen, die sich unmittelbar aus dem Betrieb des Mikrowellenofens ergeben und die von vielen Schülerinnen und Schülern als für sie interessant beurteilt werden.

Inhalte des einführenden Frontalunterrichts

Leitfrage 1 (phänomenologische Ebene): Was sind „mikrowellentaugliche“ Behälter?

Im Rahmen dieser Leitfrage wird das Verhalten unterschiedlicher Substanzen (Wasser, Aluminium und Kunststoff) bei Bestrahlung mit Mikrowellen geklärt. Unterrichtsmethodisch ist es sinnvoll, diese Frage in frontaler Form zu bearbeiten, da hier die grundlegenden Inhalte vermittelt werden, die für alle

MATERIAL 1

Überblick über die benötigten Versuchsmaterialien

- Mikrowellengeräte (3–4)
- 2 Tassen oder Becher mit Löffeln
- Alufolie
- „mikrowellentauglicher“ Kunststoffbehälter mit Deckel
- Mikrowellensender und -empfänger (ein solches Gerät gibt es bei den Lehmittelfirmen, z. B. das in **Abb. 3** dargestellte Gerät bei der Firma Elwe [Artikel-Nr. 8493400; online unter <http://www.elwe-didactic.de/>])
- verschiedene Materialien wie Plastik, Metallsieb, Holz
- Thermofax-Papier (Schreibwarenhandel)
- passendes Brett (Holz oder Styropor) als Unterlage für das Thermofax-Papier
- „Energimonitor“ (für ca. 20 Euro im Fachhandel erhältlich)
- Wasserkocher (gleiche Leistungsaufnahme wie Mikrowellenofen, ca. 1200 W)
- Vitamin-Teststäbchen (z. B. Ascorbinsäure-Test 1.10023.0001 der Firma Merck)
- Energiesparlampe
- CD (wird zerstört!)

nachfolgenden Leitfragen bereitstehen müssen.

Aus den Beobachtungen im zentralen Demonstrationsversuch (s. **Kasten 2**) werden die folgenden Schlüsse gezogen:

- Wasser absorbiert Mikrowellen.
- Metalle (exemplarisch gezeigt an der Aluminiumfolie) reflektieren Mikrowellen (bei Absorption hätte sich die Folie erwärmt).
- Mikrowellentaugliche Kunststoffe lassen die Mikrowellen passieren.

Wasser ist sogar die entscheidende Substanz bei der Erwärmung von Speisen. Enthalten Substanzen überhaupt kein Wasser, so bleiben sie in der Regel kalt.

Optional kann darüber hinaus gezeigt werden, dass dünne Metallschichten (z. B. Goldbeschichtungen auf Tellern) im Mikrowellenofen zerstört werden. Dies lässt sich im Versuch mit Hilfe einer CD demonstrieren, die eine etwa einen Mikrometer dünne Metallbeschichtung hat (s. **Kasten 4**: „Was geschieht mit Metallen?“).

Sicherheitshinweis

An dieser Stelle sollte nun zweckmäßigerweise ein Hinweis auf eine Sicherheitsmaßnahme erfolgen, die für die Durchführung von Versuchen mit dem Mikrowellenofen wichtig ist: Wird der Ofen im „Leerlauf“, also ohne ausreichend absorbierende Substanz betrieben, so werden die Mikrowellen aus dem Garraum zurückreflektiert zum sog. Magnetron (s. **Kasten 3**), in dem die Mikrowellen erzeugt werden. Dies kann das Gerät beschädigen.

Aus diesem Grund ist es geraten, beim o. g. Versuch mit der CD eine Tasse Wasser in den Garraum einzustellen. Außerdem sollte z. B. ein Teelöffel in die mit Wasser gefüllte Tasse gestellt werden. Denn in besonders ungünstigen Fällen wird das Wasser sonst auf über 100 °C erhitzt und verdampft dann beim Herausnehmen schlagartig. Dies hat vereinzelt zu schweren Verletzungen geführt. Ein Löffel (oder Ähnliches) verhindert einen solchen „Siedeverzug“, denn er stellt in aller Regel genügend mikroskopisch kleine Lufteinschlüsse als Siedekeime zur Verfügung. Dies sollten die Schülerinnen und Schüler auch zu Hause beachten, z. B. wenn sie sich ein Getränk erhitzen. Nebenbei erkennt man

Mikrowellentaugliche Behälter

▼ MATERIAL

- zwei kleine, identische Becher (oder Tassen)
- Aluminiumfolie
- „mikrowellentauglicher“ Kunststoffbehälter mit Deckel
- Wasser
- Mikrowelle

▼ DURCHFÜHRUNG

Die beiden Becher werden mit Wasser gefüllt und einer zusätzlich in Aluminiumfolie eingepackt. Die Becher werden anschließend in einen „mikrowellentauglichen“ Kunststoffbehälter gestellt, der mit seinem Deckel verschlossen wird. Nun stellt man den Behälter in den Mikrowellenofen und führt (für ca. 20 Sekunden) Energie zu.

▼ BEOBACHTUNGEN

- Das Wasser im Becher ohne Aluminiumfolie hat sich deutlich erwärmt.
- Das Wasser im Becher mit Aluminiumfolie ist praktisch nicht wärmer geworden.
- Die Aluminiumfolie bleibt kalt.
- Der „mikrowellentaugliche“ Behälter hat sich praktisch nicht erwärmt.

▼ HINWEIS

Zusätzlich kann auch experimentell gezeigt werden, dass sich die Temperatur einer bestimmten Menge Wasser in einer Tasse um einen Betrag erhöht, der praktisch unabhängig davon ist, ob die Tasse allein oder im mikrowellentauglichen Behälter eingeschlossen in den Mikrowellenofen gestellt wird. Dabei ist neben der gleichen Zeit für die Energiezufuhr darauf zu achten, dass die Tasse in beiden Fällen an derselben Stelle des Garraums steht (z. B. in der Mitte des Drehtellers), um unterschiedliche Erwärmungen in der stehenden elektromagnetischen Welle zu verhindern (s. a. **Leitfrage 3**).

daran auch, dass ein pauschales Verbot von Metallen im Mikrowellenofen wenig sinnvoll ist.

Leitfrage 1 (interpretative Ebene): Warum wird Wasser im Mikrowellenofen heiß?

Der bisher vorgestellte Unterricht beschränkt sich auf eine phänomenologische Darstellung. Möchte man einen Schritt weitergehen, so lassen sich die Befunde des Demonstrationsversuchs in **Kasten 2** durch physikalische Interpretationen vertiefen. Ob dies gemacht werden sollte, hängt von den Vorgaben der Kerncurricula sowie den Interessen und Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler ab.

Um die Frage nach der Ursache der besonderen Rolle des Wassers zu klären, ist es sinnvoll, das Teilchenmodell heranzuziehen. Die Erwärmung von Sub-

stanzen ist auf atomarer bzw. molekularer Ebene immer mit einer schnelleren Teilchenbewegung verbunden.²⁾ Im Falle des Wassers werden die Wassermoleküle (elektrische Dipole) durch die Mikrowellen (elektromagnetische Wellen) in Rotation versetzt (Details s. **Kasten 3**).³⁾ Die Rotationsenergie wird durch Stöße an die umgebenden Moleküle zum Beispiel des Fleisches weitergegeben, die sich dadurch auch schneller bewegen. Dies äußert sich als Temperaturerhöhung der Speise. In diesem Zusammenhang kann auch die Frage diskutiert werden, warum sich ein Mikrowellenofen zum Auftauen von Speisen im Grunde nicht eignet (vgl. **Kasten 4**).

Die Existenz des elektrischen Feldes der Mikrowellen (s. **Kasten 3**) lässt sich eindrucksvoll demonstrieren:

- Legt man eine Energiesparlampe in den Mikrowellenofen und schaltet

Funktionsprinzip der Mikrowelle

Wie können Mikrowellen Wassermoleküle in Rotation versetzen?

Ein Wassermolekül besteht aus zwei Wasserstoff- und einem Sauerstoffatom (H_2O -Molekül). Die Elektronen der Wasserstoffatome werden etwas vom Sauerstoffatom angezogen, sodass sich dort ein kleiner Ladungsüberschuss, bei den Wasserstoffatomen hingegen ein entsprechend kleiner Mangel an negativer Ladung ergibt, obwohl das Wassermolekül als Ganzes elektrisch neutral ist (vgl. auch z. B. [3]).

In einem äußeren elektrischen Feld z. B. eines Kondensators wird der Dipol ausgerichtet: Die negative Seite des Wassermoleküls wird von der positiven Platte angezogen und die positive Seite von der negativ geladenen Kondensatorplatte. Schließt man an den Kondensator eine Wechselspannung geeigneter Frequenz an, so kann man Wassermoleküle in Rotation versetzen (s. **Abb. 1**). Da Mikrowellen (wie Licht) elektromagnetische Wellen sind, verfügen sie über ein elektrisches Feld⁴⁾ sehr hoher Frequenz.⁵⁾ Im Mikrowellenofen regt das elektrische Feld die Wassermoleküle zu 2,45 Milliarden Rotationen pro Sekunde an.

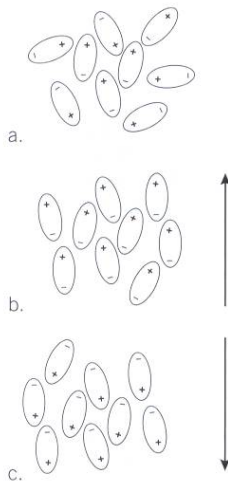


Abb. 1: Ohne äußeres elektrisches Feld sind die Wassermoleküle ungeordnet (a): Die positiven bzw. negativen Enden zeigen in alle möglichen Richtungen. Bringt man die Dipole in das elektrische Feld eines Plattenkondensators, so werden die positiven Enden von der negativen Platte angezogen und die negativen Enden von der positiven Platte. Es kommt zu einer Ausrichtung der Dipole, die nur durch die Wärmebewegung der Dipole gestört wird, s. (b) und (c.); die Pfeile geben die Richtung des elektrischen Feldes an

Wie werden Mikrowellen erzeugt?

In den herkömmlichen Schulgeräten für die Mikrowellenversuche werden die Mikrowellen in einem Klystron erzeugt. Dessen Leistung reicht für den Mikrowellenofen aber nicht aus. Daher wird ein sog. Magnetron eingesetzt. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Schwingkreise (s. **Abb. 2**).

Aus der Glühkathode K werden durch Glühemission Elektronen freigesetzt, die durch eine konstante Hochspannung von einigen Tausend Volt zum metallischen Anodenring A beschleunigt werden. In diesen Ring sind acht Schwingkreise eingelassen. Um Frequenzen im GHz-Bereich zu erhalten, müssen die Werte der Kapazität und Induktivität entsprechend klein sein. Jede „Spule“ besteht daher nur noch aus einer Windung, ihre offenen Enden

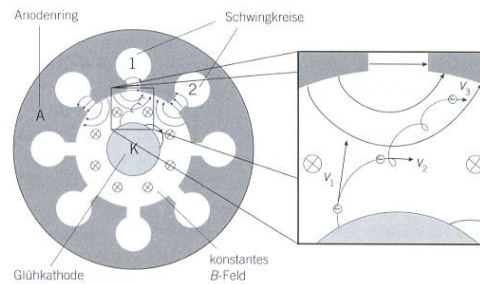


Abb. 2: Technischer Aufbau eines Magnetrons zur Erzeugung von Mikrowellen (nach [4], S. 169)

bilden den Kondensator. Senkrecht zum elektrischen Gleichfeld zwischen Kathode und Anode wird mit einem Dauermagneten ein konstantes Magnetfeld erzeugt. Dadurch werden die Elektronen auf ihrem Weg zu den Schwingkreisen im Uhrzeigersinn abgelenkt. Elektronen, die im elektrischen Wechselfeld eines Schwingkreiskondensators beschleunigt werden, werden aufgrund der dadurch vergrößerten Lorentzkraft zur Glühkathode zurückgeführt. Dies ist in **Abbildung 2** für ein Elektron in der Nähe des Schwingkreises 2 dargestellt. Elektronen, die im elektrischen Feld abgebremst werden und dadurch Energie verlieren, gelangen auf spiralförmigen Bahnen zur Anode (vergrößerter Ausschnitt in **Abb. 2**), da die Lorentzkraft im Mittel entsprechend kleiner ist. Insgesamt wird dadurch erreicht, dass die von einer Glühkathode emittierten Elektronen bevorzugt dann in das elektrische Feld der Schwingkreiskondensatoren gelangen, wenn sie Energie an den Schwingkreis abgeben. Die Verstärkung des elektrischen Wechselfeldes der Schwingkreiskondensatoren geschieht durch Influenz (s. **Abb. 3**).

Die so erregte ungedämpfte elektromagnetische Schwingung induziert in einer in den Schwingkreis eingebrachten Auskoppelspule eine Induktionsspannung im GHz-Bereich. Über einen Wellenleiter gelangen die Mikrowellen in den Garraum.

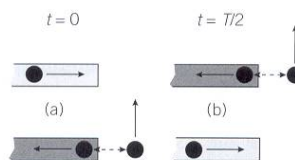


Abb. 3: Erzeugung einer ungedämpften Schwingung (schematisch). Bewegt sich ein aus der Glühkathode freigesetztes Elektron an der unteren Kondensatorplatte des Schwingkreises („Spulen“windung nicht eingezeichnet) vorbei, so influenziert es dort durch die Abstoßung von Plattenelektronen eine positive Aufladung (a). Durch diese Ladungsverschiebung wird die obere Platte negativ aufgeladen. Der Vorgang wiederholt sich an der oberen Kondensatorplatte (b). Die Geschwindigkeit des Elektrons wird durch geeignete Wahl des elektrischen Feldes zwischen Glühkathode und Kondensator und dem dazu senkrechten statischen Magnetfeld so eingestellt, dass es nach einer halben Schwingungsperiode die obere Platte erreicht und so die Schwingung anfacht

kurz ein, so leuchtet die Lampe hell auf (Abb. 4).⁶⁾ Dies liegt daran, dass das elektrische Feld der Mikrowelle freie Elektronen beschleunigt. Sie stoßen gegen die Quecksilberatome und regen diese zur Emission von UV-Strahlung an. In der weißen Beschichtung der Energiesparlampe wird das ultraviolette Licht in sichtbares Licht umgewandelt.

Wird die vorgeschlagene Vertiefung durch Betrachtung der mikroskopischen Verhältnisse zusätzlich im Unterricht behandelt, so werden insgesamt etwa ein bis zwei Schulstunden in Anspruch genommen.

Vertiefung im Rahmen von Gruppenarbeit

Der im Folgenden vorgestellte Lernzirkel benötigt etwa eine weitere Doppelstunde an Zeit. Dabei werden vier Teilthemen behandelt, deren Inhalt aus den Arbeitsblättern 1–4 hervorgeht. Die Materialien lassen sich auch leicht an andere Gruppenarbeitsformen anpassen wie z. B. das Gruppenpuzzle (vgl. [1] für die Sekundarstufe II). Im Folgenden werden die Leitfragen kurz beschrieben, die im Rahmen der Gruppenarbeitsphase behandelt werden.

Leitfrage 2: Wozu dient das Metallgitter an der Tür des Mikrowellenofens?

Für diesen Versuch ist ein Mikrowellensender und -empfänger notwendig, bei dem die Mikrowellen mit einer hörbaren Frequenz moduliert sind. Mithilfe dieses Geräts lassen sich die Tür eines Mikrowellenofens sowie weitere Materialien daraufhin prüfen, ob sie für Mikrowellen durchlässig sind (s. Arbeitsblatt 1 und Abb. 5).

Im Versuch wird gezeigt, dass die abschirmende Wirkung der Ofentür auf das Metallgitter und nicht auf die Kunststoffscheibe zurückzuführen ist. Wasserhaltige Substanzen – wie zum Beispiel die Hand – sind ebenfalls undurchlässig, da sie absorbieren. Damit werden zentrale Befunde des einleitenden Demonstrationsversuchs wiederholt (s. Leitfrage 1 und Kasten 2). Zusätzliche Informationen finden sich in Kasten 4 („Bleiben die Mikrowellen im Gerät?“).

Leitfrage 3: Wozu dient der Drehteller im Mikrowellenofen?

Mithilfe von nassem Thermofaxpapier lässt sich zeigen, dass es Bereiche im Mikrowellenofen gibt, die heiß werden, und andere, die kühl bleiben (s. Arbeitsblatt 2 und Abb. 6). Aus diesem Grund sollte die Speise im Ofen gedreht werden, um eine möglichst gleichmäßige Erwärmung zu erreichen.

Hinter diesem Phänomen steckt physikalisch die Ausbildung einer stehenden elektromagnetischen Welle durch die Reflexion der Mikrowellen an den Metallwänden (Details s. Kasten 4: „Warum bilden sich stehende Wellen im Mikrowellenofen?“).⁷⁾ Dabei entstehen „Knoten“ und „Bäuche“, die entsprechend zu kalten und heißen Stellen auf der Speise führen.

Leitfrage 4: Ist der Mikrowellenofen energiesparend?

Zur Klärung dieser Frage ist ein sog. „Energimonitor“ notwendig. Damit lässt sich die elektrische Leistung von Haushaltsgeräten bestimmen. Um die Aufgabe für die Schülerinnen und Schüler einfach zu halten, wird in der Aufgabe der Mikrowellenofen mit einem Wasserkocher gleicher Leistungsaufnahme (ca. 1200 Watt) verglichen. Eine bestimmte Menge von Wasser wird im Mikrowellenofen bzw. im Wasserkocher in einer vorgegeben Zeitspanne erwärmt. Die Temperaturerhöhung kann als Maß für die jeweilige Effizienz interpretiert werden (s. Arbeitsblatt 3).

Eine Vertiefung der Aufgabe könnte darin bestehen, dass aus der Temperaturzunahme einer bestimmten Wassermenge mithilfe der Formel $\Delta U = c \cdot m \cdot \Delta \vartheta$ auf die zugeführte innere Energie des Wassers geschlossen wird. Der erhaltene Wert kann mit der vom Mikrowellengerät aufgenommenen elektrischen Energie (elektrische Leistung multipliziert mit der Dauer der Energiezufuhr) verglichen werden. Man erhält einen typischen Wirkungsgrad von etwa 50%. Wasserkocher sind dagegen viel effizienter. Bei dieser Vertiefung lassen sich wichtige Begriffe der Wärmelehre wie die innere Energie und die Wärmekapazität behandeln.

Üblicherweise werden im Mikrowellenofen Speisen erwärmt; der ermittelte

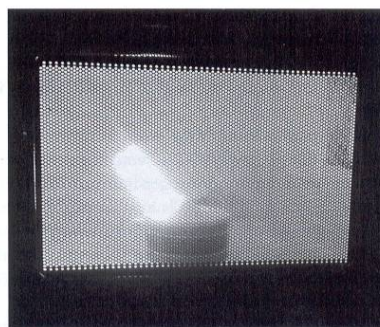


Abb. 4: Das elektrische Feld der elektromagnetischen Welle regt die Energiesparlampe im Mikrowellengerät zu starkem Leuchten an. Die Energiesparlampe befindet sich in einer als Halterung dienenden leeren Tasse. (Dahinter steht eine weitere, für alle Versuche obligatorische, wassergefüllte Tasse; s. Sicherheitshinweis auf S. 35)

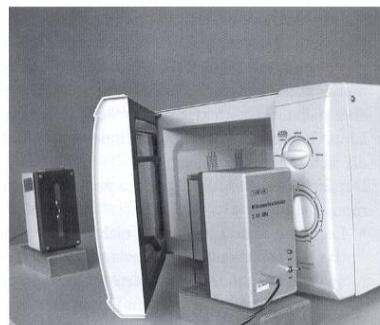


Abb. 5: Nachweis der abschirmenden Wirkung der Ofentür. Der Mikrowellenempfänger im Bild links empfängt vom Sender rechts keine Mikrowellen mehr, wenn sich die Tür zwischen beide Geräten befindet

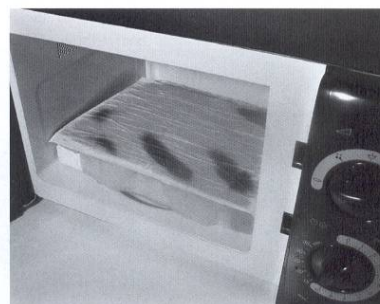


Abb. 6: Durch die Interferenz der zwischen den Wänden des Garraums reflektierten elektromagnetischen Wellen kommt es an einigen Stellen zu besonders starken Erwärmung des nassen Thermofaxpapiers. Diese Bereiche erkennt man an den dunklen Verfärbungen. Für den Versuch wurde der Drehteller entfernt. Die Unterlage (Styropor oder Holz) dient nur dazu, das Thermofaxpapier gut ausbreiten zu können

Fragen und Antworten zum Mikrowellenofen

Was geschieht mit Metallen?

Elektromagnetische Wellen werden an Metallen nie ganz vollständig reflektiert. Sie dringen immer in eine mehr oder weniger dünne Schicht des Metalls ein („Skintiefe“). Im sichtbaren Bereich beträgt die Skintiefe an Spiegeln nur wenige Atomlagen. Dort wird die Welle außerordentlich stark absorbiert. Da dieser Bereich aber so dünn ist, wird trotzdem der größte Teil reflektiert.

Innerhalb der Skintiefe beschleunigt das elektrische Feld der elektromagnetischen Welle die Metallelektronen, die diese Energie durch Stöße an das Metallgitter abgeben. Dies führt zu einer Erwärmung des Metalls. Ist das Metallvolumen groß, so verteilt sich die Wärmeenergie aufgrund der guten metallischen Wärmeleitfähigkeit rasch und die gesamte Temperaturerhöhung bleibt gering.

In dünnen Metallschichten kommt es aber zu erheblichen Temperaturerhöhungen. Daher sind z. B. Teller mit Goldrand nicht geeignet. Auch darf man die Temperatur der Speisen im Mikrowellengerät auf keinen Fall mithilfe eines Quecksilberthermometers messen. Manche Hersteller von Mikrowellenkochtöpfen nutzen aber auch diesen Effekt, damit ihr Lebensmittel gebräunt werden kann: Auf der Oberfläche sind dünne Metallstreifen aufgebracht, die sich stark erwärmen.

Der Effekt lässt sich sehr eindrucksvoll auch in der Schule demonstrieren:

- Legt man eine (anderweitig nicht mehr benötigte) CD in das Mikrowellengerät (Unterlage aus Plastik verwenden!), so wird nach dem Einschalten auf ihrer Oberfläche ein Muster eingebrannt, das den Einzugsgebieten von Flusssystemen ähnelt und als Lichtenberg'sche Figur bezeichnet wird ([6]; s. Abb. 7).

Ein Metalllöffel in einer wassergefüllten Tasse ist dagegen unkritisch, da er effektiv durch das Wasser gekühlt wird. Hier wird für Schülerinnen und Schüler deutlich, wie nützlich physikalische

Kenntnisse sind: Dass keine Metalle in das Mikrowellengerät eingebracht werden dürfen, ist in dieser pauschalen Form nicht sinnvoll.

Die elektrische Feldstärke in einem Mikrowellenofen ist mindestens um einen Faktor zehn kleiner als die Durchschlagsfeldstärke von 10^6 V/m für Luft. An metallischen Spitzen kann der Wert wie bei einem Blitzableiter natürlich wesentlich größer werden und die Durchschlagsfeldstärke überschreiten. Man kann dann Funkenüberschläge zum Beispiel an den Spitzen einer Gabel beobachten.

Warum taut Eis im Mikrowellenofen schlecht auf?

Die im Ofen erzeugten Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen einer Frequenz von 2,45 GHz; die Richtung des elektrischen Feldes der Mikrowellen ändert sich also 2,45 Milliarden Mal pro Sekunde. Dadurch werden die Wassermoleküle (elektrische Dipole) in Rotation versetzt (s. **Kasten 3**). Im Eis jedoch sind die meisten Wassermoleküle an ihre Positionen gebunden, können also nicht rotieren. Legt man eine gefrorene Pizza in das Mikrowellengerät, so wird sie an den Stellen sehr schnell heiß, an denen sich bereits etwas Wasser in flüssiger Form befindet. Die anderen Bereiche bleiben gefroren.

Um die damit verbundenen großen Temperaturunterschiede zu vermeiden, gibt es bei vielen Geräten eine Auftaueinstellung: Das Gerät schaltet sich periodisch für kurze Zeit bei maximaler Leistung ein und dann wieder aus. Bevor es sich wieder einschaltet, kühlen sich die heißen Stellen durch Wärmeleitung ab und schmelzen das umgebende Eis. Die Erwärmung ist dadurch homogener.

Die Leistung, die für die jeweilige Auftaustufe angegeben ist, bezieht sich übrigens auf den zeitlichen Mittelwert der zugeführten Leistung: Je länger die Periode der Abschaltung dauert, desto geringer ist der Wert. Der zeitliche Verlauf der Leistungszufuhr lässt sich sehr schön mit einem Energie-Monitor beobachten.

Wodurch wird die Frequenz der Mikrowellen bestimmt?

Die maximale Absorption von Wasser liegt nicht bei 2,45 GHz (s. o.), sondern bei 22 GHz. Verwendet man wesentlich höhere Frequenzen, so können die Wasserdipole der schnellen Änderung des elektrischen Feldes nicht mehr folgen und die Absorption der Mikrowellen durch das Wasser wird schwächer.

Warum verwendet man im Mikrowellenofen nicht diese höhere Frequenz von 22 GHz? Dann würde die Welle bereits in einer dünnen Oberflächenschicht der Speise absorbiert und könnte nicht bis ins Innere vordringen. Damit hätte man jedoch den Vorteil gegenüber anderen Verfahren wie z. B. dem Erwärmen in einem Kochtopf verschenkt. Denn auch dort muss sich die Energie durch Wärmeleitung von der Oberfläche ins Innere fortpflanzen. Dieser Prozess dauert vergleichsweise lang. Bei der in Mikrowellengeräten verwendeten Frequenz von 2,45 GHz

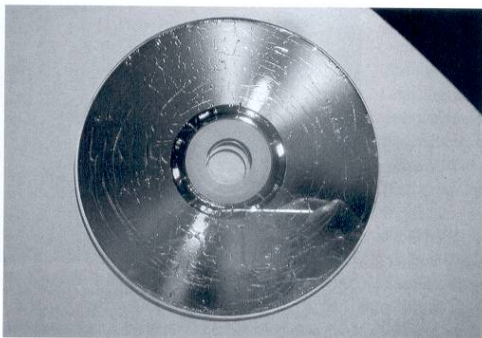


Abb. 7: Legt man eine CD in einen Mikrowellenofen und schaltet ihn für kurze Zeit ein, so wird die dünne Metallschicht zerstört

14 Wozu dient das Metallgitter an der Tür des Mikrowellenofens?

INFORMATIONEN 4

beträgt die Eindringtiefe jedoch einige Zentimeter, und die elektromagnetischen Wellen erhitzen das Wasser im ganzen Lebensmittel praktisch gleichzeitig (s. u.: „Wozu braucht man noch einen Grill?“).

Warum bilden sich stehende Wellen im Mikrowellenofen?

Die Mikrowellen, die auf einer Seite in den Garraum eindringen, werden an allen Seiten des Ofens reflektiert. Dies liegt daran, dass die Wände des Mikrowellenofens aus Metall sind und Mikrowellen (wie alle elektromagnetischen Wellen nicht zu hoher Frequenz) daher reflektiert werden. Durch die Überlagerung der einlaufenden und reflektierten Wellen bildet sich eine stehende Welle.

Bei Wellen, die nur auf einer Seite reflektiert werden (wie z. B. Wellen in einem an einem Ende befestigten Seil), ist der Abstand der Knoten gerade gleich der halben Wellenlänge der sich ausbreitenden Welle und die gesamte Ausdehnung des Resonanzsystems ist gleich einem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge. Misst man die Ausdehnung eines Mikrowellenofens ab, so stellt man fest, dass die Kantenlängen des Garraumes nicht Vielfache der halben Wellenlänge der Mikrowellen, also etwa 6 Zentimeter betragen. Im Unterschied zu der o. g. Seilwelle, die nur an einem Ende reflektiert wird, werden die Mikrowellen von allen Seiten des Mikrowellenofens zurückgeworfen. Es bildet sich daher eine dreidimensionale stehende Welle. Dort ist die Resonanzbedingung etwas weniger „streng“ als bei eindimensionalen stehenden Wellen (vgl. [2]).

BLEIBEN DIE MIKROWELLEN IM GERÄT?

Damit die Mikrowellen nicht aus dem Gerät austreten können, ist auch die Tür mit Metall versehen. Um die Speisen auch während des Garvorgangs beobachten zu können, wird in der Regel ein Metallgitter verwendet. Zunächst erscheint es überraschend, dass die Mikrowellen nicht durch dessen Löcher entweichen können. Mithilfe eines Mikrowellensenders und -empfängers lässt sich zeigen, dass das Metallgitter die Mikrowellen tatsächlich nicht passieren lässt (s. **Arbeitsblatt 1**). Allerdings darf die Maschenweite des Metallgitters nicht beliebig groß werden: Nur wenn die Wellenlänge groß ist gegen die Maschengröße des Gitters, werden die Wellen wie an einem Spiegel praktisch vollständig reflektiert. Dies ist bei den verwendeten Mikrowellen der Fall, ihre Wellenlänge beträgt etwa 12 cm.

WOZU BRAUCHT MAN NOCH EINEN GRILL?

Wasser in der Gasphase kann im Gegensatz zur flüssigen Form nur Mikrowellen einer Frequenz von etwa 22 GHz absorbieren. Ist das Wasser im Mikrowellenofen vollständig verdampft, so erhitzt sich der Dampf nicht mehr weiter. Diese Beschränkung der Kochtemperatur im Mikrowellengerät auf die Siedetemperatur des Wassers bringt aber einen Nachteil mit sich: Fleisch wird an der Oberfläche nicht knusprig-braun, da die dafür verantwortlichen chemischen Reaktionen erst bei Temperaturen weit oberhalb von 100 °C einsetzen. Bei diesen sog. Maillard-Reaktionen reagieren Aminosäuren (Bausteine der Eiweiße) mit Kohlehydraten. Im Verlaufe von komplizierten Reaktionsketten entstehen geruchs- und geschmacksverbessernde Stoffe und eben die Bräunungsstoffe mit ihrer intensiven Färbung.¹⁰⁾ Daher haben einige Mikrowellengeräte auch einen Grill eingebaut, mit dem man bei hoher Temperatur zunächst eine Kruste erzeugen und anschließend mit den Mikrowellen das Fleisch bis ins Innere rasch erhitzen kann, ohne dass sich die Aromastoffe verflüchtigen.

Wirkungsgrad bezieht sich jedoch zunächst nur auf Wasser. Denn Wasser eignet sich für diesen Versuch besonders gut, da auf einfache Weise qualitative und eben auch quantitative Aussagen gewonnen werden können. Da viele Speisen einen großen Anteil Wasser enthalten, sind die Ergebnisse aber auch in der Praxis relevant. Dazu böte es sich auch an, z. B. als Hausaufgabe zusätzlich den Wirkungsgrad einer Kochplatte zu bestimmen.

LEITFRAGE 5: ERHITZT DER MIKROWELLENOFEN VITAMINSCHONEND?

Die Frage nach möglichen Nährwertveränderungen beim Erhitzen mit dem Mikrowellenofen geht über die Physik hinaus in Richtung eines fachübergreifenden Unterrichts. Erfahrungsgemäß stößt die Frage auf sehr großes Interesse. Mithilfe von geeigneten Teststäbchen[®] wird der Vitamingehalt von Wasser ermittelt, in dem eine Vitamin-C-Tablette gelöst ist (s. **Arbeitsblatt 4**).

Aufgrund der hohen Konzentration an Vitamin C verfärbt sich das Teststäbchen maximal. Der auf der Packung angegebene Farbskala lässt sich entnehmen, dass die Konzentration an Vitamin C mindestens 2000 mg/l beträgt. Die nächste Farbstufe entspricht einer Konzentration von 1000 mg/l. Die Schülerinnen und Schüler sollen erkennen, dass ein Verlust daher nur dann nachweisbar ist, wenn mindestens die Hälfte des Vitamins bei der Erwärmung zerstört würde.

Das zentrale Anliegen des Versuchs ist es, die Schülerinnen und Schüler dafür zu sensibilisieren, dass für die Prüfung einer naturwissenschaftlichen Fragestellung die Genauigkeit des eingesetzten Messverfahrens bei der Interpretation der Messung zu berücksichtigen ist.

ERPROBUNG DER UNTERRICHTSEINHEIT

Der Unterricht wurde in der dargestellten Form einschließlich der molekularen Deutung in einer 10. Klasse einer Osnabrücker Realschule (15 Schülerinnen und Schüler) erprobt. Nach einer vom Lehrer durchgeführten einführenden Frontalstunde wurden die Leitfragen 2–5 in einer Doppelstunde an Stationen bearbeitet.

Interesse

Um das Interesse der Schülerinnen und Schüler zu erfassen, wurde der Fragebogen des Instituts für die Pädagogik der Naturwissenschaften in Kiel zur motivierenden Wirkung von Unterricht eingesetzt ([5], S. 116). Auf einer 5-stufigen Skala von 1 (trifft überhaupt nicht zu) bis 5 (trifft ganz genau zu) wurden Aussagen zur Interessantheit des Lerngegenstands eingeschätzt. Das Resultat ist überaus erfreulich: Der Durchschnitt war mit etwa 3,5 recht hoch. Die folgenden 8 der insgesamt 18 verwendeten Items stießen auf große Zustimmung (im Durchschnitt 4 oder höher):

- Der Unterricht war abwechslungsreich.
- Ich war neugierig darauf, was in der nächsten Stunde behandelt wird.
- Der Unterricht beschäftigte sich mit Dingen, die mir im täglichen Leben begegnen.
- Im Unterricht gab es etwas Neues für mich zu entdecken.
- Ich konnte mich leicht auf die Sache konzentrieren.
- Ich hatte das Gefühl, für mich selbst etwas dazugelernt zu haben.
- Die Schule würde mir mehr Spaß machen, wenn wir öfter solche Themen behandeln würden.
- Es hat mir Spaß gemacht, mein Verständnis für dieses Thema zu vertiefen.

Entsprechend fielen auch die frei formulierten Einschätzungen der Schülerinnen und Schüler zur Frage aus, was ihnen besonders gut gefallen habe. Dabei wurden insbesondere die *Versuche*, aber auch deren selbstständige Bearbeitung hervorgehoben:

- „Die Versuche mit der CD in der Mikrowelle; der Versuch mit dem Thermofax-Papier.“
- „Die Experimente.“
- „Die Versuche waren sehr gut aufgebaut und sie waren gut zu verstehen.“
- „Die Versuche.“
- „Dass wir mit einem alltäglichen Hausgegenstand gearbeitet haben.“
- „Dass man selber lernen konnte, wie die Mikrowelle funktioniert.“
- „Abwechslungsreich und viele eigene Versuche.“
- „Eigentlich alles, da wir alles selber machen konnten.“

- „Versuch 1.“
- „Dass man mit seiner Gruppe mehrere Sachen machen musste und auch darüber reden konnte.“
- „Dass wir auf uns allein gestellt waren.“
- „Dass alles ganz gut aufgebaut und vorbereitet war.“
- „Die ganzen Versuche./Dass man viel Neues gelernt hat.“

Die Frage, was nicht gefallen habe, beantworteten nur vier Schülerinnen und Schüler:

- „Die Zeit war etwas knapp, finde ich.“
- „Die manchmal zu ungenaue Erklärung der Versuche.“
- „Manche Erklärungen waren unverständlich, da wir uns nicht so auskannten.“
- „Die Gruppenarbeit.“

Der im direkten Anschluss an die Gruppenarbeitsphase geschriebene **Wissenstest** (s. S. 47; farbiges Bild des Teststäbchens unter <http://www.unterricht-physik.de>) zeigte einen ausreichenden Lernerfolg. Der durchführende Lehrer war davon überzeugt, dass die Leistungen deutlich besser gewesen wären, wenn für die Erprobung etwa eine Stunde mehr an Unterrichtszeit zur Verfügung gestanden hätte, um den behandelten Stoff zu festigen. In dieser Richtung zielen auch einige der kritischen Kommentare der Schülerinnen und Schüler.

Fazit

Der Mikrowellenofen ist ein für Schülerinnen und Schüler hochinteressanter Lerngegenstand. Im Rahmen dieses Kontexts lassen sich eine Reihe von physikalischen Inhalten aus der Elektrizitäts- und Wärmelehre behandeln.

Mit dem vorgestellten Unterrichtsvorschlag können physikalische Phänomene von einer vertiefenden, modellbasierten physikalischen Reflexion weitgehend entkoppelt werden, sodass ein Unterricht auf unterschiedlichem Anspruchsniveau ermöglicht wird.

Die Erprobung zeigte die erhoffte, stark motivierende Wirkung des Mikrowellenofens. Wie die Ergebnisse eines Leistungstests zeigen, sollte der Lernprozess noch stärker unterstützt werden. Dies könnte durch zusätzliche

Hilfen, z.B. durch Bereitstellung von „Lösungen“ zu den Aufgaben (z.B. mit „Hilfe-Umschlägen“) und einem etwas umfangreicheren Zeitbudget gelingen. Möglicherweise sind auch andere unterrichtsmethodische Elemente hilfreich, wie z.B. die Anpassung der Materialien an das Konzept des Gruppenpuzzles.

Anmerkungen

- 1) <http://www.physikdidaktik.uni-osnabrueck.de/mikrowelle.htm>
- 2) In vielen populärwissenschaftlichen Darstellungen wird ein Mechanismus nahegelegt (oder gar explizit mitgeteilt), wonach aufgrund der höheren Geschwindigkeit „eine stärkere Reibung“ entsteht, die zur beobachteten Temperaturerhöhung führe. Auf molekularer Skala gibt es jedoch keine Reibung. Schnelle Bewegung auf atomarer Skala äußert sich makroskopisch als Temperaturerhöhung.
- 3) Zum Vorgang der Rotationsanregung gibt es eine sehr anschauliche Animation im Internet: http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/microwaves/water_rotates3.html
- 4) Das magnetische Feld von Mikrowellen spielt für die Erwärmung im Mikrowellenofen keine Rolle.
- 5) Im Internet gibt es zahlreiche Applets zu elektromagnetischen Wellen (z.B. <http://www.walter-fendt.de/ph11d/emwelle.htm>).
- 6) Wir empfehlen, die Lampe nur ca. 1–2 Sekunden zu zünden. In seltenen Fällen wird die Energiesparlampe sonst zerstört, und geringe Mengen an Quecksilber gelangen in den Garraum. Falls mit dem Mikrowellenofen wieder Speisen erwärmt werden sollen, muss er sorgfältig gereinigt werden. Es ist jedoch grundsätzlich ratsam, einen Mikrowellenofen für die Physiksammlung anzuschaffen.
- 7) Applet zur Ausbildung einer stehenden elektromagnetischen Welle: <http://www.walter-fendt.de/ph14d/stwellereffl.htm>
- 8) Wir haben den „Ascorbinsäure-Test 1.10023.0001“ der Firma Merck verwendet.
- 9) Die Wellenlänge beträgt bei dieser Frequenz ca. 12 cm, es handelt sich also um Mikrowellen.
- 10) Die Maillard-Reaktion ist z.B. auch verantwortlich für die Entstehung der Brotkruste beim Backen, dass geröstete Kaffee- und Kakaobohnen so gut riechen und Bier goldgelb ist.

Literatur

- [1] Berger, R.: Das Gruppenpuzzle am Beispiel des Mikrowellenofens. In: Praxis der Naturwissenschaften 56 (2007), Heft 2, S. 5–11.
- [2] Berger, R.: Das Mikrowellengerät – ein interessanter Küchenhelfer. In: Praxis der Naturwissenschaften Physik 51 (2002), Heft 2, S. 9–17.
- [3] Bergmann, L., Schäfer, C.: Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 5: Gase Nanosysteme Flüssigkeiten. Berlin: de Gruyter, 2006.
- [4] Dorn, E.; Bader, F.: Physik Gymnasium Sek II. Hannover: Schroedel, 2000.
- [5] Hoffmann, L.; Häußler, P.; Peters-Haft, S.: An den Interessen von Mädchen und Jungen orientierter Physikunterricht. Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel, 1997 (IPN Buch 155).
- [6] Nordmeier, V.: Zugänge zur nichtlinearen Physik am Beispiel fraktaler Wachstumsphänomene. Münster: Lit-Verlag, 1999.