

UNTERRICHTSEINHEIT ZUM MIKROWELLENGERÄT

von Dr. Roland Berger, Physikdidaktik der Universität Kassel

Einordnung in den hessischen Lehrplan

Der neue hessische Lehrplan (gültig ab 1.8.2003) fordert, dass sich der Physikunterricht in der gymnasialen Oberstufe „an den Vorerfahrungen und Interessen der Schülerinnen und Schüler orientiert“. Besondere Bedeutung erhält der Unterricht laut Lehrplan durch das Aufgreifen fächerübergreifender Problemstellungen.

Diesen Anforderungen wird der Mikrowellenofen gerecht, obwohl dieses Gerät im neuen Lehrplan im Gegensatz zum vorhergehenden Lehrplan nicht mehr explizit genannt wird.

Ein hohes Interesse sowohl der Schülerinnen als auch der Schüler an Fragestellungen rund um den Mikrowellenofen belegt die Studie von Berger¹. Zu den geäußerten Interessen gehören auch eine Reihe fächerübergreifender Aspekte.

Der Mikrowellenofen wird sinnvollerweise im 2. Halbjahr der 12. Jahrgangsstufe behandelt. Dort sind elektromagnetische Schwingungen und Wellen wesentliche Unterrichtsgegenstände:

| | |
|---|--|
| Mechanische und elektromagnetische Schwingungen | Harmonische Schwingungen charakteristische Größen (Schwingungsdauer, Frequenz, Kreisfrequenz) Resonanzphänomene (Probleme und Anwendung) |
| Mechanische und elektromagnetische Wellen | Eigenschaften, charakteristische Größen (Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge, Frequenz) |
| Überlagerung von Wellen | Stehende Wellen, Huygenssches Prinzip Beugung und Interferenz (Doppelspalt, Gitter) Reflexion, Brechung |

Im Hinblick auf fächerübergreifenden Unterricht ist es ein erfreulicher Umstand, dass das Thema Ernährung in den Lehrplänen sowohl der Chemie als auch der Biologie im 2. Halbjahr der Jahrgangsstufe 12 eine Rolle spielt.

Im Lehrplan Chemie wird dabei insbesondere auf die umfassende Bedeutung von Kohlenstoffen für die Ernährung hingewiesen. Auch in Biologie steht das Thema Stoffwechsel in diesem Halbjahr auf dem Programm. Der vorliegende Text enthält daher auch einen Überblick über grundlegende Aspekte der Ernährung.

Das Thema „Mikrowellenherd“ eignet sich einerseits sehr gut, um ein breites Gebiet an physikalischen Inhalten abzudecken und ermöglicht andererseits über das Thema Ernährung den Brückenschlag zur Biologie und Chemie.

Zum Aufbau dieses Textes

Die Unterrichtseinheit ist so konzipiert, dass sie von interessanten Leitfragen ausgeht. Diese können in der Reihenfolge z.T. vertauscht werden.

Ein Vorschlag für einen Lehrtext findet sich im Anhang. Dort wird außerdem eine methodische Alternative zur direkten Instruktion („Expertenkreis“) vorgeschlagen.

¹ Berger, R. (2002). Das Mikrowellengerät – ein interessanter Küchenhelfer. Praxis der Naturwissenschaften Physik, 2/51, S. 9-17

Für die Versuche wird ein Mikrowellenofen und das schulübliche Mikrowellendemonstrationsgerät (z.B. Phywe) verwendet. Bei den Versuchen mit dem Mikrowellengerät ist darauf zu achten, dass sich immer ein Absorber (z.B. eine Tasse Wasser) im Gerät befindet. Außerdem sollte ein Löffel im Wasser sein, da es sonst zum Siedeverzug kommen kann. Bei einer kleinen Erschütterung (z.B. beim Herausnehmen der Tasse aus dem Gerät) verdampft das Wasser explosionsartig. Dabei können schwere Verletzungen auftreten.

Hier noch einige Hinweise zum Text:

• **Die Leitfragen sind jeweils fett gedruckt und eingerahmt.**

- Die verwendeten Medien sind **fett** geschrieben.

- Die Versuche werden unter der entsprechenden Nummer beschrieben: **V** Nr.

Zum Teil eignen sie sich auch als Heimversuche. (Sicherheitshinweise!)

- Lernzielkontrollen werden mit **LZK** abgekürzt
- Die angegebenen Hausaufgaben beziehen sich auf die Aufgaben am Ende des Lehrtextes. Die Lösungen befinden sich am Ende dieses Textes.

Die im Text beschriebenen Simulationen aus dem Lernprogramm Physics 2000 sind unter http://www.uni-bonn.de/iap/P2K/applets_EL.html zu sehen.

Am Ende des Textes ist ein Exkurs zur Ernährung zu finden. Dies ermöglicht einen Einstieg in die Biologie und Chemie der Ernährung und öffnet in Richtung fächerübergreifenden Unterricht.

1 Wozu dient Mikrowellengeschirr?

- V**₁ Eine Tasse Wasser und einen mikrowellentauglichen Behälter in den Mikrowellenofen einbringen und anschalten.

Beobachtung: das Wasser wird im Gegensatz zum Mikrowellenbehälter heiß.

Wasser absorbiert Mikrowellen. Von mikrowellentauglichen Behältern muss man fordern, dass sie nicht absorbieren (sonst schmelzen sie), sondern die Mikrowellen durchlassen, damit sich die darin befindliche Speise erwärmt.

- V**₂ Zwei Tassen Wasser, eine davon in Aluminium werden in den Mikrowellenofen eingebracht und angeschaltet.

Beobachtung: Das Wasser im Aluminium bleibt ebenso wie das Aluminium selber kalt.

Ergebnis: Aluminium absorbiert Mikrowellenstrahlung nicht (sonst würde es warm), sondern reflektiert sie.

V **Phywe-Demonstrationsgerät:**
3 verschiedene Substanzen (z.B. Alufolie, sonstige Metalle (z.B. CDs), Holz, Papier, nasses Papier, Wasserbehälter, Styropor, Plastik, Mikrowellengeschirr, Glas, Wasser und ähnliches) werden daraufhin getestet, ob Mikrowellen durchgehen oder reflektiert werden. An Alufolie kann das Reflexionsgesetz gezeigt werden.

Zusammenfassung:

- An Metallen werden Mikrowellen reflektiert genauso wie Licht. (erste Gemeinsamkeit mit Licht!).
- durch viele Stoffe gehen die Mikrowellen einfach durch (Styropor, Glas, viele Kunststoffe, insbesondere Mikrowellengeschirr)
- Wasser absorbiert die Mikrowellen (keine Transmission und Reflexion)

LZK: Warum bleiben die Wände des Mikrowellenofens beim Kochen im Gegensatz zu Wasser kalt?

Aufgaben 1. und 2.

2 Warum werden manche Stoffe sehr heiß, andere aber nicht?

Warum werden gerade Wasser bzw. wasserhaltige Substanzen warm?

Mitteilung: Bei der Erwärmung von Speisen durch Mikrowellen wird eine besondere Eigenschaft von Wasser ausgenutzt: Das Wassermolekül ist ein permanenter elektrischer Dipol.

Simulation „Wasser rotiert“ (Applett Physics 2000): Durch Verschieben einer elektrischen Ladung lässt sich das Wassermolekül in Bewegung versetzen. Durch ein sich zeitlich periodisch änderndes elektrisches Feld könnte man das Wassermolekül in Rotation versetzen.

Mitteilung: Dies gelingt am besten bei Frequenzen im Giga-Hertz-Bereich, z.B. durch Einbringen des Wassers in einen Plattenkondensator, an den die Wechselspannung angelegt wird. Dies ist mit elektronischen Bauelementen bei hoher Leistung nicht mehr zu machen. Daher verwendet man elektromagnetische Wellen im Gigahertzbereich.

Eigenschaften der elektromagnetischen Welle:

(vgl. z.B. Dorn/Bader Physik 12/13 S. 165)

- die Welle enthält neben elektrischen auch magnetische Felder
- elektrisches und magnetisches Feld stehen aufeinander senkrecht
- die Wellenlänge und Phasengeschwindigkeit sind für elektrisches und magnetisches Feld gleich groß

Problem: Wie kann eine elektromagnetische Welle existieren?

Lösung:

1. ein wanderndes Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Feld und
2. ein wanderndes elektrisches Feld erzeugt ein Magnetfeld

zu 1.

In einem Versuch zeigt man, dass die induzierte Spannung in einem Leiter (Länge d) unabhängig davon ist, ob sich der Leiter bewegt und der Magnet ruht oder umgekehrt. Die von

einem wandernden Magnetfeld induzierte Spannung beträgt also $E=U/d=Bdv/d=Bv$. Bewegt sich das Magnetfeld mit der Geschwindigkeit c , so wird ein elektrisches Feld der Stärke $E=Bc$ erzeugt. Da E und B proportional sind, sind beide Felder in Phase.

zu 2.

Gedankenversuch: wird ein geladener Kondensator bewegt, so fließt aufgrund der bewegten Ladungen auf den Platten ein elektrischer Strom, der von einem Magnetfeld begleitet ist. Entfernt man die Platten in Gedanken unendlich weit voneinander, so erkennt man, dass ein wanderndes elektrisches Feld von einem Magnetfeld begleitet wird.

Insgesamt erhält man das Ergebnis:

eine elektromagnetische Welle kann sich ausbreiten, da sich die beiden Feldarten gegenseitig erzeugen.

Aus den gleichen Energiedichten lässt sich anschließend die Phasengeschwindigkeit c ableiten und zeigen, dass sie gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. (vgl. Dorn/Bader S. 166)

Anhand **Simulation „Mikrowellen & Wasser“ (Applett Physics 2000)**: Wasserdipol wird im elektrischen Feld der elektromagnetischen Welle hin und her geklappt. Ist die Substanz hinreichend dicht, so wird die Energie an benachbarte Moleküle angegeben und so teilweise in kinetische Energie umgewandelt. Schnellere Bewegung bedeutet aber höhere Temperatur!

Simulation „Reibung“ Physics 2000

Diskussion des **elektromagnetischen Spektrums (Folie)**:

- Einordnung der Mikrowellen und des sichtbaren Lichts.
- Elektromagnetische Wellen unterscheiden sich nur in der Frequenz bzw. der Wellenlänge.

Fachliche Ergänzung: Warum wird Wasserdampf im Mikrowellenofen nicht heiß?

Die maximale Absorption von Wasser im Mikrowellenbereich liegt bei 22 GHz. In der Dampfphase stoßen die Moleküle mit einer Frequenz von etwa 10^8 pro Sekunde². Fast alle dieser Stöße führen zu einer Energieübertragung aus der angeregten Rotation in eine Translation und damit zur Erwärmung. Dies führt zu einer Druckverbreiterung der Absorptionslinie von ca. $1/10^8$ Hz= 100 MHz. Dies reicht aber nicht aus, um bei der Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz noch zu absorbieren.

V **Phywe-Demonstrationsgerät:**

4 Mikrowellen können eine Eisschicht durchdringen. Ist das Eis geschmolzen, so kommen sie nicht mehr durch, da sie vom Wasser absorbiert werden.

Bemerkung zum Versuch:

Die Mikrowelle ist amplitudenmoduliert (intern mit 50 Hz), um sie hörbar zu machen. Daher kann die Hörfrequenz auch nicht durch das Eis gelangen. Bei einer Frequenzmodulation könnte die Hörfrequenz das Eis möglicherweise passieren.

LZK: Warum kann man Eis nur schwer auftauen?

Die Wassermoleküle sind im Eis gebunden, können also nicht in Rotation versetzt werden. Dies sieht man manchmal beim Auftauen einer Pizza: Diese wird an Stellen sehr heiß, wo schon etwas Wasser ist, bleibt aber an einigen Stellen gefroren. Bei vielen Mikrowellenöfen

² Die Zahl der Stöße pro Sekunde ergibt sich aus der mittleren thermischen Geschwindigkeit v und der mittleren freien Weglänge l zu $v/l=v \cdot n \cdot \sigma$ (n ist die Teilchendichte und σ der Stoßquerschnitt). Die mittlere Geschwindigkeit liegt bei etwa 10^3 m/s. Der Sättigungsdampfdruck von Wasser beträgt $p=23$ mbar, sodass $n=p/kT=10^{23}$ pro m^3 . Schätzt man den Stoßquerschnitt mit $\sigma=(10^{-9}m)^2$ ab, so ergibt sich eine Stoßrate von 10^8 pro Sekunde.

gibt es eine „Auftaustufe“. Dabei wird nur kurze Zeit Mikrowellen erzeugt und dann abgeschaltet. Die heißen Stellen können sich dann durch Wärmeleitung abkühlen und die vereisten Stellen erwärmen. So kann man die großen Temperaturunterschiede verhindern.

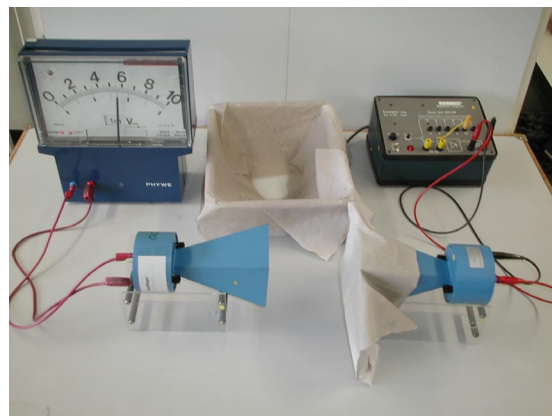
Aufgaben 3. und 4.

3 Warum kann ein Mikrowellenofen Speisen so rasch erhitzen?

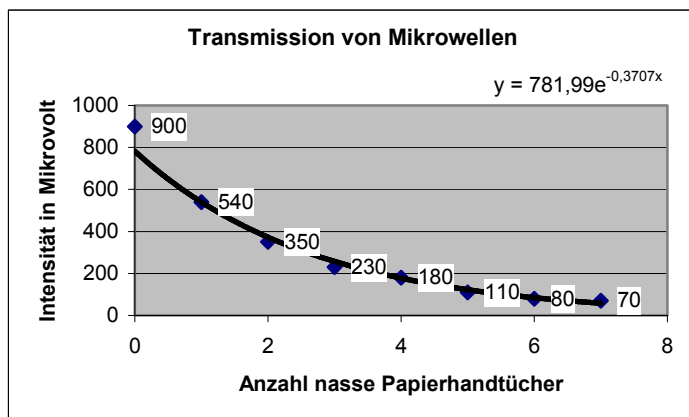
Beim herkömmlichen Kochen und Braten wird die Oberfläche der Speise zuerst erhitzt. Die damit verbundene Erhöhung der kinetischen Energie wird durch Stöße an Nachbarmoleküle weitergegeben. Diese Wärmeleitung ist ein vergleichsweise langsamer Prozess. Die Mikrowellen können dagegen einige Millimeter in die Speise eindringen und das Innere damit sofort erwärmen. Die Intensität der Mikrowellen nimmt nach einem exponentiellen Absorptionsgesetz ab, welches im Versuch 5 ermittelt werden soll.

V₅

Auf den Mikrowellensender werden zunehmend viele nasse Papierhandtücher aufgelegt und die jeweilige Intensität mit einem Spannungsmesser ermittelt.



Es ergibt sich ein exponentielles Absorptionsgesetz:



Aufgaben zum Absorptionsgesetz: Aufgaben 7. und 8.

4 Wozu dient der Drehteller im Mikrowellenofen?

V₆ Thermofaxpapier wird auf ein nasses Papierhandtuch gedrückt und in den Mikrowellenofen eingebracht (passend Styropor unterlegen, damit das Papier in einigen Zentimetern Höhe liegt).

Beobachtungen: Es entstehen dunkle Stellen.

Erklärung: Der Mikrowellenofen wird nicht an allen Stellen gleichmäßig warm. Daher werden die Speisen gedreht.

Wie kommt es zu diesem Phänomen?

Wenn sich Wellen (z.B. Wasserwellen) überlagern kommt es zur Interferenz.

Im Mikrowellenofen gibt es doch aber nur einen Sender?!

Die Mikrowellen werden überall reflektiert und überlagern sich dann.

V₇ **Phywe-Gerät:** Reflexion von Mikrowellen am Metallschirm.

Diskussion der Entstehung von stehenden Wellen; Begriff der Knoten und Bäuche.

Bestimmung der Wellenlänge des Phywe-Gerätes (Abstand der Knoten: $\lambda/2$).

Simulation „Stehende Wellen“

(<http://www.pk-applets.de/phy/interferenz/interferenz.html> oder Applett Physics 2000):

Im Mikrowellenofen werden die Wellen aber nicht nur einmal reflektiert, sondern sehr häufig. Bei geeigneter Dimension des Ofens bzw. Frequenz überlagern sich alle Wellen so, dass sie sich verstärken.

V₈ Mechanische Resonanz mit eingespanntem Gummiseil. Bei geeigneten Drehfrequenz („Eigenfrequenzen“) des Exzenters erhält man sehr große Amplituden. Man beobachtet die Grundwelle und verschiedene Oberwellen.

Simulation „Resonanz“ (Applett Physics 2000)

Beim Mikrowellenofen steht jedoch die Frequenz fest (2,45 GHz). Die Konstrukteure des Mikrowellenofens müssen die Dimensionen des Mikrowellengerätes dann so wählen, dass sich die hin- und her laufenden Wellen gegenseitig verstärken.

Simulation „Fliesen-Analogie“ (Applett Physics 2000)

Bemerkung:

Das Interferenzmuster ist durch die Dreidimensionalität recht kompliziert, so dass der Abstand der heißen Stellen nicht durch $\lambda/2$ gegeben ist. (→ fachliche Hinweise: Resonanz beim Mikrowellenofen am Ende des Textes)

Ergebnis: An den Knoten bleibt die Speise weitgehend kalt. Schöne Aufnahmen mit einer Infrarotkamera sind in der Zeitschrift The Physics Teacher, Band 36, Januar 1998, Seite 48.

Anwendungen der Resonanz (Singen im Badezimmer, Zerstörung einer Brücke etc.)

Aufgabe 9.

5 Bleibt die Mikrowellenstrahlung im Ofen?

Wir hatten im Eingangsversuch gesehen, dass Mikrowellen auch Glas durchdringen. Das würde zu einer Gefährdung des Kochs/Köchin führen. Wie kann das verhindert werden? → Metallabschirmung!

Irritierend ist, das in der Tür des Mikrowellengerätes eine Tür ist, die von einem Metallgitter bedeckt ist. Können Mikrowellen nicht durch die Löcher ins Freie gelangen und Personen schädigen?

V₉

Nachweis mit dem **Phywe-Gerät**: Die Mikrowellen können die (geöffnete) Tür des Mikrowellenofens nicht durchdringen.

V₁₀

1. Maschendraht (z.B. vom Bunsenbrenner) ist für Mikrowellen undurchlässig
2. **Phywe-Gerät**: Zwischen Sender und Empfänger wird eine Irisblende gebracht³. Die Mikrowellen sind erst dann nachweisbar, wenn die Öffnung ausreichend groß ist.

LZK: Warum kann man die Speise im Mikrowellengerät sehen?

Die Wellenlänge des Lichtes ist viel kleiner als der Durchmesser der Gitteröffnungen. Licht kann von innen nach außen gelangen

Aufgabe 5.

6 Sind Mikrowellenöfen gefährlich?

Es werden zwei potenzielle Wirkungsmechanismen niederfrequenter elektromagnetischer Wellen diskutiert:

1. Wärmewirkung: ist unbestritten
2. nichtthermische Wirkung auch schwacher Strahlung („Elektrosmog“): Berichtete Experimente konnten nicht reproduziert werden.

³ Experimenteller Hinweis: Falls die Irisblende aus Kunststoff ist und daher Mikrowellen passieren lässt, so kann man sie mit Alufolie umwickeln.

Siehe auch **fachliche Hinweise**: Exkurs zum Elektrosmog am Ende des Textes.

V₁₁ Versuch des Nachweises von Mikrowellen mit einem billigen Nachweisgerät⁴.

V₁₂ (Angeschaltetes) Handy wird in (abgeschalteten!!!) Mikrowellenofen gelegt. Be-
findet sich ein Verstärker in ausreichender Nähe, so klingelt es bei Anruf.

Ergebnis: Das Mikrowellengerät ist ein Faradayscher Käfig (Vergleich mit Auto). Allerdings gibt es keine 100%-ige Abschirmung. Deswegen werden Grenzwerte angegeben. Hinweis auf Grenzwert von 100 μT für dauernde Einwirkung. Elektroherd hat z.T. höhere Felder (vgl. Riedl (1997) S. 301). Auch die thermische Strahlung enthält Anteile im Mikrowellenbereich, so dass wie auch einer schwachen natürlichen Mikrowellenstrahlung permanent ausgesetzt sind.

7 Warum sollen keine Gegenstände aus Metall in den Mikrowellenofen?

Die Metallwände des Ofens erwärmen sich praktisch nicht. Bringt man aber eine CD in den Mikrowellenofen ein, so erwärmt sich die dünne Metallschicht sehr stark.

V₁₃ Eine CD wird im Mikrowellenofen erhitzt.

Die elektromagnetischen Wellen nicht weit in das Metall eindringen. Bei der typischen Frequenz eines Mikrowellengerätes beträgt die Eindringtiefe („Skintiefe“) nur etwa 1 Mikrometer. Aufgrund der geringen Zahl der Elektronen in dieser dünnen Schicht ist die Absorption aber gering, obwohl jedes Elektron in der „Skinhaut“ stark absorbiert. (vgl. Hecht, E.: Optik. Addison-Wesley 1994, S. 116). Ist das Metallvolumen klein, so kommt es auch zu starken Erwärmungen. Bei großen Metallen verteilt sich die Wärme wegen der guten Wärmeleitfähigkeit rasch über das ganze Volumen und die Temperaturerhöhung bleibt klein.

V₁₄ Eine Gabel wird im Mikrowellenofen erhitzt.

V₁₅ Eine Glühbirne wird in einer Tasse (als Halterung) in das Mikrowellengerät gestellt. Die Glühbirne leuchtet kurz auf. In den Drähten wurden durch das elektrische Feld der Mikrowellen Ströme erzeugt, deren Joulesche Wärme aufgrund des endlichen Metallwiderstands die Lampe quasi „ganz normal“ zum Glühen bringt.

⁴ z.B. der Mikrowellen-Leck-Tester der Fa. Conrad (www.conrad.com, Best.-Nr. 102156-80, DM 30,13)

Zusammenfassung:

Die Absorption von Mikrowellen kann auf zwei Arten geschehen:

1. Elektrische Dipole werden durch das elektrische Wechselfeld in Schwingungen versetzt und geben die Rotationsenergie durch Stöße an die Umgebung ab.
2. freie elektrische Ladungen (z.B. in Metallen) werden durch das elektrische Feld beschleunigt und geben ihre Energie durch Stöße an das Gitter ab.

Der zweite Mechanismus kann auch ein anderes Phänomen erklären: Die Ladungsverschiebung kann an Spitzen zu sehr starken Feldern führen, die Funkenüberschläge verursachen. Das ist hin und wieder im Mikrowellengerät zu beobachten.

Mögliche Ergänzung:

V 16 Energiesparlampe wird in einer Tasse in den Ofen gestellt. Sie leuchtet sehr hell auf

Die Energiesparlampen entsprechen in der Funktion weitgehend der stabförmigen Leuchtstoffröhre. Darin befindet sich Quecksilber geringen Drucks. Im elektrischen Feld der Mikrowelle werden Elektronen beschleunigt und die Quecksilberatome durch Elektronenstoß zur Emission überwiegend von UV-Licht angeregt (4,9 eV, also der Übergang, der auch im Franck-Hertz-Versuch ausgenutzt wird). Die weiße Leuchtstoffschicht wandelt das UV-Licht in sichtbares Licht um.

Bemerkung: Das elektrische Feld wirkt natürlich auch auf Ionen. Zum Beispiel erwärmt sich eine wässrige Salzlösung etwas schneller als reines Wasser.

Aufgabe 6.

8 Ist Nahrung aus dem Mikrowellenofen ungesund?

Mit diesen beiden Mechanismen kann nun die Erwärmung der Speisen diskutiert werden: Die Mikrowellen werden von den Wänden hin und her reflektiert, bis sie von wasserhaltigen Substanzen absorbiert werden. Die Energie der Mikrowellen wird dabei **vollständig** in innere Energie umgewandelt.

- Da die Temperatur nicht über den Siedepunkt des Wassers steigen kann, ist das Garen⁵ mit Mikrowellen ein für die (leicht flüchtigen) Geschmacksstoffe schonendes Verfahren.
- Da die so genannte „Maillard-Reaktion“ erst bei Temperaturen weit über dem Siedepunkt einsetzt, kommt es nicht zur Bräunung von Fleisch. Viele Geräte haben daher noch einen integrierten Grill.
- Die Energie der Mikrowellenphotonen reicht nicht zur Ionisation von Atomen aus. Es können sich somit keine Wasserradikale bilden, die andere Moleküle (z.B. die im Körper) schädigen. In diesem Zusammenhang lässt sich das Photonenmodell der elektromagnetischen Wellen einführen. Mehr dazu im Kapitel **Quantenphysik mit dem Mikrowellenofen**

→ **Fachliche Hinweise:** Exkurs zur Ernährung am Ende des Textes

Das Bundesamt für Strahlenschutz (Salzgitter) erklärt zu dieser Frage⁶:

⁵ laut Duden: „fertig Zubereiten“; gar gekocht ist „fertig gekocht“

Die Frage nach möglicherweise gesundheitlich bedenklichen Veränderungen in Lebensmitteln durch Mikrowellenbehandlung ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen. Nach heutigem Erkenntnisstand ist - verglichen mit konventionellen Zubereitungsverfahren - die Mikrowelle nicht mit speziellen Risiken behaftet. Praktisch alle bisher vorliegenden Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass sowohl hinsichtlich des ernährungsphysiologischen Wertes als auch hinsichtlich der hygienischen Qualität der erhitzten Lebensmittel die Sorgfalt bei der Erhitzung entscheidender ist als die Wahl des Erhitzungsverfahrens.

Die Abtötung von Mikroorganismen hängt vor allem von den erreichten Temperaturen und der Erhitzungszeit ab. Weniger zufriedenstellende Untersuchungsergebnisse lassen sich auf sehr inhomogene Temperaturverteilungen im Produkt zurückführen. Diese kommen vor, wenn zu schnell erhitzt wird und dadurch keine Zeit für den Temperatúrausgleich im Produkt zur Verfügung steht. Nach einer gewissen Ausgleichszeit wird die Temperatur im Gargut durch Wärmeleitung gleichmäßiger.

Eine Metaanalyse der bis 1979 vorhandenen Literatur kommt zu folgenden Ergebnissen⁷:

I. Behandlung von Fleisch, Fleischwaren und Geflügel

- *Hinsichtlich der Erhaltung von Vitaminen der B-Gruppe waren widersprüchliche Resultate zu verzeichnen. Eine Tendenz lässt sich nicht aufzeigen.*
- *Signifikante Unterschiede in der prozentualen Fettsäurezusammensetzung und dem Gesamtfettsäuregehalt als Folge der verschiedenen Behandlungsmethoden waren nicht festzustellen.*
- *Hinsichtlich der Bildung bzw. Erhaltung von freien Aminosäuren scheint konventionelles Garen gegenüber Mikrowellenbehandlung Vorteile aufzuweisen.*
- *Garen mit trockener Hitze (ohne Zugabe von Wasser) führte in mikrowellengegartem Fleisch zu geringerer Mineralstofferhaltung für Phosphor und Eisen als bei konventioneller Zubereitung mit trockener Hitze. Demgegenüber war nach Garen mit feuchter Hitze (Zugabe von Wasser) höhere Phosphor- und Kaliumerhaltung bei mikrowellengegartem Fleisch zu beobachten.*
- *Gewichtsverluste durch Abtropfen und Verdampfung von Fett bzw. Wasser waren beim Kochen mit Mikrowellen im Allgemeinen höher. In Hinblick auf eine vorteilhafte Anwendung von Mikrowellen zur Zubereitung fettreduzierter Diätverpflegung war jedoch festzustellen, dass der prozentuale Fettgehalt im gekochten Fleisch nicht in jedem Fall niedriger war als nach konventioneller Zubereitung.*
- *Nach Aufwärmen vorgekochter Proben im Mikrowellenherd wurden TBS-Werte (Thiobarbitursäure) und Sulfydrylgehalte ermittelt, wie sie auch bei Anwendung herkömmlicher Aufwärmmethoden festgestellt werden konnten.*
- *Die sensorischen Eigenschaften von mikrowellenbehandelten Proben wurden in der Regel insbesondere bezüglich der Merkmale Zartheit und Saftigkeit geringer bewertet als Proben, die auf konventionelle Weise zubereitet worden waren.*

II. Behandlung von Gemüse

Beim Garen bzw. Aufwärmen von Gemüse ergaben sich weder in Bezug auf die Vitaminerhaltung und Gewichtsverluste, noch in Hinblick auf sensorische Veränderungen größere Unterschiede als Folge der Behandlung mit Mikrowellen im Vergleich zu herkömmlichen Kochen, wenngleich sich diesbezüglich zwischen den einzelnen Gemüsesorten Abweichungen im Kochverhalten feststellen ließen. Wichtige Bedeutung bezüglich der Verluste an löslichen Le-

⁶ http://www.bfs.de/service/faq/a_hfs.htm

⁷ Dehne, L. & Bögl, W. (1979). Der Einfluß von Mikrowellen auf Veränderungen in Lebensmitteln im Vergleich zur konventionellen Hitzebehandlung. Eine Literaturstudie Teil I. Berlin: Dietrich Reimer Verlag

bensmittelbestandteilen beim Garen mit Wasser kommt der Kochwassermenge zu, von der Auslaugverluste wesentlich bestimmt werden. Beim Garen größerer Portionsmengen an Gemüse, wie dies bei Zubereitung einer Mahlzeit für mehrere Personen erforderlich werden kann, ist mit dem Mikrowellenherd jedoch gegenüber herkömmlichem Kochen kein Zeitvorteil mehr zu erzielen, da die Kochzeit ungefähr linear mit dem Gewicht des Gargutes ansteigt.

III. Behandlung von Vitaminlösungen

- Die Bestrahlung von Thiamin⁸- und Riboflavin⁹lösungen mit Mikrowellen im Vergleich zur Hitzebehandlung ergab keine Hinweise auf eine spezifische Wirkung der Mikrowellenenergie: Die Bestrahlung von Thiaminlösungen bei 100° C bewirkte einen Thiaminabbau; Mikrowellen bei 0° C verursachten keine Thiaminzerstörung. Der Abbaueffekt durch Mikrowellenenergie war ebenso wie bei konventioneller Hitzeeinwirkung allein eine Funktion der Temperatur. Die Thiamin- und Riboflavinerhaltung war nach konventionellem Erhitzen (100° C) geringfügig größer als nach Mikrowelleneinwirkung.
- Die Behandlung von Folsäure¹⁰ und Folsäurederivaten ergab für das hitzelabile Derivat 5-Methyltetrahydrofolat eine signifikant schnellere Abbaurate bei Mikrowelleneinwirkung als bei Zufuhr konventioneller Hitze. Dieses Ergebnis ist als eine spezifische Eigenschaft der Mikrowellenenergie zu bewerten.

9 Ist ein Mikrowellenofen Energie sparend?

Nachdem zunächst überlegt wird, was Energie sparend in diesem Zusammenhang heißt, kann nun ein Versuchsdesign gemeinsam überlegt werden.

V₁₇ 1 Liter Wasser wird für 5 Minuten auf der Heizplatte und im Mikrowellenofen erhitzt. Die zugeführten Leistungen werden mit einem Leistungsmessgerät bestimmt. Die Frage ist nun, welcher Bruchteil an Energie als innere Energie im Wasser erscheint. Mit Hilfe der Formel $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ lässt sich dann zeigen, dass Mikrowellenöfen im Vergleich zu Herdplatten Wasser sehr effektiv erwärmen (ca. 50% im Vergleich zu 10%).

Die Überprüfung dieser Frage eignet sich als experimentelle Hausaufgabe.

10 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 so genanntes Magnetron eingesetzt. Dieses Bauteil wurde in England 1940 bis zur Fertigungsreife entwickelt und führte zum entscheidenden Durchbruch zur modernen Radartechnik. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Schwingkreise, wie sie üblicherweise im Unterricht der gymnasialen Oberstufe diskutiert werden. Der technische Aufbau eines Magnetrons ist in Abb. 5 zu sehen.

⁸ d.h. Vitamin B 1

⁹ d.h. Vitamin B 2

¹⁰ Die Folsäure ist ein Vitamin der Gruppe Folate und ist vorwiegend im Blattgemüse zu finden. Ohne die Folsäure wäre die Zellteilung nicht möglich. Sie hat einen wichtigen Stellenwert bei Stoffwechselprozessen.

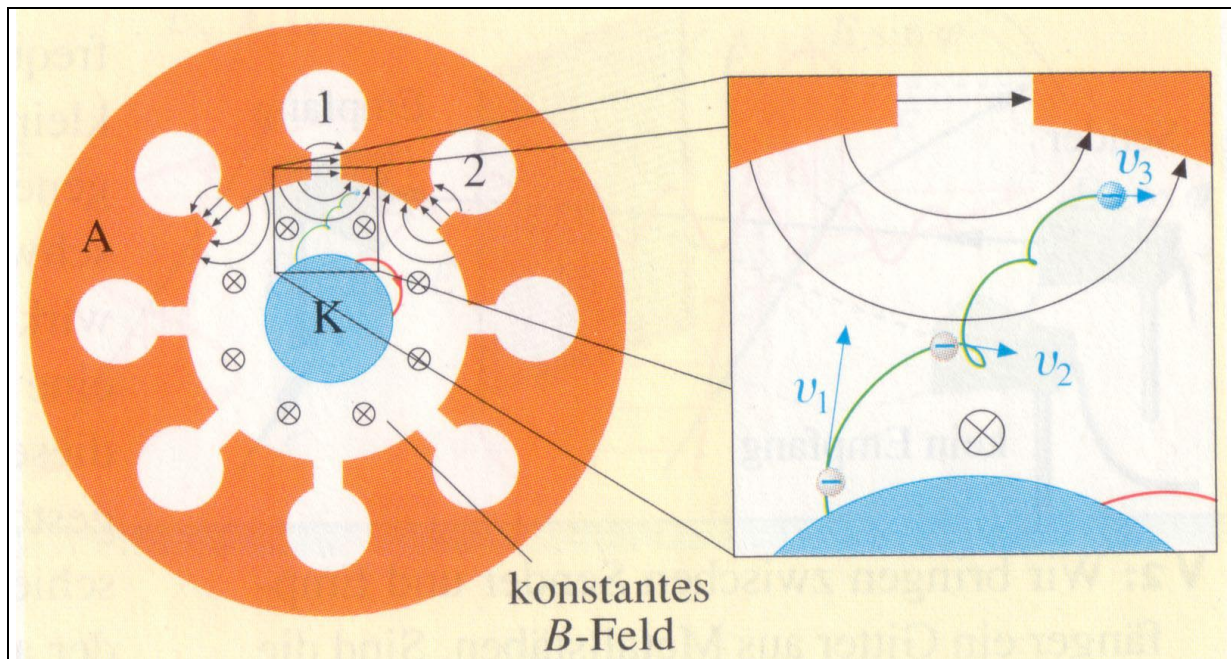


Abb. 5: Technischer Aufbau eines Magnetrons zur Erzeugung von Mikrowellen. Die Funktionsweise ist im Text beschrieben. (aus Dorn, F. & Bader, F.: Physik Gymnasium Sek II. Hannover: Schroedel 2000, 169)

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 Giga-Hertz-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 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, welche im elektrischen Wechselfeld eines Schwingkreiskondensators beschleunigt werden, werden aufgrund der dadurch vergrößerten Lorentzkraft zur Glühkathode zurückgeführt. Dies ist in Abb. 5 für ein Elektron in der Nähe des Schwingkreises 2 dargestellt. Elektronen, die im elektrischen Feld hingegen abgebremst werden und dadurch Energie verlieren (z.B. Schwingkreis 1) gelangen auf spiralförmigen Bahnen zur Anode (vergrößerter Ausschnitt in Abb. 5), 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 und ist in Abb. 6 schematisch dargestellt und beschrieben. Die so erregte ungedämpfte elektromagnetische Schwingung induziert in einer in den Schwingkreis eingebrachten Auskoppelspule eine Induktionsspannung im Gigahertzbereich. Über einen Wellenleiter gelangen die so erzeugten Mikrowellen in den Garraum. Eine detaillierte Darstellung der Elektronenbewegung im überlagerten elektrischen und magnetischen Feld ist im fachlichen Hinweis zu finden, eine stark vereinfachte Beschreibung im Buch von L.A. Bloomfield, „How Things Work“, Verlag Wiley enthalten.

1. Diskussion des Schwingkreises
2. Erzeugung ungedämpfter Schwingungen mit Hilfe des Magnetrons

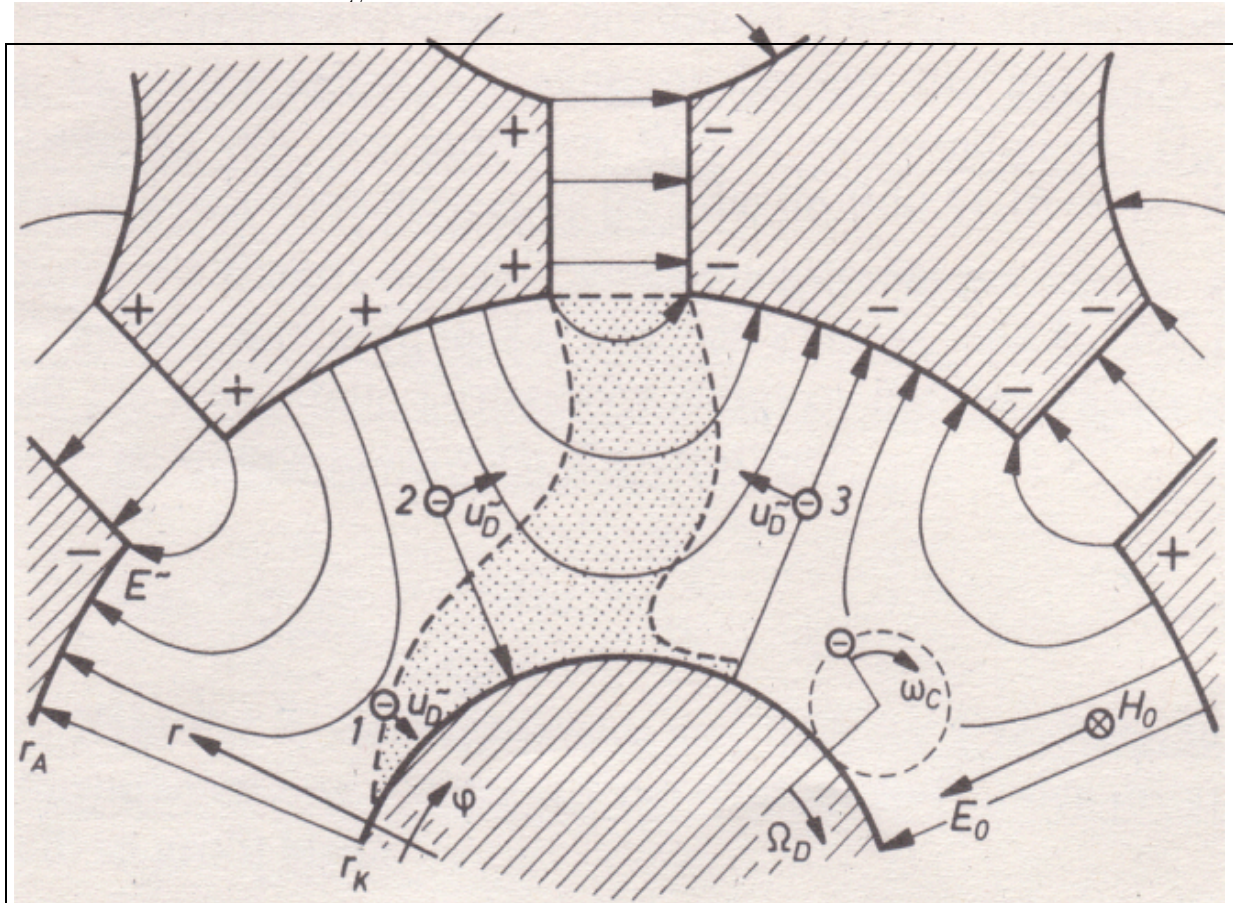
Aufgabe 10.

Fachlicher Hinweis:

Es handelt sich hier um eine vereinfachte Beschreibung der Vorgänge¹¹. Tatsächlich befindet sich um die Glühkathode ein Anodenring, in den gleich mehrere Schwingkreise eingelassen sind (vgl. Abbildung). Zwischen dieser Anode und der Glühkathode liegt eine Beschleunigungsspannung von einigen KiloVolt. Aus dem damit verbundenen Feld E_0 stammt die Energie, die die Elektronen dem Schwingkreis zuführen. Zusammen mit dem konstanten Magnetfeld H_0 bewirkt das Feld eine komplexe Bewegung der Elektronen auf ihrem Weg von der Glühkathode zum Anodenring. Es ist eine Überlagerung einer Rotation der Elektronen in tangentialer Richtung mit der Winkelgeschwindigkeit Ω_D und Zyklotronrotationen mit ω_C (angedeutet in der Abbildung rechts unten). Letztere ist in der Praxis im Vergleich zur Schwingfrequenz der Schwingkreise so groß, dass sich der damit

¹¹ Details zu den folgenden Überlegungen sind in Mayer, E. & Pottel, R. (1969). Physikalische Grundlagen der Hochfrequenztechnik. Braunschweig: Vieweg. S. 279-283 zu finden.

verbundene Energieaustausch mit dem elektrischen Feld des Schwingkreises herausmittelt. Ω_D wird nun durch Wahl der Felder \mathbf{E}_0 und \mathbf{H}_0 so eingestellt, dass die Elektronen im mit Ω_D mitrotierenden System insgesamt ein Feld \mathbf{E}^- des Schwingkreises mit konstanter Richtung „sehen“. In dem aus \mathbf{E}^- und \mathbf{H}_0 überlagerten Feld führen die Elektronen Bewegungen aus, die durch die effektive Driftgeschwindigkeit \mathbf{u}_D^- beschrieben werden. Dies entspricht im Wesentlichen der Situation, die im Schülertext beschrieben ist. Vereinfachte Darstellungen sind im Dorn/Bader¹² und in How Things work¹³ zu finden.



Einstieg in die Quantenphysik

Die Frage, ob Mikrowellenstrahlung in den Lebensmitteln Veränderungen hervorrufen kann, hat im Abschnitt 7 zu der Aussage geführt, dass Mikrowellen keine chemischen Bindungen aufbrechen können. Eine nahe liegende Vermutung wäre aber, dass die Intensität nur groß genug sein müsste, damit Bindungen aufgebrochen werden und damit chemische Radikale, z.B. Wasserbruchstücke wie OH^- und H^+ entstehen, die äußerst reaktionsfreudig sind und Moleküle dadurch chemisch verändern können. Dies ist aber nicht der Fall, da die Photonenergie der Mikrowelle eben nicht ausreichend ist. Mikrowellenstrahlung gehört im Gegensatz z.B. zur Röntgenstrahlung damit zur „nicht ionisierenden Strahlung“. Um dies begründen zu können, bietet es sich an, zunächst das Standard-Experiment zum photoelektrischen Effekt durchzuführen und zu interpretieren. In diesem Experiment werden mit Hilfe von Photonen Metalle „ionisiert“. Man erhält dabei die folgenden Ergebnisse:

- es existiert eine minimale Frequenz, jenseits der keine Photoelektronen freigesetzt werden.

¹² Dorn, F. & Bader, F.: Physik Gymnasium Sek II. Hannover: Schroedel 2000, 169

¹³ Bloomfield, L.A.: How Things Work. New York: Wiley 1997

- die kinetische Energie der Elektronen hängt nicht von der Intensität des Lichts ab, sondern nimmt linear mit der Lichtfrequenz zu.
- wird die Intensität des Lichts erhöht, so nimmt nur die Zahl der freigesetzten Elektronen, nicht aber deren Energie zu.

Dies ist klassisch sehr schwer zu erklären, da man erwarten würde, dass die Elektronen bei höherer Intensität des Lichts, d.h. auch höherer elektrischer Feldstärke stärker beschleunigt werden. Im Jahr 1905 gab Einstein die folgende Lösung des Problems: monochromatische elektromagnetische Strahlung der Frequenz f besteht aus Energiepaketen (Photonen) der Energie $h \cdot f$. Ein solches Energiequant kann vollständig auf ein Elektron übertragen werden. Die im Experiment beobachtete kinetische Energie beträgt daher $E_{\text{kin}} = h \cdot f - E_b$. E_b ist die zum Verlassen des Metalls notwendige Bindungsenergie. Diese so genannte „Austrittsarbeit“ hängt nur von der Art des Metalls ab. Das „plancksche Wirkungsquantum“ h ergibt sich aus diesem Experiment zu $4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$.

Damit lässt sich nun auch zwanglos erklären, warum die Photonen der Mikrowellenstrahlung nicht ionisieren können. Bei der Frequenz von 2,45 GHz haben die Photonen eine Energie von $h \cdot f = 4,1 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 2,45 \cdot 10^9 \text{ Hz} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$. Typische Bindungsenergien sind einige eV (z.B. beträgt die H-OH-Bindungsenergie 5,2 eV. [23]). Die Energie der Photonen ist also etwa hunderttausend mal zu klein, um chemische Bindungen aufbrechen zu können. Diese Energie bringen also erst Photonen auf, die Energien größer als die des sichtbaren Lichts haben (z.B. UV und Röntgenstrahlung).

Hinweis:

Theoretisch wäre es allerdings denkbar, dass ein Wassermolekül die Energie sukzessive aufnimmt und so ionisiert wird. Eine einfache Abschätzung zeigt aber, dass die Intensität in einem Mikrowellengerät für eine solche Multiphotonabsorption viel zu klein ist. Hat ein Wassermolekül ein Photon absorbiert, so gibt es diese Energie innerhalb der Relaxationszeit $\tau \approx 10^{-11} \text{ s}$ wieder ab. Um die Energie eines weiteren Photons aufnehmen zu können, müsste das Wassermolekül innerhalb dieser Zeit wieder „getroffen“ werden. Diese Bedingung erfordert eine Strahlungsintensität von $I_s = \frac{E_{\text{Photon}}}{\sigma \tau}$. Der Wirkungsquerschnitt σ berechnet sich aus

der Wassermoleküldichte n und der mittleren freien Weglänge der Photonen in Wasser zu $\sigma = 1/nd$. Mit einer Photonenergie von 10^{-5} eV , einer Dichte von $10^{22} \text{ Wassermolekülen/cm}^3$ und der Eindringtiefe von etwa 1 cm ergibt sich eine Sättigungsintensität von $I_s \approx 10^9 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$.

Im Mikrowellengerät hat die Intensität aber nur einen Wert von ca. $800 \text{ W}/(20\text{cm})^2 = 2 \text{ W/cm}^2$. Diese Intensität ist viele Größenordnungen von der Sättigungsintensität entfernt und eine Ionisation durch Multiphotonabsorption daher ausgeschlossen.

Aufgabe 11.

Exkurs zur Ernährung

Im Hinblick auf fächerübergreifenden Unterricht könnte zum Beispiel die Feststellung, dass Proteine von Mikrowellen (wie beim herkömmlichen Kochen auch) zwar verändert werden, dies aber auch bei der Verdauung passiert, ein Einstieg in die Ernährungs-Thematik sein. Im Folgenden ist eine Zusammenfassung der wesentlichen Begriffe im Zusammenhang mit der Ernährung, der Verdauung und dem Kochen gegeben. Das Thema würde sich z.B. als Referat eignen. Naheliegender wäre es, wenn ein Schüler/Schülerin mit Leistungskurs Biologie oder Chemie diesen Vortrag übernehmen würde. Da das Thema Ernährung auch in der Biologie

und Chemie der Sekundarstufe II behandelt wird, wäre eine enge Kooperation mit den Fachkollegen und –kolleginnen sinnvoll.

Definition Nährstoffe:

- Proteine
- Kohlehydrate
- Fette
- Vitamine und Mineralstoffe

Kuhmilch kommt von allen Nahrungsmitteln einer vollwertigen Nahrung am nächsten. Es beinhaltet außer ca. 90% Wasser alle wichtige Nährstoffe:

- ca. 4% Fett
- ca. 4% Proteine
- ca. 4% Milchzucker
- ca. 0,7% Mineralstoffe (vor allem Kalzium, Natrium, Kalium, Phosphat)

auch Vitamine lassen sich nachweisen. Lediglich Ballaststoffe fehlen. Ballaststoffe sind nicht abbaubare Bestandteile pflanzlicher Nahrung wie Zellstoff („Cellulose“)¹⁴. Sie regen die Darmtätigkeit an und fördern die Absonderung von Verdauungssäften.

Kohlehydrate und Fette liefern der Zelle Energie¹⁵. Proteine, Vitamine und Mineralstoffe sind Baustoffe für den Aufbau körpereigener Substanzen und Stoffe zur Steuerung der Lebensvorgänge. Der Körper kann aus Kohlehydraten Fett herstellen und in geringem Umfang umgekehrt. Diese beiden Nährstoffe enthalten die Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff. Proteine enthalten zudem Stickstoff, meist auch Schwefel, sodass sich Kohlehydrate und Fette nicht in Proteine umwandeln können.

Kohlehydrate

sind so genannte *Einfachzucker* („Monosaccharide“) oder Verbindungen daraus. Zu den Einfachzuckern gehört z. B. der Traubenzucker („Glucose“) und der Fruchtzucker („Fructose“). Bei den Einfachzuckern handelt es sich um ringförmige Moleküle mit fünf bis sechs Kohlenstoffatomen.

Verbinden sich zwei Einfachzucker, so entstehen *Doppelzucker* („Disaccharide“). Dazu gehören z.B. der Malzzucker („Maltose“), der Milchzucker („Lactose“, z.B. als Bestandteil der Kuhmilch¹⁶) und Rohrzucker¹⁷ („Saccharose“). Kocht man Saccharose mit Säure, so lassen sich Glucose und Fructose als Hydrolyseprodukte nachweisen. Die meisten Pflanzen speichern Kohlehydrate in Form von Pflanzenstärke. Sie ist z.B. in Kartoffeln, Mehlprodukten, Reis und Bananen enthalten. Pflanzenstärke, Glykogen und Cellulose sind Vielfachzucker („Polysaccharide“). Bei der so genannten „Glycolyse“ (übersetzt: „Zuckerauflösung“) wird Traubenzucker in der Zelle gespalten, wobei Energie frei wird.¹⁸

¹⁴ Cellulose ist ein Kohlehydrat und der wichtigste Baustoff der Zellwände von eukaryotischen Pflanzen. Diese bestehen zu 90% ihres Trockengewichtes aus Kohlehydraten und zu 10% aus Proteinen.

¹⁵ Die Energie, die bei der Umwandlung von einem Gramm Fett frei wird, ist mit 39 kJ mehr als doppelt so hoch wie der Brennwert der Kohlehydrate. Es wird empfohlen, ca. 50-60% des Energiebedarfs durch Kohlehydrate zu decken. Man sollte dazu aber nicht mehr Zucker essen, da zur Umwandlung das Vitamin B₁ nötig ist. Dies ist z.B. in Vollkornprodukten gleichzeitig mit Kohlehydraten enthalten.

¹⁶ Lactose ist wichtig für Säuglinge, nicht aber für Erwachsene

¹⁷ Unser Haushaltszucker ist Rohrzucker oder Rübenzucker. Aufgrund ihrer großen Süßkraft gewinnt aber auch die Fructose zunehmende Bedeutung in der Lebensmittelindustrie (z.B. in Cola-Getränken).

¹⁸ Daneben ist die Energiegewinnung durch die so genannte „Zellatmung“ möglich: Durch Oxidation bildet sich aus Zucker Kohlenstoffdioxid und Wasser. In der Zelle können Kohlehydrate damit sowohl bei Anwesenheit von Sauerstoff als auch bei Sauerstoffmangel abgebaut werden. In dieser Hinsicht unterscheiden sie sich von Fetten und Eiweißstoffen. Bei einem 400-Meter-Lauf werden beide Phasen des Kohlehydratabbaus durchlaufen.

Fett

Fett besteht aus Glycerin und drei Fettsäuren¹⁹. Fettsäuren, die nicht vom Körper selber aufgebaut werden können, werden als essentielle Fettsäuren bezeichnet und müssen mit der Nahrung zugeführt werden.

Proteine

Eiweißstoffe (Proteine) sind Kettenmoleküle aus bis zu 20 verschiedenen Aminosäuren²⁰ (z.B. Alanin und Glycin). Von den 20 Aminosäuren können 12 vom Körper selbst hergestellt werden, acht sind essentiell, müssen also mit der Nahrung zugeführt werden. Aus Nahrungsproteinen werden im Wesentlichen Körperproteine gebildet. Dazu gehören z.B. die Faserproteine Fibrin (zum Wundverschluss), sowie die Hornsubstanz in Haut, Haaren und Fingernägeln. Diese sind langgestreckte, wasserunlösliche Proteine, die Stütz- und Gerüstfunktion haben. Dazu gehört auch das Kollagen in der Haut, Knochen und Sehnen²¹. Neben diesen Gerüstsubstanzen sind auch Enzyme und Antikörper Proteine²².

Verdauung²³:

Die drei Nährstoffe Proteine, Fett und Kohlehydrate werden im Verdauungssystem von so genannten Enzymen²⁴ in ihre Bestandteile zerlegt. Diese Bestandteile gelangen durch die Darmwand ins Blut („Resorption“)²⁵. Dies geschieht entweder passiv durch Diffusion (in Richtung eines Konzentrationsgefälles), oder aber aktiv gegen ein Konzentrationsgefälle unter Energieaufwand. Im Folgenden wird skizziert, was mit diesen Nährstoffen beim Vorgang der Verdauung geschieht.

Die Verdauung der *Proteine* beginnt im Magen. Die Magensäure „denaturiert“ die Proteine, d.h. sie löst deren Raumstruktur auf. Dabei wird die natürliche Gestalt durch Aufbrechen von Bindungen der Sekundär- und Tertiärgestalt²⁶ verändert. Die Struktur wird entknäult bis die Aminosäurekette vorliegt. Denaturierte Proteine verbinden sich meist wieder („koagulieren“), da die aufgebrochenen Bindungen neue, zufällige Vernetzungen zwischen den Polypeptidketten herstellen („Gerinnung“). Durch die Denaturierung werden sie für die Enzyme leichter angreifbar und sind daher leichter verdaulich. Unter dem Einfluss des Enzyms Pepsin werden die Aminosäureketten in Bruchstücke aus mehreren Aminosäuren zerlegt. Im Zwölffingerdarm und Dünndarm wirken die Enzyme Trypsin und Erepsin aus der Bauchspeicheldrüse und spalten die Peptidketten stufenweise zu einzelnen Aminosäuren. Diese werden über die Darmwand resorbiert und über die Pfortader zur Leber transportiert. Von hier aus gelangen

¹⁹ Die häufigsten Lipide sind Fette. Cholesterin, ein Lipid, ist in tierischen Geweben ein wichtiger Baustein von Biomembranen. Diese etwa 10 nm dünnen Grenzen der menschlichen Zellen bestehen zu 40% aus Lipiden und zu 60% aus Proteinen. Daneben lassen sich noch Kohlehydrate nachweisen.

²⁰ Besteht das Molekül aus weniger als 100 Aminosäuren, so wird es nicht als Protein, sondern als Peptid bezeichnet.

²¹ Gelatine ist denaturiertes Kollagen.

²² Neben diesen Faserproteinen gibt es noch kugelförmige, wasserlösliche „globuläre“ Proteine.

²³ Der Stoffwechsel umfasst die Verdauung der Nahrung und ihre Verwertung in den Zellen. Er ist nichts anderes als eine fortlaufende chemische Reaktion.

²⁴ Es gibt etwa 2000 verschiedene Enzyme, die alle zu den Proteinen zählen. Enzyme sind meist kugelförmige Eiweißverbindungen mit charakteristisch gestalteter Oberfläche. Dies ermöglicht den Enzymen das selektive Angreifen an Bindungen nach dem „Schlüssel-Schloss-Prinzip“. Pro Minute kann ein Enzym bis zu fünf Millionen Moleküle zerlegen. Enzyme sind Katalysatoren für die Spaltung von Nährstoffen, da aufgrund der vergleichsweise geringen Körpertemperatur diese Reaktionen sonst mit viel zu geringer Rate ablaufen würde.

²⁵ Die Zerlegung ist notwendig, da nur Einfachzucker resorbiert werden können. Cellulose kann von den Verdauungssystemen der meisten Organismen nicht in Einfachzucker gespalten werden.

²⁶ Die äußere Gestalt („Tertiärstruktur“) eines Proteins resultiert aus Faltungen der Sekundärstruktur (helixförmige Verwindungen der Primärstruktur, den Aminosäureketten). Die Bindungen der Tertiärstruktur entstehen bei unpolaren Gruppen aus der van-der-Waals-Wechselwirkung, polare Bindungen sind Wasserstoffbrücken.

die Aminosäuren mit dem Blut zu den Zellen des Körpers. Hier werden sie zu körpereigenen Eiweißen abgebaut.

Die Verdauung der *Kohlehydrate* beginnt bereits im Mund. Hier wirkt ein Enzym auf die Stärke oder das Glykogen und spaltet diese Mehrfachzucker in der Regel in kürzere Einheiten, den Dextrinen²⁷. Im Zwölffingerdarm erfolgt die Spaltung zu Maltose und weiter durch das Enzym Maltase zu Glucose. Im Dünndarm wird dann nur noch die Lactose gespalten. Anschließend werden die entstandenen Einfachzucker resorbiert und über das Pfortadersystem zur Leber transportiert. Von dort gelangen sie in die verschiedenen Körperzellen, wo sie gespeichert oder abgebaut werden.

Die Verdauung von *Fett* beginnt erst im Magen, der weitaus größte Teil wird im Zwölffingerdarm zu Glycerin und Fettsäuren abgebaut.

Garen von Lebensmitteln

Im Zusammenhang mit dem Kochen ist festzuhalten, dass die meisten Proteine nicht durch die Verdauung, sondern schon während des Kochens denaturiert werden (Mörike et al., 1991, S. 8-36). Dies gilt für alle Garmethoden unter Wärmeeinwirkung²⁸.

Im Backofen wird unter Hitzeeinwirkung Stärke thermisch zersetzt, wobei braune Aromastoffe entstehen. Von zentraler Bedeutung ist dabei die so genannte „Maillard-Reaktion“, die nicht nur beim Backen, sondern generell beim Erhitzen von Lebensmitteln abläuft. Hierbei reagieren Zucker mit Amino-Gruppen von Eiweißverbindungen. Die verschiedenartigen Reaktionsprodukte bestimmen wesentlich Farbe und Aroma von Backwaren. Butter (2% Eiweiß) wird beim Erhitzen durch die Maillard-Reaktion zwischen den Proteinen und Kohlehydraten gebräunt. Bei Temperaturen oberhalb von 150° C verkohlen die Eiweiße. Die Maillard-Reaktion ist z.B. auch verantwortlich für die Entstehung der Brotkruste beim Backen, den Geruch gerösteter Kaffee- und Kakaobohnen und die goldgelbe Farbe des Bieres.

Die einzelnen Garmethoden unterscheiden sich im Temperaturbereich. Kurzbraten erfolgt bei 120-150°C, Braten bei 140-250°C im Backofen und Frittieren (Kochen im Fett) bei ca. 180°C. Dabei schwimmt das Gargut (z.B. Pommes Frites) in heißem Fett²⁹.

Tropft Fett beim Grillen direkt auf glühende Holzkohle, können bei Zersetzungstemperaturen von über 400°C krebserregende Kohlenwasserstoffe wie Benzpyren entstehen.

Fettlösliche Vitamine sind gegenüber Hitze recht beständig und werden eher durch Licht- und Sauerstoffeinflüsse zerstört. Der Verlust an Vitamin A oder Carotin beträgt beim Garen nur etwa 10-20%. Wasserlösliche Vitamine wie Vitamin C, Folsäure und Thiamin sind dagegen besonders hitzeempfindlich. Der Verlust an Vitaminen hängt dabei stark von der Gartemperatur und damit von der Garmethode ab. Die geringsten Verluste bewirkt das Dünsten im Wasserdampf im Topf oder dem Mikrowellengerät bei unter 100°C. Dagegen ist im Dampfdrucktopf (etwa 120°C) trotz der Zeitersparnis ein höherer Verlust an Vitaminen zu verzeichnen. In der folgenden Tabelle ist der Vitamin-C-Verlust für einige Gemüsesorten in Prozent aufgeführt (nach Arens-Azevedo, 1990).

²⁷ Wenn man Brot lange genug kaut, so entsteht ein süßlicher Geschmack.

²⁸ Das ist leicht bei der Herstellung von Spiegeleiern zu beobachten: Das Eiklar gerinnt bei etwa 60° Celsius und wird dadurch undurchsichtig. Eiweiße können außerdem durch Alkohol und Schwermetalle denaturiert werden. Die Gerinnung bewirkt übrigens, dass Fleisch fester wird. Einen gegensätzlichen Effekt bewirken die Kollagenmoleküle, die Fleisch zäh machen. Bei über 70°C denaturieren sie und bilden Gelatine, welche in Wasser weich wird.

²⁹ Beim Frittieren verdampft die Feuchtigkeit der Kartoffeln ins heiße Fett. Dadurch wird die Oberfläche der Pommes Frites trocken. Das Fett muss dabei aber so stark wie möglich erhitzt werden, damit sich auf den Pommes Frites möglichst rasch eine Kruste bildet und das Fett nicht eindringen kann.

| | Kochen | Dünsten | Druckgaren |
|-------------------|---------------|----------------|-------------------|
| Kartoffel | 16 | 7 | 27 |
| Sellerie | 51 | 25 | 66 |
| Spinat | 66 | 18 | 35 |
| Rosenkohl | 34 | 15 | 22 |
| Blumenkohl | 35 | 7 | 23 |

Beim Dünsten in wenig Wasser oder ohne Wasser bei Temperaturen knapp unter 100°C bleiben neben den Vitaminen außerdem auch die Geschmacks- und Farbstoffe weitestgehend erhalten.

Unter Temperatureinflüssen verändern Gewürze ihren Geschmack. Der kritische Temperaturbereich, bei dem Geschmacksveränderungen stattfinden, liegt zwischen 90°C und 100°C. Beim Kochen verflüchtigen sich vor allem die ätherischen Öle, die die wesentlichen Geschmackskomponenten darstellen.

Zum Schluss noch einige Tipps vom Fachmann für die Zubereitung eines Bratens (This-Benckhard, 2001):

Ein Braten soll erst am Ende der Garzeit gesalzen werden, denn sonst tritt Wasser aus. Das Fleisch kann nicht richtig bräunen und innen wird es trocken. Im übrigen bleibt ein Braten nicht aufgrund seiner Kruste saftig, sondern wegen der kurzen Garzeit bei möglichst hohen Temperaturen. Während des Bratens darf der Ofen nicht geöffnet werden, da dann Wasserdampf austritt. Dieser wird durch Wasser aus dem Fleisch ersetzt, sodass der Braten austrocknet.

Literatur:

1. E. W. Bauer (2000). Humanbiologie. Berlin: Cornelsen
2. Mörike, K. D.; Betz, E. & Mergenthaler, W. (1991). Biologie des Menschen. Heidelberg: Quelle und Meyer
3. M. Jäckel & K. Risch (1998). Chemie heute – Sekundarstufe 2. Hannover: Schroedel
4. H. This-Benckhard (2001). Rätsel der Kochkunst. Naturwissenschaftlich erklärt. München: Piper
5. Arens-Azevedo, U. (1990). Ernährungslehre zeitgemäß-praxisnah. Hannover: Schroedel

Zur Wirkung hochfrequenter elektromagnetischer Wellen auf den Körper

Die Fragen nach der Wirkung der Mikrowellen (und anderer hochfrequenter Strahlungsquellen) lässt sich zum Beispiel im Rahmen eines Referates behandeln. Im Folgenden ist dazu der Auszug eines Textes wiedergegeben, der sich m.E. als Grundlage eignet. (Bernhardt, J. (1991). Mensch und Umwelt: „Strahlung im Alltag“³⁰. München: GSF, S. 48-52). Eine sehr schöne Darstellung zur Wirkung niederfrequenter elektromagnetischer Wellen ist der Artikel von A. Pflug (1996). Sind elektromagnetische Felder gesundheitsschädlich? Unterricht Physik 7, Nr. 33, S. 103-106. Weitere Quellen finden sich leicht zum Beispiel im Internet.

Zu der Frage der Gefährlichkeit von Mikrowellengeräten meint das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS, Salzgitter) zusammenfassend:³¹

³⁰ Das Heft kann gegen Einsendung von DM 3.- in Briefmarken bei der GSF-Öffentlichkeitsarbeit, Ingolstädter Landstr.1, 85764 Neuherberg

³¹ http://www.bfs.de/service/faq/a_hfs.htm

Sorgen um schädliche Gesundheitswirkungen für die Benutzer sind jedoch unbegründet. Das BfS hat umfangreiche und repräsentative Messungen an Mikrowellengeräten durchgeführt. Bei allen Geräten trat in der Umgebung der Sichtblende und der Türen eine geringe Leckstrahlung auf; sie war jedoch stets äußerst gering: An üblichen Aufenthaltsorten in der Umgebung von Mikrowellengeräten liegt die noch erfassbare Strahlung um mehr als das Tausendfache unter dem Grenzwert. Gesundheitsgefahren gehen also von intakten Geräten nicht aus.

Wirkungsmechanismen häufig überlagert

Bei der Übertragung von Hochfrequenzenergie auf den Organismus werden mehrere Mechanismen wirksam. So beeinflussen die elektrischen und magnetischen Feldkomponenten der Hochfrequenzstrahlung freie Ladungsträger in Zellen und Geweben. Betroffen sind hauptsächlich Ionen wie K^+ , Na^+ und Cl^- . Dabei werden elektrische Ströme erzeugt. Auftretende Reibungsverluste führen zur Wärmebildung. Ebenso kann Hochfrequenzenergie molekulare Dipole, wie zum Beispiel Wassermoleküle, zu Schwingungsbewegungen anregen. Auch hier wird die absorbierte Energie durch Reibungsverluste vollständig in Wärme umgewandelt. Molekülveränderungen treten dabei nicht auf.

Andere Wirkungsmechanismen werden durch die elektrischen Eigenschaften der Zellen und der Zellmembranen bestimmt. Ladungsverschiebungen führen dazu, dass zwischen Zellinnen- und Zellaußenraum eine elektrische Spannung entsteht, die sich dem vorhandenen Membranruhepotential überlagert. Da sich die Zellen auch wie Dipole verhalten, können von solchen Zellen Kraftwirkungen auf Nachbarzellen ausgehen. Auch dieser Effekt ist experimentell nachweisbar.

Die drei Wirkungsmechanismen auf molekularer und mikroskopischer Ebene – Wärmewirkung, Erzeugung von elektrischen Spannungen sowie felderzeugte Kraftwirkungen – können je nach Frequenz und äußerer Feldstärke nebeneinander auftreten. Die im UKW-, Fernseh- und Mikrowellenbereich vorkommenden Frequenzen führen überwiegend zu Wärmewirkungen.

Wärmebedingte Effekte

Leistungsstarke Radaranlagen, Rundfunk- und Fernsehsender geben Hochfrequenzstrahlung mit sehr hohen Leistungsflussdichten in die unmittelbare Umgebung ab. Diese Hochfrequenzenergie bewirkt beim Auftreffen auf biologische Objekte eine Erwärmung des Körpers oder einzelner Körperteile. Bei Versuchstieren wurden als Folgewirkungen Veränderungen des Blut- oder Immunsystems, Störungen der Stoffwechselfvorgänge, Beeinflussung der Thermoregulationsvorgänge, Änderungen des Verhaltens sowie Störungen der Embryonalentwicklung beobachtet. Um diese Effekte auszulösen, muss es jedoch zu einer Erwärmung um in der Regel mindestens ein bis drei Grad Celsius über die normale Körpertemperatur kommen.

Anders als Wärmestrahlung registriert der Organismus selbst intensive Hochfrequenzstrahlung häufig nicht als Reiz. Bei den meisten Frequenzen wird die Hochfrequenzenergie in unterhalb der thermischen Temperaturrezeptoren gelegenen Hautschichten absorbiert. Die Hochfrequenzstrahlung eines Kurzwellensenders dringt beispielsweise etwa 20 Zentimeter tief in den Körper ein. Mikrowellenherde arbeiten mit Frequenzen, die eine Eindringtiefe von etwa drei bis fünf Zentimetern haben. Die in der modernen Radartechnik angewandte Hochfrequenzstrahlung mit Wellenlängen von einigen Zentimetern oder Millimetern wird hingegen bereits in der Haut absorbiert.

Hitzschlag durch Mikrowellen

Ist der Körper einer starken Hochfrequenzstrahlung ausgesetzt, so sorgt zunächst die Blutzirkulation dafür, dass die entstehende Wärme an die Körperoberfläche transportiert und dort durch Strahlung, Atmung oder Schwitzen an die Umgebung abgegeben wird. Die Erhöhung der Körpertemperatur wird insofern nicht nur von der absorbierten Energie, sondern auch durch die Mechanismen der Kühlung des Gewebes und die herrschenden Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit bestimmt. Die normale körpereigene Regulation setzt ein, wenn eine Temperaturerhöhung von etwa 0,5 Grad Celsius in den im Zwischenhirn sitzenden Regulationszentren (Hypothalamus) erreicht ist. Bei andauernder intensiver Hochfrequenzeinwirkung kann es zum Zusammenbruch des Thermoregulationssystems kommen: ein Hitzschlag ist die Folge.

Einzelne Organe werden normalerweise erst dann geschädigt, wenn die Temperaturerhöhung über längere Zeit mindestens drei bis fünf Grad Celsius beträgt. Schlecht durchblutete Organe reagieren allerdings empfindlicher. Da ihre Thermoregulationsmechanismen weniger effektiv sind, kommt es relativ schnell zu einem Hitzestau. Ein gut untersuchtes Beispiel ist die Linse des Auges. Intensive

Hochfrequenzbestrahlung im Augenbereich kann zu einer Trübung der Linse, als Katarakt oder grauer Star bezeichnet, führen. Deshalb sind die Augen bei einer Hochfrequenztherapie im Kopfbereich unbedingt vor intensiver Strahlung zu schützen.

Unverstandene Beobachtungen

Biologische Wirkungen sind aber auch unter Bedingungen beobachtet worden, die Wärmeeffekte als Ursache praktisch ausschließen. Beispielsweise hat man in Laborversuchen einen verstärkten Transport von Calcium-Ionen durch Zellmembranen gefunden. Hühnerhirngewebe war dabei einer Hochfrequenzstrahlung ausgesetzt, die mit einer niederfrequenten Strahlung überlagert war – eine Kombination, die als modulierte Strahlung bezeichnet wird. Ein anderes Beispiel betrifft Mikrowellen im Millimeterbereich. Hier sind in einem sehr eng begrenzten Frequenzbereich resonanzartige Verzögerungen und Beschleunigungen im Wachstum einer speziellen Sorte von Hefezellen festgestellt worden. Beide Beobachtungen sind bis heute nicht richtig verstanden. Es existieren zahlreiche Hypothesen, die jedoch als Grundlage für eine Risikobewertung oder für die Ableitung von Grenzwerten zum Schutz von Personen nicht ausreichen. Hier ist weitere Grundlagenforschung erforderlich.

Die Ursachen des Höreffekts

Ein anderer, ebenfalls bei so genannten nichtthermischen Intensitäten auftretender biologischer Effekt ist dagegen gut erklärbar: Gepulste oder mit Hörfrequenz modulierte Hochfrequenzstrahlung wird von manchen Menschen als Klicken oder Summen wahrgenommen. Dieser so genannte Höreffekt tritt nur innerhalb eines begrenzten Mikrowellenbereiches zwischen 300 bis 1500 Megahertz auf. Seine Ursache sind räumlich eng begrenzte Temperaturerhöhungen von etwa 1/10000 Grad Celsius im menschlichen Kopf. Die Modulation der Hochfrequenzstrahlung führt zu periodischen Ausdehnungen und Zusammenziehungen dieser „hot-spot“-Bereiche. Dadurch entsteht eine mechanische Druckwelle, die sich im Kopf ausbreitet und von der Hörschnecke des Innenohrs wahrgenommen werden kann. Aufgrund dieses Wirkungsmechanismus spricht man von einem thermoakustischen Effekt. Um solche Erscheinungen zu vermeiden, enthalten die Grenzwerte zum Schutz von Personen auch ein Limit für gepulste Mikrowellen.

Bislang nicht bestätigt werden konnten indes einzelne Berichte über Veränderungen an der Desoxyribonukleinsäure oder an Chromosomen bei nichtthermischen Intensitäten.

Dosiskonzepte für Hochfrequenzstrahlung

Vor etwa 15 Jahren wurden in den USA die Dosiskonzepte entwickelt, die heute eine quantitative Risikobewertung der Hochfrequenzstrahlung ermöglichen. Als dosimetrische Basisgrößen dienen Energie beziehungsweise Leistung, die der Körper absorbiert. Welche der beiden Größen für die Risikobewertung zugrundegelegt wird, hängt von der Dauer der Hochfrequenzbestrahlung ab.

Bei einer kurzzeitigen Exposition wird die im Körper resultierende Temperaturerhöhung allein durch die absorbierte Energie bestimmt. Erst bei Expositionsdauern von mehr als etwa sechs Minuten spielen auch Mechanismen wie Wärmeleitung, Blutzirkulation und Thermoregulation eine Rolle. Nach 15 bis 20 Minuten stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der absorbierten Hochfrequenzenergie und der abgeführten Wärmemenge ein. Für Wirkungszeiten unter sechs Minuten ist somit die absorbierte Energie für den biologischen Effekt entscheidend. Bei längeren Einwirkungszeiten ist hingegen die insgesamt absorbierte Leistung maßgeblich.

Sowohl die absorbierte Energie als auch die absorbierte Leistung werden über den gesamten Körper gemittelt und durch die Körpermasse dividiert. Ihre Einheiten sind dementsprechend Joule pro Kilogramm (J/kg) und Watt pro Kilogramm (W/kg).

Sie können im Einzelfall aber auch auf einzelne Organe oder auf 100 Gramm eines Gewebes bezogen werden. Für so genannte „nichtthermische“ Wirkungsmechanismen sind diese Größen ebenfalls anwendbar, sofern die Effekte von der im Gewebe vorhandenen Feldstärke der Hochfrequenzstrahlung abhängen.

Alle gesicherten biologischen Wirkungen hochfrequenter Strahlungen treten erst oberhalb bestimmter Dosissschwellen auf. Die Risikoanalyse kann sich daher an den unterschiedlichen Schweregraden der hervorgerufenen Wirkungen orientieren. Die ersten Grenzwertregelungen wurden unter dem Gesichtspunkt des Schutzes vor akuten Gefährdungen konzipiert. Sie berücksichtigen auch indirekte Einwirkungen, wo die Einkoppelung des Hochfrequenzfeldes in den Organismus über einen leitenden Körper erfolgt. Beispielsweise verursacht die Berührung großer metallischer Gegenstände wie Bau-

kräne, lange Drahtzäune oder Drähte, Dachrinnen oder auch Autos und Lastwagen in einem Hochfrequenzfeld unter Umständen Ströme, die über den Körper zur Erde abfließen. Diese hochfrequenten Körperströme können je nach Frequenz und Stärke Erwärmungen, Verbrennungen oder Elektroschocks verursachen.

Basisgrößen für Grenzwertfestlegungen

Man muss davon ausgehen, dass Hochfrequenzabsorptionen des ganzen Körpers von 70 bis 280 Watt je nach Expositionsbedingung und Gesundheitszustand bei einer Expositionsdauer von einer Stunde Gesundheitseffekte verursachen. Hierzu gehören zum Beispiel Überlastung der Thermoregulation und verminderte Ausdauer. Durch längere Exposition über Tage und Wochen sind Schäden zu erwarten. In den meisten Ländern ist deshalb eine absorbierte spezifische Leistung von 0,4 Watt pro Kilogramm Körpergewicht, gemittelt über den ganzen Körper und gemittelt über sechs Minuten-Intervalle, Basisgröße für die Grenzwertfestlegung.

Sicherheitsfaktoren ergänzen Basisgröße

Diese Basisgröße, die bereits deutlich unter dem oben erläuterten Schwellenwert für das Auftreten von gesundheitsschädlichen Effekten liegt, wird durch die Einführung von Sicherheitsfaktoren ergänzt. Bei den davon abgeleiteten Grenzwerten für die Leistungsflussdichte der Strahlung sowie die elektrischen und magnetischen Feldstärken handelt es sich um Größen, die mit einem Dosimeter gemessen werden können. Sicherheitsfaktoren können für unterschiedliche Populationen verschieden angesetzt werden, um beispielsweise die größere Streubreite von Alter und Gesundheitsstatus innerhalb der Allgemeinbevölkerung im Vergleich zu beruflich Exponierten zu berücksichtigen. Der Wert von 0,4 Watt pro Kilogramm liegt auch den neu überarbeiteten DIN-VDE-Grenzwerten in der Bundesrepublik zugrunde. Für Wohngebiete und Gesellschaftsbauten, für einzelne Wohngrundstücke sowie Anlagen und Einrichtungen für Sport, Erholung und Freizeit wird darin unter dem Aspekt der Gesundheitsvorsorge ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von 5 eingeführt. Diese Absenkung berücksichtigt die Schutzbedürftigkeit besonders empfindlicher Bevölkerungsgruppen. Der in den neuen DIN-VDE-Richtlinien vorgesehene Höchstwert für die Allgemeinbevölkerung liegt damit bei etwa 0,1 Watt pro Kilogramm Körpergewicht. Selbst unter ungünstigen Expositionsbedingungen übersteigt bei absorbierten Hochfrequenzleistungen dieser Größenordnung die Temperaturerhöhung in keinem Körperteil den Wert von 0,5 Grad Celsius. Auch wahrnehmbare Hochfrequenzeinwirkungen, die unterhalb des Schwellenbereiches für gesundheitliche Effekte liegen, werden durch den neuen Höchstwert vermieden. Eine absorbierte Leistung von 0,1 Watt pro Kilogramm entspricht etwa zehn Prozent des körpereigenen Grundumsatzes. Besorgnisse über gesundheitlich nachteilige „nichtthermische Wirkungen“ sind nach dem derzeitigen Stand der Forschung ebenfalls nicht begründet.

Modifikationen durch neue Forschungsergebnisse

Grenzwerte werden von Zeit zu Zeit überprüft und können – wenn neue Erkenntnisse vorliegen – geändert werden. Im Laufe der letzten zwanzig Jahre sind aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse die Grenzwerte für Hochfrequenzstrahlung mehrmals modifiziert worden. Weitere Modifikationen können sich in Zukunft ergeben,

- wenn bessere Einsichten über die Auswirkungen geringer Temperaturunterschiede innerhalb des Körpers vorliegen, die auf ungleichförmige Hochfrequenzabsorption zurückzuführen sind,
- wenn die unter Laborbedingungen frequenz- oder modulationsabhängigen Wirkungen an Zellmembranen verstanden sind und ihre Bedeutung für den Gesundheitsschutz beim Menschen untersucht ist.

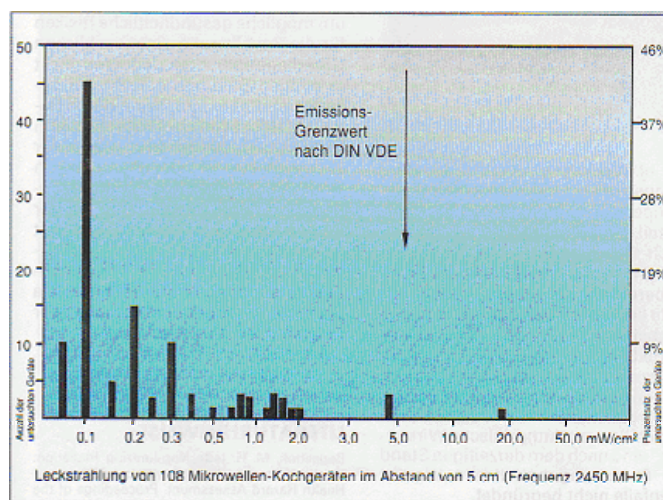
Auf internationaler Ebene wurden die Gesundheitskriterien bei Einwirkung von Radio- und Mikrowellen während der letzten zwei Jahre erneut überarbeitet. In Zusammenarbeit mit den Umweltprogrammen der Vereinten Nationen und mit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) haben internationale Expertengremien hierfür neue experimentelle und theoretische Untersuchungen geprüft und hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Gesundheitsschutz bewertet. Die Ergebnisse werden 1992 in einem WHO-Dokument veröffentlicht. Einem Vergleich dieser dem aktuellen Stand der Forschung entsprechenden Kriterien mit den in unseren Häusern und Wohnungen auftretenden Intensitäten von Radio- und Mikrowellen zeigt, dass Alarmrufe um mögliche gesundheitliche Risiken für die Bevölkerung einer sachlichen Grundlage entbehren. Jedoch erreicht in einigen Ballungsgebieten die gesamte mess-

bare Immission durch Radio- und Mikrowellen bereits etwa zehn Prozent des niedrigen Grenzwertes für Wohngebiete. Bei der Planung von Großeinrichtungen, wie Rundfunksendern und Radaranlagen, und bei der Entwicklung neuer Technologien mit Anwendungen hochfrequenter Energie ist aus Gründen des vorbeugenden Gesundheitsschutzes mehr als bisher eine Verminderung unnötiger Expositionen anzustreben.

Gefährliche Mikrowellenherde?

Zur Frage der Nährwertveränderungen hat das Institut für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes (jetzt Bundesamt für Strahlenschutz) mehrere hundert experimentelle Forschungsarbeiten über Aspekte der Mikrowellenbehandlung von Lebensmitteln tierischer und pflanzlicher Herkunft wie Fleisch, Fleischwaren, Gemüse, Obst und Obsterzeugnisse, Getreide- und Kartoffelerzeugnisse, Speisen gemischter Zusammensetzung und Getränke ausgewertet. Den Untersuchungen lagen als Maßstab Veränderungen zugrunde, wie sie bei konventionellen Erhitzungsverfahren auftreten. Die betrachteten Lebensmittelmerkmale waren dabei Proteine, Aminosäuren, Fette, Fettbegleitstoffe, Kohlenhydrate, Wasser- und Gewichtsverluste, Mineralstoffe, Spurenelemente, Vitamine und Provitamine, Enzyme, toxische Stoffe sowie geschmackliche Veränderungen. Schon einfache Geschmacksprüfungen lassen erkennen, dass sich die im Vergleich zu herkömmlichen Methoden kürzere Erhitzungszeit und die bei der Mikrowellenbehandlung andersartige Temperaturverteilung auf die Lebensmittel auswirken. Die Nährwertveränderungen liegen jedoch innerhalb der Norm, die auch für die konventionelle Erwärmung zutrifft. Dies bedeutet, dass die Mikrowellenbehandlung von Lebensmitteln nicht schädlicher als konventionelle Zubereitungsverfahren ist. Die Gebrauchsanweisungen für die Geräte sind jedoch genau zu beachten. So führt zu rasche Erhitzung inhomogener Nahrungsmittel wie beispielsweise Geflügel unter Umständen zu einer Ungleichmäßigen Temperaturverteilung. Durch Luft einschlüsse oder Knochen werden einzelne Bereich nur ungenügend erwärmt. Salmonellenvergiftungen können die Folge sein: die Erreger werden erst bei Temperaturen über 70° Celsius zuverlässig abgetötet. Auch die Zubereitung von Babyflaschen sollte sehr sorgfältig erfolgen, um eine gleichmäßige Erwärmung von Inhalt und Behältnis zu erzielen.

Der Personenschutz beim Betrieb von Mikrowellenherden wird durch verschiedene Sicherheitsvorkehrungen und durch Abschirmmaßnahmen gewährleistet. Als Grenzwert für die Leckstrahlung in fünf Zentimeter Abstand sind fünf Milliwatt pro Quadratcentimeter festgelegt. Von technisch einwandfreien Geräten gehen insofern weder Gefahren für Schwangere und Kleinkinder aus, noch besteht ein erhöhtes Krebsrisiko. Herzschrittmarkerträger sollten allerdings einen Sicherheitsabstand von 30 Zentimetern zum Gerät einhalten, da der Mikrowellen-Netztransformator bei einigen Schrittmachern vorübergehende Funktionsstörungen verursachen kann. Werden an älteren oder sehr intensiv benutzten Geräten Verschleißerscheinungen festgestellt, ist es ratsam, eine Überprüfung durch die Herstellerfirma oder den Fachhandel vornehmen zu lassen. Dies gilt insbesondere für Veränderungen und Defekte an der Gerätetür.



Über einhundert Mikrowellenherde in Privathaushalten wurden 1984 von Mitarbeitern des Instituts für Strahlen-

hygiene auf ihre Leckstrahlung untersucht. Bei 90% der Geräte lagen die Messwerte in fünf Zentimetern Abstand unter 1 Milliwatt pro Quadratcentimeter. Die deutliche Überschreitung des Gerätegrenzwertes von 5 Milliwatt pro Quadratcentimeter kam durch ein defektes Gerät zustande, das bereits zehn Jahre in Betrieb war. Der „Oldtimer“ wies eine Leckstrahlung von 17 Milliwatt pro Quadratcentimeter auf. An den üblichen Aufenthaltsplätzen der Hausfrauen und –männer ist die noch messbare Mikrowellenstrahlung auf weniger als 1 bis 5 Prozent der an der Oberfläche der Geräte feststellbaren Werte abgesunken. Damit wird der international empfohlene Grenzwert zum Schutz von Personen von 1 Milliwatt pro Quadratcentimeter bei dieser Frequenz hinreichend weit unterschritten.

Fachliche Hinweise

Resonanz beim Mikrowellenofen

Befindet sich ein eindimensionales System in Resonanz, so 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. *Dies gilt aber nur für eindimensionale Systeme und ist beim Mikrowellenofen als dreidimensionalem Resonanzkörper nicht mehr der Fall.* Es ist also nicht so, dass Vielfache der halben Vakuumwellenlänge $\lambda=c/f$ in jede der drei Raumrichtungen „passen“ müssten. Dann könnten nur diejenigen Mikrowellenöfen betrieben werden, deren Maße in jeder Richtung Vielfache von 6,1 cm betragen. Die Resonanz würde aber auch in diesem Fall sofort dadurch zerstört, dass Speisen im Mikrowellenofen die Feldstärkeverteilungen stark verändern. Diese Überlegung hat in der didaktischen Literatur für Verwirrung gesorgt³². Im folgenden soll nun in aller Kürze die Verhältnisse beim Mikrowellenofen geklärt werden.

Das elektrische Feld im Mikrowellenofen genügt der Wellengleichung, die direkt aus den maxwellschen Gleichungen abgeleitet werden kann:

$$\left(\Delta - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \vec{E}(\vec{r}, t) = 0 \quad (1)$$

Dabei ist Δ der Laplace-Operator (in kartesischen Koordinaten: $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$)

Der folgende Ansatz löst diese partielle Differentialgleichung:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \cdot \exp \left[2\pi i \left(f \cdot t - \frac{x}{\lambda_x} - \frac{y}{\lambda_y} - \frac{z}{\lambda_z} \right) \right] \quad (2)$$

unter der Bedingung, dass

$$\left(\frac{1}{\lambda_x} \right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_y} \right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_z} \right)^2 = \left(\frac{1}{\lambda_0} \right)^2 \quad (3)$$

wie man durch Einsetzen in die Wellengleichung leicht zeigt. Die „Vakuumwellenlänge“ λ_0 ist dabei die Wellenlänge, mit der sich die elektromagnetische Welle im Vakuum ausbreitet, und ist durch $\lambda_0 = \frac{c}{f}$ gegeben. Sie beträgt beim Mikrowellenofen $\lambda_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1} / 2450$

MHz=12,2 cm.

Gleichzeitig müssen die folgenden Randbedingungen erfüllt sein:

$$\lambda_x = \frac{2L_x}{l}; \lambda_y = \frac{2L_y}{m}; \lambda_z = \frac{2L_z}{n} \quad (4)$$

Dabei sind L_x , L_y und L_z die Ausdehnungen des quaderförmigen Mikrowellenhohlraums in den entsprechenden Richtungen und l , m und n natürliche Zahlen. Dies folgt aus der Forderung, dass die tangentialen Komponenten des elektrischen Feldes an die (als unendlich gut

³² vgl. z.B. Stauffer, R. H. (1997). Finding the Speed of Light with Marshmallows – A Take-Home Lab. The Physics Teacher Vol. 35, April, S. 231

leitend angenommenen) Metallwände verschwinden³³. Das elektrische Feld hat also Knoten an den Wänden des Mikrowellenofens.

In einer Dimension (z.B. in z-Richtung), sind L_x und L_y gewissermaßen unendlich groß. Dann reduziert sich Gleichung (3) zu $\lambda_z = \lambda_0$ und man erhält das bekannte Ergebnis, dass bei einem eindimensionalen System (z.B. ein Gummiseil) ein Vielfaches der halben Wellenlänge $\lambda_0 = c/f$ auf die Länge L_z „passt“. Man erhält für $n=1$ wie gewohnt die Grundwelle und für $n=2, 3, \dots$ die entsprechenden Oberwellen.

Welche Kombinationen von l , m und n sind im Mikrowellenofen möglich? Dazu müssen diejenigen ganzen Zahlen gefunden werden, die Gleichungen (3) und (4) lösen. Für das Mikrowellengerät 8018 der Firma Quelle gilt $L_x=29\text{cm}$, $L_y=28\text{cm}$ und $L_z=19\text{cm}$. Einige mögliche Kombinationen, bei denen das Ergebnis in der Nähe von $\lambda_0=12,2\text{ cm}$ liegt, sind in der folgenden Tabelle angegeben:

| l | m | n | $\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_z}\right)^2}}$ in cm |
|----------|----------|----------|---|
| 0 | 1 | 3 | 12,35 |
| 3 | 2 | 2 | 12,20 |
| 4 | 2 | 1 | 12,20 |
| 3 | 3 | 1 | 12,66 |

Im Mikrowellengerät werden in der Regel nicht nur eine Eigenschwingung, sondern gleichzeitig mehrere angeregt. Die Zahl hängt davon ab, wie breitbandig das Magnetron emittiert (relative Breite ca. 1%) und wie scharf die Resonanzen des Hohlraums sind (dies hängt von der Dämpfung ab, also der Absorption der Mikrowelle in den Wänden des Mikrowellenofens und der Speise). Die im Versuch mit dem Thermofax-Papier beobachtete Intensitätsverteilung ist also in der Regel recht kompliziert. Insbesondere ist der Abstand der Intensitätsmaxima in aller Regel nicht gleich der halben Vakuumwellenlänge. Hinzu kommt, dass die Feldverteilung durch eine Füllung des Ofens in der Regel stark verändert wird. Denn die Wellen werden von den Speisen absorbiert, teilweise reflektiert, gebrochen und gebeugt. Es macht also keinen Sinn aus dem Ergebnis des Versuchs quantitative Schlüsse über die Feldstärke zu ziehen. Auf was es vielmehr ankommt ist, dass hier offensichtlich ein Interferenzeffekt vorliegt. Der führt dazu, dass Speisen unterschiedlich stark erwärmt werden. Für die Schule genügt dann die Diskussion eindimensionaler Systeme und der Hinweis, dass die Verhältnisse in drei Dimensionen so komplex sind, dass sie im Rahmen der schulischen Möglichkeit der quantitativen Analyse nicht zugänglich sind.

Lösung der Aufgaben

1. Trifft es zu, dass Speisen schneller abkühlen, wenn sie im Mikrowellengerät erhitzt wurden („Wenn es sich schnell erwärmt, kühlt es auch schnell ab“)?

Die Abkühlungsdauer von Speisen hängt nicht davon ab, auf welche Art sie erwärmt wurden, sondern nur von der Temperaturverteilung zu Beginn des Abkühlungsprozesses.

2. a.) Warum explodieren Eier, wenn man sie lange genug im Mikrowellengerät erhitzt?

Wenn die Flüssigkeit im Inneren verdampft, dann führt der erhöhte Druck zum Platzen der Eier.

³³ eine genauere Diskussion findet sich z.B. in Fließbach, T. (1997). Elektrodynamik. Heidelberg: Spektrum

b.) Warum sollte man Speisen nie in geschlossenen Gefäßen erwärmen?

In allen geschlossenen Gefäßen kann der Dampfdruck diese zum Platzen bringen.

c.) Mikrowellenöfen eignen sich bestens zur Herstellung von Popkorn. Dazu bringt man Maiskörner in das Mikrowellengerät. Erklären Sie, warum diese platzen.

Erhitzt man Maiskörner im Mikrowellengerät, so bringt der Dampfdruck im Kern die Hülle zum Platzen.

3. a.) Warum werden einige Lebensmittel im Mikrowellengerät rasch heiß, andere aber nicht?

Mikrowellen werden hauptsächlich durch Wassermoleküle absorbiert. Lebensmittel mit geringem Wassergehalt erwärmen sich daher nur wenig. Natürlich spielen in zweiter Linie auch andere Faktoren, wie z.B. die Wärmekapazität des Gargutes eine Rolle.

b.) Warum dauert es relativ lange, bis Tiefgefrorenes aufgetaut ist?

Da die Wassermoleküle im Eis fest an ihren Platz gebunden sind, können sie durch das elektrische Feld der Mikrowelle nicht in Rotation versetzt werden. Eis taut daher nur langsam auf.

c.) Warum wird Fleisch im Mikrowellenofen nicht braun?

Das Erhitzen im Mikrowellengerät ist ein Prozess, der sich selbst begrenzt: wenn das Wasser verdampft ist, so wird es nicht mehr wärmer. Die Rotationsenergie wird also nicht mehr in kinetische Energie der Translation, die proportional zur Temperatur ist, umgewandelt.

d.) Warum bleiben die Wände des Geräts kalt?

In einer dünnen Metallschicht (ca. 1µm) fließt zwar ein elektrischer Strom, der durch das elektrische Wechselfeld der Mikrowelle verursacht wird. Dieser Strom führt zu einer Erwärmung dieser dünnen Schicht. Da sich diese Wärme aber durch Wärmeleitung rasch an das relativ große Metallvolumen weitergeleitet wird, kommt es insgesamt nicht zu einer nennenswerten Erwärmung.

4. Warum braucht man zur Zubereitung von Speisen im Mikrowellengerät kein Fett?

Das Fett dient beim konventionellen Braten dazu, die Wärme von der Pfanne möglichst effektiv an den Braten zu übertragen. Dort wird sie durch Wärmeleitung in das Innere des Bratens übertragen. Die Mikrowellen übertragen ihre Energie dagegen direkt ins Brateninnere.

5. Warum können langwellige Radiowellen nicht ins Innere eines Autos gelangen, Mikrowellen (z.B. Radar!) aber schon?

Ist die Wellenlänge groß gegen den Durchmesser einer Öffnung, so können die Wellen nicht eindringen.

6. a.) Warum dauert die Erwärmung von Speisen in Aluminiumbehältern länger als in Plastikbehältern?

Aluminium reflektiert die Mikrowellen überwiegend.

b.) Manche Mikrowellengerichte haben auf der Oberfläche eine Bräunungshilfe, die im wesentlichen aus einer sehr dünnen Metallschicht besteht. Warum wird diese Schicht so heiß?

In der dünnen Schicht fließt elektrischer Strom. Dadurch wird sie erhitzt.

7. Die Intensität I von Mikrowellen nimmt wie die von Licht oder Röntgenstrahlung beim Eindringen in einen Körper ungefähr exponentiell mit der Tiefe ab (vgl. Abb. 7³⁴):

$I(x) = I_0 \cdot \exp(-x/d)$. d wird als Eindringtiefe bezeichnet und gibt die Entfernung an, nach der die Intensität auf den e-ten Teil der Anfangsintensität I_0 gefallen ist.

³⁴ Die Abbildung stammt aus *Nimtz, G.: Mikrowellen. BI Wissenschaftsverlag 1990*

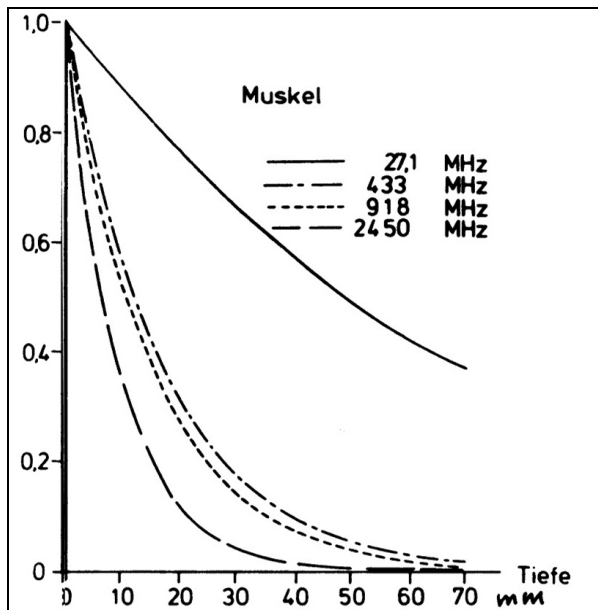


Abb. 7: Exponentielle Absorption im Muskel. Auf der Hochwertachse ist das Verhältnis I/I_0 angegeben.

a.) Wie ändert sich die Eindringtiefe mit der verwendeten Mikrowellenfrequenz?

Je höher die Frequenz, desto geringer die Eindringtiefe.

b.) Schätzen Sie die Eindringtiefe für die im Mikrowellenofen verwendete Frequenz.

Die Eindringtiefe beträgt etwa 10 mm. (Konstruktion: Die Tangente an den Graphen in $x=0$ schneidet die x -Achse bei etwa 10 mm.)

c.) Auch auf sehr starke Mikrowellenstrahlung sprechen die Temperatursensoren der Haut nicht rasch genug an. Warum ist dies so?

Da die Mikrowellen überwiegend nicht in der Haut absorbiert werden, können die Temperatursensoren die absorbierte Energie nicht vollständig registrieren.

d.) Wie oft muss die hin- und her reflektierte Mikrowelle ein Schnitzel durchdringen, damit ihre Intensität auf unter 1 Promille geschwächt wird? Wie lange benötigt sie dafür?

Ein Schnitzel ist ungefähr 1 cm dick. Die Mikrowelle muss das Schnitzel n mal durchdringen, damit seine Intensität auf 10^{-3} geschwächt wird:

$$I/I_0 = 0,001 = \exp(-n \cdot 1\text{cm}/10\text{mm}) \rightarrow n = 1\text{cm} \cdot \ln 10^{-3} = 7.$$

Die Länge eines Mikrowellengeräts beträgt ca. 30 cm. Die Laufzeit ist also $7 \cdot 0,3\text{m} / (3 \cdot 10^8\text{m/s}) = 7\text{ ns}$.

In der Rechnung wurde nicht berücksichtigt, dass ein Teil der Strahlung jeweils an der Oberfläche reflektiert wird. Der Anteil der reflektierten Intensität beträgt im Verhältnis zur einfallenden Intensität bei Wasser und Rindfleisch jeweils etwa 60%. Damit gibt das Ergebnis nur die Größenordnung der Anzahl der Transmissionen an.

8. Klären Sie die folgenden Teilaufgaben mit Hilfe von Abb. 8³⁰.

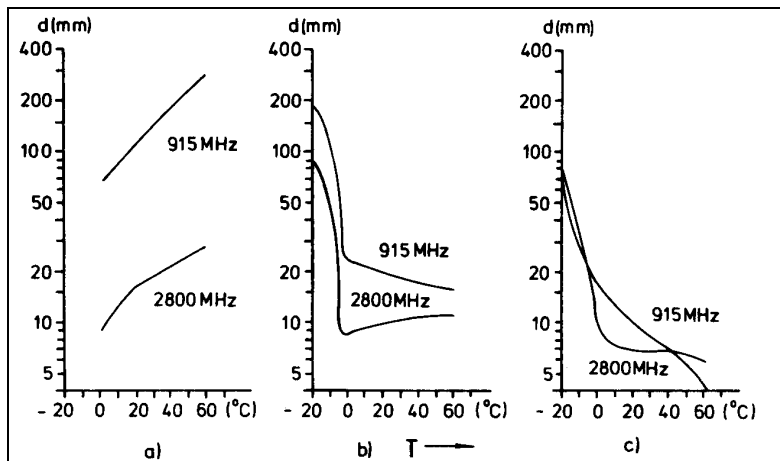


Abb. 8: Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Temperatur.

a) Wasser, b) gekochtes Rindfleisch und c) Bratensoße

a.) Welche der Graphen eignen sich zur Interpretation der Vorgänge im Mikrowellenofen am ehesten?

Die Graphen für 2800 MHz, da diese Frequenz relativ nahe bei 2,45 GHz liegt

b.) Verifizieren Sie anhand Abb. 7 folgende Aussage: Die Temperaturzunahme im Inneren eines mit Wasser gefüllten Topfes ist am Anfang des Heizvorgangs geringer als am Ende. Gilt dies auch für Rindfleisch?

Die Eindringtiefe nimmt für Wasser nach Abb. 7a) mit der Temperatur zu, sodass das Topfinnere bei höherer Temperatur effektiver geheizt wird. Bei Rindfleisch hängt die Eindringtiefe dagegen nur wenig von der Temperatur ab.

c.) Wie lässt sich die starke Abnahme der Eindringtiefe für Rindfleisch um Null Grad Celsius erklären?

Ist Wasser gefroren, so ist die Absorption schwach, da die Wassermoleküle nicht mehr rotieren können. Die Eindringtiefe ist daher entsprechend groß.

d.) Worauf könnte das unterschiedliche Absorptionsverhalten von Wasser und Bratensoße zurückzuführen sein?

Möglicherweise an den in der Soße gelösten Salzionen, die durch das elektrische Wechselfeld beschleunigt werden und durch Stöße mit den Bestandteilen der Soße diese Energie in Form von Wärme abgeben.

e.) Schätzen Sie mit Hilfe des Absorptionsgesetzes (vgl. Aufgabe 7) die relative Intensität der Mikrowellenstrahlung in einer Bratentiefe von 10 cm in Prozent der Anfangsintensität.

$$I/I_0 = \exp(-10\text{cm}/10\text{mm}) = 0,005\%$$

9. a.) Wozu dient der Drehteller im Mikrowellenofen?

Durch die Drehung sollen möglichst alle Teile der Speise durch Stellen hoher Intensität („hot spots“) des elektrischen Feldes geführt werden.

b.) Wie groß ist der Abstand zweier Knoten einer eindimensionalen stehenden Welle der Frequenz 2,45 GHz?

$\lambda = c/f = 12,2 \text{ cm}$. Der Knotenabstand ist halb so groß, beträgt also ca. 6 cm. Dies gilt nicht mehr exakt für ein dreidimensionales System wie das Mikrowellengerät. Trotzdem stimmt die Größenordnung mit den tatsächlichen Abständen etwa überein.

c.) Um zu vermeiden, dass Speisen an manchen Stellen kalt bleiben, ist es nahe liegend, die Frequenz der Mikrowellen zu erhöhen. Welche Frequenzen erscheinen dafür sinnvoll? Warum wird dies trotzdem nicht gemacht? Was könnte alternativ getan werden?

Sinnvoll wären Wellenlängen, die kleiner als der Durchmesser der zu erhitzenden Speise ist. Für eine Wellenlänge von 1 cm sind Frequenzen von $f=c/\lambda=30$ GHz notwendig. Bei dieser Frequenz absorbiert Wasser aber so stark, dass die Mikrowellen bereits in einer dünnen Oberflächenschicht z.B. von Fleisch absorbiert werden. Dadurch geht der Vorteil gegenüber dem herkömmlichen Kochen verloren, denn dort kann Wärme ebenfalls nur über die Oberfläche zugeführt werden.

Außerdem sind viele Mikrowellenfrequenzen z.B. für die Telekommunikation reserviert und könne daher nicht zu Erhitzen verwendet werden.

Alternativ könnte man

- ein Flügelrad aus Metall im Garraum rotieren lassen, welches die Mikrowellen überall hin reflektiert.
- mit Magnetrons verschiedener Frequenz erhitzen, sodass „cold spots“ bei der einen Frequenz durch „hot spots“ der anderen Frequenz kompensiert werden.
- Das Gargut im Garraum heben und senken. Dadurch „sieht“ es verschiedene Verteilungen des elektrischen Feldes und wird gleichmäßiger erwärmt.
- Eine Wand des Geräts periodisch hin und zurückschieben, sodass sich das Feldmuster im Inneren verändert.

10. a.) Welche Größenordnung müssen Kapazität und Induktivität des Schwingkreises im Magnetron haben, damit die erzeugte Schwingung wie gewünscht im Bereich von einigen GHz liegt?

Nach $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ gilt bei einer Frequenz von $f=2,45$ GHz $L \cdot C = 4 \cdot 10^{-21} \text{ s}^2$. Eine mögliche Kombination wäre $C=2$ pF und $L=2$ nH.

b.) Welche Auswirkung hat es, wenn der Hersteller des Magnetrons diese etwas größer als normal herstellt?

Größere Dimensionen des Schwingkreises bewirken eine Zunahme sowohl von L als auch von C . Dies führt zu einer Reduktion der Eigenfrequenz des Schwingkreises.

11. a.) Wie groß ist die Energie eines Photons der Strahlung im Mikrowellenofen? Erklären Sie damit, warum Mikrowellenstrahlung nichtionisierende Strahlung ist.

$$E = hf = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,45 \text{ GHz} = 1,6 \cdot 10^{-24} \text{ J} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ eV}.$$

Da die chemische Bindungsenergie typischerweise im Bereich von 1-10eV liegt, ist ein Aufbrechen einer Bindung nicht möglich.

b.) Schätzen Sie, wie viele Photonen pro Sekunde von einem Mikrowellenofen erzeugt werden. Machen Sie sich anhand des Ergebnisses klar, warum die Quantennatur der Mikrowellenstrahlung normalerweise nicht unmittelbar zu erkennen ist.

$P/(hf) = 1 \text{ kW} / 1,6 \cdot 10^{-24} \text{ J} = 10^{26}$ Photonen/Sekunde. Diese Zahl ist so groß, dass einzelne Photonen nicht direkt eine Rolle spielen.

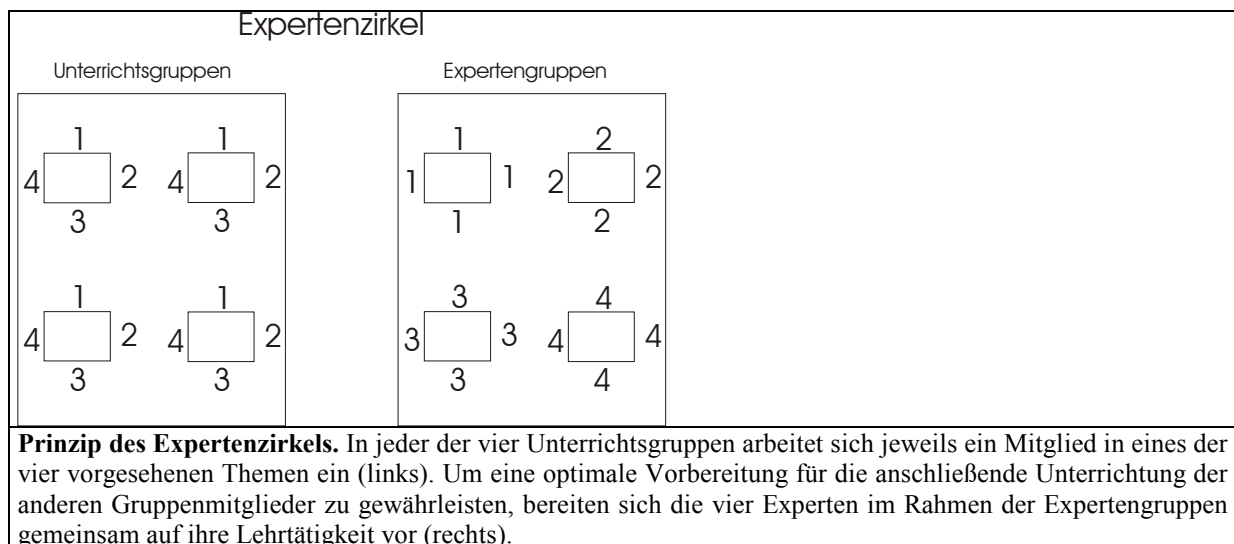
Methodische Alternative: Expertenzirkel

Einzelne Aspekte können auch im Rahmen der so genannten Puzzle-Methode (engl.: jigsaw), welche im Folgenden als Expertenzirkel bezeichnet wird, erarbeitet werden. Eine kurze Einführung in diese Methode mit weiter führenden Literaturhinweisen wurde von A. Frey-Eiling und K. Frey verfasst³⁵. Befinden sich in der Klasse 16 Schülerinnen und Schüler, so werden vier so genannte Unterrichtsgruppen gebildet. In jeder dieser Unterrichtsgruppen arbeitet sich jeweils ein Mitglied anhand von vorbereiteten Materialien und Versuchen in eines der folgenden vier Themen ein, und wird so zum Experten für dieses Teilgebiet:

1. Wozu dient das Metallgitter an der Tür des Mikrowellenofens?
2. Wozu dient der Drehteller im Mikrowellenofen?
3. Ist ein Mikrowellenofen Energie sparend?
4. Wie werden im Mikrowellenofen die hohen Frequenzen erzeugt?

Die entsprechenden Arbeitsaufträge finden sich auf den folgenden Seiten.

Die Einarbeitung findet innerhalb von vier so genannten Expertengruppen statt, um einen engen Austausch der Experten untereinander zu ermöglichen und so eine möglichst optimale Einarbeitung zu gewährleisten (vgl. Abbildung).



Anschließend unterrichten die Experten in ihrer Unterrichtsgruppe die drei anderen Mitglieder. Mit diesem System ist gewährleistet, dass jede Schülerinnen und jeder Schüler selber Experte/Expertin in einem der vier Themen ist und in jedem der restlichen drei Themen von einem anderen Experten unterrichtet wurde³⁶.

Der Vorschlag liefert somit einen Beitrag zur Entwicklung von Aufgaben für die Kooperation von Schülerinnen und Schülern, einem wichtigen Anliegen der BLK-Projektgruppe „Innovationen im Bildungswesen“ [...]. Kooperative Lernformen können fachliche Lernprozesse unter Umständen fördern. Denn die Schülerinnen und Schüler werden dazu veranlasst, Gedachtes sprachlich verständlich zu fassen, zu argumentieren und andere Perspektiven einzunehmen. Für die Motivierung des Lernens spielt die soziale Einbindung durch Kooperation eine wichtige Rolle.

³⁵ vgl. z.B. <http://www.educeth.ch/didaktik/puzzle/docs/puzzle.pdf>

³⁶ Weicht die Klassengröße von der angegebenen Zahl ab, so können in einer Unterrichtsgruppe z.B. auch zwei Experten unterrichten. Hinweise für die Gruppenbildung finden sich im Internet (<http://www.jigsawhelper.net/jigsawgroupinghelper/groupsizchart.html>).