

Experimente mit der Mikrowelle

Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Magisters
an der Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Andreas JANNACH

am Institut für Experimentalphysik
Technische Universität Graz

Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing.
Dr.techn. Gernot Pottlacher

Graz, April 2018

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit „Experimente mit der Mikrowelle“ befasst sich mit Demonstrationsexperimenten, welche nicht nur im Themenbereich „elektromagnetische Strahlung“ eingesetzt werden können. Ebenso sind Beschreibungen von physikalischen Phänomenen aus weiteren Bereichen wie Wärmelehre, Materialwissenschaften bis hin zur Kernphysik möglich. Der erste Teil der Arbeit beinhaltet neben einer fachdidaktischen Betrachtung zum Thema „Experimente im Unterricht“, eine theoretische Beschreibung zur Funktion von Mikrowellen. Es werden hier neben geschichtlichen Aspekten auch Mythen unter die Lupe genommen, welche sich um den weitverbreiteten Küchenhelfer ranken. Im zweiten experimentellen Teil des Werkes findet sich eine Auflistung von Experimenten, welche mit Anleitung zur Durchführung und dem dazugehörigen theoretischen Hintergrund versehen sind. Eine Besonderheit stellen die beigelegten Bilder dar, welche mit einer speziell angefertigten Kamera gemacht wurden. Sie gewähren dem Beobachter einen direkten Blick auf die Vorgänge aus dem Inneren des Garraumes, welcher durch die Strahlungsabschirmung nach außen, normalerweise verwehrt wird. Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Leserinnen und Lesern die Vielfalt von Phänomenen zu zeigen, die man durch Experimentieren mit einer handelsüblichen Mikrowelle in den Unterricht miteinfließen lassen kann.

Abstract

This diploma thesis under the headline ‘experiments with a microwave oven’ focuses on demonstrating scientific experiments which can be used in various contexts – not only for the subject of electromagnetic waves. Furthermore, descriptions of physical phenomena in the field of thermodynamics, material sciences and nuclear physics are included. The first part of the thesis contains a technical methodological explanation to the topic ‘experiments in class’ as well as a theoretical description of the function of microwave ovens. As well as historical aspects you will also find various ‘legends’ about this popular kitchen helper. In the second experimental part of the diploma thesis you will also find, alongside the necessary theoretical background, several experiments with detailed descriptions of how to perform these scientific experiments. Particular features are the pictures included which were taken with a customized camera. This allows the audience a direct view of the processes inside the microwave oven which are normally not possible due to the external shield. The aim of this diploma thesis is to demonstrate to the reader the variety of phenomena which can be demonstrated through experiments with a common microwave in order to easily include them for educational purpose in class.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die vorliegende Fassung entspricht der eingereichten, elektronischen Version.

Graz, April 2018

Unterschrift:

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinen Eltern danken. Sie ermöglichten mir nicht nur das Studium, sondern haben mich in allen Lebenslagen unterstützt und sind bei schwierigen und wichtigen Entscheidungen immer hinter mir gestanden.

Ein besonderer Dank gilt meinen Schwestern, der restlichen Familie, meinen Freunden und Studienkollegen, die für mich immer ein offenes Ohr hatten, mich motivierten und mir tatkräftig zur Seite standen. Vielen Dank, dass ihr immer für mich da seid.

Ein großes Dankeschön gilt Herrn Ao. Univ. – Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher für die herausragende Betreuung und für die Idee dieser Diplomarbeit. Er inspiriert mit seinen Experimenten nicht nur Studenten wie mich, sondern spricht in seiner alljährlichen Weihnachtsvorlesung ein breites Publikum an und vermittelt in seiner besonderen Art und Weise, dass Physik für jedermann interessant sein kann.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Fachdidaktischer Zugang.....	2
2.2	Experimente im Physikunterricht.....	2
2.3	Verankerung im Lehrplan.....	3
3.	Die Mikrowelle (Mikrowellenofen).....	5
3.1	Geschichtliches.....	5
3.1	Funktion eines Mikrowellenherdes.....	9
	Aufbau.....	9
	Wie entstehen Mikrowellen?.....	10
	Technische Details.....	12
3.2	Elektromagnetische Wellen und ihre Wirkung.....	15
	Elektromagnetische Wellen.....	15
	Eigenschaften von Mikrowellen.....	18
	Alles dreht sich um das Wasser.....	19
3.3	Mythen und Geschichten.....	20
	Sind Lebensmittel, welche in der Mikrowelle erhitzt werden, ungesund?.....	21
	Tritt aus der Mikrowelle Strahlung aus?.....	23
4.	Sicherheitshinweise.....	25
4.1	Schulunterrichtsgesetz.....	25
4.2	Einteilung Gefahrenstufen.....	26
5.	Experimente.....	27
	Handy in der Mikrowelle.....	27
	Lichtgeschwindigkeit ermitteln.....	29
	Schwedenbomben in der Mikrowelle.....	30

Thermopapier in der Mikrowelle	32
Popcorn herstellen	34
Dampfkarussell.....	35
Luftballon mit Wasser in der Mikrowelle.....	37
Toastbrot vs. Knäckebrot in der Mikrowelle	39
Seife in der Mikrowelle	41
Vergleich von Wasser und Eis in der Mikrowelle.....	42
Wasserglas Experiment	44
Flackerlampe in der Mikrowelle.....	47
Christbaumkugel in der Mikrowelle	48
Teller mit Goldrand in der Mikrowelle.....	50
Wassergehalt verschiedener Fette	51
Eindringtiefe von Mikrowellen.....	52
Faraday'scher Käfig in der Mikrowelle.....	54
Tischtennisball in der Mikrowelle	55
Zitrone in der Mikrowelle.....	56
Unpolare Flüssigkeiten/ mikrowellenfeste Stoffe.....	57
Streichholz-Plasma erzeugen	59
Plasma erzeugen	60
CD in der Mikrowelle.....	63
Chipstüte in der Mikrowelle.....	64
Weintraube in der Mikrowelle	66
Eier in der Mikrowelle	68
Glas schmelzen in der Mikrowelle	69
Essbesteck in der Mikrowelle.....	71
Leuchtstoffröhre in der Mikrowelle	73

Zigarette in der Mikrowelle.....	74
Plasmakugel in der Mikrowelle	76
Glühlampe in der Mikrowelle.....	77
EM Absorption durch Wasser	78
Überhitztes Wasser (Siedeverzug)	79
Metallschwamm im Benzinbad	81
Stahlwolle in der Mikrowelle	82
Sektflasche in der Mikrowelle	84
Munition in der Mikrowelle	85
Farbsprühdosen in der Mikrowelle	87
Böller in der Mikrowelle	88
Sprengstoff in der Mikrowelle.....	89
6. Literaturverzeichnis.....	91
7. Abbildungsverzeichnis.....	94

1. Einleitung

Experimentieren gehört zum Physikunterricht, wie ein Instrument zur Musik. Seit jeher dienen Experimente u.a. zur Veranschaulichung von physikalischen Phänomenen, zur Erklärung von Vorgängen und auch zur Belebung des manchmal monotonen Unterrichtsalltags. Das Experiment ist ein wichtiges Werkzeug, dessen sich sowohl Lehrpersonen als auch Schülerinnen und Schüler bedienen können, um an Vorgängen wie sie im alltäglichen Leben vorkommen, anzuknüpfen und Bildungsbereich übergreifende Lernprozesse in Bewegung zu setzen. Für mich war es in der Schule immer motivierend, ein Experiment zu sehen oder selbst auszuprobieren, um damit die Frage nach dem „Warum“ beantworten zu können. Im Physikunterricht gibt es Themenbereiche, wie z.B. die Newton'sche Mechanik oder die Wärmelehre, in welchen die dazugehörigen Experimente auch nach über 300 Jahren ihre Gültigkeit und ihre Faszination behalten haben. Es gibt aber auch Themenbereiche, die mit der permanenten technologischen Weiterentwicklung in den Klassenraum Einzug halten. Mit den technisch immer komplexer werdenden Systemen die unseren Alltag bestimmen, geht ein in vielen Bereichen unflexibles Schulsystem einher. Im Physikunterricht kann somit eine Lücke entstehen, welche Mythen, Irrglauben und Pseudowissenschaften Platz bietet. So geschehen ist es auch in den 70er Jahren bei der Markteinführung von Mikrowellenöfen. Die in den USA schon lange vollzogene Küchenrevolution fand in den österreichischen Haushalten anfangs nur schleppend Anklang. Die positiven Verkaufsargumente der Hersteller, wie Zeit- und Energieersparnis, standen vielen Mythen zur „gefährlichen“, unsichtbaren, elektromagnetischen Strahlung gegenüber. Trotzdem sich dieses Haushaltsgerät mittlerweile in rund 70% der Haushalte in Österreich etabliert hat, halten sich manche Mythen und Geschichten bis heute hartnäckig. Da der „Mikrowellenhype“ der letzten Jahrzehnte abgeklungen ist und sich der allgemeine Ernährungstrend von einem schnellen Gericht aus der Mikrowelle weitgehend abgewendet hat, sind diese technologisch ausgereiften Geräte leicht und günstig verfügbar. Diese Eigenschaften prädestinieren die Mikrowelle nahezu, um damit einen Unterricht in Form von Experimenten zu unterstützen. Diese Diplomarbeit beinhaltet Demonstrationsexperimente mit elektromagnetischer Strahlung, welche im Unterricht mit Hilfe handelsüblicher Mikrowellen gezeigt werden können. Zu den einzelnen Experimenten wird auch der theoretische Hintergrund erläutert. Die Ideen zu den Experimenten stammen einerseits von Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher und werden im Rahmen der

Experimentalphysik Vorlesungen behandelt, andererseits kommen Ideen aus Recherchen und aus selbst entwickelten Experimenten. Ein wichtiger Aspekt beim Experimentieren mit elektromagnetischen Wellen im Schulunterricht ist die Sicherheit. Im Kapitel 4 wird jedes Experiment in eine Gefahrenstufe eingeteilt, und auf eventuelle Gefahren hingewiesen. In einem eigenen Teil werden bestehende Mythen zur Mikrowelle unter die Lupe genommen und der Wahrheitsgehalt physikalisch untersucht.

2. Fachdidaktischer Zugang

2.2 Experimente im Physikunterricht

Experimentieren gehört zum Physikunterricht, wie ein Instrument zur Musik. Mit diesen Worten beginnt meine Diplomarbeit in der Einleitung. Diese Aussage sollte auf den hohen Stellenwert des Experiments im Physikunterricht hinweisen. Experimente im Unterricht unterscheiden sich von Experimenten in Wissenschaft und Forschung. Während in der Forschung die Erweiterung des Erkenntnisstandes im Vordergrund steht, geht es in der Schule darum, physikalische Effekte und Gesetzmäßigkeiten zu veranschaulichen. Sie sollten einen motivierenden Charakter haben und Lernprozesse unterstützen. Doch Physikunterricht sollte viel mehr sein als eine bloße Aneinanderreihung von Experimenten. Um Physik zu verstehen, können Experimente Helfer sein, um eigene Theorien und Vorstellungen zu entwickeln und diese zu überprüfen. So kann man mit der Zeit Zusammenhänge zwischen den Vorgehensweisen und Sachverhalten immer besser verstehen.

„Doch genügt es nicht, sich ein Experiment anzuschauen, um zu erkennen und zu verstehen, worum es bei einem bestimmten Phänomen geht. Es ist die physikalische Sichtweise, die systematische Interpretation, ermöglicht durch eine physikalische Theorie, die ein Experiment zu einem physikalischen Phänomen macht. Experiment und Theorie stehen in einem wechselseitigen Verhältnis, das sich nicht in einfacher Weise in ein ‚Normalverfahren‘ auflösen lässt, erst recht nicht im Kontext des Unterrichts.“ (Duit, 2002)

Ein seit Jahren bekanntes und offensichtliches Problem ist, dass Schüler und vor allem Schülerinnen das Interesse am Physikunterricht im Laufe ihrer Schulzeit verlieren. Die Änderung von Methoden oder Änderungen inhaltlicher Natur, haben aufgrund der vielschichtigen Ursache für das geringe Fachinteresse leider keine Verbesserungen mit sich gebracht. Ein erfolgreicher Ansatz hingegen ist die Einbettung von physikalischen Inhalten in für Schülerinnen und Schüler interessante Kontexte. Da dieser Ansatz auch relativ einfach von Lehrkräften in den Unterricht zu implementieren ist, sind hier Erfolge zur Verbesserung des Physikunterrichts zu erwarten. Solche Kontexte müssen neben der Attraktivität für Schülerinnen und Schüler weitere anspruchsvolle Anforderungen erfüllen. Das über den Kontext vermittelte Wissen muss übertragbar sein, darf also nicht an diesen gebunden sein. Physikalische Prinzipien sollten ersichtlich sein und diese dürfen auf keinen Fall durch z.B. technische Detailinformationen überdeckt werden. Das Ziel ist es, dass sich Inhalte systematisch nach Prinzipien geordnet, zu Wissen zusammenschließen, weshalb das Wissen kohärent vermittelt werden muss. Ein Kontext, der meiner Meinung nach diesen Anforderungen gerecht wird, ist das Experimentieren mit der Mikrowelle. Es ist hier nicht nur eine direkte Verbindung zum Alltag der Schülerinnen und Schüler vorhanden, sondern auch ein fächerübergreifendes Denken erforderlich. So kommen Problemstellungen und naturwissenschaftliche Effekte aus Mathematik, Chemie, Biologie und Physik zusammen. (Berger, 2002, S. 9 ff)

2.3 Verankerung im Lehrplan

Im folgenden Kapitel werden die Zusammenhänge zwischen dem Lehrplan und dieser Diplomarbeit hergestellt. Blickt man in den Bildungsbereich der Natur und Technik, wird die Natur als Grundlage menschlichen Lebens beschrieben, welche auch in vielfältig technisch veränderter Form in Erscheinung tritt. Die Nutzung und der bewusste Umgang mit der Natur sollten Schülerinnen und Schüler, laut Lehrplan, mit dem Verstehen ihrer Wirkungszusammenhänge darstellen. Die Grundlage für die Orientierung in einer modernen, von Technologie geprägten Gesellschaft bildet das Verständnis für Phänomene, Fragen und Problemstellungen aus den Bereichen Technik, Naturwissenschaft und Mathematik. Neben Vermittlung von Wissen, Handlungskompetenz und Entscheidungsfähigkeit, sollte der Unterricht auch dazu motivieren, sich mit ethischen Fragen im Zusammenhang mit Natur

und Technik sowie Mensch und Umwelt auseinanderzusetzen. Ferner sind für Analyse und Lösung von Problemen u.a. Modellbildung und Raumvorstellungsvermögen zu vermitteln. (AHS Lehrplan, 2017, Bildungsbereich Natur und Technik)

Laut den allgemeinen Bildungszielen sollten auch Bezüge zur Lebenswelt hergestellt werden:

„Im Sinne des exemplarischen Lernens sind möglichst zeit- und lebensnahe Themen zu wählen, durch deren Bearbeitung Einsichten, Kenntnisse, Fähigkeiten, Fertigkeiten und Methoden gewonnen werden, die eigenständig auf andere strukturverwandte Probleme und Aufgaben übertragen werden können. Die Materialien und Medien, die im Unterricht eingesetzt werden, haben möglichst aktuell und anschaulich zu sein, um die Schülerinnen und Schüler zu aktiver Mitarbeit anzuregen. [...]“ (AHS Lehrplan, 2017, allgemein didaktische Grundsätze/ 8)

Der Umgang mit neuen Technologien, Medien und Fertigkeiten ist im Zusammenhang mit dieser Diplomarbeit ebenso gegeben. Gerade im Physikunterricht kann man auch das sichere Handhaben mit technischen Geräten und die dazugehörigen theoretischen Hintergrundinformationen vermitteln.

Ganz allgemein sollte die Bildungs- und Lehraufgabe des Unterrichtsfaches Physik jene sein, dass man ausgehend von fachspezifischen Aspekten eine enge Verflechtung mit anderen Naturwissenschaften herstellt. Bildungsbereich übergreifend sollte der Unterricht sich keinesfalls nur auf die Darstellung physikalischer Inhalte beschränken. Daher sollten Schülerinnen und Schüler das physikalische Modelldenken (Realwelt - Modell – Modelleigenschaften - Realwelt) erlernen, um dazu im Stande zu sein, physikalisches Wissen in größere Zusammenhänge zu stellen. (AHS Lehrplan, 2017, Unterstufe Physik, Bildungs- und Lehraufgabe)

Im Oberstufenlehrplan spricht man davon, dass der Physikunterricht insbesondere der Befähigung zum selbstständigen Wissenserwerb, dem verantwortungsbewussten Umgang mit der Umwelt und der verantwortlichen, rationalen Mitwirkung an gesellschaftlichen Entscheidungen fachspezifisch beizutragen und damit in besonderer Weise den Erwerb naturwissenschaftlicher Kompetenzen zu fördern hat. Zusätzlich sollen Schülerinnen und Schüler die Bedeutung physikalischer Phänomene und Konzepte im Alltag, in der Umwelt sowie für die Welterkenntnis erfassen und diese für ihre Lebensgestaltung nutzen. Sie sollen den Beitrag der Physik zur Lösung individueller, lokaler und globaler Probleme, sowie die

Physik als schöpferische Leistung der Menschheit und damit als Kulturgut erkennen. Der Physikunterricht leistet einen wichtigen Beitrag zur Berufsorientierung und zur persönlichen Berufswahl. (AHS Lehrplan, 2017, Oberstufe Physik, Bildungs- und Lehraufgabe)

Neben Beiträgen zu mehreren Bildungsbereichen wie z.B. das Lernen physikalischer Grundbegriffe (Sprache und Kommunikation), können die Experimente, welche in dieser Diplomarbeit aufgelistet sind, auch etwas zu den Grundlagen für gesundheitsförderndes Verhalten beitragen. Schülerinnen und Schüler lernen im Unterricht auch, wie man Sicherheitsbewusstsein im Haushalt umsetzen kann und welche Chancen und Gefahren im Umgang mit Elektrizität, Strahlung und Wärme entstehen können. (AHS Lehrplan, 2017, Oberstufe Physik, Beiträge zu Bildungsbereichen)

3. Die Mikrowelle (Mikrowellenofen)

3.1 Geschichtliches

Wie man aus dem Namen des Mikrowellenofens ableiten kann, hat seine Funktion etwas mit elektromagnetischen Wellen im Mikrowellenbereich zu tun. Um die Gesetzmäßigkeiten, denen elektromagnetische Felder und Wellen unterliegen, beschreiben zu können, sollte man zuerst einen Blick in die spannende Zeit deren Entdeckung werfen. Im 19. Jahrhundert gab man diesem Wissensgebiet, an dem viele namhafte Größen der Physik forschten, die Bezeichnung Elektrodynamik. An dieser Stelle sollte ein Physiker besonders hervorgehoben werden, der Schotte James Clerk Maxwell.

„Er hat nämlich der Elektrodynamik im 19. Jahrhundert ihre in einem gewissen Sinne endgültige Form gegeben und das umfangreiche vorliegende Material in einigen wenigen Gleichungen zusammengefasst, aus denen umgekehrt wiederum alles hergeleitet werden kann.“ (Lehner, 2009, S. 1)

Diese sogenannten Maxwell'schen Gleichungen bilden seit damals die Grundlage für die klassische Elektrodynamik, wie wir sie heute kennen. Den Grundstock für diese Arbeit legte Jahre zuvor der Engländer Michael Faraday. Sein Forschungsgebiet konzentrierte sich auf die Wechselwirkungen zwischen Magneten und elektrischen Ladungen, wobei er den physikalischen Effekt der Induktion entdeckte. Es war auch Faraday, der erstmals die Vorstellung des elektrischen Feldes hatte. Er wollte mit dieser Vorstellung die

Wechselwirkung zwischen geladenen Körpern, die sich nicht berühren, zu verstehen geben. Darüber hinaus sprach er von „Schwingungen der Feldlinien in Wellenform“, hatte also bereits eine vage Vorstellung von den später beschriebenen, elektromagnetischen Wellen. Mit diesen Entwicklungen und Erkenntnissen gelangen auch Erfindungen wie z.B. jene des Generators, welche der elektrischen Revolution im 19. Jahrhundert zum Durchbruch verhalf. Doch nun zurück zu den Maxwell'schen Gleichungen, welche die Ideen von Faraday mathematisch zusammenfassen. Sie bilden u.a. die theoretische Beziehung zwischen sich verändernden, elektrischen und magnetischen Feldern. Diese Vorstellung erbrachte die Idee, dass elektromagnetische Wellen es ermöglichen müssten, Energie in einen Raum hinaus abzustrahlen. Bei seiner Forschung zu diesem Sachverhalt gelang es Maxwell u.a. auch erstmals, eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen zu berechnen. Er errechnete eine Geschwindigkeit von 310.740.000 m/s, welche relativ genau mit der heute definierten Lichtgeschwindigkeit von 299.792.458 m/s (physics.info) übereinstimmt, wenn man die ihm damals zur Verfügung stehenden Mittel beachtet. 1886 gelang es dem deutschen Physiker Heinrich Hertz mit Experimenten die vorhergesagten,

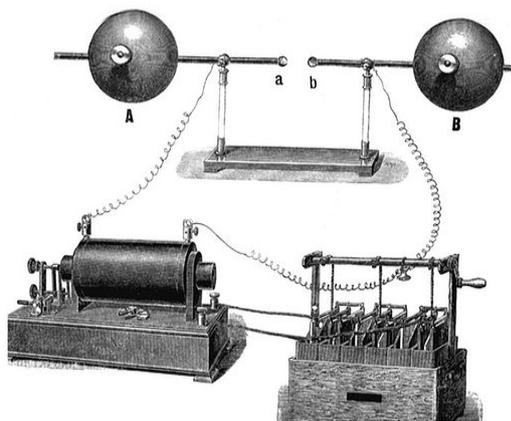


Abbildung 1: Hertz'scher Oszillator 1888,
Versuchsaufbau zum Nachweis von EM- Wellen;
Quelle: www1.wdr.de

elektromagnetischen Wellen zu erzeugen und nachzuweisen. Mit einem simplen Versuchsaufbau mittels eines Senders, der Funken erzeugte, und mit einem Empfänger, der diese unter einem bestimmten Abstand (in Resonanz) empfangen konnte, war auch die Geburtsstunde des Rundfunks gekommen. Bei weiteren Versuchen fand Hertz auch heraus, dass sich elektromagnetische Wellen ähnlich wie Lichtwellen verhalten. (leifiphysik.de)

Die Versuche von Hertz wurden von einigen Physikern weitergeführt, u.a. auch von Guglielmo Marconi, der den Grundstein für die drahtlose Funkwellenkommunikation legte, wie sie auf dem gleichen Prinzip beruhend noch heute in Gebrauch ist.

Nicht nur die experimentelle sondern auch die theoretische Entwicklung ging weiter. Die klassische elektrodynamische Theorie, welche ausschließlich durch die Maxwell'schen

Gleichungen beschrieben wurde, war zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig. Erkenntnisse, welche im Laufe des 20. Jahrhunderts in anderen Teildisziplinen der Naturwissenschaften generiert wurden, vervollständigten das Modell. Einsteins Relativitätstheorie z.B. ist auch mit der klassischen Elektrodynamik kompatibel, ja sie ist sogar ein wichtiges Werkzeug, um die Elektrodynamik besser verstehen zu können. Elektromagnetische Felder und die dazugehörigen elektromagnetischen Wellen zeigen sich in unserem Alltag überall. Sichtbares Licht, Röntgenstrahlen, Radiowellen, Wärmestrahlung und auch Mikrowellen sind prominente Vertreter dafür. All diese elektromagnetischen Wellen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und diese wurde durch die Relativitätstheorie zur wichtigsten Konstanten für die Struktur von Raum und Zeit und somit zu einer fundamentalen Naturkonstante. Daneben haben die elektromagnetischen Wellen noch eine wesentliche Erkenntnis gebracht. Licht besteht, wie man seit Max Planck weiß, aus einzelnen Teilchen (Lichtteilchen), die man Photonen nennt. Zusammen mit anderen fundamentalen Entdeckungen, die hier nicht erörtert werden, hat das zur Quantenelektrodynamik geführt. In dieser Quantenelektrodynamik werden elektromagnetische Felder als das, was sie nach heutigem Wissen sind, nämlich als Wellen und Teilchen zugleich, behandelt. (Lehner, 2009, S. 1 f)

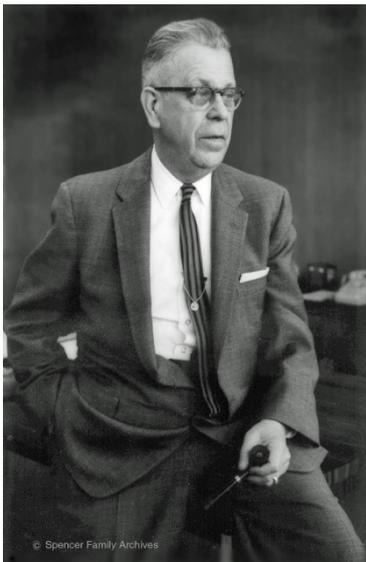


Abbildung 2: Percy LeBaron Spencer, der Erfinder des Mikrowellenherdes;
Quelle: Spencer Family Archives

Aus diesen drei eng zusammenhängenden Erkenntnissen aus klassischer Elektrodynamik, Relativitätstheorie und Quantenelektrodynamik können wir die elektromagnetischen Vorgänge, wie sie z.B. im Inneren einer Mikrowelle erzeugt werden, weitgehend beschreiben. Natürlich fließen auch noch andere Effekte aus Atom-, Molekül- und Festkörperphysik oder der Thermodynamik mit ein, doch dazu später.

Die Idee von der Nutzung von elektromagnetischen Wellen in der Küche war bis dato noch nicht geboren. Die Erfindung, welche eine spätere „Küchenrevolution“ auslöste, war eher ein reines Zufallsprodukt in der militärischen Forschung. In der Zeit des zweiten Weltkrieges entwickelten die Herren Boot und Randall einen Sender für Radaranlagen, der für die Überwachung des Luftraumes gedacht war. An solch einen Sender, ab dieser Zeit auch Magnetron genannt, forschte auch ein gewisser Percy Spencer (Abb.2).

“In den Fünfzigerjahren entdeckte der amerikanische Ingenieur durch einen Zufall die Möglichkeit, Mikrowellenstrahlung von Magnetrons zu nutzen. Damals machte er für seinen Arbeitgeber, die amerikanische Raumfahrt- und Rüstungsfirma Raytheon Corporation, Experimente zur Radartechnik. Laut Anekdote trug er bei dieser Arbeit eines Tages einen Schokoladenriegel in der Tasche, der schmolz. Überrascht untersuchte er nun die Wirkung der Strahlung auf Popcorn, das wild umhersprang. Ein dritter Versuch führte zur Explosion eines Eis und eröffnete schließlich den Weg zum 1950 erteilten Patent einer „Method of Treating Foodstuffs.“ Bereits 1954 kam mit „Radarange“ die erste kommerzielle Mikrowelle mit einer Leistung von 1600 W auf den Markt. Ihr Name, der eher an militärische Anwendungen erinnert, vor allem aber ihr stattlicher Preis von 5000 US-\$ sowie ihre technischen Daten (Höhe 1,75 m, Masse 375 kg, Festanschluss an Wasserkühlung) verhinderten allerdings eine weitere Verbreitung. Das änderte sich 1967 mit der ersten „echten“ Haushaltsmikrowelle, die nun erschwinglich und handlich war. Zehn Jahre später besaß bereits jeder zweite US-Haushalt ein solches Gerät.“ (Möllmann, Vollmer, 2004, S. 38)



Abbildung 3: Radarange, erster Mikrowellenofen 1954; Quelle: marketingvp.com

Etwas zeitverzögert gelang es auch hierzulande, dass sich die Mikrowelle in den Haushalten etablierte. Heutzutage gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Systemen und Varianten von verschiedenen Herstellern. Doch das Grundprinzip der Erhitzung von Lebensmitteln durch elektromagnetische Strahlung ist heute, als auch vor 60 Jahren, das gleiche.

3.1 Funktion eines Mikrowellenherdes

Aufbau

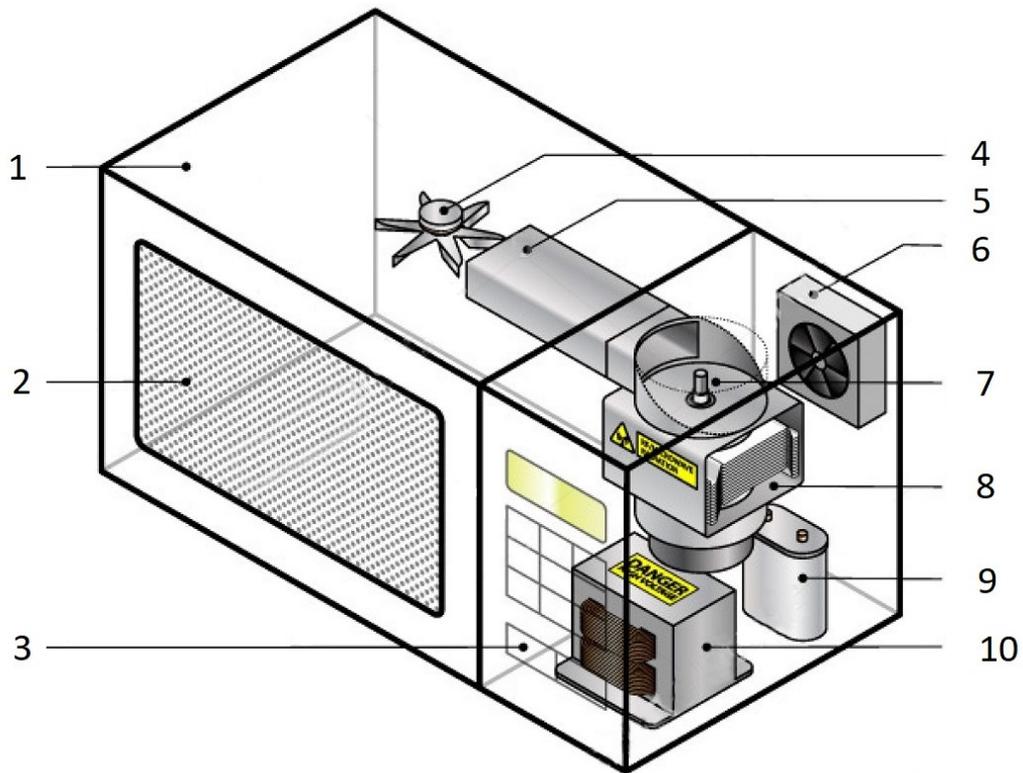


Abbildung 4: Aufbau eines Mikrowellenofens; Quelle: <https://i.warosu.org/data/sci/img/0089/90/1498191913316.jpg>

1. Außengehäuse, dahinter im Inneren befindet sich der Garraum
2. Klapptüre mit Sichtfenster
3. Bedienfeld
4. Reflektor Flügel
5. Wellenleiter
6. Kühlung bzw. Gebläse
7. Antenne bzw. Mikrowellensender
8. Magnetron
9. Kondensator
10. Elektronik und Transformator

Eines der wichtigsten Bauteile einer Mikrowelle ist das Magnetron (8). Hier werden die elektromagnetischen Wellen erzeugt und über die Antenne (7) und den Wellenleiter (5) wie hier gezeigt an der Oberseite durch die Einkopplung in den Garraum geleitet. Die Wände im Garraum sind aus Metall gefertigt, damit keine Strahlung nach außen gelangt. Diese Eigenschaft besitzt auch die Klapptüre, welche im Sichtfenster ein Metallgitter beinhaltet. Garraum und Klapptüre verhalten sich wie ein Faraday'scher Käfig, in dem die elektromagnetischen Wellen hin und her reflektiert werden. Ein Sicherheitsschalter verhindert den weiteren Betrieb des Magnetrons, sobald die Türe geöffnet wird. Die Netzspannung wird von einem Transformator (10) in die vom Magnetron benötigte Spannung transformiert. Alle elektronischen Bauteile, besonders das Magnetron, werden über ein Thermometer überwacht, um den Betrieb bei Überhitzung sofort zu stoppen. Im Inneren des Garraumes befindet sich meist ein Drehteller aus Glas, welcher alle Volumenbereiche der Speise durch die räumliche Modenverteilung rotiert, um Inhomogenitäten des elektromagnetischen Feldes auszugleichen. Damit wird erreicht, dass sich alle Stellen des Gargutes durch die Zonen hoher Feldstärke („Hot Spots“) drehen und sich die Speise, über das Volumen gesehen, gleichmäßig erwärmt. Der Garraum ist, um nicht zu überhitzen, mit einem strahlungsgesicherten Zu- und Abluftsystem ausgestattet. Auch Mikrowellen haben sich technologisch verbessert, deshalb gibt es heutzutage eine Vielzahl von unterschiedlichen Modellen mit technischen Extras und ausgeklügelter Elektronik.

Wie entstehen Mikrowellen?

Im Laufe der jüngeren Geschichte haben sich mehrere Methoden entwickelt, um Mikrowellen zu erzeugen. In den herkömmlichen Mikrowellenöfen, wie wir sie aus dem Haushalt kennen, werden Magnetrons eingesetzt. Das Bauteil wurde in England 1940 bis zur Fertigungsreife entwickelt und führte zum entscheidenden Durchbruch zur modernen Radartechnik. Diese Magnetrons, welche auch Wanderfeldröhren genannt werden, können elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von 1 bis 40 GHz erzeugen. Diese Röhren können kontinuierlich oder gepulst elektromagnetische Strahlung erzeugen und arbeiten dabei mit einem Wirkungsgrad bis zu 80%. Diese Technik könnte in Zukunft durch Leistungshalbleitertechnik ersetzt werden, da sogenannte „Solid State“ Elemente elektromagnetische Felder noch effizienter erzeugen können. In dieser Arbeit werden jedoch

nur Mikrowellenöfen mit Magnetrons verwendet, da diese recht kostengünstig für Experimente in der Schule angeschafft werden können. (Möllmann, Vollmer, 2004, S. 39)

Ein Magnetron ist wie in der unten abgebildeten Form aufgebaut. Aus der Glühkathode K werden Elektronen durch Glühemission freigesetzt. Die Elektronen werden durch eine konstante Hochspannung von einigen tausend Volt zum Anodenring A beschleunigt. In diesem Ring sind radial verteilt (meist acht) Schwingkreise eingelassen. Um Frequenzen im Gigahertzbereich zu erhalten, müssen die Werte der Kapazität und Induktivität entsprechend klein sein. Jede der „Spulen“ besteht aus diesem Grund nur aus einer Windung und die offenen Enden bilden einen 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. (Berger, 2002, S.16)

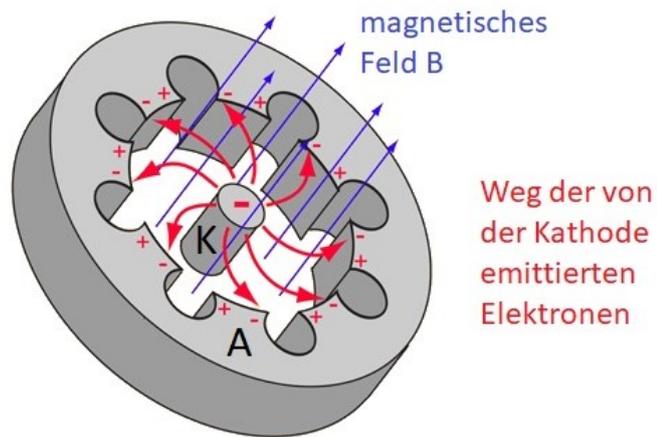


Abbildung 5: Aufbau eines Magnetrons; Quelle: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Waves/magnetron.html>

Elektronen, welche im elektrischen Wechselfeld eines Schwingkreiskondensators beschleunigt werden, werden aufgrund der dadurch vergrößerten Lorenzkraft zur Glühkathode zurückgeführt. Elektronen, die im elektrischen Feld hingegen abgebremst werden, und dadurch Energie verlieren, gelangen auf spiralförmigen Bahnen zur Anode, da die Lorenzkraft im Mittel entsprechend kleiner ist. Insgesamt wird dadurch erreicht, dass die von einer Glühkathode emittierten Elektronen bevorzugt in das elektrische Feld der Schwingkreiskondensatoren gelangen, wenn sie Energie an den Schwingkreis abgeben. (Berger, 2002, S.16)

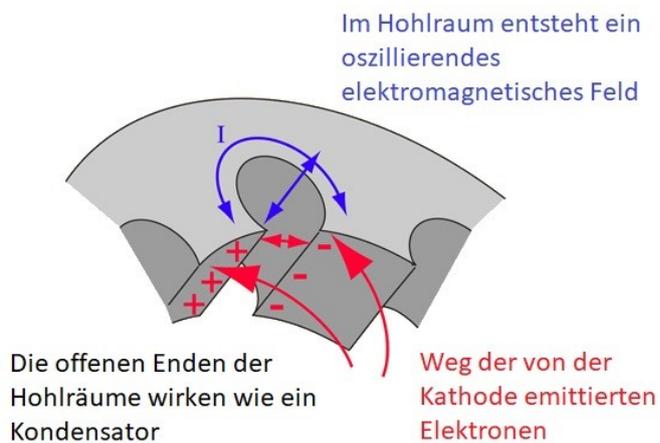


Abbildung 6: Das elektromagnetische Feld wird in den Hohlräumen der Anode erzeugt; Quelle: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Waves/magnetron.html>

Die Verstärkung des elektrischen Wechselfeldes der Schwingkreis-kondensatoren geschieht durch Influenz. Die so erregte ungedämpfte elektromagnetische Schwingung induziert in einer in den Schwingkreis eingebrachten Auskoppelspule Induktionsfrequenzen im Gigahertzbereich. (Berger, 2002, S.16)

Von der Auskoppelspule gelangen die Wellen über einen Mikrowellenleiter in den Garraum. Dieser metallische Hohlleiter besitzt einen rechteckigen Querschnitt. Seine Geometrie ist physikalisch vorgegeben, denn es gibt eine maximale Wellenlänge bzw. eine minimale Frequenz einer elektromagnetischen Welle, die er transportieren kann. Die Querdimension entspricht genau einer halben Wellenlänge. Als Konsequenz für die Betriebsdaten von $2,45\text{ GHz}$ ($\lambda = 12,2\text{ mm}$) muss ein mit Luft gefüllter Wellenleiter in Querschnittsdimension eine Breite von mindestens $6,1\text{ cm}$ aufweisen. Die dazu senkrechte Querdimension ist praktisch immer kleiner und kann die vom Magnetron erzeugten Wellen daher nicht transportieren. Deshalb müssen die in den Resonator eingekoppelten Mikrowellen polarisiert sein. Je nach Zahl der Reflexionen im Wellenleiter können die in den Garraum ausgekoppelten Mikrowellen dann noch teilpolarisiert sein. Durch im Wellenleiter eingebrachte Dielektrika wird durch Verschiebung der Abschneidefrequenzen eine Teilpolarisierung verhindert. (Möllmann, Vollmer, 2004, S. 39)

Technische Details

Im Laufe der Zeit haben sich Mikrowellen technisch immer mehr zu einem hochtechnologischen Küchengerät entwickelt. Heute ist der Mikrowellenofen wieder ein wichtiger Bestandteil in den digital vernetzten „smart kitchen“. Ein wichtiger Zwischenschritt in der technologischen Weiterentwicklung war z.B. die Einbringung des Drehtellers. Doch wozu benötigt man diesen überhaupt?

Die Erfahrung in der Entwicklung früherer Mikrowellengeräte zeigte, dass Speisen, wenn man sie erwärmte, Stellen aufwies, die kaum wärmer als Zimmertemperatur waren, und Stellen, an denen das Gargut überhitzte. Dies erkennt man auch auf der Abbildung 7. Gezeigt wird eine Infrarotaufnahme von einem mit Wasser befeuchteten Tuch nach dem Erhitzen in einem Mikrowellenofen.

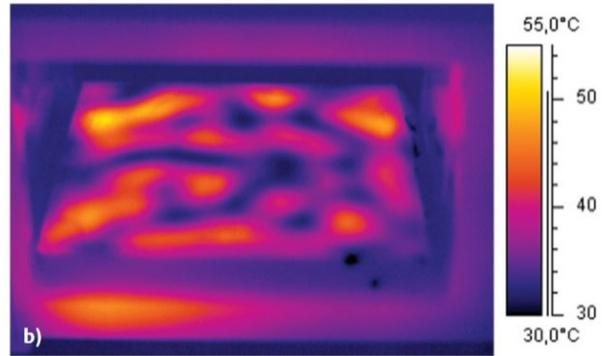


Abbildung 7: Infrarot Aufnahme, zeigt Ungleichverteilung von Hitzeentwicklung im Garraum; Quelle: Eier im Wellensalat, Physik in unserer Zeit, 35. Jg. 2004 Nr. 2 S. 91

Der Grund dafür ist die sich bildende dreidimensionale, stehende Welle im Garraum. Denn die Wellen werden an jeder Wand im Inneren reflektiert und überlagern sich an einigen Orten konstruktiv und an anderen Orten wieder destruktiv. 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 trifft auf einen Mikrowellenofen als dreidimensionales Resonanzsystem nicht zu. Es ist also nicht der Fall, dass das Vielfache der halben Wellenlänge ($\lambda = 12,2 \text{ cm}$) in jeder der drei Raumrichtungen „passt“. Es könnten also nur Mikrowellenöfen betrieben werden, deren Resonanzraum als Ausmaß in jeder Richtung dem Vielfachen von $6,1 \text{ cm}$ entsprechen würde. Eine Resonanz in allen Raumrichtungen würde aber auch in diesem Falle sofort zerstört werden, indem man eine Speise in den Mikrowellenofen gibt, weil diese die Feldstärkenverteilung verändert. Insbesondere entspricht der Abstand zwischen den Feldmaxima nicht der halben Vakuumwellenlänge. Dazu werden nun die Resonanzverhältnisse in einem Mikrowellenofen geklärt. (Berger, 2002, S. 12)

In folgenden Formeln werden vektorielle Parameter in „fett“ dargestellt. Das elektrische Feld \mathbf{E} in einem Mikrowellengerät kann man mit einer Wellengleichung beschreiben, welche aus den Maxwell’schen Gleichungen abgeleitet werden kann:

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

Dabei ist \mathbf{r} der Ortsvektor, t die Zeit, c die Lichtgeschwindigkeit und der Laplace- Operator Δ entspricht

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Der folgende Ansatz löst die partielle Differenzialgleichung:

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

Unter der Bedingung, dass

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

ist, wie man durch Einsetzen in die Wellengleichung zeigen kann (λ entspricht der Wellenlänge). Um die Randbedingungen zu erfüllen, müssen gleichzeitig die folgenden Gleichungen erfüllt sein:

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

L_x, L_y, L_z entsprechen den Ausdehnungen des quaderförmigen Mikrowellenhohlraumes in den entsprechenden Richtungen und l, m und n , welche natürliche Zahlen sind. Dies folgt aus den Forderungen, dass die tangentialen Komponenten des elektrischen Feldes an den (als unendlich gut leitend angenommenen) Metallwänden verschwinden. Die Konsequenz daraus ist, dass das Feld Knoten an den Wänden des Garraumes besitzt. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass das Vielfache von $\frac{\lambda_x}{2}$ in x- Richtung, das Vielfache von $\frac{\lambda_y}{2}$ in y- Richtung und das Vielfache von $\frac{\lambda_z}{2}$ in z- Richtung als Resonanzlänge entsprechen muss, wobei die Gleichung (3) erfüllt werden muss. Dieses schwächere Kriterium führt zu wesentlich mehr Lösungen der Wellengleichung. In z- Richtung z.B. sind L_x und L_y unendlich groß, dadurch reduziert sich die Gleichung (3) auf $\lambda_z = \lambda_0$ und man erhält das Ergebnis, dass bei einem eindimensionalen System (z.B. ein Gummiseil) ein Vielfaches der halben Wellenlänge mit der Länge L_z übereinstimmt. Man bekommt für $n = 1$ wie gewohnt die Grundwelle und für $n = 2, 3, \dots$ die entsprechenden Oberwellen. (Berger, 2002, S. 12)

Die im Versuch „Thermopapier in der Mikrowelle“ beobachtete Intensitätsverteilung im Garraum ist also relativ kompliziert mathematisch nachzurechnen. In Wirklichkeit entspricht der gemessene Abstand zwischen den Intensitätsmaxima in der Regel nicht gleich der halben

Vakuumwellenlänge. Grund dafür ist, dass die Feldverteilung durch die Füllung des Garraumes stark verändert wird. Die Wellen werden durch das Gargut absorbiert, teilweise reflektiert, gebrochen und gebeugt. Es macht also wenig Sinn aus diesem Versuch quantitative Schlüsse über die räumliche Verteilung der Feldstärke zu ziehen. Für den Unterricht genügt die Behandlung des Themas mit Hilfe eines eindimensionalen Systems und der Hinweis, dass die Verhältnisse in dreidimensionalen Systemen so komplex sind, dass sie im Rahmen der schulischen Möglichkeiten nicht behandelt werden können. Was hier sehr gut gezeigt werden kann, ist der Effekt der Interferenz, welcher dafür verantwortlich ist, dass Speisen an gewissen Orten mehr erhitzt werden als an anderen. Um dies zu verhindern wird der schon genannte Drehteller eingesetzt, welcher die Speise durch das vorhandene Interferenzmuster hindurchbewegt. Der technische Nachteil dabei ist, dass in der Mitte des Drehtellers keine Änderung des Interferenzmusters stattfindet. Deshalb haben neuere Geräte einen rotierenden metallischen Reflektor eingebaut, der das Feld im Inneren permanent ändert. (Berger, 2002, S. 13)

3.2 Elektromagnetische Wellen und ihre Wirkung

Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen bestehen aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern. Mikrowellen, Radiowellen, Infrarot-, Röntgen- und UV Strahlung und das sichtbare Licht gehören u.a. zu ihren prominentesten Vertretern. Diese genannten Wellentypen liegen alle im elektromagnetischen Wellenspektrum (Abb. 8) und sie unterscheiden sich lediglich in ihrer Frequenz bzw. in ihrer Energie.

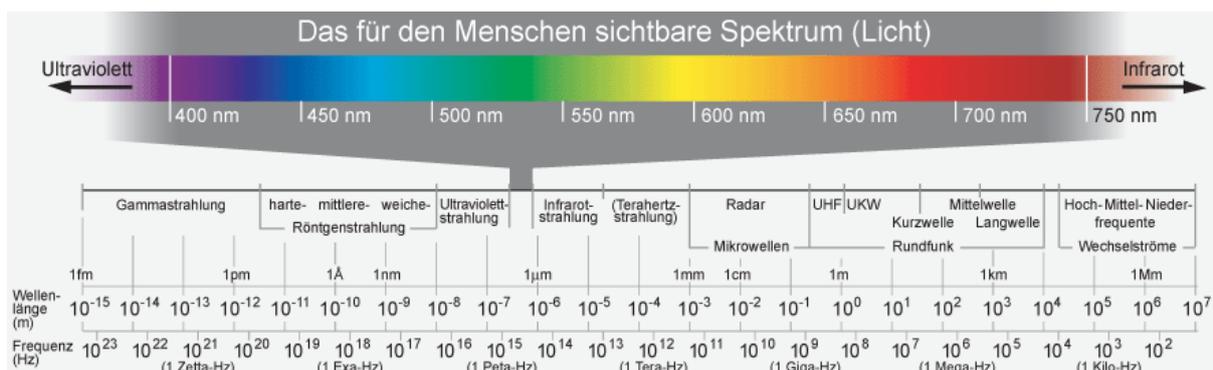


Abbildung 8: Elektromagnetisches Spektrum Übersicht; Quelle: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-wellenlaenge.htm>

Die sich ändernden Eigenschaften der Strahlung oder die Herkunft sowie die unterschiedlichsten Anwendungsarten und Herstellungsverfahren sind sehr vielfältig. Eine besondere Eigenschaft der elektromagnetischen Wellen ist es, dass sie kein Medium benötigen, um sich ausbreiten zu können. Sie bewegen sich daher in Vakuum unabhängig ihrer Frequenz mit Lichtgeschwindigkeit fort. Eine weitere faszinierende Eigenschaft ist es, dass sich elektromagnetische Wellen unter bestimmten Umständen wie Teilchen verhalten (Welle-Teilchendualismus).

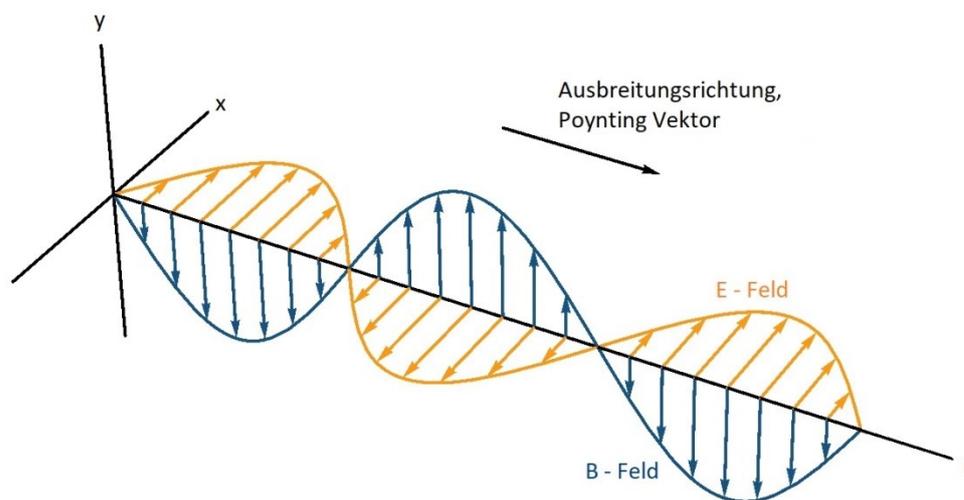


Abbildung 9: Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle; eigenes Bild

Elektromagnetischen Wellen liegen Schwingungen des elektromagnetischen Feldes zugrunde, wobei hier ein elektrisches und ein magnetisches Feld, wie in der Abbildung darüber gezeigt, senkrecht aufeinander stehen und ein festes Größenverhältnis zueinander haben. Elektromagnetische Wellen können durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben werden. Diese besagen u.a., dass zeitliche Änderungen des elektrischen Feldes stets mit einer räumlichen Änderung des magnetischen Feldes zusammenhängen. Ebenso ist umgekehrt eine zeitliche Änderung des magnetischen Feldes mit einer Veränderung des elektrischen Feldes verknüpft. Auf Grund dieser Gegebenheit ergibt sich für periodisch wechselnde Felder eine fortschreitende Welle. Für bestimmte Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen muss man quantenmechanische Effekte berücksichtigen. Hier treten Teilcheneigenschaften einzelner Quanten oder Photonen in den Vordergrund, wobei auch der Wellencharakter, wie z.B. Interferenz, vollständig vorhanden bleibt. Man spricht daher bei solchen Beobachtungen auch von einem Dualismus von Welle und Teilchen. Wenn

man als Beispiel dazu das sichtbare Licht betrachtet, wird jeder Frequenz f die Energie eines einzelnen Photons $h \cdot f$ zugeordnet. Wobei hier h dem Planck'schen Wirkungsquantum entspricht.

Ein anderes Beispiel wäre der elektrische Strom, bei dem auch jene Teilchen, welche über mehrere Atome hinweg bewegt werden, Welleneigenschaften haben. Mit diesen Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen befasst man sich theoretisch im physikalischen Teilgebiet der Quantenelektrodynamik. Bewegen sich elektromagnetische Wellen in einem Medium, verringert sich ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit, abhängig von der dielektrischen Leitfähigkeit (Permittivität) und der magnetischen Leitfähigkeit (Permeabilität). In Materie wird eine elektromagnetische Welle, zudem auch abhängig von ihrer Dispersion sowie ihrer Polarisation, gebrochen. Eine Richtungsänderung auf eine sich ausbreitende elektromagnetische Welle kann nur durch das Ausbreitungsmedium (z.B. Begrenzungen, Dichteänderung) oder durch die Gravitationskraft erfolgen. Sichtbares Licht, welches nur einen kleinen Teil des gesamten elektromagnetischen Spektrums einnimmt, ist der einzige Bereich, welchen der Mensch ohne technische Hilfsmittel wahrnehmen kann. Blickt man im Spektrum in die Richtung höherer Wellenlänge, ist die Energie der Strahlung zu gering, um von uns wahrgenommen zu werden (z.B. Radarwellen). Blickt man auf die andere Seite des elektromagnetischen Spektrums, beginnt dort die ionisierte Strahlung, hier kann die Energie eines Photons so groß sein, dass es Moleküle zerstören kann (z.B. radioaktive Strahlung). (Chemie.de)

Die mathematische Beschreibung elektromagnetischer Wellen lässt sich am besten auf Basis der Maxwell'schen Gleichungen nachvollziehen. Man kann eine Form der Wellengleichung herleiten, mit der man auch andere Arten von Wellen beschreibt (z.B. Ausbreitung von Schallwellen). Man beginnt mit den Maxwell-Gleichungen, die sich im ladungs- und stromfreien Vakuum ($\rho = 0, j = 0$) wie folgt beschreiben lassen:

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (6)$$

Dabei entspricht \mathbf{B} dem magnetischen Feld, μ_0 der magnetischen Feldkonstante und ε_0 der dielektrischen Leitfähigkeit. Wendet man auf beiden Seiten von (5) den Differenzialoperator **rot** an und setzt **rot B** aus (6) ein, so erhält man

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = -\varepsilon_0 \cdot \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (7)$$

wobei die zeitliche Differenziation vorgezogen werden kann, da ∇ nicht von der Zeit abhängt.

Nun gilt für **rot rot E**

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla \mathbf{E} = \mathbf{grad}(\mathit{div} \mathbf{E}) - \mathit{div}(\mathbf{grad} \mathbf{E})$$

Im ladungsfreien Raum ist $\rho = 0$ und daher auch $\mathit{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = 0$. Deshalb erhalten wir aus

(7) die Gleichung

$$\Delta \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (8)$$

wobei $\Delta = \mathit{div} \mathbf{grad}$ der Laplace-Operator ist. Diese Gleichung ist eine Wellengleichung, welche die Ausbreitung eines zeitlich veränderlichen elektrischen Feldes $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (9)$$

beschreibt. Eine ganz analoge Wellengleichung erhält man für das magnetische Feld $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$, wenn man von (6) **rot rot B** bildet und entsprechend einsetzt.

$$\Delta \mathbf{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} \quad (10)$$

(Demtröder, 2009, S. 195 f)

Eigenschaften von Mikrowellen

Im allgemeinen Frequenzraum spricht man von Mikrowellenbereich, wenn die Frequenz der Strahlung zwischen 300 MHz und 300 GHz liegt. Umgerechnet entspricht λ einer Wellenlänge zwischen $\lambda = 1 \text{ m}$ und $\lambda = 1 \text{ mm}$. Diese Werte zeigen, dass der Begriff „Mikro“ im Zusammenhang mit Mikrowellenöfen irreführend ist. Denkt man an das Küchengerät, möchte man glauben, dass dieses mit Wellen im Mikrowellenbereich arbeitet. So ist es aber nicht, denn durch internationale Vereinbarungen haben sich Frequenzen um die 2,35 GHz bei allen Herstellern durchgesetzt. Umgerechnet entspricht das einer Wellenlänge von $\lambda = 12,23 \text{ cm}$, man müsste also eigentlich von Zentimeterwellen sprechen. (Thuery, 1992)

Mikrowellen mit kürzerer Wellenlänge durchdringen Wolken, Regen und Dunst relativ ungehindert. Durch diese Eigenschaften werden Mikrowellen auch zur Kommunikation und Navigation von Schiffen und Flugzeugen eingesetzt. Solche Radar (Radio detecting und ranging) senden kurze, elektromagnetische Impulse aus und empfangen ihre Echos. Durch die Laufzeit zwischen dem Sende- und Empfangsvorgang kann man richtungsabhängig den Abstand des Reflektors bestimmen. Mikrowellen mit ihren hohen Frequenzen sind auch ein geeigneter Informationsträger für große Datenmengen und werden für die Informationsübertragung für weite geradlinige Strecken in der Satelliten-Nachrichtentechnik und im Mobilfunk eingesetzt.

Alles dreht sich um das Wasser

Ein Wassermolekül besteht aus zwei Wasserstoff- und einem Sauerstoffatom. Dieses Sauerstoffatom zieht aufgrund seiner Elektronegativität ($\chi = 3,5$) die Elektronen der beiden Wasserstoffatome so an, dass ein Überschuss an negativen Ladungen an der Sauerstoffseite entsteht. Im Gegensatz dazu ist ein positiver Ladungsüberschuss auf der Wasserstoffseite ($\chi = 2,1$) vorhanden. Die Ungleichverteilung der Ladungen verleiht dem Wassermolekül seine elektrische Polarität.

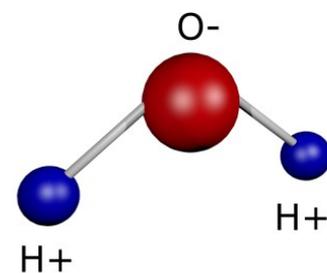


Abbildung 10: H_2O Dipolmolekül;
Quelle: sarsteinegold.at

In einem feldfreien Raum sind diese Wasserdipole ungeordnet in alle möglichen Richtungen orientiert. Befinden sich die Moleküle jedoch in einem elektrischen Feld, z.B. in einem Plattenkondensator, dann richten sie sich der Feldrichtung nach aus. Das positive Ende des Moleküls (Wasserstoff) wird von der negativen Kondensatorplatte und das negative Ende von der positiven Seite angezogen. Bei einer Umpolung des Kondensators dreht sich das Molekül neben seiner thermischen Bewegung dementsprechend um 180° . Die mit der neuen Ausrichtung (Rotation) verbundene Energie kann durch Stöße an benachbarte Wassermoleküle abgegeben werden, welche dadurch eine höhere kinetische Energie erhalten und sich folgend schneller bewegen. Auf makroskopischer Ebene wird dies durch eine Temperaturerhöhung wahrgenommen. Um dadurch einen Stoff effektiv zu erwärmen, sind höhere Umpolfrequenzen nötig, für die ein Plattenkondensator jedoch zu träge ist. Ein

dementsprechend hochfrequentes elektrisches Wechselfeld weisen elektromagnetische Wellen auf. In den Wechselfeldern, wie sie auch in Mikrowellenöfen erzeugt werden, werden Wasserdipole sehr schnell hin und her geklappt und werden somit in Rotation versetzt. Bei der in Mikrowellenöfen verwendeten Frequenz von $2,45\text{ GHz}$ beträgt die Wellenlänge ca. 12 cm . Die elektromagnetischen Wellen dringen in das Lebensmittel einige Zentimeter ein und versetzen die enthaltenen H_2O Moleküle in Rotation. Die Wassermoleküle geben ihre erhaltene, höhere kinetische Energie durch Stöße dann an das umliegende Gewebe weiter, was schlussendlich durch Wärmeleitung zur Erhitzung der Lebensmittel führt. Der Wassergehalt in Lebensmittel spielt somit eine essenzielle Rolle. Wäre die verwendete Frequenz höher (max. Absorption von Wasser liegt bei 22 GHz), könnten die Wasserdipole der schnellen Feldänderung nicht mehr folgen und die Absorption der Mikrowellen durch das Wasser wäre schwächer. (Berger, 2002, S. 10 f)

In der theoretischen Auseinandersetzung im Unterricht kann auch über das Absorptionsspektrum von Wasser gesprochen werden. Aufgrund der hohen Stoßfrequenzen zwischen den Molekülen im flüssigen Aggregatzustand von Wasser, ist das Absorptionsspektrum sehr stark stoßverbreitet. Es ist dadurch keine resonanzartige Absorption möglich. Die Relaxationszeit t zwischen zwei Stößen in Wasser lässt sich über die Eindringtiefe d abschätzen ($d \approx 1\text{ cm}$ angenommen).

$$t \approx \frac{c}{\omega^2 d \sqrt{\chi_0}} \approx 10^{-11}\text{ s} \quad (11)$$

Bei χ_0 handelt es sich um die Suszeptibilität von Wasser, welche ca. 80 beträgt. Die daraus folgende Stoßfrequenz beträgt daher 10^{11} Hz und ist damit größer als die Mikrowellenfrequenz von $2,45\text{ GHz}$. Die Absorption von Wasserdampf bei dieser Frequenz ist aber so gering, dass eine weitere Erhitzung nicht möglich ist. Die Eindringtiefe im Dampf ist in etwa 8 Zehnerpotenzen größer als im flüssigen Aggregatzustand. (Berger, 2002, S. 11)

3.3 Mythen und Geschichten

In Österreich gibt es in 3 von 4 Haushalten ein Mikrowellengerät. Zerstört die Erwärmung in der Mikrowelle die Nährstoffe oder macht die verwendete Mikrowellenstrahlung sogar krank? Es ranken sich viele Mythen und Geschichten um das beliebte Haushaltsgerät. Ein Mythos ist es, dass die verwendete Strahlung Krebs erregt. Die Strahlung, welche in

Mikrowellenöfen verwendet wird, ist hochfrequent. Diese Art von Strahlung umgibt uns Menschen Tag und Nacht, obwohl die Intensität natürlich geringer ist, als sie in der Mikrowelle vorherrscht. Allgegenwertige Quellen sind z.B. die Sonne, WLAN-Router, Mobiltelefone und Radiosender. Wird ein Mikrowellengerät sachgemäß verwendet, tritt aus der Mikrowelle nur ein Bruchteil der Strahlung aus, wie sie uns im modernen Alltag jederzeit umgibt. Die häufigsten Verletzungen im Zusammenhang mit Mikrowellen sind übrigens Verbrennungen und somit ein Fall für den „Darwin Award“.

Ängste und Mythen entstehen in den meisten Fällen durch unsachgemäße Bedienung der Geräte. Einer Legende nach gab eine Dame in den USA ihre nasse Katze zum Trocknen in die Mikrowelle, woraufhin das Tier qualvoll verendete. Seit dem darauffolgenden Rechtsstreit, den der Hersteller dieses Gerätes verloren hat, wird in jeder Bedienungsanleitung davor gewarnt, seine Haustiere in die Mikrowelle zu geben. (Focus.de, 2018)

Um solche Missverständnisse, Mythen und Verletzungen zu vermeiden, eignet sich der Physikunterricht in der Schule. Man kann Mythen und Geschichten aufbauend auf Halbwissen nur durch sachliche und wissenschaftliche Aufklärung widerlegen und verhindern!

Sind Lebensmittel, welche in der Mikrowelle erhitzt werden, ungesund?

Zu dieser Frage kursieren immer wieder Mythen in der Öffentlichkeit. Es wird befürchtet, dass sich Lebensmittel, welche in der Mikrowelle erhitzt werden, chemisch in ihrer Zusammensetzung verändern. Aus physikalischer Sicht könnte die Fragestellung umformuliert werden. Sind die Feldstärken in einem Mikrowellengerät groß genug, um nichtlineare Prozesse wie Multiphotonendissoziation oder Multiphotonenionisation zu bewirken? Es wäre nur durch diese Prozesse denkbar, reaktionsfreudige Radikale zu erzeugen, welche die chemische Zusammensetzung von Lebensmitteln verändern könnten. Vorweg ist zu sagen, dass Mikrowellenstrahlung im Gegensatz zu Röntgenstrahlung nicht ionisierend wirken kann. Es können also keine chemischen Bindungen direkt aufgebrochen werden. Albert Einsteins Beschreibung des Photoeffektes besagt, dass Elektronen aus einem Metall bei dessen Bestrahlung mit Licht nur dann austreten können, wenn die Energie $h \cdot f$ der Photonen größer als die Bindungsenergie bzw. Austrittsarbeit der Elektronen ist. Ist die verwendete Frequenz des Lichts kleiner als der Austrittsarbeit entsprechenden Grenzfrequenz, so führt auch keine Erhöhung der Lichtleistung zur Elektronenemission.

Berechnet man die Energie eines Photons in einem Mikrowellengerät, kommt man durch $E = h \cdot f = 10^{-5} \text{ eV}$ auf einen Zahlenwert, der weit unter den typischen Bindungsenergien im Elektronenvoltbereich liegt. Durch diese Gegebenheit können Mikrowellenphotonen im Gegensatz zu Röntgenphotonen, unabhängig von ihrer Intensität, keine chemischen Bindungen direkt aufbrechen, da sie energetisch zu schwach sind. Theoretisch gibt es aber die Möglichkeit, dass sich ein Wassermolekül durch Absorption ionisieren lässt, indem es schrittweise 10^5 Photonen aufnimmt. Bei diesem Prozess würde man von einer Multiphotonenabsorption sprechen. Dabei müsste ein Wasserstoffmolekül, welches gerade die Energie eines Photons aufgenommen hat, innerhalb der Relaxationszeit von $t = 10^{-11} \text{ s}$ ein weiteres Photon bzw. dessen Energie aufnehmen. Diese Bedingung erfordert eine sehr hohe Strahlungsintensität von

$$I_s = \frac{E_{\text{photon}}}{\sigma t} \quad (12)$$

Der Wirkungsquerschnitt σ berechnet sich aus der Wassermoleküldichte n und der mittleren freien Weglänge d der Photonen in Wasser zu $\sigma = \frac{1}{n d}$. Mit einer Photonenenergie von 10^{-5} eV , einer Dichte von 10^{22} Wassermolekülen/ cm^3 und einer Eindringtiefe von etwa 1 cm ergibt sich eine notwendige Intensität von $I_s \approx 10^9 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$. In einem handelsüblichen Mikrowellengerät hat die Intensität jedoch nur einen Wert von ca. $2 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$. Die vorhandene Intensität liegt somit viele Größenordnungen unter jener, bei welcher Multiphotonenabsorption möglich ist. Dieser Prozess ist somit ausgeschlossen und es können daher keine Radikale entstehen, welche mit anderen Zellen eines Lebensmittels reagieren bzw. diese dadurch verändern können. (Berger, 2002, S. 14 f)

Blickt man jedoch z.B. auf Proteine, so werden diese in einer Mikrowelle beim Erhitzen denaturiert, also strukturell verändert. Der gleiche Prozess findet aber auch beim herkömmlichen Erhitzen in der Bratpfanne oder auch bei der Verdauung statt. Entgegen der allgemeinen Meinung kann das Erhitzen von Speisen in der Mikrowelle in manchen Fällen sogar schonender als der herkömmliche Weg sein. Die elektromagnetischen Strahlen in Mikrowellen können nur Wassermoleküle in flüssiger Form erhitzen. Deshalb wird die Temperatur der Speisen nie über die Siedetemperatur von Wasser gehoben. Dadurch bleiben die Aromastoffe, welche aus organischen Molekülen bestehen, weitgehend erhalten. Hat ein Kochtopf oder eine Pfanne eine höhere Temperatur als 100°C , ist dies nicht der Fall.

Der gleiche Effekt ist aber ein Nachteil wenn es um die Zubereitung von Fleisch geht. Die chemische Reaktion, welche dafür verantwortlich ist, dass das Fleisch knusprig- braun wird, setzt über der auf 100°C begrenzten Kochtemperatur der Mikrowelle ein. Bei der so genannten Maillard- Reaktion entstehen erst ab 140°C die erwünschten geruchs- und geschmacksverstärkenden Stoffe in einer Kruste an der Oberfläche (Chemie.de, 2018). Um auch diesen Anforderungen gerecht zu werden, haben einige Hersteller zusätzliche Grillflächen in Mikrowellenöfen eingebaut. (Berger, 2002, S. 15)

Tritt aus der Mikrowelle Strahlung aus?

Der Garraum in der Mikrowelle besteht aus Metall und dieser wirkt wie ein Faraday'scher Käfig, indem die elektromagnetischen Wellen an den Wänden vollständig reflektiert werden. Die einzige Möglichkeit, dass Strahlung im Betrieb aus der Mikrowelle austreten könnte, wäre über die Klapptüre an der Vorderseite. Um den Strahlenausritt an den Rändern zu verhindern, werden die Fugen mit sogenannten $\frac{\lambda}{4}$ - Verdrosselungen abgedichtet. Es handelt sich

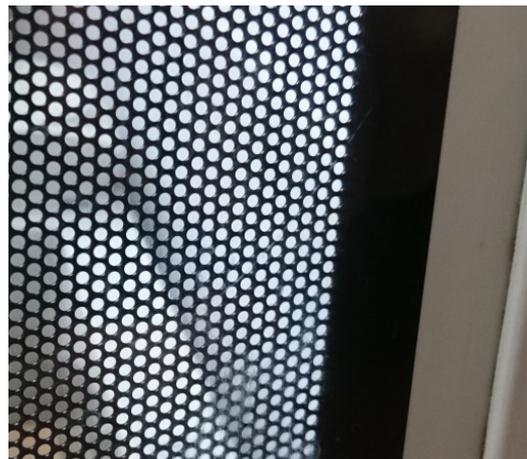


Abbildung 11: Metallgitter im Mikrowellenfenster; eigenes Bild

dabei um Ferritdichtungen, welche auf die Strahlung polarisierend wirken. (Pehl, 1992)

Um in das Mikrowellengerät einsehen zu können, ist die Klapptüre bei fast allen Geräten mit einer Glasfront versehen. Um auch hier den Austritt von Strahlung zu verhindern, ist ein Metallgitter mit einer Maschenweite von 1 – 2mm integriert.

Dieses Gitter wirkt ebenso wie ein Faraday'scher Käfig und lässt keine elektromagnetische Strahlung passieren. Doch diese Aussage ist nur bedingt richtig. Würde keine elektromagnetische Strahlung transmittieren können, könnte man auch nicht durch das Gitter in den Garraum sehen können. Sichtbares Licht unterscheidet sich von Mikrowellen in der Frequenz bzw. in der Wellenlänge. Die Wellen, welche in den Geräten verwendet werden, haben eine Wellenlänge von ca. $\lambda = 12 \text{ cm}$. Ist die Wellenlänge groß gegenüber der Maschenweite des Gitters, werden die Wellen vollständig reflektiert. Die Wellenlänge von sichtbarem Licht liegt im nm Bereich und kann somit ungehindert passieren. Doch völlig „dicht“ ist ein Mikrowellengerät trotzdem nicht, wie das Experiment „Handy in der

Mikrowelle“ beweist. Es stellt sich daher die Frage der Wirkung von hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung auf den menschlichen Körper. Es gibt aber viele Studien darüber, dass man sich beim Betrieb einer intakten Mikrowelle keine Sorge um seine Gesundheit machen muss. (Berger, 2002, S. 13)

„Das Bundesamt für Strahlenschutz (Bsf) hat repräsentative Messungen an Mikrowellengeräten durchgeführt mit dem Resultat, dass von intakten Geräten keine Strahlungsgefahr ausgeht. („Internet“, Bsf) Die Leckstrahlung erreichte im Mittel 1 % des gesetzlichen Emissionsgrenzwertes von 5 mW/cm^2 an der Geräteoberfläche. An üblichen Aufenthaltsorten in der Umgebung von Mikrowellengeräten liegt die Strahlung unter einem Tausendstel des Grenzwertes.“ (Möllmann, Vollmer, 2004, S. 43)

Eine ebenso weit verbreitete Befürchtung ist es, dass Mikrowellen beim Öffnen der Türe austreten könnten, nachdem das Gerät im Betrieb war. Um diese Befürchtung zu entkräften, muss man zunächst wissen, wie schnell Mikrowellen im leeren Garraum absorbiert werden bzw. nach dem Abschalten vorhanden sind. Mikrowellen werden im Garraum zum Großteil reflektiert und zu einem kleinen Teil in den Wänden absorbiert. Bei der verwendeten Frequenz von $2,45 \text{ GHz}$ und einem metallischen spezifischen Widerstand von $\rho = 10^{-7} \Omega\text{m}$, kann die Eindringtiefe in das Metall, auch „Skintiefe“ genannt, etwa

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \omega}} \approx 1 \mu\text{m} \quad (13)$$

betragen. Die Größe der Güte Q eines Hohlraumresonators lässt sich als das Verhältnis des vom elektromagnetischen Feld eingenommenen Volumens und dem Volumen der Metallwand abschätzen, in den das Feld eindringt. (Jackson, 1983, S. 421 ff)

$$Q = \frac{a^3}{d \cdot 6a^2} = \frac{a}{6d} \quad (14)$$

Wobei a die Kantenlänge des als würfelförmig angenommenen Garraumes ist. Es ergibt sich für die Güte daraus ein Wert von etwa 10^4 . Die Güte ist ebenso definiert als das Verhältnis, der im elektromagnetischen Feld gespeicherten Energie und dem Energieverlust je Schwingungsperiode. Sie gibt daher auch die Zahl der Reflexionen an, bei welcher die Welle im Garraum im Wesentlichen absorbiert ist. Für diese Zahl von Reflexionen benötigt die Welle die Zeit $t = 10^4 a/c = 10 \mu\text{s}$ wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. In dieser

abgeschätzten Zeit von 10 μ s kann die Türe nicht geöffnet werden, also ist auch diese Befürchtung unbegründet. (Berger, 2002, S. 13)

4. Sicherheitshinweise

4.1 Schulunterrichtsgesetz

Bei den für Lehrpersonen rechtlich verbindlichen schulrechtlichen Bestimmungen der Aufsichtspflicht im Schulunterricht, ist laut Schulunterrichtsgesetz „[...] insbesondere auf die körperliche Sicherheit und auf die Gesundheit der Schüler zu achten und Gefahren nach Kräften abzuwehren.“ (Schulunterrichtsgesetz, 2017, § 51 Abs. 3)

Laut § 5 der Rechtsvorschrift für Schulordnung gilt: „die Schüler sind vor dem Gebrauch von Maschinen und Geräten, die eine Gefährdung verursachen können, auf die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen aufmerksam zu machen. [...]“ (Schulordnung, 2017, § 5)

Die oben angeführten Zitate und Sicherheitsbestimmungen spielen besonders im Zusammenhang mit Experimenten im Physikunterricht eine wichtige Rolle. Da bei vielen hier angeführten Experimenten eine Mikrowelle „zweckentfremdet“ wird, ist besondere Vorsicht geboten. Für einen besseren Überblick, werden die Experimente in drei Gefahrenstufen eingeteilt. **Die Einteilung erfolgt durch persönliche Erfahrungen beim Experimentieren und kann als Empfehlung, jedoch auf keinen Fall als Garantie angesehen werden.** Die einzelnen Experimente werden in der Auflistung mit der jeweiligen Gefahrenstufe gekennzeichnet. Im Haushalt sollten laut Bedienungsanleitung und Sicherheitsvorschriften Mikrowellenöfen auf keinen Fall leer betrieben werden um Rückkopplungen des Mikrowellenfeldes in das Magnetron zu verhindern. Bei manchen Versuchen, die in dieser Arbeit beschrieben sind, wird gegen die Herstelleranweisungen verstoßen, daher kann es zu Schäden an den Geräten kommen.

4.2 Einteilung Gefahrenstufen

Unbedenklich



Wenn dieses Symbol bei der Experimentbeschreibung ersichtlich ist, geht keine Gefahr von diesem Versuchsaufbau aus. Diese Versuche können auch von den Schülerinnen und Schüler selbstständig durchgeführt werden.

Gefährlich



Wenn dieses Symbol bei einer Experimentbeschreibung ersichtlich ist, kann von einer Gefahr ausgegangen werden. Diese Experimente sind von der Lehrperson im Vorfeld auf jeden Fall ohne Publikum auszuprobieren, um die auftretenden Gefahren zu erkennen. Bei den jeweiligen Versuchen sind weitere Sicherheitsanweisungen aus der Versuchsbeschreibung zu entnehmen.

Nicht geeignet



Wenn dieses Symbol bei einer Experimentbeschreibung ersichtlich ist, sind diese Versuche für den Schulunterricht nicht geeignet. Es ist davon auszugehen, dass Gegenstände durch Verdampfung oder Explosion die Mikrowelle beschädigen oder diese sogar verlassen können. Da diese Experimente jedoch interessante physikalische Effekte zeigen, können diese über den abgedruckten QR- Code über Videoaufnahmen angesehen werden.

5. Experimente

Handy in der Mikrowelle



Wie im Kapitel 3.1 erläutert, funktioniert eine Mikrowelle über die Anregung von Molekülschwingungen im H_2O Molekül und der damit einhergehenden Erwärmung der Speisen. Da sich die Speisen erwärmen sollten und nicht die Person, die den Mikrowellenherd bedient, sollte aus der Mikrowelle möglichst wenig Strahlung austreten. An dieser Stelle sei erwähnt, dass trotz guter Abschirmung Strahlung in gesetzlich erlaubter Intensität austreten kann. Der Garraum in der Mikrowelle besteht aus Metall und wirkt wie ein Faraday'scher Käfig. Die Mikrowellenstrahlung wird von den Wänden gut absorbiert und folglich reflektiert und kommt somit nicht nach außen. Damit auch durch die Türe des Gehäuses keine Strahlung austritt, ist diese meist aus Glas, in welches ein Metallgitter integriert ist. Die Maschenweite ist so gewählt, dass man gut in den Garraum sehen kann. Diese ist jedoch geringer als die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung ($\lambda \sim 12 \text{ cm}$). In den meisten Geräten sind Gitter mit einer Maschenweite von ca. $1 - 2 \text{ mm}$ verbaut, diese sind somit für Mikrowellenstrahlung undurchlässig. Durch diese Maßnahmen sollte das Gehäuse gegen das Austreten von Mikrowellenstrahlung schützen.

Warum das aber nicht so ist, kann mit einem einfachen Experiment gezeigt werden. Wenn Strahlung austreten kann, muss auch Strahlung von außen in das Gehäuse gelangen. Um das zu überprüfen, benötigen wir einen sensiblen Empfänger, den jeder von uns besitzt – ein Mobiltelefon. Handys arbeiten in einem ähnlichen Frequenzbereich wie ein Mikrowellenofen ($\sim 2,4 \text{ GHz}$). In Österreich stehen für das GSM (Global System for Mobile Communications) System das 900 MHz Band ($\lambda \approx 33 \text{ cm}$) und das 1800 MHz Band ($\lambda \approx 17 \text{ cm}$) zur Verfügung. (rtr.at)

Aufgrund dieses Wellenlängenbereiches sollte auch Handystrahlung abgeschirmt werden. Man lege das eingeschaltete Handy in die Mikrowelle, schließe die Tür und versuche es anzurufen.

Sicherheitshinweis: Hierbei darf die Mikrowelle nicht in Betrieb genommen werden!

Tatsache ist, dass in den meisten Fällen die Abschirmung durch den Faraday'schen Käfig ausreicht, um die Handystrahlung abzuschirmen und das Mobiltelefon in der geschlossenen

Mikrowelle nicht klingelt. In meinen Versuchen konnte die Hälfte der Mikrowellenöfen die Strahlung abschirmen.

Man kann Mikrowellenöfen trotzdem ohne schlechten Gewissens in der Küche verwenden, bei allen Geräten wird die Einhaltung der gesetzlichen Auflagen überprüft.

„Die Leckstrahlung erreichte im Mittel 1 % des gesetzlichen Emissionsgrenzwertes von 5 mW/cm^2 an der Geräteoberfläche. An üblichen Aufenthaltsorten in der Umgebung von Mikrowellengeräten liegt die Strahlung unter einem Tausendstel des Grenzwerts.“ (Möllmann, Vollmer, 2004, S. 43)

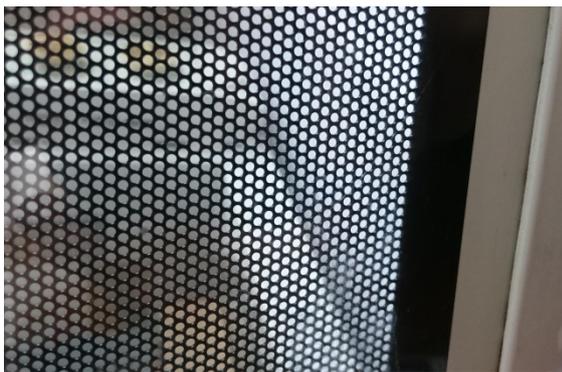


Abbildung 12: Metallgitter in Mikrowellentür; eigenes Bild



Abbildung 13: Handy in Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild

Materialien:

- Zwei Mobiltelefone

Video:



Lichtgeschwindigkeit ermitteln



Wie im Kapitel 3.1 beschrieben, bilden sich im Garraum stehende Wellen, welche lokale positive Interferenzen bzw. Knotenpunkte besitzen. Genau an diesen Knotenpunkten, auch „Hot Spots“ genannt, werden Speisen besonders schnell erhitzt. Da sich diese Knotenpunkte im Garraum punktuell anordnen, erklärt sich auch die Funktion des Drehtellers, da sich der Inhalt nur durch Drehen gleichmäßig erhitzen kann. Um diese Knotenpunkte experimentell zu lokalisieren, müssen wir also den Drehteller entfernen. Als nächsten Schritt legt man eine oder zwei Tafeln Schokolade ca. in die Mitte der Mikrowelle auf eine glatte Oberfläche. Ein zugeschnittenes Stück Karton eignet sich dafür gut, da das Material elektromagnetische Strahlung nicht gut absorbieren kann. Schaltet man nun die Mikrowelle ein, schmilzt die Schokolade genau an diesen Knotenpunkten als Erstes. Sind die Schmelzstellen gut ausgebildet, kann man die Mikrowelle ausschalten und die Schokolade auskühlen lassen. Wenn man die Schokolade vorher kühlt (Kühlschrank, Gefrierfach), verzögert sich dieser Prozess und die Schmelzstellen bilden sich besonders gut aus. Nun kann der Abstand zwischen den Senken mittels Lineal ermittelt werden.

Bei mehreren Versuchen konnte im Schnitt ein Abstand von 7 cm ermittelt werden. Nun kann man über die Betriebsfrequenz von $2,45 \times 10^9$ Hz, welche am Typenschild an der Mikrowelle abzulesen ist, die Lichtgeschwindigkeit berechnen. Der Abstand zwischen zwei Knotenpunkten entspricht genau einer halben Wellenlänge ($\frac{\lambda}{2}$), an der Stelle, an der die stehende Mikrowelle die Schokolade durchdringt. Da man nun die Wellenlänge und die



Abbildung 14: Lichtgeschwindigkeit ermitteln, Versuchsaufbau; eigenes Bild

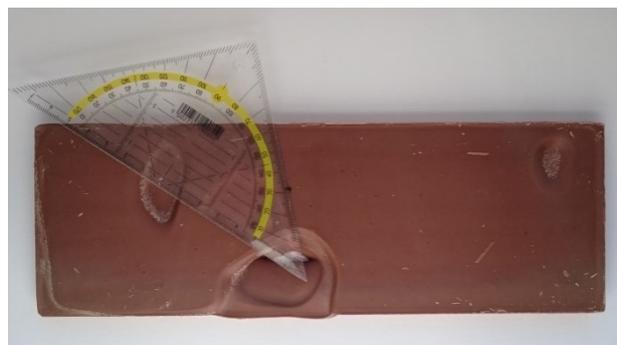


Abbildung 15: Messung des Abstandes zwischen den Knotenpunkten; eigenes Bild

Betriebsfrequenz kennt, kann über die folgende Beziehung die Lichtgeschwindigkeit errechnet werden:

$$\lambda = \frac{c}{f} \rightarrow c = \lambda \cdot f \quad (15)$$

Das errechnete Ergebnis liegt bei $3,430 \times 10^8 \frac{m}{s}$. Dieser mit einer einfachen Methode ermittelte Wert ist dem genormten Wert von $c = 2,997 \times 10^8 \frac{m}{s}$ sehr nahe. Um die Knotenpunkte im Garraum zu finden, werden mehrere Versuche benötigt, deshalb sollte man mehrere Tafeln Schokolade vorbereiten.

Material:

- Lineal
- Schokolade
- Teller/ Karton

Video:



Schwedenbomben in der Mikrowelle



Wenn man einen Schaumkuss oder Dickmann in eine Mikrowelle stellt und sie einschaltet, dehnt er sich aus. Grund dafür ist, dass das im Schaum enthaltene Wasser verdunstet und sich somit das Volumen des Schaumes vergrößert. Es ist auch zu erkennen, dass sich das in der Schokolade enthaltene Wasser ebenso erhitzt und die Schokohülle teilweise schmilzt.

Doch der interessante Effekt, neben einer verschmutzten Mikrowelle ist ein Anderer. Hier kann man beobachten, wie der Auftaumodus funktioniert. Da gefrorene Speisen langsam und gleichmäßig auftauen, und dabei nicht schon gekocht werden sollten, arbeitet die Mikrowelle getaktet. Das heißt, es wechseln sich Phasen, bei denen Strahlung vorherrscht, mit jenen, wo keine Strahlung erzeugt wird, zeitlich ab. Bei Vorhandensein von elektromagnetischen Wellen dehnt sich der Schokokuss aus, sobald das Magnetron keine

mehr erzeugt, fällt der Schaum wieder in sich zusammen. Dieser Vorgang wiederholt sich periodisch so lange, bis die Substanz vollständig geschmolzen ist.



Abbildung 16: Schwedenbombe in Mikrowelle, ohne EM Strahlung; eigenes Bild



Abbildung 17: Schwedenbombe in Mikrowelle, mit EM Strahlung; eigenes Bild

Material:

- Schokokuss/ Schwedenbombe
- Teller

Video:



Thermopapier in der Mikrowelle



Thermopapier ist eines der führenden Druckmedien, wenn man den Pro-Kopf-Verbrauch betrachtet. Egal ob Kaufquittung, Eintritts- oder Fahrkarten, Lottoscheine oder Kontoauszüge, Langzeitaufzeichnungen physikalischer Messungen wie Wetterdaten oder Erdbewegungen bis hin zu Etiketten aller Art, Thermopapier ist aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Der Grund dafür liegt nicht zuletzt in der hohen Zuverlässigkeit und den geringen Wartungsintervallen der Thermodrucksysteme und ihren niedrigen Verbrauchskosten. Thermopapier ist neben einer dickeren Trägerschicht aus normalem Papier aus einer Thermoschicht aufgebaut, welche Leuco- Farbstoffe, Entwickler Stabilisatoren und Bindemittel beinhaltet. Wenn es bedruckt wird, erhitzen kleine Heizelemente, welche im Drucksystem untergebracht sind, punktuell das Papier. An diesen Stellen reagiert der im Papier enthaltene Farbbinder und Entwickler und das Papier färbt sich ein. (gebe.net)

Diese Eigenschaft wollen wir auch in einem Experiment nutzen. Wie im Experiment „Lichtgeschwindigkeit ermitteln“ beschrieben, bildet die elektromagnetische Welle Knotenpunkte bzw. positive Interferenzen (Hot Spots) im Garraum aus, an denen sich Lebensmittel besonders schnell erhitzen. Diese Knotenpunkte, an welchen die Feldstärke besonders hoch ist, wollen wir mittels Thermopapier sichtbar machen. Dazu benötigt man eine Platte aus einem Material, welches nicht auf elektromagnetische Strahlung reagiert (Nichtleiter). Besonders gut funktioniert dies mit einer zugeschnittenen Kunststoffplatte. Auf diese Unterlage legt man das Thermopapier, welches man zuvor mit Wasser durchtränkt (Abb. 18). Gibt man nun diese Platte in die Mikrowelle und schaltet sie ein, erhitzen die elektromagnetischen Wellen das Wasser. Besonders schnell passiert dies dort, wo die stehenden Wellen

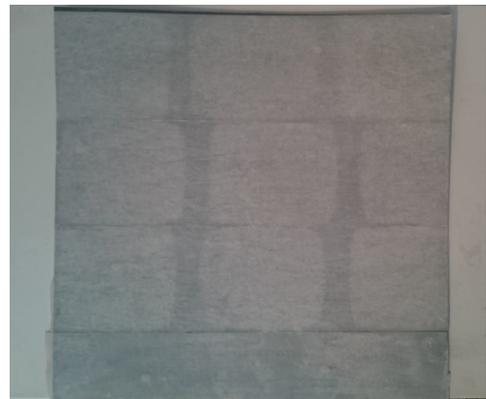


Abbildung 18: Kunststoffplatte mit aufgelegten befeuchteten Thermopapierstreifen; eigenes Bild



Abbildung 19: Thermopapier zeigt lokale Erhitzung nach Reaktion; eigenes Bild

ihre Knotenpunkte haben. An diesen heißen Stellen reagiert nun auch das Thermopapier und färbt sich ein, dadurch werden die Positionen, wo sich die Knotenpunkte befinden, sichtbar. Es ergibt sich nun ein Muster auf dieser Platte, wo man auch an mehreren Stellen die halbe Wellenlänge ($\frac{\lambda}{2}$) von ca. 7 cm abmessen kann. Damit dieser Versuch gut funktioniert, sollten die Thermopapierstreifen, welche man im Bürofachhandel günstig erstehen kann, gleichmäßig durchfeuchtet sein. Luftbläschen, welche sich unter dem Papier bilden, sollten ausgestreift werden. Bei der Handhabung mit Thermopapier ist jedoch Vorsicht geboten. Ältere Thermopapiere könnten die Chemikalie Bisphenol A enthalten, welche als gesundheitsschädlich gilt. (orf.at)

Diese örtliche Darstellung ist jedoch sehr ungenau, denn durch die Einfärbung des Thermopapiers (wie in Abb. 19 ersichtlich) wird die Intensität des Feldes nur qualitativ wiedergegeben. Der Ausschaltzeitpunkt ist schwer zu treffen da das Thermopapier erst oberhalb von 60°C reagiert. Bei längerer Erwärmung verschwimmen die lokalen Hot Spots, weil immer mehr Bereiche die Schwelltemperatur der Reaktion im Thermopapier überschreiten. (Karstädt, Möllmann, Vollmer, 2004, S. 90 f)

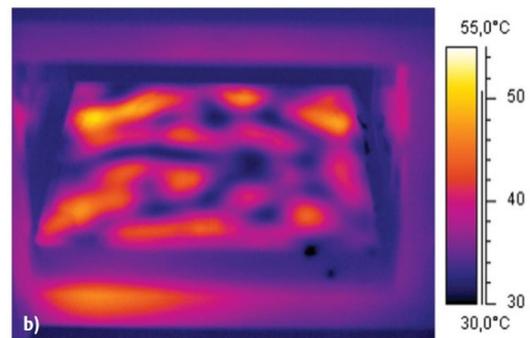


Abbildung 20: Nachweis der Moden mit einem Wasserfilm auf einer Glasplatte und IR-Kamera, 15 s Erwärmung mit 800 W Heizleistung, in 3,5 cm Höhe, Quelle: Karstädt, Möllman, Vollmer, 2004, Eier im

Das elektromagnetische Feld ist ungleichmäßig im Garraum verteilt, dies kann man auch mit einer auf Infrarotstrahlung basierenden Wärmebildkamera feststellen. In der Abbildung 20 sieht man eindeutig die daraus resultierende unterschiedliche Temperaturverteilung.

Materialien:

- Kunststoffplatte/ Glasplatte
- Thermopapier
- Wasser
- Lineal

Video:



Popcorn herstellen



Geschichtlich gesehen ist die Herstellung von Popcorn eine der ersten Anwendungen für Mikrowellenstrahlung im Zusammenhang mit Lebensmitteln. Auch heute ist die Herstellung von Popcorn mittels Mikrowelle eine schnelle, energiesparende und beliebte Lösung. Maiskörner, welche die Samen der Maispflanze darstellen, bestehen aus stärkehaltigem Speichergewebe, welches mit einer festen Samenschale umhüllt ist. Puffmais, wie das Korn zur Herstellung von Popcorn noch genannt wird, beinhaltet Wasser im Speichergewebe. Durch die elektromagnetische Strahlung erhitzt sich das enthaltene Wasser und verdampft. Da Wasserdampf ein viel größeres Volumen als flüssiges Wasser einnimmt, springt die Schale durch den steigenden Druck auf. Das Wasser verdampft, die vorher gequollene Stärke schäumt auf und erstarrt nach einer kurzen Abkühlphase.



Abbildung 21: Mikrowellenpopcorn im Papiersack; eigenes Bild



Abbildung 22: Mikrowellenpopcorn fertig; eigenes Bild

Es gibt mehrere Möglichkeiten Popcorn in der Mikrowelle herzustellen. Im Handel gibt es das in Papier abgepackte Mikrowellenpopcorn. Die Puffmaiskörner sind schon gesalzen und mit etwas Fett in einem Papiersack abgepackt. Bei 800 W dauert die Herstellung nur 2 – 3 Minuten. Dabei ist der Drehteller zu verwenden, um sicher zu stellen, dass sich alle Maiskörner gleichmäßig erhitzen. Nachdem man die Mikrowelle eingeschaltet hat, poppen die ersten Körner nach ca. 40 – 50 Sekunden auf. In den Abb. 21 und 22 kann man eindeutig die Volumensvergrößerung sehen.

Eine weitere Möglichkeit ist es, Puffmaiskörner mit etwas Öl in ein mikrowellenfestes Behältnis zu geben. Dies sollte man möglichst mit einem Deckel abdecken, um das Umherspringen von Popcorn im Garraum zu vermeiden. Hier geschieht dasselbe, wie oben

beschrieben. Das Wasser im Korn verdampft schlagartig ab einer Schwelltemperatur von ca. 180°C und der entstehende Dampfdruck bringt das Korn zum Platzen. Da sich in diesem Moment sein Volumen mindestens verdoppelt, sollte das Gefäß groß genug sein, damit alle aufgepoppten Körner Platz haben. In diesem Moment des Poppens verringert sich die Dichte des Korns um das 8-fache. (RoyalSociety)



Abbildung 23: Popcorn Herstellung in einem Gefäß; eigenes Bild

Materialien:

- Mikrowellenpopcorn in Papierbeutel
- Popcorn
- Gefäß
- Speiseöl
- Deckel für Gefäß

Video:



Dampfkarussell



Bei diesem Experiment wird mit Hilfe von elektromagnetischen Strahlen Wasser erhitzt, um in weiterer Folge eine simple Wärmekraftmaschine zu betreiben, welche den Wasserdampf in Bewegungsenergie umwandelt. Zunächst befestigt man zwei Kunststoffbehälter (z.B. von Überraschungseiern) an einem Rotor, welcher in der Mitte gelagert ist. In diesem Experiment werden Lego Bauteile verwendet. Anschließend bohrt man kleine Löcher (ca. 1 mm Durchmesser) in diese Behälter, welche vor dem Versuch mit

Wasser gefüllt werden. Dazu verwendet man am besten eine Spritze mit einer stumpfen Nadel.

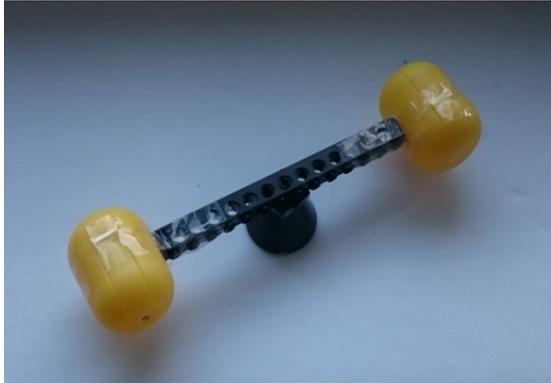


Abbildung 24: Dampfkarussell Aufbau; eigenes Bild



Abbildung 25: das Dampfkarussell wird zentral im Garraum platziert; eigenes Bild

Nachdem man das Karussell in der Mitte des Garraumes platziert hat, kann man die Mikrowelle in Betrieb nehmen. Nach wenigen Sekunden fängt es sich an zu drehen.

Grund dafür ist die Expansionskraft von Wasserdampf und das Rückstoßprinzip. Diese physikalischen Effekte kennt man bereits seit Heron von Alexandria, welcher ca. 100 n. Chr. eine mit Wasserdampf betriebene Drehkugel namens Äolipile erfand. Sie funktionierte ähnlich wie das hier gezeigte Dampfkarussell. (leifiphysik.de)

Das in den Behältern befindliche Wasser wird durch die elektromagnetische Strahlung erhitzt und verdampft. Da der Wasserdampf expandiert, wird er durch die kleinen Löcher an der Rückseite der Behälter gedrückt, welche wie Düsen wirken. Die gerichteten austretenden Dampfstrahlen setzen das Karussell nach dem Rückstoßprinzip in Bewegung.

Materialien:

- Behälter (2 x Überraschungsei)
- Klebeband
- Rotor mit Lagerung
- Wasser
- Spritze mit stumpfer Nadel

Video:



Luftballon mit Wasser in der Mikrowelle



Die Physik bietet viele Wege, um einen Luftballon aufzublasen. Eine Möglichkeit ist es, dies mit der Mikrowelle zu machen. Zunächst nimmt man einen handelsüblichen Luftballon und füllt ca. 10 ml Wasser ein. Nachdem man den Luftballon mit einem Knoten verschlossen hat, kann man ihn in den Mikrowellenofen legen und diese auf 800 W Leistung einstellen. Nach dem Einschalten dauert es nur wenige Sekunden bis sich der Luftballon aufbläst. Nach dem Ausschalten verringert sich das Volumen nach einiger Zeit wieder auf den Ausgangszustand.

Der physikalische Hintergrund hat mit der Volumsexpansion von Wasser zu tun, wenn dieses verdampft. Die im Wasser

enthaltenen H_2O Moleküle werden von der Mikrowellenstrahlung zur Bewegung (Rotation) angeregt, was in weiterer Folge eine Erwärmung des Mediums bewirkt. Das Wasser erhitzt sich bis zum Siedepunkt und verdampft. Da Wasserdampf je nach Temperatur das ca. 1700-fache von seinem Volumen im flüssigen Zustand einnehmen kann, sollte man in den Luftballon nicht zu viel Wasser einfüllen. (univie.ac.at)

Das Verdampfen geschieht (bei Normaldruck) bei gleichbleibender Temperatur von $100^{\circ}C$. Das bedeutet, dass eine weitere Energiezufuhr durch die Mikrowellenstrahlung zunächst nicht zu einer weiteren Erwärmung des Wasserdampfes führt, es verdampft lediglich das restliche, flüssige Wasser, welches noch vorhanden ist und das Volumen des Ballons vergrößert sich. Die Energie, welche in der Zeit des Verdampfens zugeführt wird, löst die Bindung zwischen den einzelnen Wassermolekülen fast vollständig auf. Im gasförmigen



Abbildung 26: Luftballon mit Wasser in der Mikrowelle, Versuchsaufbau, die Schale haltet den Ballon auf Position; eigenes Bild



Abbildung 27: das enthaltene Wasser ist verdampft und das Volumen des Ballons hat sich vergrößert; eigenes Bild

Zustand gibt es zwar noch Kräfte zwischen den Molekülen, diese sind aber um ein Vielfaches geringer als im flüssigen Aggregatzustand. Im gasförmigen Zustand können sich diese Moleküle relativ lange bewegen, bevor sie mit ihresgleichen zusammenstoßen. Das ist auch der Grund, warum ein Gas den zur Verfügung stehenden Raum im Gegensatz zu Festkörpern oder Flüssigkeiten vollständig ausfüllt. Das Verhältnis zwischen Temperatur und Volumen von Wasser kann im folgenden Diagramm veranschaulicht werden.

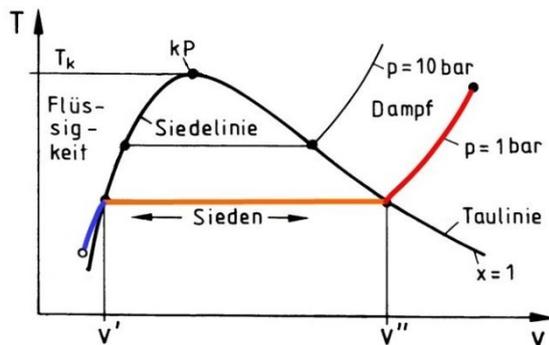


Abbildung 28: T-V Diagramm von Wasser, Erhitzen (blau) - Sieden (orange) - Überhitzen (rot), Quelle: E. Hahne, 2000, Technische Thermodynamik, Bild 5.2, S 234

Die Änderung des Volumens kann wie folgt errechnet werden. Wir gehen davon aus, dass die eingefüllten 10 ml Wasser vollständig und isobar verdampfen.

Ideale Gasgleichung:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (16)$$

umgeformt

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p} \quad (17)$$

Für die Stoffmenge n gilt $n = \frac{m}{M} = \frac{10 \text{ g}}{18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,55 \text{ mol}$, für die allgemeine Gaskonstante wird

der Zahlenwert $R = 8,31 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2 \text{ mol K}}$ eingesetzt, für die Temperatur $T = 373 \text{ K}$ was (100 °C)

entspricht und für den Druck p wird der genormte Normaldruck von $p = 101.325 \text{ Pa}$ eingesetzt. Es ergibt sich ein Volumen von $V = 0,01683 \text{ m}^3$ was ca. 17 l entsprechen. In der Realität wird das Volumen des Ballons nicht so groß, da sich nicht das gesamte Wasser verdampfen lässt und die Verdampfung nicht isobar ist, weil sich der Ballon nicht kraftfrei aufblasen lässt.

Fachliche Ergänzung:

Ist das Wasser verdampft, kann der Wasserdampf durch Mikrowellen nicht weiter erhitzt werden. Der Bereich, wo Wasser Mikrowellen absorbieren kann, liegt bei 22 GHz. Die Wasser Moleküle schwingen in der Dampfphase mit einer Frequenz von etwa 10^8 pro s^2 . Diese Stöße, welche letztendlich zur Erwärmung führen, werden von einer rotierenden in eine translatorische Bewegung übertragen. Dies führt zu einer Druckverbreiterung der Absorptionslinie von ca. 100 MHz. Diese Verbreiterung reicht aber nicht aus, um bei einer Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz noch zu absorbieren. (Berger, 2002, S. 4)

Materialien:

- Luftballons
- Wasser
- Keramikschale

Video:



Toastbrot vs. Knäckebrot in der Mikrowelle



Die Erfahrung mit einem Mikrowellenherd im Alltag zeigt, dass sich verschiedene Gerichte unterschiedlich schnell erwärmen. Am folgenden Beispiel wird gezeigt, woran das liegt. Wenn man Knäckebrot isst, fühlt sich das im Vergleich zu einer Scheibe Toastbrot relativ trocken an. Das lässt vermuten, dass der Wassergehalt von Knäckebrot viel geringer ist als der von Toastbrot. Wie im Theorieteil erklärt, müsste sich das Brot mit dem höheren Wassergehalt auch schneller erwärmen. Um das herauszufinden, stellt man eine Scheibe Toastbrot und ein Knäckebrot angelehnt an eine Halterung in die Mitte des Drehtellers. Da die Moden im Garraum nicht gleichverteilt sind, muss sich der Drehteller bei diesem Versuch mindestens um 360° drehen, um die gleichen Bedingungen für beide Testobjekte zu gewährleisten. Nachdem sich der Drehteller eine Umdrehung unter Mikrowellenstrahlung gedreht hat, misst man die Temperatur der Brote, am besten mit einem kontaktlosen

Infrarotthermometer. Nach einer Versuchsreihe hat sich herausgestellt, dass sich das Knäckebrot im Schnitt um 7°C und das Toastbrot um 53°C erwärmt hat. Dieses Ergebnis korreliert sehr gut mit den Wassergehaltangaben auf den Produktverpackungen. Lebensmittel mit hohem Wassergehalt sind also besser für die Erwärmung in einem Mikrowellenofen geeignet.



Abbildung 29: Toastbrot vs. Knäckebrot in der Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild

Materialien:

- Toastbrot (frisch)
- Knäckebrot
- Infrarotthermometer
- Halterung (mikrowellenfest)

Video:



Seife in der Mikrowelle



Wenn man ein Stück Seife in der Mikrowelle erhitzt, verdampft das enthaltene Restwasser. Da die Wassermoleküle in der Seife relativ gleichmäßig verteilt sind, bilden sich Poren mit Wasserdampf, welcher ein größeres Volumen einnimmt. Somit wächst die Masse kontinuierlich bis das gesamte Wasser verdampft ist. Dabei kann die Seife ein Vielfaches ihres Ausgangsvolumens erreichen. Nach dem Versuch geht die Seife nicht wieder in ihren Ausgangszustand zurück, da sie im expandierten Zustand erstarrt. (Karstädt, Möllmann, Vollmer, 2004, S. 8)



Abbildung 30: Seife in der Mikrowelle, nach dem Experiment; eigenes Bild

Materialien:

- Seife (fest)
- Teller

Video:



Vergleich von Wasser und Eis in der Mikrowelle



Die Funktionsweise eines Mikrowellenofens beruht darauf, dass Wassermoleküle, welche in Speisen enthalten sind, zur Bewegung angeregt werden. Das Wassermolekül ist ein Dipol, den man sich wie eine kleine Kompassnadel vorstellen kann. Dieser schwingt angeregt durch das elektromagnetische Feld in der Mikrowelle hin und her und wird periodisch neu ausgerichtet, was schlussendlich das Molekül in Rotation versetzt. Den Speisen in der Mikrowelle wird Wärme in Form von Rotationsenergie „von Innen“ heraus zugeführt, wodurch sich die Substanz punktuell erwärmt. Die Rotationsenergie wird durch molekulare Zusammenstöße auf benachbarte Moleküle, welche auch unpolar sein können, übertragen, wodurch sich die Wärme in der gesamten Speise ausbreiten kann. Der Absorptionsgrad ist dabei abhängig von der Stärke des Dipolmomentes eines Moleküls. Das H_2O Molekül hat ein vergleichsweise hohes Dipolmoment und somit eignen sich wasserhaltige Speisen besonders gut zum Erwärmen in der Mikrowelle. Um das Verhalten von Eis und Wasser in der Mikrowelle zu vergleichen, gibt man zunächst einen Eisblock für drei Min. in die Mikrowelle. Dieser Eisblock besteht aus 150 ml gefrorenem Wasser, welche zuvor in einen Luftballon abgefüllt, eingefroren wurde. Nach 60 Sek. Bei 800 W Leistung in der Mikrowelle ist der -8°C kalte Eisblock nur minimal geschrumpft und es sind nur ca. 20 ml geschmolzenes Wasser entstanden.



Abbildung 31: Eisblock in Mikrowelle; eigenes Bild



Abbildung 32: Eisblock nach dem Experiment, ein kleiner Teil des Eisblocks ist geschmolzen; eigenes Bild

Zum Vergleich werden nun 150 ml Wasser in einem mikrowellenfesten Glasbecher in die Mikrowelle gestellt. Nach derselben Zeit von 60 Sek. bei 800 W Leistung erwärmt sich das Wasser von 22,5°C auf 68°C.



Abbildung 33: Wasser im mikrowellenfesten Glasbehälter; eigenes Bild

Um die beiden Aggregatzustände zu vergleichen, kann man die aufgenommenen Energien überschlagsmäßig errechnen. Wenn man im Falle des Eises die Schmelzwärme Q von $Q_{Schmelz,Wasser} = 333 \frac{kJ}{kg}$ betrachtet, sind ca. $Q_{Schmelz} = 6660 J$ aufgewendet worden, um 20 ml Wasser vom Eisblock zu schmelzen.

Um die aufgenommene Energie vom Wasser im Glasbehälter zu errechnen, benötigt man die Formel der spezifischen Wärmekapazität c .

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \quad (18)$$

umgeformt auf

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (19)$$

Durch das Einsetzen von der spezifischen Wärmekapazität von Wasser $c = 4181 \frac{J}{kg \cdot K}$, der Masse $m = 0,150 kg$ und einen Temperaturanstieg von $\Delta T = 45,5^\circ C$ erhält man eine zugeführte Wärme von $Q_{Erwärmung} = 28535 J$.

Diese überschlagsmäßige Berechnung ist keinesfalls genau, zeigt aber ein deutliches Ergebnis. Das Eis konnte ca. vier Mal weniger Energie aufnehmen. Der Grund dafür ist, dass sich die Teilchen bzw. die Wassermoleküle im starren Gefüge des Eiskristalls kaum bewegen können. Sie sind also starr gebunden und die dielektrische Relaxation von Wasser ist stark

behindert weil die Dipole gebunden sind und dem äußeren Feld nicht folgen können. Daher können die Moleküle im Eis nicht von Mikrowellen zum Rotieren angeregt werden.

Diese Gegebenheit ist auch dafür verantwortlich, dass gefrorene Speisen in der Mikrowelle sehr lange zum Auftauen benötigen. Bei der Auftaufunktion werden daher Phasen mit anliegendem, elektromagnetischem Feld und feldlose Phasen zeitlich abgewechselt. Hier wird vorliegendes Wasser erhitzt und in den Phasen, in welchen kein Feld vorherrscht, gewartet, bis das warme Wasser das umliegende Eis auftaut, bis danach wieder das Wasser erhitzt wird. Durch diese Gegebenheit kann ein wunderbares Dessert in der Mikrowelle hergestellt werden. Bringt man Fruchtsauce in eine Eis Kugel ein, lässt sich die Fruchtfüllung durch die Mikrowellen erhitzen, wobei das Eis sich nur in geringen Maßen erwärmt und somit fest bleibt.

Materialien:

- Messbecher
- Wasser
- Gefrierfach/ Gefrierschrank
- Luftballon
- Glasbehälter (mikrowellenfest)

Video:



Wasserglas Experiment



Bei diesem Versuch wird untersucht, wie sich unterschiedlich präparierte Wassergläser in einem Mikrowellenherd verhalten bzw. erwärmen. Man verwendet dazu ein normales Glasgefäß mit 250 ml eingefülltem Wasser, ein Glas mit der gleichen Menge Salzwasser (250 ml Wasser mit 2 Teelöffel Speisesalz) und ein Glas, welches mit Aluminiumfolie umwickelt ist. Diese Gläser werden nacheinander in die Mikrowelle gestellt und bei 800 W Leistung erhitzt. Dabei wird jeweils am Anfang, nach 60 Sek. und nach 120 Sek. die Temperatur gemessen. Zur Messung der Temperatur wurde bei diesem Experiment ein Flüssigkeitsthermometer (Ausdehnungsthermometer) verwendet.



Abbildung 34: Glas mit 250 ml Wasser in der Mikrowelle; eigenes Bild



Abbildung 35: Glas mit 250 ml Salzwasser (2 Teelöffel Speisesalz) in der Mikrowelle; eigenes Bild



Abbildung 36: Glas mit 250 ml Wasser mit Aluminiumfolie umwickelt; eigenes Bild

Ergebnis:

Zeit / s	T Wasser / °C	T Salzwasser / °C	T Aluminiumfolie / °C
0	15	15	15
60	58	70	23
120	81	85	27
180	94	95	32

Tabelle 1: Temperaturmessung im Abstand von 60 Sekunden

Die Messungen zeigen ein eindeutiges Ergebnis. Das normale Wasser erhitzt sich. Der physikalische Hintergrund dazu ist im Theorieteil beschrieben. Wenn man die Erwärmung von Salzwasser betrachtet, stellt man fest, dass sich dieses schneller als normales Wasser erhitzt. Der Grund dafür ist, dass reine Wassermoleküle als Dipole über Wasserstoffbrückenbindungen zusammenhängen. Um diese relativ starken Bindungen aufzubrechen, benötigt man viel Energie. Um die Wassermoleküle zu trennen bzw. damit diese sich frei bewegen können (Erwärmung = mehr Bewegung), muss man viel Wärme hinzufügen. Gibt man nun Salz in das Wasser, werden diese Bindungen gelöst. Die H_2O Moleküle binden sich jetzt nicht mehr untereinander über Wasserstoffbrückenbindungen, sondern werden als Dipole an die elektrisch geladenen Ionen des gelösten Salzes gebunden. Wird also Salzlösung erhitzt, bewegt sich jedes einzelne Ion mitsamt der umliegenden Wasserhülle als eine Einheit. Diese Einheiten, auch Ion-Wasserkomplexe genannt, binden

auch aneinander, aber viel geringer als die ursprünglichen Wasserstoffbrückenbindungen. Deshalb muss man im Vergleich weniger Wärme zuführen, um sie voneinander zu trennen bzw. die Temperatur zu erhöhen. Die in der Lösung vorhandenen Na^+ und Cl^- Ionen werden durch das elektrische Wechselfeld ebenfalls zur Bewegung angeregt und erzeugen über Stöße mit Molekülen zusätzliche Reibungswärme (Möllmann, Vollmer, 2004, S. 42). Deshalb wird das mit Salz versehene Wasser in der Mikrowelle auch schneller heiß. Dieses Verhalten kann auch beobachtet werden, wenn man den Vergleich mit herkömmlichem Erhitzen im Kochtopf untersucht.

Vergleicht man hierzu das Glas, welches mit Aluminiumfolie umwickelt ist, fällt einem die geringe Erwärmung von nur 17°C über die gesamte Zeitspanne auf. Bei diesem Experiment ist darauf zu achten, dass die Aluminiumfolie das Becherglas und seinen Boden eng umschließt. Grund für die geringe Erwärmung ist, dass das elektromagnetische Feld größtenteils von der Aluminiumfolie reflektiert wird. Der kleinere, absorbierende Teil erhitzt die Aluminiumfolie und die Wärme wird an das Becherglas bzw. an das Wasser abgeleitet. Die größte Wärmezufuhr geschieht jedoch über die offene Oberseite des Bechers, da hier das elektromagnetische Feld direkt an das Wasser heran kommt. Diese Fläche reicht jedoch nicht aus, um das Wasser so stark wie bei den zwei anderen Versuchsanordnungen zu erwärmen. Die verwendete Aluminiumfolie schirmt deshalb so gut ab, weil ihre Dicke von $10 - 30 \mu\text{m}$ weit über der Eindringtiefe von $1 \mu\text{m}$ von elektromagnetischer Strahlung in Metallen liegt. (Karstädt, Möllmann, Vollmer, 2004, S. 93)

Materialien:

- Becherglas (mikrowellenfest)
- Wasser
- 2 EL Speisesalz
- Aluminiumfolie
- Temperaturmessgerät (Thermometer)

Flackerlampe in der Mikrowelle



Eine Flackerlampe oder auch Glimmlampe genannt, kann man in die Kategorie der Gasentladungslampen unter den Leuchtmitteln einordnen. Das in diesem Experiment verwendete Modell sollte das flackernde Licht einer Kerze imitieren. Erzeugt wird dieser Effekt dadurch, dass die Lampe, in der sich zwei Eisenelektroden befinden, mit dem Edelgas Neon gefüllt ist. Durch das Anlegen einer Wechselspannung wird an den Kathoden eine Stoßionisation hervorgerufen, welche das Neon- Gasgemisch teilweise in Plasma anregt und dadurch orangerot erleuchten lässt (Gasentladung). Wäre die Lampe mit einem anderen Gas gefüllt, würde sie nicht orangerot leuchten, sondern weiß (Krypton) oder blau-grün mit Argon. An dieser Stelle ist auch darauf hinzuweisen, dass der Begriff der „Neonlampe“ fälschlicherweise für alle Gasentladungslampen verwendet wird, obwohl dies nur die Bezeichnung für Leuchtmittel ist, welche tatsächlich Neon enthalten und orangerot leuchten.

In diesem Versuch wird eine solche Flackerlampe in die Mikrowelle gelegt. Um den auftretenden Effekt besser zu sehen, kann auch eine mikrowellenfeste Halterung verwendet werden. Nach dem Einschalten der Mikrowelle bei niedriger Leistung (400 W) beginnt der gesamte Inhalt der Lampe zu leuchten. Um die Lampe nicht zu beschädigen, sollte die Mikrowelle zwei Sekunden nach dem ersten Aufleuchten wieder ausgeschaltet werden.



Abbildung 37: Flackerlampe in Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild

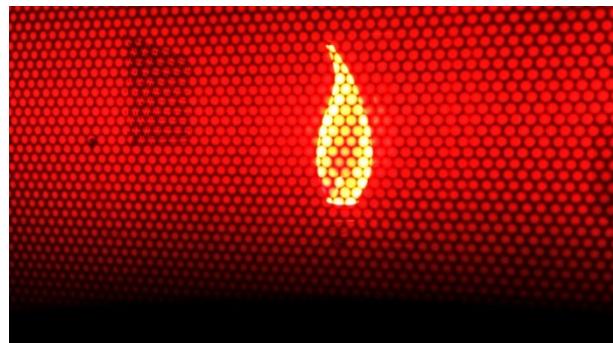


Abbildung 38: Flackerlampe in Mikrowelle, Neon Gasentladung; eigenes Bild

Die elektromagnetische Strahlung wird vom Neon absorbiert und dadurch werden die Elektronen in den Atomen auf ein höheres Energieniveau gehoben. Die Anregung mit der höchsten Wahrscheinlichkeit erfolgt aus dem Grundzustand in die 3p-Zustände des Neons, welche energetisch zwischen 18,4 eV und 19,0 eV über dem Grundzustand liegen. Die energetisch tiefer liegenden 3s-Zustände werden mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit

angeregt. Die Relaxation von den 3p-Zuständen in den Grundzustand, welche unter der Abgabe eines Photons stattfindet, ist wie in der unten angeführten Grafik gezeigt, nur über die 3s-Zustände möglich. Das Licht, welches dabei emittiert wird, liegt im sichtbaren Bereich zwischen der Farbe Rot und Grün und ist für uns als das für Neon typische orangerot ($\lambda = 585 - 620 \text{ nm}$) sichtbar. (Dick, 2012, S. 16 f)

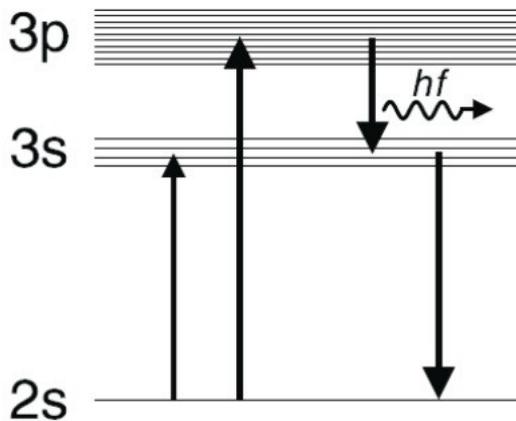


Abbildung 39: Vereinfachtes Termschema des Neons, Relaxation von 3p- in den Grundzustand, Photonen als orangerotes Licht sichtbar; Quelle: Dick B., 2012, S. 17

Materialien:

- Flackerlampe (Neon)
- Sicherheitshandschuhe

Video:



Christbaumkugel in der Mikrowelle



Christbaumkugeln können nicht nur in der Weihnachtszeit glänzende Kinderaugen beschern. Man schafft dies auch jederzeit im Physikunterricht. Gibt man eine Christbaumkugel in die Mikrowelle und nimmt diese in Betrieb, verursacht dies ein hell leuchtendes und glitzerndes Spektakel.

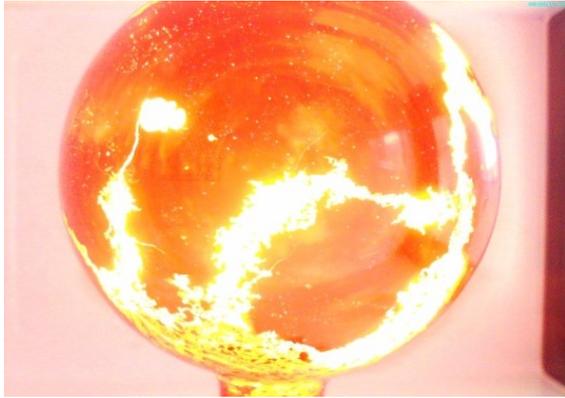


Abbildung 40: Christbaumkugel in Mikrowelle, Silberschicht verdampft; eigenes Bild

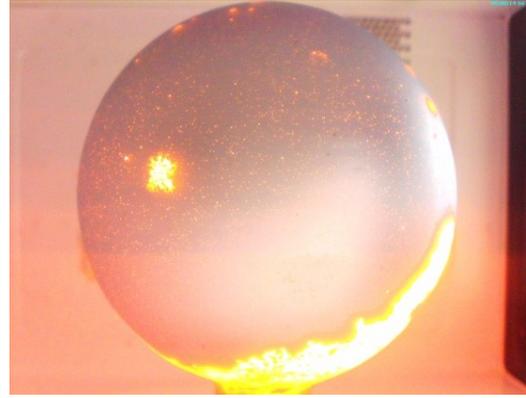


Abbildung 41: Christbaumkugel in der Mikrowelle, die Silberschicht im Inneren der Glaskugel verdampft; eigenes Bild

Grund dafür ist die spiegelnde Silberschicht im Inneren der Glaskugel. Diese wird in der Herstellung in Form einer Silbernitratlösung flüssig in die Kugel eingebracht. Über eine chemische Reaktion in Verbindung mit anderen Chemikalien, setzen sich unter Hitze die Silberionen im Inneren der Glaskugel in Form einer dünnen Schicht ab. Silber ist ein leitendes Metall und ist auf atomarer Ebene aus positiven Atomrümpfen aufgebaut. In diesem kubisch flächenzentrierten Atomgitter befinden sich frei bewegliche Elektronen (Valenzelektronen), welche durch die Mikrowellenstrahlung angeregt werden. Dadurch entstehen oszillierende Ströme, welche das Silber auf Grund Ohm'scher Verluste sehr stark erhitzen. Da die Silberschicht sehr dünn ist, kann diese Wärme nicht abgeleitet werden, woraufhin sich das Silber lokal so stark erhitzt, dass es verdampft. Es entstehen Funken und brennende Stellen im Inneren der Glaskugel.

Materialien:

- Christbaumkugeln
- Sicherheitshandschuhe
- Feuerlöschmittel

Video:



Teller mit Goldrand in der Mikrowelle



Die elektromagnetischen Felder, welche vom Magnetron erzeugt werden, bringen normalerweise in Speisen Moleküle zum Schwingen, welche in weiterer Folge dann durch ihre Bewegung die Speisen erhitzen. Befinden sich jedoch leitende Metalle in der Mikrowelle, könnte dies gefährlich werden. Die dünne Goldschicht auf einem Goldrand Teller leitet elektrische Ladungen und dabei können Elektronen leicht aus dem Material herausgelöst werden. Stellt man einen Teller mit Goldrand in die Mikrowelle, entstehen im Betrieb lokale Spannungsspitzen in der Goldschicht. Erreicht die Feldstärke dort über 20.000 V/cm schlagen Funken über. Die teilweise herausgelösten Goldatome können in Verbindung mit der Umgebungsluft ionisieren, sodass Plasma-Blitze entstehen. Das Küchengerät könnte beschädigt werden, deshalb sollten Speisen auf mikrowellenfesten Tellern erwärmt werden.



Abbildung 42: Porzellanteller mit Umrandung aus Gold; eigenes Bild

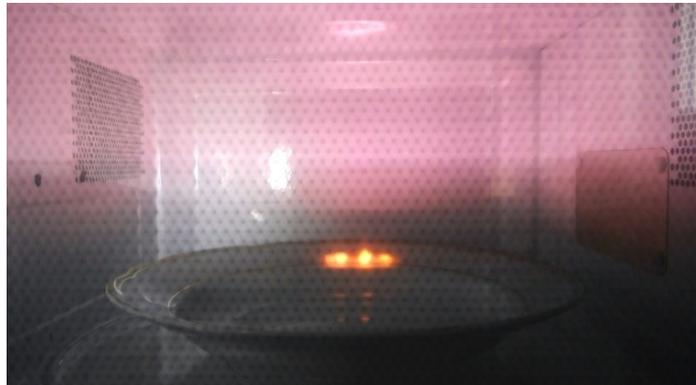


Abbildung 43: Goldrandteller in der Mikrowelle, Entladung; eigenes Bild

Materialien:

- Teller/ Geschirr mit Goldrand

Video:



Wassergehalt verschiedener Fette



Wie im Theorieteil beschrieben, ist die Erwärmung eines Stoffes davon abhängig, wie viel Wasser in der Speise enthalten ist. Diese Eigenschaft kann auch genutzt werden, um den Wassergehalt verschiedener Stoffe zu bestimmen. Im folgenden Versuch wird die Mikrowelle verwendet, um den Wassergehalt verschiedener Arten von Fett zu bestimmen bzw. gegenüber zu stellen. Dazu benötigt man Reagenzgläser aus Kunststoff (mikrowellenfest) und unterschiedliche Fette. Es wird dabei Butter, Butterschmalz, Bratenfett und Thea (Margarine) miteinander verglichen. Man gibt diese unterschiedlichen Fette in eine Vorrichtung und dann bei 400 W Leistung in die Mikrowelle. Es ist zu gewährleisten, dass jede Probe die gleiche Intensität der Strahlung abbekommt (Drehteller verwenden). Im Betrieb wird nun die Zeit gemessen, welche die Proben zum Schmelzen benötigen.

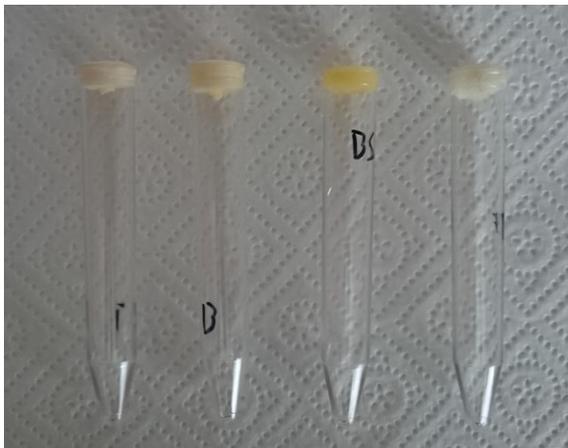


Abbildung 44: Fettproben, Thea - Butter - Butterschmalz - Bratenfett (von li. nach re.), eigenes Bild

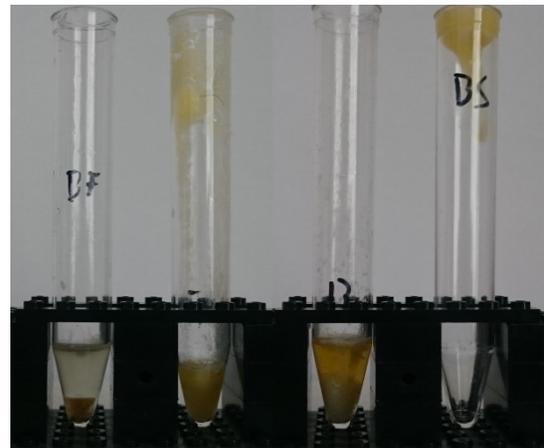


Abbildung 45: Proben nach dem Experiment, die Fette sind je nach Wassergehalt unterschiedlich schnell geschmolzen; eigenes Bild

Die geringpolaren Fettmoleküle werden durch die Mikrowellenstrahlung nur wenig angeregt. Also ist wieder der Wassergehalt für die Erwärmung entscheidend. Wie zu erwarten, sind jene Fette mit einem hohen Wassergehalt schnell geschmolzen. Das Bratenfett, welches als Nebenprodukt beim Braten von Schweinefleisch entsteht, hat demnach den höchsten Wassergehalt (Schmelzzeit 43 Sekunden). Danach ist das Thea-Produkt (70 % Fettanteil) nach 121 Sekunden geschmolzen. Letztlich ist die

Butter (82 % Fettanteil) nach 150 Sekunden und das Butterschmalz (99 % Fettanteil) nach 195 Sekunden geschmolzen, was auf einen niedrigen Wassergehalt hinweist.

Solche Wassergehalts-Messverfahren werden auch in der Landwirtschafts- und Nahrungsmittelindustrie eingesetzt. Die Bestimmung des Feuchtegehaltes erfolgt durch die Analyse eines Feststoff-Wassergemisches in einem elektromagnetischen Feld. Dabei haben die unterschiedlichen Permittivitätszahlen der Materialien Einfluss auf das Ergebnis.

Materialien:

- Verschiedene Fette
- Reagenzgläser (mikrowellenfest)
- Halterung für Reagenzgläser

Video:



Eindringtiefe von Mikrowellen



Im folgenden Experiment sollte gezeigt werden, wie sich die Eindringtiefe von Mikrowellen verhält bzw. durch was sich Mikrowellenstrahlung abschirmen lässt. Zunächst wird ein Testobjekt in die Mikrowelle gegeben. Dieses ist der Jahreszeit entsprechend ein Schokoosterhase. Entfernt man die Aluminiumfolie und nimmt den Mikrowellenofen bei 800 W Leistung in Betrieb, so beginnt das Testobjekt, wie im Video zu sehen, zu schmelzen. Entfernt man die Folie hingegen nicht, wird dieser Vorgang um Minuten verzögert. Sobald die Folie nämlich dicker als die typische Eindringtiefe (Skintiefe Formel 13) von $1 \mu\text{m}$ ist, wird der Großteil der Strahlung reflektiert bzw. abgeschirmt. Nach über 3 Minuten geht aber auch der in Folie eingewickelte Osterhase „in die Knie“. Somit ist auch der Wahrheitsgehalt über die Entdeckung des Nutzens der Mikrowellenstrahlung für den Haushalt überprüft. Percy Spencer hatte der Legende nach einen Schokoriegel, der beim Experimentieren in der Hosentasche geschmolzen ist. Man kann nur hoffen, dass dieser in Papier eingewickelt war.



Abbildung 46: Eindringtiefe von Mikrowellen, Versuchsaufbau; eigenes Bild



Abbildung 47: Eindringtiefe von Mikrowellen, Vergleich der Testobjekte nach dem Versuch; eigenes Bild

Die Einigung der Hersteller von Mikrowellengeräten auf eine Betriebsfrequenz von 2,45 GHz für Haushaltsgeräte hängt physikalisch mit der Absorption der Wellen, also mit der Eindringtiefe, zusammen. Speisen, welche man in der Mikrowelle erwärmen will, haben typische Dicken im Zentimeterbereich, und bei 12 cm Wellenlänge liegt auch die Eindringtiefe in dieser Größenordnung. Würde man z.B. eine höhere Frequenz von 20 GHz verwenden, würde die Eindringtiefe um eine Größenordnung sinken. Sie läge dann bei ca. einem Millimeter. Dadurch würde die gesamte Energie an der Oberfläche absorbiert werden und die tieferen Schichten der Speise nicht erreichen. Die verwendeten niedrigen Frequenzen dienen also der Erwärmung des gesamten Volumens. (Möllmann, Vollmer, 2004, S. 42)

Materialien:

- Schokohase, zwei Stück

Video:



Faraday'scher Käfig in der Mikrowelle



Beim folgenden Experiment wird überprüft, ob ein Faraday'scher Käfig in der Mikrowelle feldfrei bleibt. Dazu benötigt man einen Käfig aus einem leitenden Material. Dieser kann einfach aus einem Metallgitter mit einer Maschenweite von maximal 2 – 4 mm gebastelt werden. Nun gibt man ein kleines Glas oder Kunststoffbehältnis mit Wasser gefüllt in den Käfig, schließt diesen und stellt ihn auf den Drehteller der Mikrowelle. Zum Vergleich wird ein zweites Gefäß ohne Faraday'schen Käfig auch auf den Drehteller gestellt. Die beiden Wasserbehälter sollten den gleichen Abstand zum Drehtellermittelpunkt haben, damit sie der gleichen Intensität der elektromagnetischen Welle ausgesetzt sind. Dann kann man den Mikrowellenofen in Betrieb nehmen. Nach ca. 20 Sekunden hat sich das Wasser im freien Behälter von 20°C davor soweit erhitzt, dass es zu sieden beginnt. Nun kann die Temperatur des Wassers im Käfig gemessen werden. Dieses hat sich in der Zeitdauer nur um 2 °C erwärmt. Diese Erwärmung lässt sich auf die auftretende Temperaturerhöhung im Garraum zurückführen.

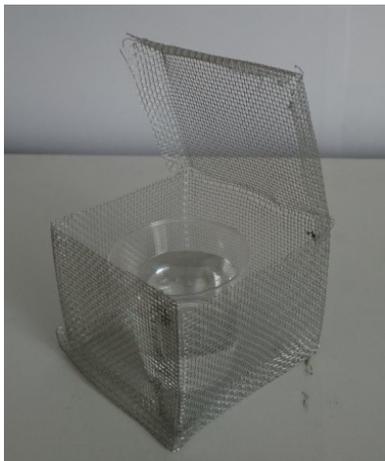


Abbildung 48: Faraday'scher Käfig in der Mikrowelle, im Inneren befindet sich ein Gefäß mit Wasser; eigenes Bild



Abbildung 49: Faraday'scher Käfig in der Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild

Der Faraday'sche Käfig, welcher eine geschlossene Hülle aus einem leitenden Gitter ist, schirmt das elektromagnetische Feld im Garraum der Mikrowelle vollständig ab. Das Wechselfeld induziert im Metallgitter Wirbelströme die dem außen einwirkenden Feld nach der Lenz'schen Regel entgegenwirken. Dadurch dringen die Mikrowellen nicht in den Käfig ein und können folglich das Wasser im Inneren auch nicht erhitzen.

Materialien:

- Drahtgitter, Maschenweite maximal 4 mm
- zwei Stück Glas oder Kunststoffgefäße (mikrowellenfest)
- Wasser
- Temperaturmessgerät
- Sicherheitshandschuhe

Video:



Tischtennisball in der Mikrowelle



Die kleinen Tischtennisbälle, welche vorwiegend aus Zelluloid hergestellt sind, müssen beim Tischtennispiel große Verformungen und Geschwindigkeiten bis zu 150 km/h aushalten. Doch was passiert, wenn man einen davon in die Mikrowelle gibt? Legt man einen handelsüblichen Tischtennisball in die Mikrowelle und nimmt diese bei 800 W Leistung in Betrieb, so bläst sich dieser auf. Grund dafür ist, dass sich das Material des Balles erhitzt und sich diese Energie auf die im Ball befindliche Luft überträgt. Die Luft wird immer heißer und der Druck im Ball steigt so lange, bis sich die Kunststoffhülle soweit erhitzt hat, dass sie sich vom steigenden Innendruck verformen lässt. Nach dem Experiment bleibt die Verformung erhalten, da sich Zelluloid (Thermoplast) unter Temperatureinwirkung verformt und diese Gestalt danach im abgekühlten Zustand nicht mehr verändert.

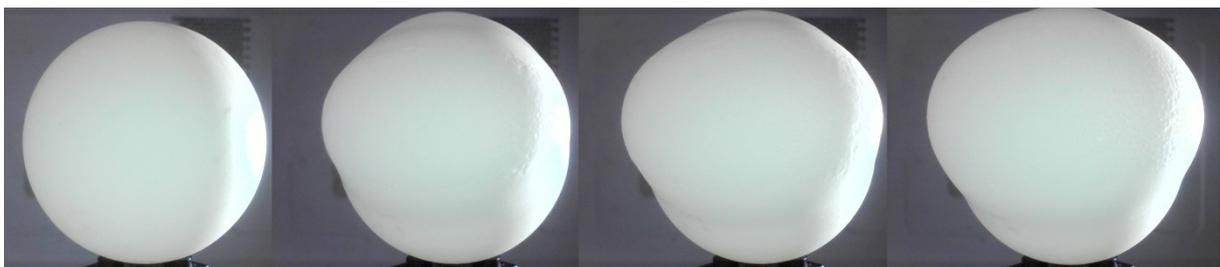


Abbildung 50: Tischtennisball in der Mikrowelle, dieser vergrößert sein Volumen und verformt sich; eigenes Bild

Materialien:

- Tischtennisball
- Halterung (mikrowellenfest)

Video:



Zitrone in der Mikrowelle



Zitronen sind auf Grund ihrer Vielseitigkeit in der Anwendung auch im Physikunterricht beliebt. Neben der klassischen „Obstbatterie“, bei der zwischen zwei in eine Zitrone gesteckten Polen Spannung auftritt, kann diese auch im Zusammenhang mit einer Mikrowelle nützlich sein. Man gibt eine Zitrone oder Limette auf den Drehteller und nimmt den Mikrowellenofen in Betrieb. Nach ca. einer Minute bildet sich an der Oberfläche ein Loch, durch welches heißer Zitronensaft austritt. Je nach Beschaffenheit der Schale kann die Zitrone oder Limette auch explodieren (äußerst selten). Zitronen bestehen zum größten Teil aus Wasser, welches sich durch die elektromagnetische Strahlung erhitzt und verdampft. Die dicke Schale der Zitrusfrucht hindert den Wasserdampf an der Expansion so lange, bis diese dem Dampfdruck nicht mehr standhält und aufreißt oder explodiert.



Abbildung 51: Zitrone bzw. Limette in der Mikrowelle, heiße Flüssigkeit tritt aus;
Quelle: YouTube/ Slow Motion Stuff
Exploding in de Microwave

Doch im Gegensatz zu anderen Experimenten in dieser Diplomarbeit, kann die angerichtete „Sauerei“ dieses Mal nützlich sein. Das heiß versprühte Gemisch aus Wasserdampf und Zitronensäure löst bei einer verdreckten Mikrowelle den Schmutz von den Seitenwänden. Somit kann dieser Versuch am Ende einer Experimentiereinheit helfen, das Gerät zu säubern.

Materialien:

- Zitrone
- Limette
- Putztücher

Video:



Unpolare Flüssigkeiten/ mikrowellenfeste Stoffe



In dieser Diplomarbeit werden zum Großteil polare Stoffe (z.B. Wasser) im Zusammenhang mit Mikrowellenstrahlung behandelt. Doch wie verhalten sich unpolare Flüssigkeiten bzw. mikrowellenfeste Stoffe im elektromagnetischen Feld eines Mikrowellenofens? In Molekülen wie Wasser ist die ungleiche Verteilung von Ladungen der Grund dafür, dass sich diese im elektromagnetischen Wechselfeld erwärmen. Bei unpolaren Flüssigkeiten z.B. Motoröl oder Benzin, sollte das nicht der Fall sein. Man stellt eine Probe davon in die Mikrowelle und beobachtet ihr Verhalten. Beim Motoröl, sowie beim Benzin ist nach einer Minute in der Mikrowelle nur ein geringer



Abbildung 52: unpolare Flüssigkeit in der Mikrowelle, Temperaturmessung nach einer Minute MW Betrieb; eigenes Bild

Temperaturanstieg zu beobachten. Dies ist auf diverse Zusatzstoffe zurückzuführen, welche leicht polar sind und sich dadurch erhitzen lassen. Niedrige Kohlenwasserstoffe, wie z.B. Pentan und Hexan würden sich nicht erwärmen.

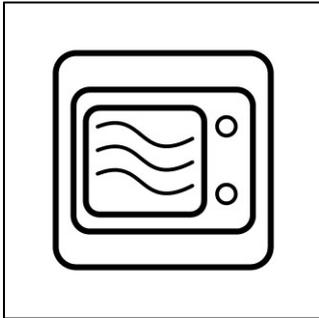


Abbildung 53: Symbol für mikrowellenfestes Geschirr, Quelle: https://www.curver.com/deu/gut_zu_wissen/hier-erfahren-sie-alles-uber-die-symbole-auf-unseren-kunststoffdosen

Bei mikrowellenfestem Geschirr wird in der Herstellung auf polare Stoffe verzichtet. Dies bedeutet, dass sich solch ein Stoff nicht erwärmt. Es gibt mikrowellenfestes Geschirr aus Glas, Keramik und Kunststoff, welches meist vom Hersteller mit einem Symbol versehen ist. Um das zu überprüfen, kann ein Testobjekt in die Mikrowelle gegeben werden. Auch nach Minuten im elektromagnetischen Feld erhitzt sich das Geschirr nicht.

Sicherheitshinweis:

Unpolare Flüssigkeiten können sich aufgrund der Beimengung von Zusatzstoffen trotzdem erwärmen. Gerade bei Benzin ist besondere Vorsicht geboten. Durch die Erwärmung kann Benzin verdampfen und sich entzünden (siehe Experiment „Metallschwamm im Benzinbad“).

Materialien:

- Unpolare Flüssigkeit (Motoröl)
- Temperaturmessgerät

Video:



Streichholz-Plasma erzeugen



Plasma gilt allgemein als vierter Aggregatzustand und kann auf viele Wege erzeugt werden. Relativ einfach gelingt dies mit folgendem Experiment. Man platziert ein Streichholz, welches in einen Getränkekorke gesteckt wird, in der Mitte des Garraumes. Die Mikrowelle sollte auf die höchste Leistungsstufe (ab 800 W) eingestellt sein. Nun zündet man das Streichholz an und stülpt ein passendes Glas über die Flamme, schließt die Türe und schaltet die Mikrowelle ein. Nach wenigen Sekunden bildet sich ein Plasma, welches aufsteigt und im Glasgefäß gefangen wird.



Abbildung 54: mittels Streichholz Plasma erzeugen, Versuchsaufbau; eigenes Bild



Abbildung 55: erzeugtes Plasma leuchtet; eigenes Bild

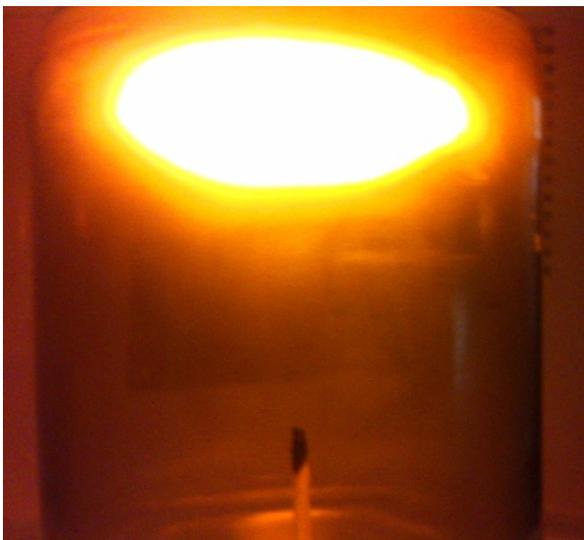


Abbildung 56: Plasma Innenaufnahme; eigenes Bild

Wenn man das Streichholz entzündet, verbrennen zuerst die im Zündholzkopf vorhandenen Chemikalien wie Schwefel, Antimonsulfid, Kaliumchlorat und andere Stoffe. (bcp.fu-berlin.de) Diese Redoxreaktion liefert genügend Hitze um auch das Holz zu entzünden, welches bei der Verbrennung u.a. Kohlenstoff in den heißen Flammgasen enthält. Dieser Kohlenstoff leitet Strom und dieser Umstand führt dazu, dass das Kohlenstoff-Luftgemisch bei Absorption von

Mikrowellenstrahlung zu Plasma ionisiert. Die Mikrowellen sorgen also dafür, dass die nötige Ionisierungsenergie eingebracht wird, worauf sich dann Elektronen von den Atomen

trennen. Es liegen nun freie Ladungsträger (Ionen, freie Elektronen) vor, welche zur Plasmaentladung führen. (Zohm, 2012)

Das Glas, welches über das Streichholz gestülpt wird, dient lediglich dazu, das heiße Plasma gefangen zu nehmen und nicht die Innenseite der Mikrowelle zu beschädigen. Anstelle des Zündholzes kann auch ein Zahnstocher verwendet werden.

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment sollte ausschließlich von der Lehrperson durchgeführt werden. Da das entstehende Plasma eine sehr hohe Temperatur hat, sollte die Mikrowelle nur wenige Sekunden in Betrieb sein. Besteht das Plasma zu lange, erhitzt sich das Glas und kann springen. Um das Glas aus der Mikrowelle zu nehmen, sind unbedingt feuerfeste Handschuhe zu verwenden. Um das Splintern des Glases zu verhindern, sollte man hitzebeständiges Pyrexglas, wie es auch im Chemielabor eingesetzt wird, verwenden.

Materialien:

- Streichhölzer
- Weinkorken
- Glasbehältnis (hitzebeständig)
- Schutzausrüstung

Video:



Plasma erzeugen



Den gleichen Effekt, welcher auch im Versuch „Streichholz- Plasma erzeugen“ beschrieben ist, kann man auch auf andere Art und Weise erzeugen. Eine Möglichkeit ist es, dies mittels handelsüblicher Aluminiumfolie zu machen. Man reißt Alufolie in kleine Stückchen (ca. 1 – 3 cm²) und gibt sie in ein kleines Glasgefäß. Dieses stellt man in die Mitte der Mikrowelle und schaltet das Gerät bei höchster Leistungsstufe, z.B. auf 800 W, ein. Nach

kurzer Zeit entsteht Plasma, welches sich im Glasgefäß auf Position hält. Um die Vorgänge zu verstehen, müssen wir uns zunächst ansehen, wie sich die Alufolie bzw. dünne Metallschichten im elektromagnetischen Feld verhalten.



Abbildung 57: Plasma erzeugen mit Aluminiumfolie, Versuchsaufbau; eigenes Bild

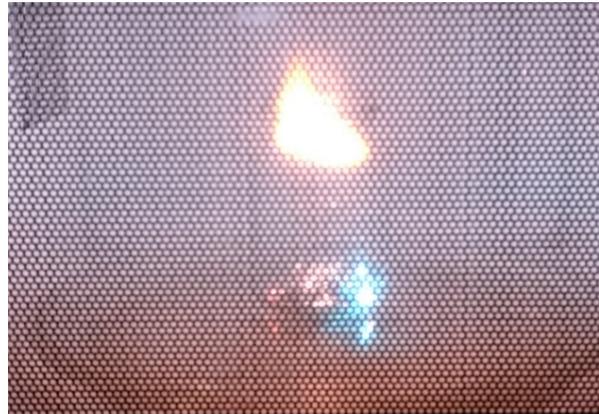


Abbildung 58: Plasma erzeugen mit Aluminiumfolie; eigenes Bild

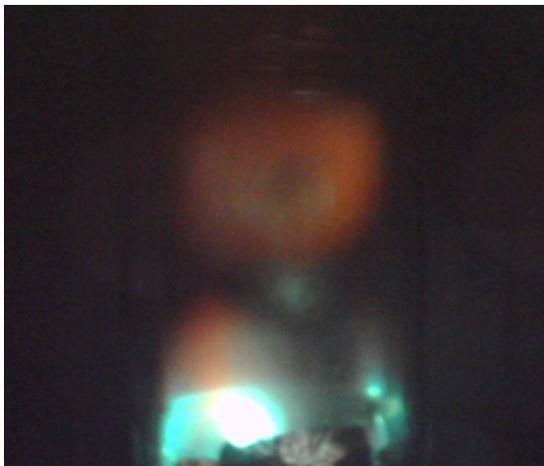


Abbildung 59: Plasma erzeugen mit Aluminiumfolie, Innenaufnahme durch Schweißglas-Filter; eigenes Bild

Die elektromagnetische Strahlung in einem Mikrowellenofen kann die in einem Metall vorhandenen Leitungselektronen anregen. Diese Elektronen, auch Valenzelektronen genannt, bewegen sich im atomaren Maßstab betrachtet, zwischen den positiv geladenen Atomrümpfen frei und sorgen für die typischen Eigenschaften von Metallen wie z.B. eine gute Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit etc.. Bei Absorbierung von elektromagnetischer Strahlung entstehen oszillierende Ströme im Metall, welche auf Grund von Ohm'schen Verlusten das Metall lokal erwärmen. Diese Erwärmung, hervorgerufen durch lokale Wirbelströme, verteilt sich auf Grund der guten Wärmeleitungseigenschaften gleichmäßig auf den ganzen Körper. Wenn dieser Metallkörper ausreichend massiv ist, stellt

sich je nach Wärmeableitung und Wärmekapazität ein neuer Gleichgewichtszustand mit einer nur geringen Erwärmung des Körpers ein. Wie sich kleine Körper in einem elektromagnetischen Feld verhalten, hängt im Wesentlichen von ihrer Geometrie bzw. der Dicke bei Metallschichten oder Folien ab. Dünne Schichten wie z.B. der Goldrand bei Goldrandtellern verfügen nur über eine geringe Wärmekapazität und erhitzen sich daher so schnell, dass sie zu glühen anfangen oder sogar an einigen Stellen verdampfen können. (Karstädt, Möllmann, Vollmer, 2004, S. 92)

Bei diesem Experiment erhitzt sich die Aluminiumfolie lokal so stark (meist an den Rändern), dass kleine Teile verdampfen. Dieses Gas-Luftgemisch wird durch das noch immer anliegende elektromagnetische Feld weiter erhitzt und ab einem gewissen Gasdruck und einer Temperatur ionisiert, sodass Plasma entsteht. Diese Plasmakugel wird nun großteils auf Grund der Form des Glases (Flaschenhals) vom Glasgefäß in Position gehalten. Verwendet man ein nach oben gerades Gefäß, entweicht das Plasma und der Effekt ist weniger gut sichtbar.

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment sollte ausschließlich von der Lehrperson durchgeführt werden. Da das entstehende Plasma eine sehr hohe Temperatur hat, sollte die Mikrowelle nur wenige Sekunden in Betrieb sein. Besteht das Plasma zu lange, erhitzt sich das Glas und kann springen. Um das Glas aus der Mikrowelle zu nehmen, sind unbedingt feuerfeste Handschuhe zu verwenden. Um das Splintern des Glases zu verhindern, sollte man hitzebeständiges Pyrexglas, wie es auch im Chemielabor eingesetzt wird, verwenden.

Materialien:

- Glasbehälter (hitzebeständig)
- Aluminiumfolie
- Sicherheitshandschuhe

Video:



CD in der Mikrowelle



Eine Compact Disc (CD) besteht in den meisten Fällen aus Polycarbonat und aus einer sehr dünnen (50 – 100 nm) Reflexionsschicht aus aufgedampftem Aluminium. Aluminium ist ein leitendes Metall und reagiert auf das elektromagnetische Feld, welches in einer Mikrowelle erzeugt wird. Sichtbar wird diese Reaktion dadurch, dass man eine CD mit der reflektierenden Seite nach oben auf den Drehteller legt. Man kann sie auch mittels einer Halterung in die Mitte des Garraumes stellen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Halterung aus einem nicht brennbaren, nicht leitenden Material besteht. Nun kann man die Mikrowelle einschalten und durch das Fenster nach wenigen Sekunden viele Funken und Blitze sehen. Nach dem Versuch kann man ein Muster aus Rissen in der Aluminiumschicht erkennen.



Abbildung 60: CD in Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild

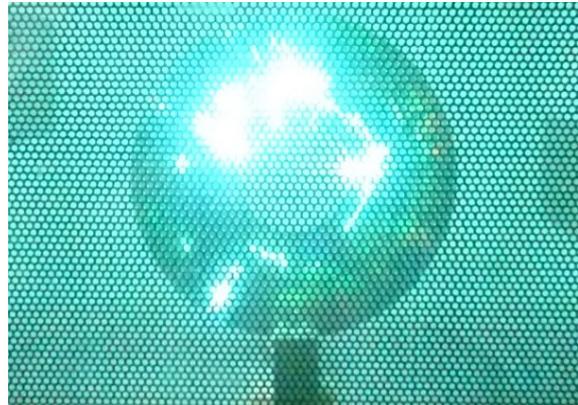


Abbildung 61: CD in Mikrowelle, Aluminiumschicht verdampft; eigenes Bild



Abbildung 62: CD in Mikrowelle, zerstörte Aluminiumschicht nach Versuch; eigenes Bild

Doch wie ist das geschehen? Aluminium ist ein leitendes Metall und ist auf atomarer Ebene aus positiven Atomrümpfen aufgebaut. In diesem kubisch flächenzentrierten Atomgitter befinden sich frei bewegliche Elektronen (Valenzelektronen), welche durch die Mikrowellenstrahlung angeregt werden. Dadurch entstehen oszillierende Ströme, welche das Aluminium auf Grund Ohm'scher Verluste sehr stark erhitzen. Da die Aluminiumschicht sehr dünn ist, kann diese Wärme

nicht abgeleitet werden, woraufhin sich das Aluminium lokal so stark erhitzt, dass es verdampft. Es entstehen Funken und brennende Stellen, wodurch die Aluminiumschicht Risse bildet.

Sicherheitshinweis:

Durch die hohen Temperaturen kann sich die Polycarbonatschicht entzünden. Es ist daher empfehlenswert, Feuerlöschmittel bereit zu stellen. Weiters soll die CD nach dem Versuch nur mit Sicherheitshandschuhen angegriffen werden, um sich nicht zu verbrennen. Wenn man die CD mittels einer Halterung fixiert, ist darauf zu achten, dass diese aus einem mikrowellenfesten Material hergestellt ist.

Materialien:

- CD's
- Halterung
- Sicherheitshandschuhe

Video:



Chipstüte in der Mikrowelle



Legt man eine Verpackung von z.B. Kartoffelchips in die Mikrowelle und schaltet diese ein, entstehen am Verpackungsmaterial viele Funken und Blitze und die Chips Tüte schrumpft zusammen. Die Ursache dafür ist der mehrschichtige Aufbau der Verpackung. Diese Verpackungsfolie besteht aus einer Deckschicht, einer Druckschicht, einer Zwischenfolie und einer aluminiumbedampften Innenschicht. Diese Innenschicht verhindert das Eindringen von z.B. Wasserdampf, Sauerstoff oder Licht und macht dadurch den Inhalt länger haltbar. Wie auch im Experiment „Plasma erzeugen“ beschrieben, reagieren dünne Metallschichten auf elektromagnetische Strahlung, indem sie sich erhitzen. Ein Teil dieser Wärmeenergie verursacht das Schmelzen der anderen Schichten, welche aus verschiedenen

Kunststoffen bestehen. Durch das Erhitzen schrumpft der Kunststoff und somit die gesamte Packung zusammen.

Sicherheitshinweis:

Die Masse aus geschmolzenem Kunststoff wird sehr heiß, deshalb sollte man nach dem Versuch einige Minuten Abkühlzeit verstreichen lassen, bevor man die Probe aus der Mikrowelle nimmt. Sicherheitshandschuhe sind zu verwenden. Außerdem sollten Feuerlöschmittel bereitgestellt werden.

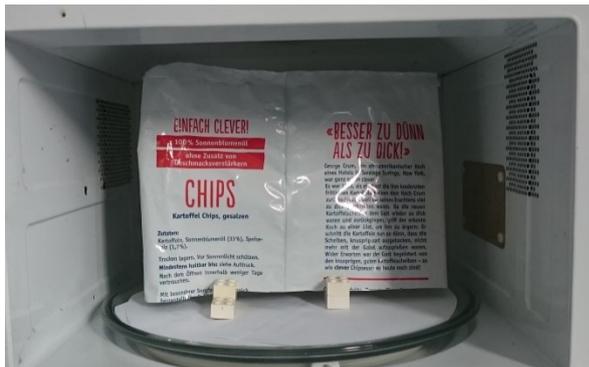


Abbildung 63: Chipstüte in der Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild



Abbildung 64: Chipstüte nach Anlegen eines elektromagnetischen Feldes, Chipstüte schrumpft; eigenes Bild

Materialien:

- Chipstüte
- Halterung
- Drehteller
- Sicherheitshandschuhe

Video:



Weintraube in der Mikrowelle



Eine Weintraube ist ein sehr bekanntes und vielseitiges Lebensmittel. Der Mikrowellenherd wurde dafür erfunden, Lebensmittel zu erwärmen. In diesem Versuch wird gezeigt, wie spektakulär dies aussehen kann. Man nimmt eine große Weintraube, halbiert diese und legt das Stück mit dem Weintraubenstiel zur Seite. Das andere Stück halbiert man noch einmal der Länge nach aber nur soweit, dass die Hälften an der Weintraubenhaut gerade noch zusammenhalten. Nun klappt man die Hälften, welche über eine Art Steg zusammengehalten werden, auseinander.

Jetzt kann man die präparierte Traube in die Mikrowelle legen (ohne Drehteller) und diese auf voller Leistungsstufe einschalten. Nach wenigen Sekunden entsteht ein Lichtbogen und in weiterer Folge Plasma über der Weintraube.

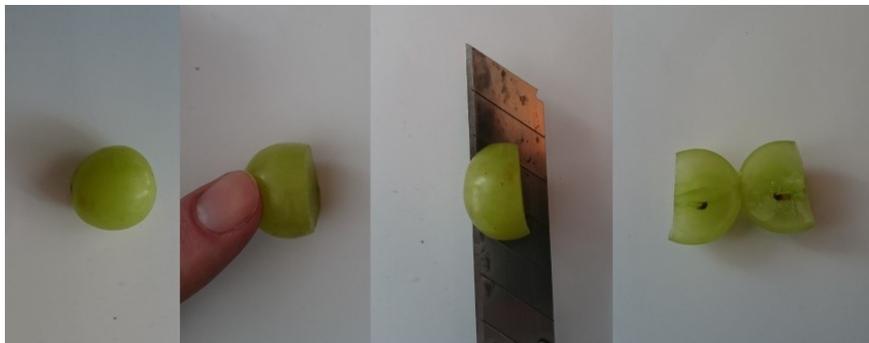


Abbildung 65: Weintraube präparieren, eigenes Bild

Verantwortlich dafür ist der hohe Wassergehalt der Weintraube. Wasser kann als Dielektrikum angesehen werden. Es ist also ein Medium, welches den Durchgang von Kraftlinien eines elektrostatischen Feldes erlaubt, ohne dabei elektrischen Strom zu leiten. Lebensmittel mit hohem Wassergehalt werden, wie im Theorieteil beschrieben, schneller durch die dielektrische Erwärmung erhitzt. Stellt man den Mikrowellenofen auf eine Leistung von 800 W ein, wird im Garraum eine stehende Welle mit einer Frequenz von 2,4 MHz und einer Länge von 12,5 cm erzeugt. Diese Länge wird beim Durchgang der Weintraube (dielektrisches Wasser) auf 1,4 cm reduziert. Die präparierte Weintraube wirkt hierbei wie eine Dipolantenne, bei der das Feld der Mikrowellen zwischen den Teilstücken über den Verbindungssteg ungehindert fließen kann. Nimmt man einen Spalt von 1 mm Breite an, muss ein Potential von 3000 V anliegen, dass ein Lichtbogen entstehen kann. An diesem kleinen Steg, über den die zwei Hälften verbunden sind, werden die Äquipotentiallinien des

Feldes verdichtet und dadurch steigt der Spannungsgradient stark an. Letztlich erreicht das Feld an dieser Stelle mehr als 3000 V und durch die starke Wärmeentwicklung verdampft das in der Weintraube enthaltene Wasser. Der Wasserdampf wiederum wird durch das vorherrschende hohe Potential in einen Plasmazustand angeregt. Das Plasma bildet nun einen kurzgeschlossenen Leiter und im Bereich des Dampfes entsteht ein heller Lichtbogen.



Abbildung 66: präparierte Weintraube in der Mikrowelle; eigenes Bild

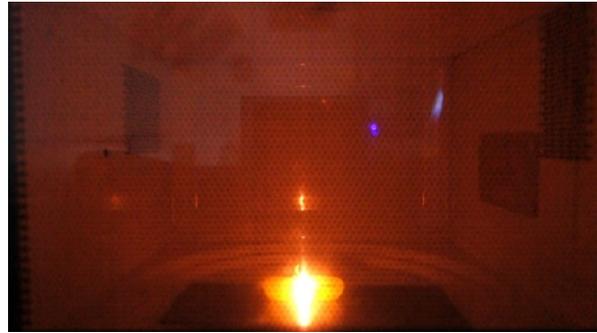


Abbildung 67: Weintraube in der Mikrowelle, Lichtbogen und Plasma entstehen; eigenes Bild

Sicherheitshinweis:

Wie bei den anderen Versuchen mit Plasma sollte vor dem Versuch Feuerlöschmittel bereitgestellt werden. Durch die hohen Temperaturen könnte es zu einem Brand kommen. Wenn der Lichtbogen entsteht, sollte man die Mikrowelle nach 2 – 3 Sekunden wieder ausschalten, um das Magnetron durch Leerbetrieb nicht zu beschädigen. Beim Herausnehmen der Weintraube sind Sicherheitshandschuhe zu verwenden.

Materialien:

- Weintrauben (je größer desto besser)
- Messer
- Teller
- Sicherheitshandschuhe

Video:



Eier in der Mikrowelle



Um die Zubereitung einiger Lebensmittel in der Mikrowelle ranken sich viele Gerüchte. Bei diesem Experiment versuche ich herauszufinden, ob Eier in der Mikrowelle explodieren, wie es in vielen Kochbüchern oder (Koch) Blogs im Internet beschrieben wird. Zunächst wird untersucht, ob man ein Spiegelei in der Mikrowelle zubereiten kann. Dazu schlägt man ein Ei auf und gibt es auf einen mikrowellenfesten Teller. Danach schaltet man die Mikrowelle bei 800 W Leistung ein.



Abbildung 68: Spiegelei in der Mikrowelle, entstehende Dampfblasen explodieren; eigenes Bild

Nach ca. Zehn Sekunden fängt das Eiklar am Rand an, Blasen zu werfen. Etwas später werden die Blasen größer und unter zischenden Geräuschen platzen das Eiklar und der Dotter sogar auf. Grund dafür ist das im Ei vorhandene Wasser (Eiklar 85 %, Eigelb 50 % Wasseranteil der Gesamtmasse). Das elektromagnetische Feld erwärmt das vorhandene Wasser bis es verdampft. Da die Hitze die Eimasse ab 62°C stocken lässt, bildet sich eine dampfundurchlässige Haut, welche den entstehenden Wasserdampf zurück hält, bis der Dampfdruck hoch genug ist, um die kleinen Bläschen explodieren zu lassen.

Es ist jedoch trotzdem möglich, ein gutes Spiegelei in der Mikrowelle zu machen. Der Teller sollte vorgewärmt und eingefettet sein. Wenn man dann die Mikrowelle nur stoßweise 30 Sekunden betreibt, ist es möglich, dass der entstehende Wasserdampf entweicht, ohne die Bläschen zum Platzen zu bringen und somit das Spiegelei gelingen lässt.

Der etwas spannendere Versuch besteht darin, ein Ei in der Schale zu „kochen“. Gibt man ein rohes Ei bei 800 W Betriebsleistung in den Mikrowellenofen, sieht man etwa nach 30 Sekunden, wie sich Wassertröpfchen an der Oberfläche bilden. Nach ca. einer Minute Betriebszeit explodiert das Ei unter einem lauten Knall. Mehrere Versuche haben gezeigt, dass sich Eier, je nach Beschaffenheit der Schale unterschiedlich verhalten. Ist die Schale beschädigt z.B. durch einen Haarriss, entweicht der entstehende Dampfdruck relativ unspektakulär. Hat das Ei jedoch eine stabile, unbeschädigte Schale, verdampft das im Ei enthaltene Wasser ab 100°C. Der entstehende Wasserdampf wird durch das gestockte Eiklar

und die Schale am Austreten gehindert, bis schlussendlich der Dampfdruck zu groß wird und das Ei explodiert.

Sicherheitshinweis:

Da bei diesem Versuch heißer Wasserdampf entsteht, ist besondere Vorsicht geboten. Das explodierende Ei kann eine Druckwelle auslösen, welche die Klapptüre der Mikrowelle öffnet. Deshalb sollten Schülerinnen und Schüler einen Sicherheitsabstand zum Gerät einhalten.

Materialien:

- Eier
- Teller (mikrowellenfest)
- Eierbecher (mikrowellenfest)

Video:



Glas schmelzen in der Mikrowelle



Glas zählt zu den amorphen Festkörpern und zu den wichtigsten Baustoffen unserer Zeit. Die Struktur ist im Stoff ungeordnet und kann durch eine Nahordnung beschrieben werden. Man kann Glas auch als eine „unterkühlte“ Flüssigkeit bezeichnen. Im folgenden Experiment wird gezeigt, wie Gebrauchsglas (Natron- Kalk Glas) auf Mikrowellen reagiert. Zunächst stellt man ein handelsübliches Glas (Gurken- oder Marmeladeglas) in die Mitte des Drehtellers und betreibt die Mikrowelle für 5 Minuten bei 800 W Leistung. Das Glas hat sich bei mehreren Versuchen nicht über 120°C erwärmt (Messung mit Infrarotthermometer).

In einem weiteren Versuch wird das Glas mit einem Bunsenbrenner an einer Stelle ca. 2-3 Minuten erhitzt. Nun gibt man das Glas wieder in die Mikrowelle und nimmt sie mit 800 W Leistung in Betrieb. Nach ca. einer Minute sieht man an der zuvor erhitzten Stelle wie

das Glas allmählich zu glühen beginnt. Die Stelle wird immer hell glühender, bis schlussendlich das Glas dünnflüssig wird und sich ein Loch in der Glasoberfläche bildet.

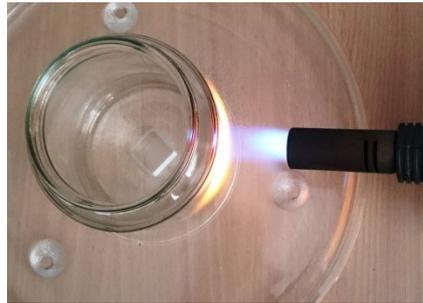


Abbildung 69: Glas wird mit Bunsenbrenner ca. 2 - 3 Minuten an einer Stelle erhitzt; eigenes Bild

Gibt man Speisen in einem Glasbehälter in die Mikrowelle, erhitzt sich das Gargut in nur wenigen Minuten bevor das Glas heiß wird. Glas ist bei Zimmertemperatur sowie bei Temperaturen um die 100°C ein Isolator und enthält auch kein Wasser. Somit wird es von den Mikrowellen wie im ersten Versuch gezeigt nur wenig erhitzt. Erhitzt man es mit einem Bunsenbrenner an einer Stelle, so wird es leitend. Grund dafür ist das quantenphysikalische Verhalten von Elektronen in einem Festkörper. Die Elektronen können dabei verschiedene Zustände einnehmen, etwa fest an ein bestimmtes Atom (Natron-Kalkglas besteht zu 75% aus SiO_2 , 13% Na_2O und 12% NaO) gebunden sein, oder in Zuständen höherer Energie (z.B. hohe Temperatur) frei beweglich zwischen den einzelnen Atomen. Durch das elektromagnetische Wechselfeld der Mikrowelle beginnt im erhitzten Glas durch die frei beweglichen Ionen ein Strom zu fließen. Dadurch erhitzt das Glas weiter bis es schlussendlich schmilzt.



Abbildung 70: die zuvor erhitzte Stelle wird unter der Mikrowellenstrahlung weiter erhitzt und das Glas schmilzt; eigenes Bild

Sicherheitshinweis:

Da bei diesem Experiment mit Glas hantiert wird, welches eine Temperatur von über 600°C erreichen kann, sollte das Experiment nur von der Lehrperson durchgeführt werden. Es sind auf jedem Fall feuerfeste Sicherheitshandschuhe zu verwenden. Nach dem Experiment sollte man die Türe der Mikrowelle geschlossen und das System 30 Min. erkalten lassen. Durch die Abkühlung entstehen Spannungen im Material, welche das Glas springen lassen können.

Materialien:

- Feuerfeste Sicherheitshandschuhe
- Schutzbrille
- Bunsenbrenner
- Glas
- Feuerlöschmittel

Video:



Essbesteck in der Mikrowelle



Es wird oft erzählt, dass man metallische Gegenstände auf keinem Fall in die Mikrowelle geben darf. Diese Aussage ist aber nur bedingt richtig. Man weiß, dass elektromagnetische Wellen in einem Metall die freien Leitungselektronen anregen. Hierbei wird das Metall über ohmsche Verluste, welche durch oszillierende Ströme entstehen, erwärmt. Diese freien Elektronen in Metallen sorgen aber auch für eine gute Wärmeleitfähigkeit. Lokal entstehende Wärme wird somit schnell im ganzen Körper verteilt. Dies gilt aber nur für Körper, die ausreichend massiv sind. Für dünne Metallschichten oder Folien gilt das nicht, wie die Experimente „Teller mit Goldrand in der Mikrowelle“ oder „Plasma erzeugen“ zeigen. (Karstädt, Möllmann, Vollmer, 2004, S. 92 f)

Um eine Aussage wie „Besteck darf auf keinen Fall in die Mikrowelle“ überprüfen zu können, muss man es ausprobieren. Zunächst wird eine handelsübliche Gabel aus Metall in die Mikrowelle gelegt und das Gerät mit 800 W Leistung in Betrieb genommen. Nach 60 Sekunden ist bei diesem Experiment nichts passiert, außer dass sich die Gabel von Raumtemperatur auf 50°C erwärmt hat. Im nächsten Versuch wird mehr Besteck auf den

Drehteller gelegt. Zwei Gabeln, zwei Messer, zwei Löffel werden so verteilt, dass sie sich gegenseitig berühren. Nimmt man nun das Gerät in Betrieb entstehen Funken und teilweise Entladungen an den Kontaktstellen zwischen dem Besteck und an den Spitzen der Gabeln.



Abbildung 71: Essbesteck in der Mikrowelle; Versuchsaufbau, eigenes Bild



Abbildung 72: Essbesteck in der Mikrowelle, Entladung an der Gabelspitze; eigenes Bild

Will man die Feldstärke in einem leeren Garraum abschätzen, kann man das über die Resonatorgüte tun. Sie ist durch

$$Q = \omega_0 \frac{\text{gespeicherte Energie}}{\text{Verlustleistung}} = \omega_0 \frac{\epsilon_0 E^2 V}{P} \quad (20)$$

gegeben. Mit der in der Formel (14) errechneten Güte Q von $Q = 10^4$ einer Verlustleistung P der Mikrowelle von $P = 800 \text{ W}$ und einem abgeschätzten Volumen des Garraumes von $V = 0,015 \text{ m}^3$, ergibt sich eine mittlere Feldstärke von $E = 6 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}}$. Diese Feldstärke ist aber in der Realität geringer, da ein Teil der Mikrowellenleistung über den Hohlwellenleiter Richtung Magnetron wieder abgeführt wird. An metallischen Spitzen hingegen, so wie sie bei einer Gabel vorhanden sind, kann dieser Wert wesentlich höher werden (Spitzenentladung). Er überschreitet hier die Durchschlagsfeldstärke von $10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ für Luft und Funkenüberschläge entstehen. (Berger, 2002, S. 14)

Besteck in der Mikrowelle kann jedoch auch ein Vorteil sein. Gibt man einen Teelöffel ins Wasser, bevor man es erwärmt, so gibt der Löffel die in ihm entstehende Wärme sofort an das Wasser ab. Ein Löffel im Wasserglas ist an dieser Stelle deshalb erwünscht, weil er im Wasser Siedekeime zur Verfügung stellt und somit einen Siedeverzug verhindert (siehe Experiment „überhitztes Wasser“). Die pauschale Aussage, dass metallische Gegenstände nicht in die Mikrowelle dürfen, ist somit nicht sinnvoll.

Sicherheitshinweis:

Das Besteck ist nach dem Versuch sehr heiß und darf nur mit feuerfesten Sicherheitshandschuhen angegriffen werden. Durch die starke Hitzeentwicklung und die Entladungen schmelzen die Spitzen der Metallgabeln.

Materialien:

- Zwei Stück Messer, Löffel und Gabel
- Sicherheitshandschuhe

Video:



Leuchtstoffröhre in der Mikrowelle



Gibt man eine Leuchtstoffröhre in die Mikrowelle und nimmt diese in Betrieb, so leuchtet die Leuchtstoffröhre hell auf. Grund dafür ist, dass die elektromagnetische Strahlung durch das Glas der Gasentladungsröhre eindringt. Die Entladung der Lampe beginnt, sobald das Feld einer starken Mode das Gas an einer Stelle der Röhre ionisiert. Die dadurch freigesetzten Ladungen werden durch das



Abbildung 73: verwendete Leuchtstoffröhre; eigenes Bild

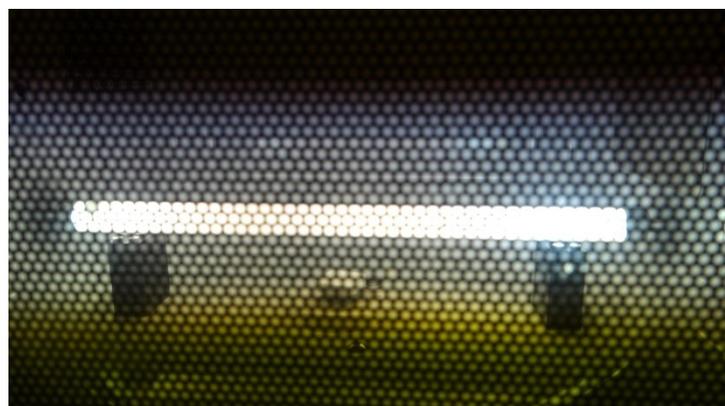


Abbildung 74: Leuchtstoffröhre in der Mikrowelle; eigenes Bild

elektrische Feld beschleunigt und können so weitere Gasmoleküle anregen. Diese lawinenartige Entladung, auch Stoßionisation genannt, ist ähnlich jener unter normalen Betriebsbedingungen. Nach wenigen Sekunden des Leuchtens kann die Leuchtstoffröhre so

heiß werden, dass diese explodiert. Darum ist besondere Vorsicht geboten, wobei die geschlossene Türe der Mikrowelle in den meisten Fällen genügend Schutz bietet. Leuchtstoffröhren enthalten Quecksilber (min. 5 mg Hg). Sollte es zu einer Explosion kommen, muss dieses unter dementsprechenden Sicherheitsvorkehrungen geborgen und entsorgt werden. Um eine Explosion zu verhindern, sollte man die Mikrowelle nur wenige Sekunden in Betrieb lassen, sobald die Entladungslampe leuchtet.

Materialien:

- Leuchtstoffröhre
- Halterung

Video:



Zigarette in der Mikrowelle



Folgendes Experiment zeigt ähnlich wie das Experiment „Streichholz-Plasma erzeugen“ ein Gas, welches durch die elektromagnetische Strahlung in der Mikrowelle ionisiert wird. Man gibt eine angezündete Zigarette (es sollte Glut vorhanden sein) in die Mikrowelle und stülpt ein Glas über diese. Danach schließt man die Türe und nimmt das Mikrowellengerät bei 800 W Leistung in Betrieb. Nach wenigen Sekunden glimmt die Glut der Zigarette auf und wenig später entsteht ein Plasmaball, welcher vom darübergestülpten Glas gefangen wird und hin und her wandert.

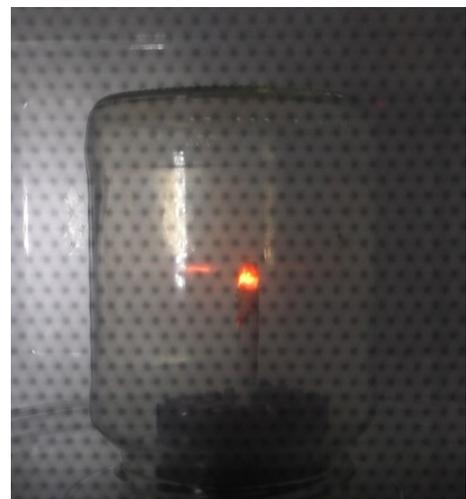


Abbildung 75: Zigarette glüht nach einigen Sekunden hell auf, Rauchgas entsteht; eigenes Bild

Eine glimmende Zigarette bildet Rauch, welcher aus vielen verschiedenen Stoffen u.a. Kohlenmonoxid, Nikotin und Ammoniak besteht. Das Gas-Luftgemisch ist leitend und dieser Umstand führt dazu, dass der Rauch Mikrowellenstrahlung absorbiert und zu Plasma ionisiert. Die Mikrowellen sorgen also dafür, dass die nötige Ionisierungsenergie eingebracht wird, worauf sich dann Elektronen von den Atomen trennen. Es liegen nun freie Ladungsträger (Ionen, freie Elektronen) vor, welche zur Plasmaentladung führen. (Zohm, 2012)



Abbildung 76: Zigarette in Mikrowelle, aufsteigender Rauch ionisiert zu Plasma; eigenes Bild

Das Glas, welches über die Zigarette gestülpt wird, dient lediglich dazu, das heiße Plasma gefangen zu nehmen, um nicht die Innenseite der Mikrowelle zu beschädigen.

Sicherheitshinweise:

Dieses Experiment sollte ausschließlich von der Lehrperson durchgeführt werden. Da das entstehende Plasma eine sehr hohe Temperatur hat, sollte die Mikrowelle nur wenige Sekunden in Betrieb sein. Liegt das Plasma zu lange vor, erhitzt sich das Glas und kann springen. Um das Glas aus der Mikrowelle zu nehmen, sind unbedingt feuerfeste Handschuhe zu verwenden. Da in der Schule ein absolutes Rauchverbot herrscht, sollte man dieses Experiment ausschließlich im Freien zeigen. Es obliegt in der Verantwortung der Lehrperson, ob der Umgang mit Zigaretten im Physikunterricht gezeigt werden soll.

Material:

- Zigaretten
- Becherglas (dickwandig)
- Feuerzeug
- Sicherheitshandschuhe

Video:



Plasmakugel in der Mikrowelle



Eine Plasmakugel oder eine Edelgas- Entladungsröhre, wie sie sein Erfinder Nikola Tesla nannte, ist eine Glaskugel, welche mit einem Gasmisch aus Argon, Neon und Stickstoff unter niedrigem Druck gefüllt ist. In der Mitte der Glaskugel befindet sich eine Elektrode, an welcher eine hochfrequente Wechselspannung anliegt, wodurch gegenüber der Außenkugel eine Glimmentladung stattfindet, welche man als Filamente (Einschnürung der Entladung) sehen kann. Beim folgenden Versuch wird versucht diese Glimmentladung durch die Mikrowellen zu erzeugen. Dabei wird zunächst die Glaskugel vom Sockel, in der die ganze Elektronik der Plasmakugel enthalten ist, entfernt. Danach legt man die Plasmakugel in die Mikrowelle und nimmt diese mit der geringsten Leistung (400 W) in Betrieb. Nach wenigen Sekunden bildet sich Plasma, welches in der Kugel hell aufleuchtet.



Abbildung 77: Plasmakugel in der Mikrowelle, Sockel mit elektronischen Bauteilen muss vorher entfernt werden; eigenes Bild



Abbildung 78: Plasmakugel in der Mikrowelle, die elektromagnetische Strahlung lässt Plasma entstehen; Quelle: YouTube/ NerdCorner

Durch die elektromagnetische Strahlung werden die in der Gasmischung (Argon, Neon, Stickstoff) enthaltenen Elektronen beschleunigt und ionisiert. Diese erhalten genügend Energie, sodass sie durch Stoßionisation weitere Ladungsträger anregen. Durch die Rekombination entsteht das für das Gasmisch charakteristische Leuchten (Glimmentladung).

Sicherheitshinweise:

Wie oben im Text beschrieben, muss vorher der Sockel der Plasmakugel entfernt werden, da sich darin Elektronikbauteile befinden, welche in der Mikrowelle zu einem Brand führen würden. Bei meinem Experiment hat sich die in der Elektrode vorhandene Folie entzündet, woraufhin das Glas aufgrund des geringen Innendrucks implodiert ist. Daher kann die verwendete Plasmakugel jederzeit kaputt gehen. Nimmt man die Plasmakugel nach dem

Versuch aus der Mikrowelle, sollten Sicherheitshandschuhe verwendet werden, da das Glas sehr heiß wird.

Materialien:

- Plasmakugel
- Werkzeug
- Sicherheitshandschuhe

Video:



Glühlampe in der Mikrowelle



Wie schon im Experiment „Plasma erzeugen“ beschrieben, werden elektromagnetische Wellen von Metallen zu einem großen Teil reflektiert. Doch ein kleiner Teil dringt immer mehr oder weniger tief in das Metall ein (Skintiefe). Im sichtbaren Bereich liegt die Skintiefe an z.B. einem Spiegel nur wenige Atomlagen tief, in dieser wird die Welle sehr stark absorbiert. Innerhalb der Skintiefe beschleunigt das elektrische Feld der elektromagnetischen Welle die vorhandenen Metallelektronen, welche diese Energie durch Stöße an das Metallgitter abgeben. Da das Volumen eines Drahtes einer Glühlampe sehr gering ist, kann die entstehende Wärme nicht abgeleitet werden, woraufhin der Draht in der Mikrowelle zuerst zum Glühen gebracht wird und in weiterer Folge schmilzt bzw. verdampft. In manchen Fällen ist es auch möglich, dass sich in der Glasfassung der Glühlampe dadurch ein Gasgemisch ansammelt, welches durch die weitere Absorption von Mikrowellen ionisiert, was wiederum hell aufleuchtet. In den meisten Fällen jedoch schmilzt das Glas der Fassung an einer Stelle und das Gasgemisch entweicht.



Abbildung 79: Glühlampe in der Mikrowelle, Glühfaden leuchtet hell auf; eigenes Bild

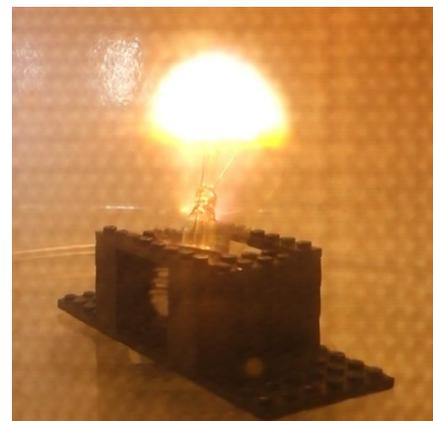


Abbildung 80: Glühlampe in der Mikrowelle, im Inneren entsteht Plasma; eigenes Bild

Sicherheitshinweise:

Wird eine Glühlampe wie vom Hersteller empfohlen mit Spannung versorgt, entstehen Temperaturen um die 160°C. Bei diesem Experiment in der Mikrowelle können es jedoch bis zu 600°C werden. Wie am Ende des Videos ersichtlich, können die Glühlampen durch die Hitzeentwicklung und den steigenden Gasdruck explodieren.

Materialien:

- Glühlampe mit Wolframdraht
- Halterung

Video:



EM Absorption durch Wasser



Wie in dem Kapitel „alles dreht sich um das Wasser“ beschrieben, wird die elektromagnetische Strahlung von Wasser absorbiert und in Wärme umgewandelt. Um dies zu bestätigen, können die folgenden zwei Experimente herangezogen werden. Dazu wird eine Glühlampe oder eine Energiesparlampe in ein Gefäß voll Wasser gehalten. Bei dem Experiment „Glühlampe in der Mikrowelle“ wird gezeigt, dass eine Glühlampe oder ein sonstiges Leuchtmittel gleich nach dem Einschalten hell zu leuchten beginnt. Doch ist das bei der Glühlampe, welche von Wasser umgeben ist, auch so? Das Gefäß wird in die Mitte des Drehtellers gestellt und das Mikrowellengerät bei 800 W Leistung in Betrieb genommen. Die Glühlampe leuchtet, wie im Video ersichtlich, nicht auf. Das elektromagnetische Feld wird vom Wasser vollständig absorbiert und kommt nicht zu der Lampe hindurch. Nun wird das Experiment ohne Wasser wiederholt. Jetzt leuchtet die Lampe, wenige Sekunden nach dem Einschalten hell auf. Warum das so ist, wird im Experiment „Glühlampe in der Mikrowelle“ beschrieben.



Abbildung 81: EM Absorption durch Wasser, Versuchsaufbau, EM Strahlung dringt nicht zur Glühlampe vor, EM Strahlung wird von dem Wasser in der Umgebung absorbiert; eigenes Bild

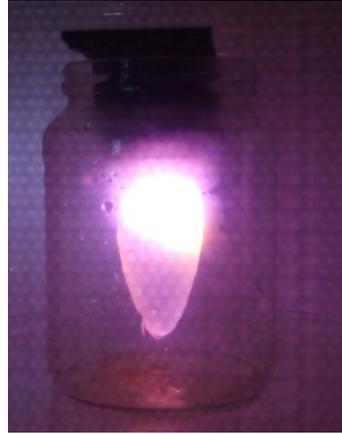


Abbildung 82: wenn man das Wasser entfernt kann das EM Feld zur Glühlampe vordringen, sie leuchtet hell auf; eigenes Bild

Sicherheitshinweis:

Wenn man das Experiment ohne Wasser betreibt und dadurch die Glühlampe zum Leuchten bringt, entsteht Plasma. Dieses wird sehr heiß und kann die Glühlampe (wie im Video ersichtlich) zum Explodieren bringen.

Materialien:

- Glühlampe
- Halterung
- Wasserglas
- Wasser
- Sicherheitshandschuhe

Video:



Überhitztes Wasser (Siedeverzug)



Wenn man Wasser herkömmlich erhitzt, geschieht dies durch Wärmeübertragung von einem Gefäß (z.B. Kochtopf) auf das Wasser, welches sich im Inneren befindet. Das Wasser erwärmt sich so lange, bis es den Siedepunkt erreicht. Dann bilden sich Dampfblasen an Kondensationskeimen, welche in Folge an die Oberfläche aufsteigen. Diese Dampfblasen

entstehen meistens an der Grenzfläche zu dem Gefäß, da hier die Temperatur höher ist als im Inneren der Flüssigkeit. In der Mikrowelle wird das Wasser „von Innen“ erhitzt, was die Möglichkeit bietet, das Wasser über den normalen Siedepunkt hinaus zu überhitzen. Voraussetzung dafür ist, dass man ein Gefäß verwendet, welches keimfrei bzw. sehr sauber ist. Das Wasser lässt sich somit auf ca. 110°C erhitzen, ohne dass es zu sieden beginnt.



Abbildung 83: Siedeverzug von Wasser, gibt man Kondensationskeime in das überhitzte Wasser verdampft es explosionsartig; Quelle: YouTube/Time Warp

Doch Vorsicht ist geboten. Kommt das überhitzte Wasser dann mit Kondensationskeimen in Berührung, z.B. wenn man Zucker oder einen Teebeutel in das Gefäß hineingibt, verdampft es explosionsartig. Da mir für dieses Experiment keine keimfreie Umgebung zur Verfügung steht, habe ich die Bilder und Videos aus der Sendung „Time Warp“ entnommen.

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment ist für den Schulunterricht nicht geeignet. Das Wasser kann schon in der Mikrowelle explosionsartig verdampfen. Dadurch kann es durch die Anbindung an das Stromnetz zu Kurzschlüssen kommen. Geschieht die Dampfexplosion außerhalb der Mikrowelle, wird kochendes Wasser durch den Raum geschleudert. Es kann außerdem dazu führen, dass durch den entstehenden Dampfdruck das Glasgefäß springt.

Materialien:

- Keimfreies Glasgefäß (z.B. Reagenzglas)
- Zucker oder Sägespäne
- Sicherheitsausrüstung

Video:



Metallschwamm im Benzinbad



Dieses spektakuläre Experiment zeigt das Verhalten leitender Metalle in der Mikrowelle. Um es noch spektakulärer wirken zu lassen, wird eine brennbare Flüssigkeit miteinbezogen. Man gibt wenige ml Benzin in eine Keramikschaale und gibt ein kleines Stück Metallschwamm oder Stahlwolle hinein und nimmt die Mikrowelle in Betrieb. Die elektromagnetische Strahlung in einem Mikrowellenofen kann die in einem Metall vorhandenen Leitungselektronen anregen. Diese Elektronen, auch Valenzelektronen genannt, bewegen sich im atomaren Maßstab betrachtet zwischen den positiv geladenen Atomrümpfen frei, und sorgen für die typischen Eigenschaften von Metallen wie z.B. eine gute Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit etc..



Abbildung 84: Metallschwamm im Benzinbad; eigenes Bild



Abbildung 85: Metallschwamm im Benzinbad, das Feuer sollte unverzüglich mit einer Löschdecke gelöscht werden; eigenes Bild

Bei Absorbierung von elektromagnetischer Strahlung entstehen oszillierende Ströme im Metall, welche auf Grund von Ohm'schen Verlusten das Metall lokal erwärmen. Diese Erwärmung, hervorgerufen durch lokale Wirbelströme, verteilt sich auf Grund der guten Wärmeleitungseigenschaften gleichmäßig auf den ganzen Körper. Wenn dieser Metallkörper ausreichend massiv ist, stellt sich je nach Wärmeableitung und Wärmekapazität ein neuer Gleichgewichtszustand mit einer nur geringen Erwärmung des Körpers ein. Wie sich kleine Körper in einem elektromagnetischen Feld verhalten, hängt im Wesentlichen von ihrer Geometrie bzw. der Dicke bei Metallschichten oder Folien ab. Ein Metallschwamm oder Stahlwolle verfügt nur über eine geringe Wärmekapazität und erhitzt sich daher so schnell, dass er/ sie zu glühen anfängt oder sogar an einigen Stellen verdampfen kann und

Entladungsblitze entstehen. Diese Blitze endzünden das Gas-Luftgemisch, welches vom Benzin aufsteigt und es entsteht ein kleiner Brand.

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment ist für den Schulunterricht nicht geeignet. Hier wird mit brennbarer Flüssigkeit gearbeitet, welche durch eine eventuelle Explosion im Klassenraum verteilt werden kann. Man darf auf keinen Fall zu viel Benzin verwenden. Denn dadurch kann in der Mikrowelle Benzin verdampfen, was folglich den Mikrowellenofen zum Explodieren bringen kann. Nach dem Versuch sollte der kleine Brand mittels Löschdecke „erstickt“ werden.

Materialien:

- Keramikschale
- Stahlwolle, Metallschwamm
- Benzin
- Schutzausrüstung (Handschuhe, etc.)
- Löschmittel

Video:



Stahlwolle in der Mikrowelle



Stahlwolle besteht aus feinen gekräuselten Fasern aus leitendem Stahl und wird zum Polieren oder Schleifen von Oberflächen eingesetzt. Gibt man sie in die Mikrowelle, glüht diese hell auf und Entladungsblitze entstehen. Die elektromagnetische Strahlung in einem Mikrowellenofen kann die in einem Metall vorhandenen Leitungselektronen anregen. Diese Elektronen, auch Valenzelektronen genannt, bewegen sich im atomaren Maßstab betrachtet zwischen den positiv geladenen Atomrümpfen frei und sorgen für die typischen Eigenschaften von Metallen wie z.B. eine gute Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit etc.. Bei Absorbierung von elektromagnetischer Strahlung entstehen oszillierende Ströme im Metall, welche auf Grund von Ohm'schen Verlusten das Metall lokal

erwärmen. Die Stahlwolle entzündet sich, da die einzelnen Fasern sehr dünn sind und die Wärme nicht abgegeben werden kann.



Abbildung 86: Stahlwolle in der Mikrowelle, die feinen Stahlfasern verglühen; eigenes Bild

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment ist nicht für den Schulunterricht geeignet. Der entstehende Brand kann eine große Raumentwicklung hervorrufen. Die Mikrowelle kann so beschädigt werden, dass sie danach nicht mehr verwendet werden kann.

Materialien:

- Stahlwolle
- Löschmittel

Video:



Sektflasche in der Mikrowelle



Kommt man, warum auch immer, auf die Idee eine Sekt- oder Champagnerflasche in der Mikrowelle zu erwärmen, sollte man das unterlassen. Bei der Herstellung dieser Getränke findet die zweite alkoholische Fermentierung durch die sogenannte Flaschengärung in der verschlossenen Flasche statt. Das Kohlendioxid (CO_2), welches dabei entsteht, kann nicht entweichen und liegt danach zum überwiegenden Teil in gelöster Form in der Flüssigkeit vor. Während der monatelangen Lagerung in der Herstellung stellt sich in der Flasche ein Gleichgewicht zwischen der Konzentration von gelöstem CO_2 in der Flüssigkeit und dem Partialdruck von gasförmigen Kohlendioxidmolekülen über der Flüssigkeitsoberfläche im Flaschenhals ein. Wie stark die Flasche unter Druck steht, hängt unter anderem von der Temperatur ab. Je höher die Temperatur desto höher der Druck.

„Man kann den Druck in der geschlossenen Flasche abschätzen aus der idealen Gasgleichung einerseits, wonach der Druck eines Gases mit steigender Temperatur bei konstantem Volumen zunimmt, und aus dem Gaslöslichkeitskoeffizienten andererseits, der das Gaslösungsgleichgewicht zwischen dem Champagner und dem CO_2 - Gas im Flaschenhals bestimmt.“ Bei annähernd Zimmertemperatur beträgt der Druck in der Flasche leicht über sieben bar – und lässt man die Flasche an heißen Sommertagen in der Sonne stehen, kann der Druck bei vierzig Grad Celsius sogar bis auf 15 bar ansteigen.“ (Konitzer, 2015)

Erwärmt man nun eine Flasche in der Mikrowelle, steigt der Druck in der Flasche, bis diese schlussendlich explodiert.



Abbildung 87: Sektflasche in der Mikrowelle, vor dem Versuch; eigenes Bild



Abbildung 88: Sektflasche in der Mikrowelle, Gerät explodiert; Quelle: YouTube - Brainiac S03E01

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment ist nicht für den Schulunterricht geeignet. Im Unterricht kann das Video im Anhang gezeigt werden. Durch die Explosion der Flasche entsteht ein so hoher Druck, welcher auch die Mikrowelle zerstören kann. Bauteile der Mikrowelle sowie Glassplitter können bis zu 20 m weit weggeschleudert werden.

Materialien:

- Sektflasche

Video:



Munition in der Mikrowelle



Munition für eine Pistole oder ein Gewehr besteht in den meisten Fällen aus einer Patronenhülse, einer Treibladung, einem Zündhütchen und aus dem Projektil. Bei einem Schuss aus einer Waffe wird über einen Abzugsmechanismus der so genannte Schlagbolzen in das Zündhütchen gedrückt, welches die Treibladung entzündet. Durch den Gasdruck, welchen die Treibladung erzeugt, wird das Projektil aus der Hülse gedrückt und im Lauf der Waffe beschleunigt.



Abbildung 89: Munition in der Mikrowelle, Innenaufnahme, eigenes Bild

Bei diesem Experiment wird untersucht, ob das elektromagnetische Feld ausreicht, um die explosiven Inhalte einer Patrone zu zünden. Unter dementsprechenden Sicherheitsbedingungen wird die Mikrowelle aus weiter Ferne in Betrieb genommen. Nach einer Betriebszeit von ca. 4 min. gibt es eine Explosion in der Mikrowelle. Die 9 mm Patrone

ist auf Grund der Hitzeentwicklung explodiert. Bei näherer Betrachtung der Überreste sieht man, dass nicht wie erwartet, das Projektil aus der Hülse geschleudert wurde, sondern die ganze Messinghülse geborsten ist. Die Explosion war jedoch nicht so stark, dass sich die Mikrowellentüre geöffnet hat oder der Garraum beschädigt wurde.



Abbildung 90: Messinghülse der Patrone explodiert; eigenes Bild



Abbildung 91: Überreste des Experiments, geborstene Messinghülse; eigenes Bild

Sicherheitshinweis:

Der Umgang oder das Mitbringen von Munition in den Unterricht ist strengstens verboten! Dieses Experiment wurde von mir nur durchgeführt, da ich für den Besitz von Munition (Waffenbesitzkarte, Jagdschein) autorisiert bin.

Video:



Farbsprühdosen in der Mikrowelle



Farbsprühdosen funktionieren als Überdruckbehälter und sind mit Farbe und einem Treibgas (Propan oder Butan) gefüllt. Durch einen Sprühkopf können die Inhaltsstoffe herausgesprüht und zerstäubt werden. Damit dies bis zur Entleerung der Dosen gewährleistet ist, muss genügend Druck in den Weißblechdosen herrschen. Als Treibgase werden meist leicht verflüssigte Alkane wie Propan, n-Butan oder Isobutan eingesetzt. Bei

Raumtemperatur herrscht in dem Expansionsraum im Inneren der Dose ein Druck von 3 bis 5 bar. Bei der Herstellung unterlaufen die Dosen einem Sicherheitscheck, wobei jede Dose auf 50°C erhitzt wird und sich folglich ein Innendruck von 7 bis 9 bar einstellt. Diese Belastung übersteigt jene üblichen Belastungen, welchen eine Sprühdose im Alltag ausgesetzt ist. Farbsprühdosen sind dadurch in der Handhabung sicher, es sei denn man gibt sie in einen Mikrowellenofen.



Abbildung 92: Farbsprühdosen in der Mikrowelle, die Kunststoffkappen der Dosen fangen Feuer; eigenes Bild

Die elektromagnetische Strahlung erhitzt den Inhalt und der Gasdruck steigt. Zusätzlich wird ein Teil der Strahlung absorbiert und in der leitenden Dose werden Wirbelströme induziert, welche das Metall erhitzen. Durch Spannungsspitzen im Material entstehen Funkenüberschläge, welche das brennbare Treibgas entzünden. Die Farbsprühdose



Abbildung 93: Farbsprühdosen in der Mikrowelle, die unter Druck stehenden Weißblechdosen explodieren; eigenes Bild

explodiert und kann die Mikrowelle stark beschädigen (siehe Video).

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment ist für den Schulunterricht nicht geeignet da die Mikrowelle stark beschädigt wird und Teile davon durch die Explosion weit umherfliegen. Weiters ist durch die brennenden Kunststoffkappen mit einer starken Rauchentwicklung zu rechnen.

Video:



Böller in der Mikrowelle



Böller (Knallkörper) gelten als pyrotechnische Gegenstände und sind zu Ostern und zum Jahreswechsel allseits beliebt. Im Rahmen dieser Diplomarbeit darf es nicht fehlen, solch einen pyrotechnischen Knallböllner unter Einfluss eines elektromagnetischen Feldes einer Mikrowelle zu untersuchen. Man lege einen Böller auf den Drehteller einer Mikrowelle und nimmt diese mit 800 W Leistung in Betrieb. Die Frage ist, ob sich das enthaltene Schwarzpulver durch das elektromagnetische Feld entzündet. Nach mehreren Versuchen heißt die Antwort ja. Die Erwärmung durch das Wechselfeld reicht aus, um die pyrotechnische Mischung im Inneren des Knallkörpers zu zünden. Die resultierende Explosion reicht aus, um durch den Schalldruck die Türe des Mikrowellenofens zu öffnen. Da hier ein CE geprüfter und zulässiger Knallkörper der Kategorie F2 verwendet wurde, hält sich der Schaden am Gerät in Grenzen. Die Mikrowelle ist nach den Versuchen vollständig intakt.



Abbildung 94: Böller in der Mikrowelle, durch die Explosion wird die Türe der Mikrowelle aufgeschleudert; eigenes Bild

Sicherheitshinweis:

Das Experiment ist für den Unterricht auf Grund der Verwendung von pyrotechnischen Gegenständen nicht geeignet.

Video:



Sprengstoff in der Mikrowelle



Dieses Experiment hat wenig pädagogischen Wert, ist aber nicht minder spektakulär. Um diese Diplomarbeit mit einem richtigen „Knaller“ abzuschließen, wird ein Stück Sprengstoff in einen Mikrowellenherd gegeben (Besitz und Handhabung nur durch Personen mit Sprengausbildung und -befugnis erlaubt). Hier wurde ein gelatinöser Sprengstoff namens „Austrogel P“ verwendet, welcher im Tunnelbau in wasserführenden Bohrlöchern verwendet wird. Dieser besitzt eine spezifische Energie von 1034 kJ/kg und detoniert mit einer Geschwindigkeit von 6000 m/s . (Austinpowder.at, 2018)

Diese Daten lassen erahnen, dass dieses Experiment sehr gefährlich ist und nur von **sprengebefugten Personen** unter dementsprechenden **Sicherheitsvorkehrungen** durchgeführt werden darf. Nach einer sehr lauten Explosion wurden Teile der Mikrowelle in 100 m Entfernung gefunden. Aufgrund der Gefährdung ist dieses Experiment nicht für den Schulunterricht geeignet.



Abbildung 95: Sprengstoff in der Mikrowelle, Gerät explodiert; eigenes Bild



Abbildung 96: Sprengstoff in der Mikrowelle, Überreste nach der Sprengung; eigenes Bild

Video:



6. Literaturverzeichnis

- Austinpowder.at. (2018). *Austrogel P*. Abgerufen am 03. 04 2018 von
<http://www.austinpowder.at/EN/products/gelatine/Austrogel%20P.pdf>
- Berger, R. (2002). Das Mikrowellengerät - ein interessanter Küchenhelfer. *Physik in der Schule, PdN-Ph. 2/51. Jg. 2002*.
- Berger, R. (2002). Unterrichtseinheit zum Mikrowellengerät. Physikdidaktik der Universität Kassel.
- Bundeskanzleramt, Rechtsinformationssystem. (01. 09 2017). *Rechtsvorschrift für Lehrpläne*. Abgerufen am 15. 01 2018 von
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568&FassungVom=2017-09-01>
- Bundeskanzleramt, Rechtsinformationssystem. (15. 01 2018). *Rechtsvorschrift für Schulordnung*. Abgerufen am 15. 01 2018 von
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10009376>
- Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung. (26. 05 2014). *Schulunterrichtsgesetz*. Abgerufen am 15. 01 2018 von
https://www.bmb.gv.at/ministerium/rs/1997_46.html
- Chemie.de. (2018). *Elektromagnetische Wellen*. Abgerufen am 12. 03 2018 von
http://www.chemie.de/lexikon/Elektromagnetische_Welle.html
- Chemie.de. (2018). *Maillard-Reaktion*. Abgerufen am 07. 03 2018 von
<http://www.chemie.de/lexikon/Maillard-Reaktion.html>
- Demtröder, W. (2009). *Experimentalphysik 2, Band 2 - Elektrizität und Optik, 5. Auflage*. Berlin: Springer Verlag.
- Dick, B. (2012). *uni-regensburg.de*. Abgerufen am 27. 02 2018 von elektronische Übergänge in Atomen: http://www-dick.chemie.uni-regensburg.de/studium/files/Elektronische_Uebergaenge_in_Atomen.pdf

- Duit R., M. T. (2002). *uni-regensburg.de, Zur Rolle des Experiments im Physikunterricht*.
Abgerufen am 13. 03 2018 von http://www.uni-regensburg.de/physik/didaktik-physik/medien/VeranstMat/gemMat/ExpSem/exp_i_phunt_duit.pdf
- Embacher, F. (2018). *univie.ac.at*. Abgerufen am 19. 02 2018 von
<https://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Splitter/VomEisZumWasserdampf/>
- Focus.de. (2018). *Die Katze in der Mikrowelle*. Abgerufen am 13. 03 2018 von
https://www.focus.de/wissen/mensch/psychologie/tid-15711/urbane-legenden-die-katze-in-der-mikrowelle_aid_440834.html
- gebe.net. (2018). *Gebe Thermodruckersysteme*. Abgerufen am 25. 01 2018 von
<http://img.gebe.net/wtc3/download/thermopapierfachart.pdf>
- Homepage Freie Universität, B. (2018). *bcp.fu-berlin*. Abgerufen am 31. 01 2018 von
http://www.bcp.fu-berlin.de/studium-lehre/studiengaenge/chemie/bachelor/Interessen_loesungen/streichholz.html
- Jackson, J. D. (1983). *Klassische Elektrodynamik*. Berlin: de Gruyter.
- Karstädt D., M. K. (Nr. 2/ 35. Jg 2004). Mehr Experimente mit der Haushaltsmikrowelle.
Physik in unserer Zeit, S. 1 - 8.
- Karstädt D., M. K. (Nr. 2/ 35. Jg. 2004). Eier im Wellensalat. *Physik in unserer Zeit*, S. 90 - 96.
- Klaus-Peter Möllmann, M. V. (Nr.1/ 35. Jg. 2004). Kochen mit Zentimeterwellen. *Physik in unserer Zeit*, S. 38 - 44.
- Klaus-Peter Möllmann, M. V. (Nr.1/ Jg. 35. 2004). Mehr zur Physik der Haushaltsmikrowelle.
Physik in unserer Zeit, S. 1 - 5.
- Konitzer, F. (31. 12 2015). *Welt der Physik - Physik der Champagnerflasche*. Abgerufen am
22. 03 2018 von <https://www.weltderphysik.de/thema/hinter-den-dingen/entkorken-einer-champagnerflasche/>
- Lehner, G. (2009). *Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker* (6. Auflage
Ausg.). Stuttgart: Springer.
- Orf.at. (2012). *Giftige Kassazettel auf dem Rückzug*. Abgerufen am 25. 01 2018 von
<http://helpv2.orf.at/stories/1704791/index.html>

- Pehl, E. (1992). *Mikrowellen in der Anwendung*. Heidelberg: Hüthig Fachverlage.
- Physik, L. (2018). *Elektrizitätslehre/ elektromagnetische Wellen*. Abgerufen am 16. 01 2018 von <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/elektromagnetische-wellen/geschichte>
- Physik, L. (2018). *Wärmelehre/ Wärmekraftmaschinen*. Abgerufen am 15. 02 2018 von <https://www.leifiphysik.de/waermelehre/waermekraftmaschinen/geschichte/herons-dampftrieb>
- Physik, I. (2018). *The Physics Hypertextbook*. Abgerufen am 17. 01 2018 von <https://physics.info/>
- RoyalSociety. (2015). *Popcorn, critical temperature, jump and sound*. Abgerufen am 25. 01 2018 von <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/12/104/20141247>
- Telekom, R.-G. (2018). *RTR*. Abgerufen am 18. 01 2018 von <https://www.rtr.at/de/tk/FRQshare>
- Thuery, J. (1992). *Microwaves, Industrial- Scientific- and Medical Applications*. Boston: Artech House.
- Zohm, H. (2012). *Plasmaphysik LMU München*. Abgerufen am 31. 01 2018 von <https://www.ipp.mpg.de/2155286/Plasmaphysik>

7. Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Hertz'scher Oszillator 1888, Versuchsaufbau zum Nachweis von EM- Wellen; Quelle: www1.wdr.de.....</i>	6
<i>Abbildung 2: Percy LeBaron Spencer, der Erfinder des Mikrowellenherdes; Quelle: Spencer Family Archives.....</i>	7
<i>Abbildung 3: Radarange, erster Mikrowellenofen 1954; Quelle: marketingvp.com</i>	8
<i>Abbildung 4: Aufbau eines Mikrowellenofens; Quelle: https://i.warosu.org/data/sci/img/0089/90/1498191913316.jpg</i>	9
<i>Abbildung 5: Aufbau eines Magnetrons; Quelle: http://hyperphysics.phy- astr.gsu.edu/hbase/Waves/magnetron.html</i>	11
<i>Abbildung 6: Das elektromagnetische Feld wird in den Hohlräumen der Anode erzeugt; Quelle: http://hyperphysics.phy astr.gsu.edu/hbase/ Waves/magnetron.html</i>	12
<i>Abbildung 7: Infrarot Aufnahme, zeigt Ungleichverteilung von Hitzeentwicklung im Garraum; Quelle: Eier im Wellensalat, Physik in unserer Zeit, 35. Jg. 2004 Nr. 2 S. 91.....</i>	13
<i>Abbildung 8: Elektromagnetisches Spektrum Übersicht; Quelle: http://www.sengpielaudio.com/Rechner-wellenlaenge.htm</i>	15
<i>Abbildung 9: Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle; eigenes Bild</i>	16
<i>Abbildung 10: H₂O Dipolmolekül; Quelle: sarsteinergold.at</i>	19
<i>Abbildung 11: Metallgitter im Mikrowellenfenster; eigenes Bild</i>	23
<i>Abbildung 12: Metallgitter in Mikrowellentür; eigenes Bild</i>	28
<i>Abbildung 13: Handy in Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	28
<i>Abbildung 14: Lichtgeschwindigkeit ermitteln, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	29
<i>Abbildung 15: Messung des Abstandes zwischen den Knotenpunkten; eigenes Bild</i>	29
<i>Abbildung 16: Schwedenbombe in Mikrowelle, ohne EM Strahlung; eigenes Bild</i>	31
<i>Abbildung 17: Schwedenbombe in Mikrowelle, mit EM Strahlung; eigenes Bild.....</i>	31
<i>Abbildung 18: Kunststoffplatte mit aufgelegten befeuchteten Thermopapierstreifen; eigenes Bild.....</i>	32
<i>Abbildung 19: Thermopapier zeigt lokale Erhitzung nach Reaktion; eigenes Bild.....</i>	32
<i>Abbildung 20: Nachweis der Moden mit einem Wasserfilm auf einer Glasplatte und IR- Kamera, 15 s Erwärmung mit 800 W Heizleistung, in 3,5 cm Höhe, Quelle: Karstädt, Möllman, Vollmer, 2004, Eier im Wellensalat.....</i>	33

<i>Abbildung 21: Mikrowellenpopcorn im Papiersack; eigenes Bild</i>	<i>34</i>
<i>Abbildung 22: Mikrowellenpopcorn fertig; eigenes Bild</i>	<i>34</i>
<i>Abbildung 23: Popcorn Herstellung in einem Gefäß; eigenes Bild</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 24: Dampfkarussell Aufbau; eigenes Bild</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 25: das Dampfkarussell wird zentral im Garraum platziert; eigenes Bild.....</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 26: Luftballon mit Wasser in der Mikrowelle, Versuchsaufbau, die Schale haltet den Ballon auf Position; eigenes Bild</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 27: das enthaltene Wasser ist verdampft und das Volumen des Ballons hat sich vergrößert; eigenes Bild</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 28: T-V Diagramm von Wasser, Erhitzen (blau) - Sieden (orange) - Überhitzen (rot), Quelle: E. Hahne, 2000, Technische Thermodynamik, Bild 5.2, S 234.....</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 29: Toastbrot vs. Knäckebrot in der Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 30: Seife in der Mikrowelle, nach dem Experiment; eigenes Bild</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 31: Eisblock in Mikrowelle; eigenes Bild</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 32: Eisblock nach dem Experiment, ein kleiner Teil des Eisblocks ist geschmolzen; eigenes Bild.....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 33: Wasser im mikrowellenfesten Glasbehälter; eigenes Bild</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 34: Glas mit 250 ml Wasser in der Mikrowelle; eigenes Bild</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 35: Glas mit 250 ml Salzwasser (2 Teelöffel Speisesalz) in der Mikrowelle; eigenes Bild.....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 36: Glas mit 250 ml Wasser mit Aluminiumfolie umwickelt; eigenes Bild.....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 37: Flackerlampe in Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 38: Flackerlampe in Mikrowelle, Neon Gasentladung; eigenes Bild.....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 39: Vereinfachtes Termschema des Neons, Relaxation von 3p- in den Grundzustand, Photonen als orangerotes Licht sichtbar; Quelle: Dick B., 2012, S. 17</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 40: Christbaumkugel in Mikrowelle, Silberschicht verdampft; eigenes Bild</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 41: Christbaumkugel in der Mikrowelle, die Silberschicht im Inneren der Glaskugel verdampft; eigenes Bild.....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 42: Porzellanteller mit Umrandung aus Gold; eigenes Bild</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 43: Goldrandteller in der Mikrowelle, Entladung; eigenes Bild</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 44: Fettproben, Thea - Butter - Butterschmalz - Bratenfett (von li. nach re.), eigenes Bild.....</i>	<i>51</i>

<i>Abbildung 45: Proben nach dem Experiment, die Fette sind je nach Wassergehalt unterschiedlich schnell geschmolzen; eigenes Bild</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 46: Eindringtiefe von Mikrowellen, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 47: Eindringtiefe von Mikrowellen, Vergleich der Testobjekte nach dem Versuch; eigenes Bild.....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 48: Faraday'scher Käfig in der Mikrowelle, im Inneren befindet sich ein Gefäß mit Wasser; eigenes Bild.....</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 49: Faraday'scher Käfig in der Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 50: Tischtennisball in der Mikrowelle, dieser vergrößert sein Volumen und verformt sich; eigenes Bild</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 51: Zitrone bzw. Limette in der Mikrowelle, heiße Flüssigkeit tritt aus; Quelle: YouTube/ Slow Motion Stuff Exploding in de Microwave</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 52: unpolare Flüssigkeit in der Mikrowelle, Temperaturmessung nach einer Minute MW Betrieb; eigenes Bild</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 53: Symbol für mikrowellenfestes Geschirr, Quelle:https://www.curver.com/deu/gut_zu_wissen/hier-erfahren-sie-alles-uber-die-symbole-auf-unseren-kunststoffdosen.....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 54: mittels Streichholz Plasma erzeugen, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 55: erzeugtes Plasma leuchtet; eigenes Bild.....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 56: Plasma Innenaufnahme; eigenes Bild.....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 57: Plasma erzeugen mit Aluminiumfolie, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 58: Plasma erzeugen mit Aluminiumfolie; eigenes Bild</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 59: Plasma erzeugen mit Aluminiumfolie, Innenaufnahme durch Schweißglas-Filter; eigenes Bild</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 60: CD in Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 61: CD in Mikrowelle, Aluminiumschicht verdampft; eigenes Bild</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 62: CD in Mikrowelle, zerstörte Aluminiumschicht nach Versuch; eigenes Bild</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 63: Chipstüte in der Mikrowelle, Versuchsaufbau; eigenes Bild</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 64: Chipstüte nach Anlegen eines elektromagnetischen Feldes, Chipstüte schrumpft; eigenes Bild</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 65: Weintraube präparieren, eigenes Bild</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 66: präparierte Weintraube in der Mikrowelle; eigenes Bild.....</i>	<i>67</i>

<i>Abbildung 67: Weintraube in der Mikrowelle, Lichtbogen und Plasma entstehen; eigenes Bild</i>	67
<i>Abbildung 68: Spiegelei in der Mikrowelle, entstehende Dampfblasen explodieren; eigenes Bild</i>	68
<i>Abbildung 69: Glas wird mit Bunsenbrenner ca. 2 - 3 Minuten an einer Stelle erhitzt; eigenes Bild</i>	70
<i>Abbildung 70: die zuvor erhitzte Stelle wird unter der Mikrowellenstrahlung weiter erhitzt und das Glas schmilzt; eigenes Bild</i>	70
<i>Abbildung 71: Essbesteck in der Mikrowelle; Versuchsaufbau, eigenes Bild</i>	72
<i>Abbildung 72: Essbesteck in der Mikrowelle, Entladung an der Gabelspitze; eigenes Bild</i>	72
<i>Abbildung 73: verwendete Leuchtstoffröhre; eigenes Bild</i>	73
<i>Abbildung 74: Leuchtstoffröhre in der Mikrowelle; eigenes Bild</i>	73
<i>Abbildung 75: Zigarette glüht nach einigen Sekunden hell auf, Rauchgas entsteht; eigenes Bild</i>	74
<i>Abbildung 76: Zigarette in Mikrowelle, aufsteigender Rauch ionisiert zu Plasma; eigenes Bild</i>	75
<i>Abbildung 77: Plasmakugel in der Mikrowelle, Sockel mit elektronischen Bauteilen muss vorher entfernt werden; eigenes Bild</i>	76
<i>Abbildung 78: Plasmakugel in der Mikrowelle, die elektromagnetische Strahlung lässt Plasma entstehen; Quelle: YouTube/ NerdCorner</i>	76
<i>Abbildung 79: Glühbirne in der Mikrowelle, Glühfaden leuchtet hell auf; eigenes Bild</i>	77
<i>Abbildung 80: Glühbirne in der Mikrowelle, im Inneren entsteht Plasma; eigenes Bild</i>	77
<i>Abbildung 81: EM Absorption durch Wasser, Versuchsaufbau, EM Strahlung dringt nicht zur Glühlampe vor, EM Strahlung wird von dem Wasser in der Umgebung absorbiert; eigenes Bild</i>	79
<i>Abbildung 82: wenn man das Wasser entfernt kann das EM Feld zur Glühbirne vordringen, sie leuchtet hell auf; eigenes Bild</i>	79
<i>Abbildung 83: Siedeverzug von Wasser, gibt man Kondensationskeime in das überhitzte Wasser verdampft es explosionsartig; Quelle: YouTube/Time Warp</i>	80
<i>Abbildung 84: Metallschwamm im Benzinbad; eigenes Bild</i>	81
<i>Abbildung 85: Metallschwamm im Benzinbad, das Feuer sollte unverzüglich mit einer Löschdecke gelöscht werden; eigenes Bild</i>	81

<i>Abbildung 86: Stahlwolle in der Mikrowelle, die feinen Stahlfasern verglühen; eigenes Bild .</i>	<i>83</i>
<i>Abbildung 87: Sektflasche in der Mikrowelle, vor dem Versuch; eigenes Bild</i>	<i>84</i>
<i>Abbildung 88: Sektflasche in der Mikrowelle, Gerät explodiert; Quelle: YouTube - Brainiac S03E01</i>	<i>84</i>
<i>Abbildung 89: Munition in der Mikrowelle, Innenaufnahme, eigenes Bild</i>	<i>85</i>
<i>Abbildung 90: Messinghülse der Patrone explodiert; eigenes Bild</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 91: Überreste des Experiments, geborstene Messinghülse; eigenes Bild</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 92: Farbsprühdosen in der Mikrowelle, die Kunststoffkappen der Dosen fangen Feuer; eigenes Bild.....</i>	<i>87</i>
<i>Abbildung 93: Farbsprühdosen in der Mikrowelle, die unter Druck stehenden Weißblechdosen explodieren; eigenes Bild</i>	<i>87</i>
<i>Abbildung 94: Böller in der Mikrowelle, durch die Explosion wird die Türe der Mikrowelle aufgeschleudert; eigenes Bild.....</i>	<i>89</i>
<i>Abbildung 95: Sprengstoff in der Mikrowelle, Gerät explodiert; eigenes Bild</i>	<i>90</i>
<i>Abbildung 96: Sprengstoff in der Mikrowelle, Überreste nach der Sprengung; eigenes Bild ..</i>	<i>90</i>