

# *Physik mit Lebensmitteln*

## **Diplomarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Magisters der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Wilfried WINKLER

am Institut für Experimentalphysik

Technische Universität Graz

Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing.

Dr.techn. Gernot Pottlacher

Graz, Juni 2017

## Kurzfassung

Die Vorliegende Arbeit basiert auf einer Idee von Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher, der diese und sicher weitere spannende Versuche im Rahmen einer Weihnachtsvorlesung einem großen Publikum näherbringen wird. Der Umfang dieser Arbeit deckt bei weitem nicht alle Experimente ab, die mit Lebensmitteln möglich sind, soll aber einen guten Einblick in diese Thematik geben. Im ersten Teil der Arbeit wird die Motivation zu dieser Arbeit erläutert und die Möglichkeiten aufgezeigt, die das Experimentieren mit Lebensmitteln bietet. Auch eine kritische Auseinandersetzung mit dem Thema ist hier eingefügt. Die Rolle des Experimentierens im Allgemeinen und speziell im Unterricht wird im fachdidaktischen Teil diskutiert. Ergänzt werden diese Ausführungen mit Zitaten aus dem Lehrplan, die für die Thematik dieser Arbeit von Bedeutung sind. Den Hauptteil bilden jedoch die Beschreibungen der ca. 70 Versuche. Eine Auflistung der Materialien, eine Anleitung zum Durchführen der Versuche mit den möglichen Beobachtungen und eine Darstellung des physikalischen Hintergrundes findet sich dort. Das Ziel dieser Arbeit ist es, sich der Rolle des Experimentes im Unterrichts bewusster zu werden und Anregungen zum Experimentieren im Unterricht zu geben.

## Abstract

The present work is based on an idea of Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher, who will bring these and certainly further exciting experiments within a Christmas lecture to a large audience. The scope of this work does not cover all experiments that are possible with food, but is intended to give a good insight into this topic. In the first part, the motivation for this work is explained and the possibilities offered by experimenting with food are discussed. A critical discussion of the subject is also included here. The role of experimentation in general, and especially in the classroom, is discussed in the technical methodology section. These remarks are supplemented by quotations from the curriculum, which are of importance for the topic of this thesis. The main part, however, is the descriptions of about 70 experiments. A list of the materials, a guide for the experiments with the possible observations and a representation of the physical background can be found there.

The aim of this thesis is to become more aware of the role of the experiment in teaching and to give suggestions for experimentation in the classroom.

## Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, 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.

Datum:

Unterschrift:

## Danksagung

Bei Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher möchte ich mich für die Betreuung der Arbeit und die Möglichkeit die Versuche am Institut für Experimentalphysik durchführen zu können besonders bedanken. Das gemeinsame Experimentieren war eine besondere Erfahrung.

Meiner Familie gilt auch ein großer Dank für die Unterstützung meiner Entscheidung, das Lehramtstudium zu betreiben. Vielen Dank, dass ihr immer für mich da seid.

Auch meine Freunde und StudienkollegInnen haben einen großen Anteil am Gelingen meines Studiums. Ich danke euch für die guten Ratschläge und das offene Ohr bei Problemen.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	I
Abstract .....	I
Ehrenwörtliche Erklärung.....	III
Danksagung.....	IV
1. Einleitung.....	1
2. Fachdidaktisches .....	2
2.1 Forderungen des Lehrplans.....	3
2.1.1 Forderungen des Lehrplanes für die AHS-Unterstufe .....	3
2.1.2 Forderungen des Lehrplanes für die AHS-Oberstufe .....	5
3. Versuche.....	7
3.1 Versuche mit Eiern .....	7
Rohes und hartes Ei rollen .....	7
Ei rotiert hochkant.....	9
Bogenform am Ei.....	10
3.2 Versuche zur Thermodynamik .....	12
Stollwerck frieren .....	12
Eis mit flüssigem Stickstoff herstellen.....	13
Popcorn in der Mikrowelle.....	14
Schwedenbombe in Mikrowelle.....	16
Popcorn in flüssigem Stickstoff .....	17
Feuerwerk mit Orangenschalen .....	18
Eiswürfel mit einem Zwirnfaden aus dem Glas holen.....	19
Eiswürfel mit Draht durchscheiden.....	20
Druckkochtopf.....	22
Bester Zeitpunkt um heißen Kaffee mit Milch abzukühlen.....	25
Cremesuppe kühlt schneller ab als Tee.....	26
Gummibärchen in heißem und kaltem Wasser .....	29
Rindszunge auf gefrorener Eisenplatte .....	31
Salz in Wasser mit Eiswürfeln.....	32
Fettbrand.....	34
Flaschengeist mit Alkohol.....	35
3.3 Versuche zur Mechanik .....	37
Kesselgleichung mit Würstchen .....	37
Ketchup als thixotropes Medium .....	39
Nicht-Newton'sche Flüssigkeit mit Maisstärke .....	42

Sirup mit Gedächtnis .....	44
Zähigkeit mit Honig .....	46
Abgestandenes Bier in Vakuum .....	47
Schwedenbombe in Vakuum.....	49
Karotte durch ein Holzbrett schießen .....	50
Cola light Dose schwimmt .....	52
Öl auf Wasser mit Eiswürfel .....	54
Öltropfen in Alkohol-Wasser-Gemisch.....	55
Wasser und Schnaps vertauschen.....	57
Alkohol und Wasser mischen .....	59
Ketchup Beutel als U-Boot .....	61
Kraftprobe zwischen Kaffee und Alkohol .....	62
Flüssiger Stickstoff, Wasser und Alkohol in Filzhut.....	63
Schlagobers auf Tia Maria .....	65
Müsli entmischt sich.....	67
Spaghetti brechen .....	69
Glas Wasser mit Karte umdrehen .....	70
Der trockene Finger.....	72
Pfeffer auf Wasser.....	73
Fakirapfel.....	75
Sodawasser bläst Luftballon auf .....	77
Backpulverrakete .....	79
Gasbläschen im Sektglas .....	81
Rosinen im Sodawasser.....	85
Schaumbildung in nassem und trockenem Glas .....	86
Radler mischen.....	88
Schlag auf Bierflasche.....	90
Cola und Mentos .....	91
Bierschaumzerfall.....	93
Milch aus der Packung leeren .....	95
Butter mit Zentrifuge herstellen .....	97
Sektflasche sabrieren .....	99
Portweinzange.....	101
Mit Brot radieren.....	103
Teeblätter in der Mitte der Tasse .....	104
3.4 Versuche zu Elektrodynamik, Magnetismus .....	107

Leuchtendes Essiggurkerl .....	107
Würstel mit Strom grillen .....	108
Glühlampe leuchtet mit Salz .....	110
Lichtgeschwindigkeit mit Schokolade messen .....	112
Maisstärke mit Speiseöl .....	114
Eisen in Cornflakes .....	115
Weintraube in der Mikrowelle .....	118
Tribolumineszenz mit Zucker .....	120
3.5 Versuche zur Akustik .....	122
Klänge aus der Tasse .....	122
Chladnische Klangfiguren mit Zucker .....	124
3.6 Versuche zur Optik .....	125
Atmosphäre aus Milch .....	125
Fettfleckphotometer .....	127
4. Literaturverzeichnis .....	129



## 1. Einleitung

Im Lehramtsstudium hat man die Wahl in welchem Fach man die Diplomarbeit schreibt. Da ich bereits eine Abschlussarbeit im Zuge meines Biologiestudiums verfasst habe, wollte ich mich mit Aspekten des Physikunterrichts näher auseinandersetzen. Im Verlauf der Überlegungen, worüber ich meine Diplomarbeit konkret verfassen möchte, habe ich Herrn Prof. Gernot Pottlacher kontaktiert. Seine Idee Freihandversuche zu „Physik mit Lebensmitteln“ auszuarbeiten, stieß sofort auf mein Interesse. Bei meiner zukünftigen Laufbahn als Physiklehrer ist es mir besonders wichtig, im Unterricht physikalische Phänomene anhand von Versuchen zu zeigen und dabei an die Alltagswelt der SchülerInnen anzuknüpfen. Experimente in der Physik müssen nicht immer mit komplexen und teuren Geräten durchgeführt werden. Man kann eine Unmenge an physikalischen Sachverhalten auch anhand von Gegenstände des täglichen Lebens jederzeit demonstrieren. Setzt man Dinge in einen neuen Kontext, zum Beispiel, wenn man eine Dipolantenne mit Hilfe einer halbierten Weintraube in einer Mikrowelle erklärt, dann kann diese scheinbar paradoxe Situation helfen, Lernprozesse in Gang zu setzen. Dadurch, dass die benötigten Materialien leicht verfügbar sind, können sich die SchülerInnen auch außerhalb des Unterrichts mit der Thematik beschäftigen und vielleicht sogar im Familienkreis spannendes aus der Physik demonstrieren. Ich denke, dass man sehr viel zur Bildung von Kindern und Jugendlichen beiträgt, wenn man sie zu einer tieferen Auseinandersetzung mit einer Thematik und in der Freizeit physikalische Sachverhalte wahrzunehmen motiviert hat. Dies ist mit sogenannten „Low-cost“ Experimenten sicherlich sehr gut möglich.

Die Versuche, die in dieser Arbeit beschrieben sind, sind Großteils die Ideen von Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher und wurden von mir mit einer ausgiebige Literaturrecherche und eigenen Erlebnissen ergänzt. Dabei wurde versucht, eine Einteilung nach den Themengebieten der Physik zu treffen. Versuche mit Eiern wurden separat behandelt. Darüber könnte eine eigene Diplomarbeit verfasst werden, weshalb nur wenige Versuche hier beschrieben sind.

Ich möchte jedoch nicht vergessen einige kritische Worte zum Thema dieser Arbeit zu verlieren. Lebensmittel als Lebensgrundlage von uns Menschen sollte die nötige Wertschätzung entgegengebracht werden. Kinder und Jugendliche dazu zu befähigen achtsam mit unserer Umwelt und unseren Ressourcen umzugehen, ist ein wichtiger Aufgabenbereich

der Schule. Daher empfehle ich die verwendeten Lebensmittel, sofern dies nach dem Versuch noch möglich ist, gemeinsam zu verspeisen (Stichwort: „Lernen mit allen Sinnen“). Versuche mit alkoholischen Getränken sind Physik mit Lebensmitteln „im weitesten Sinne“. Diese Versuche sind nur bedingt für die Schule geeignet und sollten von einem Unterricht über einen gesundheitsverträglichen Umgang mit Alkohol begleitet werden.

## 2. Fachdidaktisches

Das Experimentieren ist ein wesentliches Merkmal der Physik und hat je nach Anwendungsgebiet unterschiedliche Funktionen: Neue Theorien werden damit in der Forschung überprüft, es dient der Unterhaltung in populärwissenschaftlichen Fernsehshows und der Unterstützung des Lehrens und Lernens im Physikunterricht. Ein Schulversuch unterscheidet sich dabei sehr von einem Experiment in der Forschung. Während in der Wissenschaft die Erweiterung des Erkenntnisstandes im Vordergrund steht, dienen Versuche im Unterricht hauptsächlich physikalische Gesetzmäßigkeiten oder bekannte Naturkonstanten zu veranschaulichen oder zu bestätigen. Auch dienen Schulversuche dem Erzielen von Überraschungseffekten und haben dadurch einen motivierenden Charakter, der Lernprozesse initiieren kann. Das Lernen der Kinder und Jugendlichen zu unterstützen ist die wesentliche Funktion des Experimentierens im Physikunterricht. Die LehrerInnen sollen dabei das Experiment nach dem zu erreichenden Bildungsziel auswählen.

Dabei kommen verschiedenste Funktionen des Unterrichtsexperimentes für unterschiedlichste Ziele zu tragen: Soll reines Fachwissen vermittelt werden, wird ein Phänomen überzeugend dargestellt und eine physikalische Gesetzmäßigkeit überprüft. Für einen Begriffswechsel ist es notwendig, mit dem Versuch einen kognitiven Konflikt zu erzeugen, oder ein plausibles Argument für eine neue Vorstellung zu geben. Ist es das Ziel naturwissenschaftliches Arbeiten zu fördern, legt man den Fokus auf die Entwicklung von Hypothesen, der Versuchsplanung oder-durchführung, dem Auswerten von Daten, dem kritischen Umgang mit den Versuchsergebnissen oder dem Erwerb experimenteller Fähigkeiten. Möchte man Interesse an der Physik anregen, kann der Versuch dieses Ziel durch das Aufzeigen von Alltagsbezügen, oder durch Aufmerksamkeit erregen und zum Staunen bringen erreichen. Jedoch sollten Versuche nicht um ihrer selbst willen durchgeführt werden. Sie müssen auch

nicht unbedingt im Mittelpunkt stehen, um die geplanten Ziele zu erreichen und lernwirksam zu sein. Doch hilfreich für das Lernen ist es, wenn der Versuch Irritation erzeugt, die auf Auflösung drängt. Das Experiment im Unterricht darf dabei aber nicht zerstreudend wirken und durch einen „Knalleffekt“ vollständig von den zugrundeliegenden Mechanismen ablenken und den Zugang zum Objekt verstellen. [1]

## 2.1 Forderungen des Lehrplans

Die Lehrpläne für die AHS Unterstufe und AHS Oberstufe stellen genaue Forderungen an den Physikunterricht. Diese streichen die Wichtigkeit der Entwicklung eines tief gehenden Verständnisses ausgehend von Alltagserfahrungen deutlich hervor. Hier möchte ich auch den Bildungsbereich übergreifenden Aspekt des Physikunterrichts besonders hervorheben, der mit den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen gut abgedeckt werden kann. Weitere Inhalte der Lehrpläne, die das Thema betreffen sind im Folgenden angeführt:

### 2.1.1 Forderungen des Lehrplanes für die AHS-Unterstufe

#### **Bildungs- und Lehraufgabe**

Ausgehend von fachspezifischen Aspekten wird die enge Verflechtung der Physik mit anderen Naturwissenschaften bearbeitet: Der Unterrichtsgegenstand trägt zu allen Bildungsbereichen bei und soll sich keinesfalls nur auf die Darstellung physikalischer Inhalte beschränken.

Der Unterricht hat das Ziel, den Schülerinnen und Schülern das Modelldenken der Physik (Realwelt – Modell – Modelleigenschaften – Realwelt) zu vermitteln und physikalisches Wissen in größere Zusammenhänge zu stellen.

Dies geschieht durch:

- bewusstes Beobachten physikalischer Vorgänge;
- Verstehen und altersgemäßes Anwenden von typischen Denk- und Arbeitsweisen der Physik;

- Erkennen von Gültigkeitsgrenzen physikalischer Gesetzmäßigkeiten in alltagsbezogenen Situationen;
- eigenständige und handlungsorientierte Auseinandersetzung mit Problemen aus dem Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler nach Möglichkeit ausgehend von Schülerexperimenten;
- Entwickeln von Erklärungsversuchen beziehungsweise Modellvorstellungen und deren Anwendungen bei physikalischen Vorgängen in Natur und Technik.

Außerdem hat der Physikunterricht den Schülerinnen und Schülern in Verbindung mit anderen Unterrichtsgegenständen die Vielschichtigkeit des Umweltbegriffes bewusst zu machen. Dadurch soll eine bessere Orientierung in der Umwelt und entsprechend verantwortungsbewusstes Handeln erreicht werden. [...]

Kreativität und Gestaltung:

Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten; Einfluss der Physik auf Ästhetik, Funktion und Design.

### **Didaktische Grundsätze**

[...] Der Physikunterricht soll zu übergeordneten Begriffen und allgemeinen Einsichten führen, die an Hand weiterer Beispiele auf konkrete Sachverhalte angewendet werden.

Ausgehend von konkreten Beobachtungen bzw. Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler sind unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten jeweils die zu Grunde liegenden physikalischen Inhalte zu erarbeiten. [...]

Bei der Gewinnung von Gesetzen ist neben der Verallgemeinerung von Beobachtungen auf Grund von Experimenten gelegentlich auch die gedankliche Herleitung und anschließende experimentelle Überprüfung von Lösungsansätzen (Hypothesen) anzuwenden. [...]

An geeigneten Inhalten ist den Schülerinnen und Schülern Gelegenheit zu möglichst selbstständigem Untersuchen, Entdecken bzw. Forschen zu geben. Dies bedingt den Einsatz von Schülerversuchen. Altersgemäße Denkwege und Deutungsversuche der Schülerinnen und Schüler sind zu berücksichtigen. [...]

## 2.1.2 Forderungen des Lehrplanes für die AHS-Oberstufe

### **Bildungs- und Lehraufgabe**

Der Physikunterricht hat zum allgemeinen Bildungsauftrag der Schule, 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 von Schlüsselqualifikationen und dynamischen Fähigkeiten zu fördern. [...] Weiters sollen sie die Bedeutung physikalischer Phänomene und Konzepte im Alltag und in der Umwelt und für die Welterkenntnis erfassen und für ihre Lebensgestaltung nutzen.

Ziel des Physikunterrichts ist daher die Vermittlung des nötigen Rüstzeuges zum verstehenden Erleben von Vorgängen in Natur und Technik und keinesfalls nur das Informieren über sämtliche Teilgebiete der Physik.

Das Ziel ist der Erwerb folgender Fähigkeiten, Fertigkeiten und Werthaltungen:

- Informationen sammeln, hinterfragen und argumentieren können
- eigene Arbeiten zielgruppengerecht präsentieren können
- Problemlösungsstrategien einzeln und im Team entwickeln können
- eigenständig arbeiten können
- umweltbewusst handeln können
- mit Expertinnen und Experten sprechen, Expertenmeinungen hinterfragen und grundlegendes Fachvokabular richtig anwenden können
- physikalische Zusammenhänge darstellen können
- Diagramme erstellen und interpretieren können
- konzeptuales Wissen anwenden können
- fachbezogene Fragen formulieren können
- einfache Experimente planen und durchführen können
- Hypothesen entwickeln, einschätzen und diskutieren können
- Gefahren erkennen, einschätzen und sicherheitsbewusst handeln können

[...]

## **Didaktische Grundsätze**

Die Lehrerinnen und Lehrer haben den Bildungsprozess durch Einbettung der Lehrinhalte in lebensweltbezogene Themenbereiche zu unterstützen und so einer verfrühten Abstraktion vorzubeugen. Dabei ist der erhöhte Abstraktionsgrad moderner physikalischer Inhalte durch verstärkte Nutzung von Analogien und audiovisuellen Medien zu kompensieren. [...]

Bei der Methodenwahl sind folgende Leitlinien zu berücksichtigen:

- empirisch arbeiten und erfahrungsgeleitet lernen: Das Zusammenspiel von Beobachtung, Hypothesenbildung und überprüfendem Experimentieren sowie die Formulierung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten als physikalische Methode hat in allen Formen des Unterrichts deutlich zu werden
- situiert und an Hand authentischer Probleme lernen: Realistische und für die Schülerinnen und Schüler relevante Probleme motivieren zum Erwerb neuen Wissens; Dabei ist die oft verschiedene Interessenslage von Burschen und Mädchen zu beachten; auf aktuelle Probleme ist einzugehen
- in vielfältigen Zusammenhängen lernen: Neu erworbene Kenntnisse sind in vielfältigen Anwendungen zu festigen und damit über den Unterrichts Anlass hinaus abzusichern

[...] [2]

## 3. Versuche

### 3.1 Versuche mit Eiern

#### Rohes und hartes Ei rollen

##### **Material**

- rohes Ei
- hartgekochtes Ei
- schiefe Ebene

##### **Aufbau und Durchführung**

Auf eine schiefe Ebene werden auf gleicher Höhe ein hartgekochtes und ein rohes Ei gelegt. Die Eier sollten gleich groß und etwa gleich schwer sein. Lässt man die Eier los, beobachtet man, dass das rohe Ei schneller rollt als hartgekochte.

##### **Die Physik**

Da die Eier aus der gleichen Höhe starten, steht beiden dieselbe Anfangsenergie zur Verfügung. Beim harten Ei sind durch das Kochen das Eiweiß und der Dotter denaturiert und fest miteinander verbunden. Dadurch muss jedes Teilchen beim Rollen die ganze Drehung mitmachen, was einen Teil der Energie kostet und es bleibt weniger Energie für das Vorwärtsbewegen übrig. Beim rohen Ei ist das Innere gegenüber der Schale beweglich und Eiweiß und Dotter gleiten bis auf den Randbezirk fast ohne Rotation nach unten. Das rohe Ei ist daher schneller, weil ein großer Teil der Anfangsenergie zur Vorwärtsbewegung genutzt werden kann.

## Anmerkungen

Diese Beobachtung steht auf den ersten Blick im Gegensatz zu dem Hausfrauentrick, bei dem man ein hartgekochtes und ein rohes Ei mit den Fingern auf einem Tisch dreht um diese unterscheiden zu können. Dabei dreht sich ja das gekochte viel schneller als das rohe. Wie erwähnt sind beim gekochten Ei alle Teilchen miteinander verklebt und alle Masseteilchen drehen sich mit, was dazu führt, dass das Ei sich viel länger um die eigene Achse dreht. Beim rohen Ei macht nur der Randbezirk die Drehung mit und das Innere bleibt träge stehen, wodurch weniger Masseteilchen in Drehung versetzt werden und die Drehung des Eies kürzer dauert. Da zwischen dem bewegten und dem ruhenden Teil der Eiflüssigkeit Reibungsflächen entstehen ist die Bewegung auch langsamer. Es entstehen kleine Wirbel an diesen Grenzflächen, wodurch ein Teil der Rotationsenergien entzogen wird.

Vor dem Versuch das rohe Ei schütteln bewirkt, dass sich die Verbindungen des Inneren mit der Schale lösen und der flüssige Teil nicht zum Rollen kommt. Diesen Versuch kann man auch mit gleich großen und gleich schweren Büchsen durchführen (z.B. mit einer Dose Corned Beef und einer Suppendose). [3, 4]

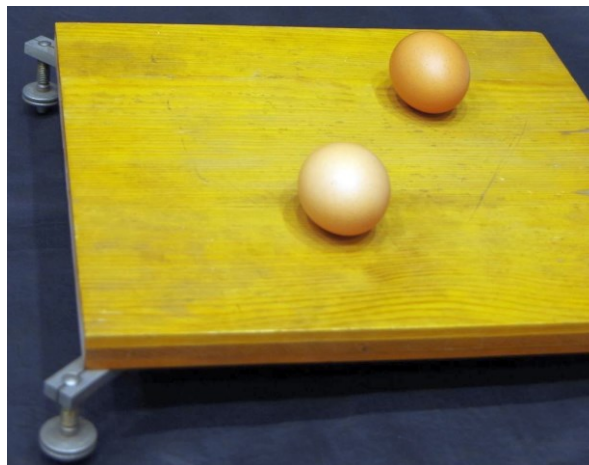


Abbildung 1: Ein rohes und ein hartgekochtes Ei rollen  
(Bild: W. Winkler)



## Ei rotiert hochkant

### **Material**

- hartgekochtes Ei
- feste Unterlage

### **Aufbau und Durchführung**

Ein hartgekochtes Ei wird auf einer festen Unterlage mit den Fingern in Rotation versetzt. Bei genügend schneller Rotation wird sich die Symmetrieachse von der Horizontalen in die Vertikale heben und das Ei rotiert hochkant.

### **Die Physik**

Das Ei stellt näherungsweise ein 3-achsiges Ellipsoid dar, mit der Längsachse als einzige Achse zu der es rotationssymmetrisch ist. Legt man das Ei auf eine Unterlage, verläuft diese Achse zunächst parallel zur Ebene der Unterlage. Dreht man das Ei, kann diese Parallelität kaum gewahrt werden. Außerdem tragen kleine Unregelmäßigkeiten auf der Eioberfläche zu Störungen bei und das Ei "eiert". Eine Präzessionsbewegung ist die Folge. Der Schwerpunkt um den das Ei rotiert, ändert somit ständig seinen Abstand zur darunterliegenden Ebene. Da jedes System bestrebt ist, seine Energie zu minimieren, muss also der Schwerpunkt möglichst ruhig und tief liegen, was zu einer Rotation um die Symmetrieachse mit der Spitze nach oben führt. Die Drehenergie wird zum Teil in eine horizontale Kraft umgesetzt, die das Ei in die Senkrechte drückt.

### **Anmerkungen**

Dieses Phänomen kann erst bei einer hinreichend schnellen Rotation 8-10 Umdrehungen pro Sekunde beobachtet werden. Bei noch schnellerer Rotation (30 Umdrehungen pro Sekunde tritt durch die kleinen Unregelmäßigkeiten auf der Eioberfläche auch ein Hüpfen des Eies auf. [5-7]

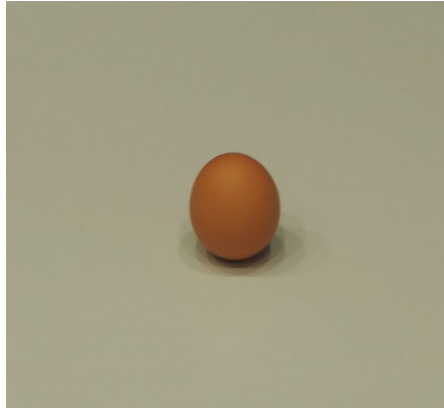


Abbildung 2: Das Ei rotiert hochkant (Bild: W. Winkler)

### Bogenform am Ei

#### **Material**

- ausgeblasenes Ei
- Nagel

#### **Durchführung und Beobachtung**

Wird mit einer leeren Eierschale auf einen Nagel geklopft, ist sie recht stabil, obwohl die Schale äußerst dünn ist. Klopft man von der Innenseite auf den Nagel, zerbricht die Schale sehr schnell.

#### **Die Physik**

Wird von außen auf das Ei eine Kraft ausgeübt, so verteilt sich diese über die ganze Bogenform des Eies. Wirkt jedoch eine Kraft von Innen auf die Eierschale, also auf das Bogeninnere, so zerbricht die Eierschale schnell, da die Kraft nicht auf den Bogen abgeleitet werden kann.

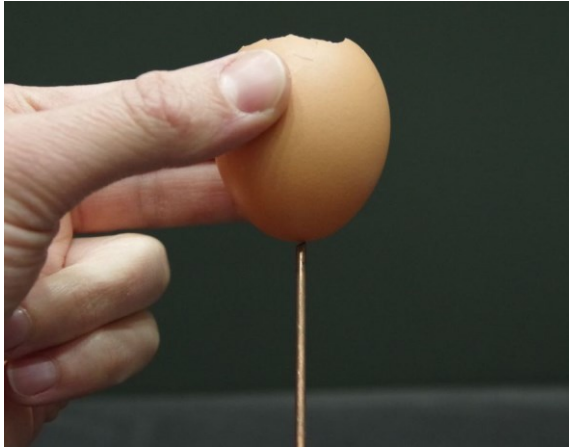


Abbildung 3: Stabile Spitze des Eis (Bild: W. Winkler)

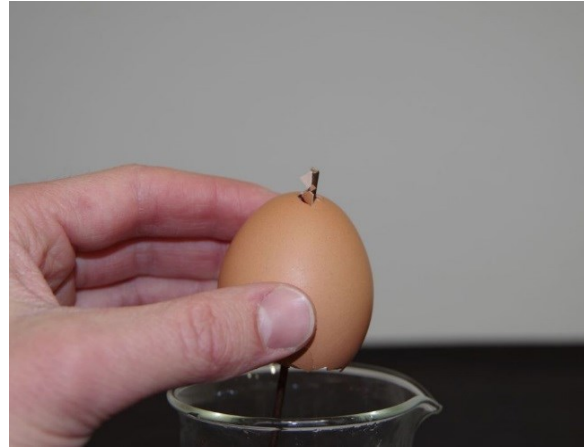


Abbildung 4: Das Ei bricht leicht bei Belastung von Innen (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

In der Architektur ist dieses Phänomen schon lange bekannt. In der Natur kommen solche runden Formen häufig vor. Für ein Küken im Ei ist das überlebenswichtig. Das Ei ist bei Krafteinwirkung von außen sehr stabil und das Küken ist geschützt. Vor allem hochkant kann ein Ei hohen Kräften ausgesetzt werden, ohne dass es zerbricht. Jedoch sollte das Küken leicht aus dem Ei schlüpfen können, weshalb die Eierschale bei Krafteinwirkung von Innen leicht zerbricht. [8]

## 3.2 Versuche zur Thermodynamik

### Stollwerck frieren

#### **Material**

- Stollwerck
- flüssiger Stickstoff
- Hammer
- Amboss

#### **Aufbau und Beobachtung**

Man legt ein Stollwerck auf einen Amboss und schlägt mit dem Hammer darauf. Das Stollwerck verformt sich und der es bleibt am Hammer kleben. Taucht man ein Stollwerck in flüssigen Stickstoff, legt es auf den Amboss und schlägt mit dem Hammer darauf, zerspringt das Stollwerck in viele kleine Splitter.

#### **Die Physik**

Das Stollwerck ist durch den Zucker, der Butter und der Milch von weicher und zäher Konsistenz. Dadurch kann es sich durch den Schlag mit dem Hammer verformen. Durch das frieren wird das Stollwerk fest und spröde. Es kann sich durch den Schlag mit dem Hammer nicht mehr verformen und es zerspringt.



*Abbildung 5: Das gefrorene Stollwerck zersplittert (Bild: W. Winkler)*

## **Anmerkungen**

Diesen Versuch kann man z.B. auch mit einer Banane durchführen. Bei Zimmertemperatur geht der Hammer einfach durch die Banane durch und zerquetscht sie, nach dem Tieffrieren zersplittert sie ebenfalls. Beim Schlagen auf das gefrorene Stollwerck fliegen viele Splitter durch die Luft. Daher ist das Tragen einer Schutzbrille empfohlen.

[Eis mit flüssigem Stickstoff herstellen](#)

## **Material**

- 200 ml Schlagobers
- etwas Milch
- 3 EL Kakao
- Zucker
- flüssiger Stickstoff
- Rührschüssel
- Schneebesen

## **Durchführung und Beobachtung**

Die Zutaten werden in eine Rührschüssel gegeben und gut verrührt, bis sich der Zucker gelöst hat. Danach gibt man unter ständigem Rühren nacheinander kleine Mengen flüssigen Stickstoff hinzu bis eine cremige Konsistenz erreicht wird.

## **Die Physik**

Für ein gutes Eis ist der richtige Schmelz wichtig. Lässt man Wasser oder eine Speiseeis-  
masse mit Schlagobers einfach gefrieren, so entsteht nur ein Eisblock. Beim Verzehr hat  
man auf der Zunge durch die niedrige Temperatur und die glatte Oberfläche ein eher un-

angenehmes Gefühl. Der Grund liegt darin, dass die Eiskristalle durch das langsame Gefrieren zu groß sind. Daher ist ständiges Rühren oder ein Emulgator wie Eigelb nötig um Creme Eis herzustellen. Durch das Hinzufügen von flüssigem Stickstoff, also schockgefrieren, haben die Eiskristalle keine Möglichkeit zusammenzuwachsen und es entsteht Eis mit einer wunderbar cremigen Konsistenz.



*Abbildung 6: Die Masse gefriert mit flüssigem Stickstoff  
(Bild: W. Winkler)*

## **Anmerkungen**

Falls man eine zu große Menge flüssigen Stickstoffs dem Speiseeis hinzugefügt hat und die Masse zu fest geworden ist, kann man mit etwas Warten die Konsistenz wieder cremiger bekommen. Beim Hantieren mit flüssigem Stickstoff sind unbedingt Sicherheitsvorkehrungen (Schutzbrille, Handschuhe) zu treffen. [9]

[Popcorn in der Mikrowelle](#)

## **Material**

- Popcornmais
- Mikrowelle
- mikrowellengeeignetes Gefäß mit Deckel

## Durchführung und Beobachtung

Man gibt den Popcornmais mit etwas Salz und Öl in ein mikrowellengeeignetes Gefäß. Danach gibt man den Deckel auf das Gefäß und erhitzt das ganze bei 700 W für zwei bis drei Minuten. Nach kurzer Zeit beginnen die ersten Maiskörner aufzupoppen.

## Die Physik

Maiskörner als Samen der Maispflanze enthalten stärkehaltiges Speichergewebe in einer festen Samenschale. Durch die Mikrowellenstrahlung wird das Wasser, das in diesem Gewebe enthalten ist erhitzt und es entsteht Wasserdampf. Dieser hat ein größeres Volumen als flüssiges Wasser und die Schale des Maiskorns springt durch den so entstehenden Druck auf. Das Wasser verdampft und die vorher gequollene Stärke schäumt auf, erkaltet und erstarrt. Dadurch entstehen viele kleine Poren (siehe Versuch „Popcorn in flüssigem Stickstoff“)



Abbildung 7: Popcorn in der Mikrowelle (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Das Gefäß sollte groß genug sein, da sich das Volumen des Popcorns vervielfacht und sich sonst der Deckel von Gefäß hebt. [10]

## Schwedenbombe in Mikrowelle

### **Material**

- Schwedenbombe
- Mikrowelle
- Teller

### **Durchführung und Beobachtung**

Auf einen Teller wird eine Schwedenbombe gelegt und dieser dann in die Mikrowelle gestellt. Bei niedriger Stufe lässt man die Schwedenbombe für kurze Zeit in der Mikrowelle. Das schaumige Innere quillt hervor und der Schokoguss zerreißt.

### **Die Physik**

Durch die Mikrowellenstrahlung wird das Wasser in der schaumigen Masse im Inneren der Schwedenbombe erhitzt und verdampft. Dadurch dehnt sich der Schaum weiter aus und zerreißt den Schokomantel. Bei zu viel Hitze kann man auch sehen, dass der Zucker im Schaum karamellisiert und sich bräunlich verfärbt. [11]



Abbildung 8: Schwedenbombe in der Mikrowelle (Bild: W. Winkler)



## Anmerkungen

Betreibt man die Mikrowelle mit der Auftaustufe, so kann man sehr schön das Takten der Mikrowelle zeigen, da hier die Schwedenbombe rhythmisch aufgeht und wieder kleiner wird.

## Popcorn in flüssigem Stickstoff

### Material

- Popcorn
- flüssiger Stickstoff
- Dewargefäß
- Siebschöpfer

### Durchführung und Beobachtung

In ein Dewargefäß, das mit flüssigem Stickstoff gefüllt ist wird etwas Popcorn geworfen. Wird das Popcorn mit einem Siebschöpfer herausgeholt und in den Mund genommen, kann es ohne Erfrierungen gegessen werden. Beim Ausatmen steigen Rauchschwaden aus dem Mund und der Nase.



Abbildung 9: G. Pottlacher mit Flüssigstickstoff gekühlten Popcorn im Mund (Bild: W. Winkler)

## Die Physik

Durch das Aufpoppen der stärkehaltigen Maiskörner entsteht eine poröse, schaumige Masse (siehe Versuch „Popcorn in der Mikrowelle“). Das Popcorn enthält so gut wie keine Feuchtigkeit, welche durch den flüssigen Stickstoff frieren könnte. Des Weiteren hat Popcorn dadurch eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit. Der in den Poren befindliche flüssige Stickstoff verdampft und bildet durch das Leidenfrost'sche Phänomen einen Dampfpolster, der vor direkter Wärmeübertragung isoliert. Durch die niedrigen Temperaturen kondensiert die Feuchtigkeit der Atemluft und „Rauchschwaden“ aus dem Mund und Nase sind sichtbar.

### Feuerwerk mit Orangenschalen

#### Material

- Orangenschale
- Feuerzeug
- Kerze

#### Durchführung und Beobachtung

Ein Stück einer Orangenschale oder einer anderen Zitrusfrucht wird mit der Außenseite an eine Kerzenflamme gehalten. Dann quetscht man die Schale, sodass einige Tröpfchen aus dieser hervorschießen. Diese Tröpfchen ergeben durch die Kerzenflamme ein kleines Feuerwerk.

#### Die Physik/Chemie

Die Tröpfchen sind ätherische Öle, welche reichlich in Schalen von Zitrusfrüchten enthalten sind. Durch diese riecht die Schale auch so gut. Ätherische Öle sind leicht brennbar, vor

allem, wenn sie als feiner Tröpfchennebel in eine Flamme geraten, wodurch die Kontaktfläche ätherisches Öl und Flamme sehr groß ist. [12]



*Abbildung 10: Feuerwerk mit einer Orangenschale  
(Bild: W. Winkler)*

Eiswürfel mit einem Zwirnfaden aus dem Glas holen

### **Material**

- Glas Wasser
- Eiswürfel
- Zwirnfaden
- Salz

### **Durchführung und Beobachtung**

In das Glas mit Wasser wird ein Eiswürfel gegeben. Das Ende des Bindfadens wird auf den Eiswürfel gelegt und etwas Salz auf diese Stelle gestreut. Nach einiger Zeit kann man den Eiswürfel am Bindfaden herausziehen.

## Die Physik

Das Salz setzt den Gefrierpunkt des Wassers auf unter 0 °C herab. Dadurch schmilzt der Eiswürfel an der Stelle wo der Faden liegt etwas an und der Faden wird mit Wasser getränkt. Gefriert das Wasser wieder, ist der Faden am Eiswürfel festgefroren.



Abbildung 11: Eiswürfel am Zwirnfaden (Bild: W. Winkler)

## Anmerkung

Es genügt eine kleine Menge Salz, da zu viel Salz auf dem Eiswürfel das Anfrieren erschwert.

## Eiswürfel mit Draht durchschneiden

### Material

- Wasser
- leere Saftpackungen
- dünner Draht
- dicker Draht (z.B. von einem Kleiderbügel)

- 2 Massestücke (5 kg)
- 2 Stativwagen

### Durchführung und Beobachtung

In zwei leere Saftpackungen wird Wasser gefüllt. Die Packungen legt man ins Eisfach bis das Wasser gefroren ist und entfernt dann die Verpackungen, damit man zwei nahezu identische Eisblöcke erhält. Um einen Eisblock wird dünner Draht gelegt und das Massestück daran befestigt. Um den zweiten Eisblock legt man eine Schlaufe des dicken Drahtes und befestigt ebenfalls das Massestück am Draht. Die Eisblöcke legt man zwischen zwei Stativwagen, sodass der Draht frei nach unten hängen kann. Damit das Schmelzwasser aufgefangen wird, und damit das herabfallende Massestück den Boden nicht beschädigt legt man Tücher und einen Schwamm unter. Nach kurzer Zeit sieht man, dass sich die Drähte in das Eis hinarbeiten. Der dünne Draht geht hier schneller voran und ist zuerst durch. Der Eisblock ist jedoch noch immer aus einem Stück. Der dicke Draht braucht länger und schnürt den Eisblock stark ab, aber trennt ihn nicht ganz durch.

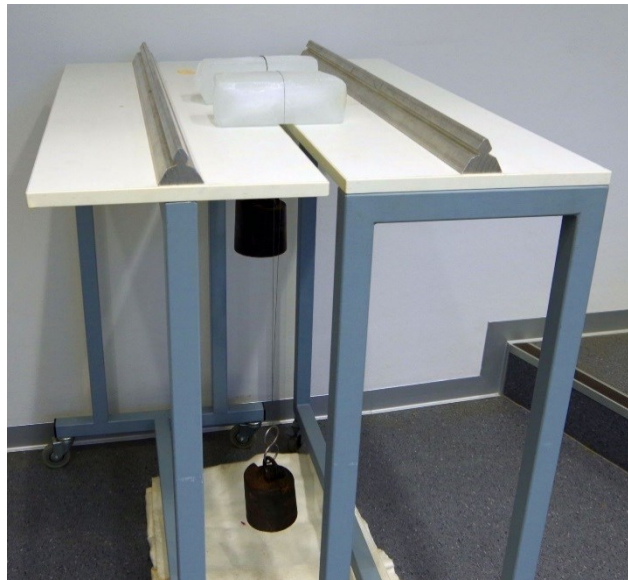


Abbildung 12: Versuchsaufbau (Bild. W. Winkler)

## Die Physik

Die Drähte üben durch das angehängte Massestück einen Druck auf das Eis aus. Dadurch entsteht Wärme und der Eisblock schmilzt an dieser Stelle. Zusätzlich besitzt das Metall der Drähte eine gute Wärmeleitfähigkeit, sodass die Umgebungswärme besser auf den Eisblock übergeht. Über dem Draht friert das Wasser wieder zusammen und der Eisblock bleibt ganz. Beim dünnen Draht ist der Druck höher als beim dicken Draht und er wandert somit schneller durchs Eis.



Abbildung 13: Eisblock mit dünnem Draht (Bild W. Winkler)



Abbildung 14: Eisblock mit dickem Draht (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Beim dicken Draht war zu erwarten, dass der Eisblock ganz durchgetrennt wird, was aber nicht der Fall war - er wurde nur stark eingeschnürt. Der Eisblock war wohl zu dick, sodass das Wasser über dem Draht wieder gefroren ist. Nähere Untersuchungen legen nahe, dass die Wärmeleitfähigkeit des Drahtes die ausschlaggebende Komponente ist, da bei Verwendung einer Angelschnur keine Durchtrennen des Eisblocks stattfindet. Macht man den Versuch in einer Kältekammer, so passiert ebenfalls nichts (siehe Diplomarbeit von Manuel HELLINGER „*Faszination Eis*“). [4, 13]

[Druckkochtopf](#)

## Material

- Schnellkochtopf mit Messgeräten (Leybold 388 611)
- Wasser

### Durchführung und Beobachtung

Wasser wird in einen Schnellkochtopf, der mit einem Thermometer und einem Manometer ausgestattet ist gefüllt. Der Topf wird auf eine Kochplatte gestellt. Diese wird auf die höchste Stufe eingeschaltet und man beobachtet die Anzeigen. Das Thermometer zeigte bei diesem Versuch ein Maximum von 112 °C an. Das Manometer erreichte 1,3 bar.

*Tabelle 1: Siedetemperatur des Wassers in Abhängigkeit vom Druck,  $p$ ...Druck,  $T_{sd}$ ...Siedetemperatur [14]*

$p / \text{kPa}$	$T_{sd} / ^\circ\text{C}$
0,611	0,01
1,227	10,00
12,350	50,00
70,960	90,00
95,000	98,20
100,000	99,63
101,325	100,00
142,870	110,00
198,600	120,00
500,000	151,80
1000,000	180,00
5000,000	264,50
10000,000	311,40

### Die Physik

Bringt man Wasser in ein abgeschlossenes Gefäß, so verdampft ein Teil und es bildet sich im Volumen oberhalb der Flüssigkeit eine Dampfphase. Diese übt einen Druck auf die Wände des Gefäßes und die Flüssigkeitsoberfläche aus, wobei die Größe von der Temperatur abhängt. Die Moleküle der Flüssigkeit haben Geschwindigkeiten und kinetische Energien, die einer Maxwell-Boltzmann-Verteilung folgen. Wenn ihre Energie größer als die Oberflächenenergie ist, können die Moleküle mit der größten kinetischen Energie die Flüssigkeit verlassen. Je höher die Temperatur ist, desto mehr Moleküle können die Flüssigkeit

verlassen, da die dafür notwendige Mindestenergie gegeben ist. Wird der Dampfdruck größer als der äußere, können sich im Inneren der Flüssigkeit Dampfblasen bilden, die durch den Auftrieb nach oben steigen. Das heißt, die Flüssigkeit siedet. Die Siedetemperatur hängt deshalb vom äußeren Druck ab. In größer Höhe siedet deshalb Wasser schon weit unter 100 °C. Die Garzeit von Speisen hängt aber stark von der Temperatur ab. Um die Garzeit zu verkürzen kann man einen Druckkochtopf verwenden. Ein Druckkochtopf wird durch den speziellen Schraubdeckel luftdicht abgeschlossen. Durch das Zuführen von Wärme vergrößert sich der Druck im Inneren und die Siedetemperatur wird angehoben. Durch die höhere Temperatur werden die Speisen schneller gar.



Abbildung 15: Versuchsaufbau (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Für eine Temperatur von 112 °C sollte der Druck laut Tabelle 1: Siedetemperatur des Wassers in Abhängigkeit vom Druck,  $p$ ...Druck,  $T_{sd}$ ...Siedetemperatur [14] mehr als 1,4 bar betragen. Der Fehler ist hier wohl beim verwendeten Druckkochtopf zu suchen. In großer Seehöhe ist das Kochen ein Problem, da das Wasser durch den geringeren Luftdruck bei niedrigeren Temperaturen siedet und die Garzeit sehr lange ist, oder die Speisen nicht gar werden. Auf dem Mt. Everest kann die Temperatur zur Gerinnung des Eiweißes eines Hühnereies gar nicht mehr erreicht werden. Das Abtöten von Bakterien ist somit auch nicht möglich. Im Roman „Die Vermessung der Welt“ benutzt Alexander von Humboldt ein Hypsometer um die Höhe der Berge zu ermitteln. Mit einem Hypsometer, welches den Siedepunkt einer Flüssigkeit bestimmt und der barometrischen Höhenformel kann man (mit einem großen systematischen Fehler) auf die Seehöhe schließen. Unfälle mit Druckkochtöpfen kommen öfter vor.



Daher ist beim Hantieren mit dem Gerät Vorsicht geboten und vor dem Öffnen ist immer zuerst der Druck im Inneren abzulassen. [15]

### Bester Zeitpunkt um heißen Kaffee mit Milch abzukühlen

#### **Material**

- 2 identische Tassen mit heißem Kaffee
- 2 Kännchen mit Milch aus dem Kühlschrank
- Temperaturmessgerät Testo 925

#### **Durchführung und Beobachtung**

Bei zwei identischen Tassen mit gleich heißem Kaffee wurde die Temperatur der Flüssigkeit gemessen. Diese betrug 76,6 °C. In eine Tasse wurde ein Kännchen Milch aus dem Kühlschrank geschüttet, umgerührt und eine Temperatur von 70,7 °C gemessen. Nach fünf Minuten wurde in die zweite Tasse das andere Kännchen Milch geschüttet und bei beiden Tassen die Temperatur gemessen. Man konnte feststellen, dass die Tasse, bei der man die Milch erst nach fünf Minuten dazu gegeben hat eine niedrigere Temperatur aufweist, nämlich 60,4 °C als die andere Tasse, wo der Kaffee noch eine Temperatur von 61,6°C hatte.



Abbildung 16: Temperatur zu Beginn (Bild W. Winkler)



Abbildung 17: Temperatur der ersten Tasse mit Milch (Bild W. Winkler)

## Die Physik

Die Temperatur des Kaffees mit  $76,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist um einiges höher als die Zimmertemperatur. Je höher die Temperaturdifferenz zwischen einem heißeren und einem kälteren Objekt, also dem Kaffee und der Umgebung ist, desto schneller erfolgt das Abkühlen. Daher kühlt die heißere Tasse schneller ab, als die Tasse, die man schon zu Beginn mit Milch abgekühlt hat. Der beste Zeitpunkt zum Abkühlen des Kaffees ist also, wenn man die Milch kurz vor dem Trinken in den Kaffee gibt.



Abbildung 18: Temperatur der ersten Tasse nach 5 Minuten (Bild: W. Winkler)



Abbildung 19: Temperatur der zweiten Tasse nach 5 Minuten (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Diese Beobachtung ist nur bei Normaltemperatur gültig, bei sehr tiefen Temperaturen kann sich der Effekt auch umkehren. [8]

[Cremesuppe kühlt schneller ab als Tee](#)

## Material

- 2 identische Thermosflaschen
- einen Topf mit heißer, dicker Suppe
- heißer Tee
- Temperaturmessgerät Testo 925

## Durchführung und Beobachtung



Abbildung 20: Kochende Suppe (Bild: W. Winkler)

Zum Überprüfen, ob die beiden äußerlich nicht ganz identen Thermosflaschen die gleichen Isoliereigenschaften aufweisen, wurde in beide heißes Wasser gefüllt und die Temperatur des Wassers nach 24 Stunden gemessen. Es konnte mit dem Messgerät die gleiche Temperatur ermittelt werden, wodurch die Abkühlung der Flüssigkeiten dann nur noch vom Inhalt abhängig sein konnte. Die cremige Gemüsesuppe wurde nach der Anleitung auf der Verpackung zubereitet und der Tee wurde mit den Kräutern aufgebrüht. Bei beiden Flüssigkeiten wurde die Anfangstemperatur gemessen und notiert. Danach wurde die Suppe bis zum Rand in eine Thermosflasche gefüllt und die gleiche Menge Tee in die zweite. Im Abstand von einer Stunde wurde die Temperatur der Flüssigkeiten gemessen und protokolliert (siehe *Tabelle 2: Temperaturen der Suppe und des Tees zu den jeweiligen Stunden nach Versuchsbeginn*). Die Daten wurden mit qti-Plot ausgewertet und graphisch dargestellt (siehe *Abbildung 21: Graph und exponentieller Fit der Abkühlung von Suppe und Tee*). Die Anfangstemperaturen der beiden Flüssigkeiten war zu Beginn des Versuches nicht gleich, sodass nur die Abkühlung im gleichen Temperaturbereich zwischen  $86,5 \pm 0,1$  °C und  $76,6 \pm 0,1$  °C zum Vergleich herangezogen werden konnte. Das Auslesen der Daten wurde mit der Data Reader Funktion von qti-Plot durchgeführt und ergab, dass die Suppe für die Abkühlung in diesem Temperaturbereich 5,2 Stunden und der Tee 6 Stunden brauchte. Das heißt, dass die Suppe schneller abgekühlt, als der Tee.

Tabelle 2: Temperaturen der Suppe und des Tees zu den jeweiligen Stunden nach Versuchsbeginn

Zeit / h	T Suppe / °C	T Tee / °C
0,0	86,4 ± 0,1	94,6 ± 0,1
1,0	85,6 ± 0,1	91,4 ± 0,1
2,0	83,0 ± 0,1	89,2 ± 0,1
3,0	80,4 ± 0,1	87,1 ± 0,1
5,0	77,0 ± 0,1	84,1 ± 0,1
6,0	75,0 ± 0,1	82,1 ± 0,1
6,5	74,6 ± 0,1	81,2 ± 0,1
7,0	72,6 ± 0,1	80,2 ± 0,1
8,0	72,4 ± 0,1	78,8 ± 0,1
9,0	69,9 ± 0,1	77,4 ± 0,1
9,5	68,1 ± 0,1	76,6 ± 0,1

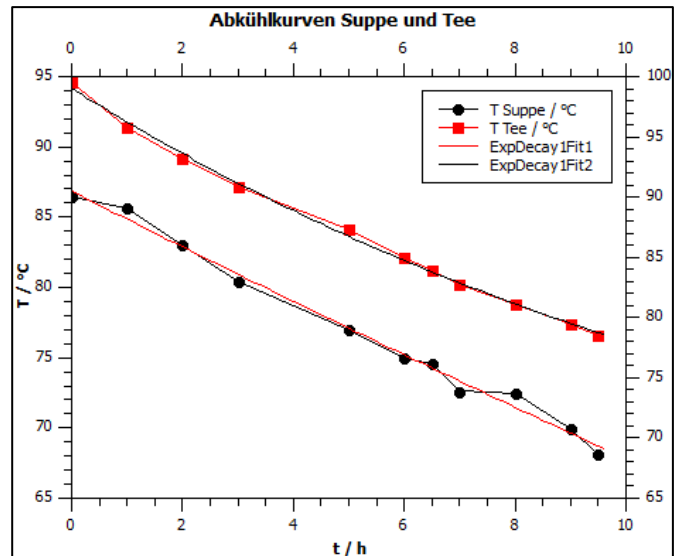


Abbildung 21: Graph und exponentieller Fit der Abkühlung von Suppe und Tee

## Die Physik

Jeder Körper mit einer bestimmten Temperatur tauscht mit seiner Umgebung so lange Energie aus, bis er die gleiche Temperatur wie seine Umgebung hat und sich im thermischen Gleichgewicht mit dieser befindet. Dieser Temperatenausgleich passiert durch Wärmeleitung, Konvektion oder Wärmestrahlung. In manchen Situationen möchte man jedoch einen Körper auf seiner Temperatur, welche von der Umgebungstemperatur abweicht, halten. Zum Beispiel soll der mitgeführte Kaffee bei einer Bergtour möglichst lange heiß bleiben. Dazu verwendet man Thermosflaschen. Diese besteht üblicherweise aus einem doppelwandigen Glaskolben und einem Stopfen mit schlechter Wärmeleitung. Der Raum zwischen den Glaswänden ist evakuiert und die zum Vakuum gerichteten Wandflächen sind verspiegelt. Die verwendeten Thermosflaschen haben keinen Glaskolben, sondern bestehen aus Metall, aber es gilt das gleiche Prinzip. Das Vakuum unterbindet die Wärmeleitung und die Konvektion und durch die Verspiegelung minimiert sich die Wärmestrahlung. Dadurch sind die Wärmeverluste im Inneren sehr klein und der Inhalt bleibt länger auf einer Temperatur, die von jener der Umgebung abweicht. Überträgt der Inhalt der Thermosflasche mit der Masse  $m$  eine Wärmemenge (thermische Energie)  $Q$  auf die Flasche, so fällt die Temperatur der Flüssigkeit um  $\Delta T$ . Hier gilt die Beziehung

$$Q = mc\Delta T \quad (1)$$

wobei  $c$  die spezifische Wärmekapazität und eine materialspezifische Größe ist. Das bedeutet jene Energie, die nötig ist, um 1 kg Inhalt um 1 °C zu verringern. Die spezifische Wärmekapazität von Wasser ist mit  $4182 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  sehr hoch. Fette und die festen Bestandteile der Suppe haben viel niedrigere Werte. Daher fällt beim selben Fluss thermischer Energie in die Flasche die Temperatur bei der Suppe viel stärker ab.

### **Anmerkungen**

Lebensmittel mit geringer Wärmekapazität werden immer schneller heiß und schneller kalt. Zum Beispiel kocht Vollmilch schneller als Wasser oder fettarme Milch. Rührt man beim Kochen einer dicken Suppe nicht gut um, kocht diese nur an einigen Stellen bevor überall 100 °C erreicht werden und die Wärme ist dann nicht gleichmäßig verteilt. Gibt man diese Suppe dann in eine Thermosflasche, wird sie noch schneller lauwarm als eine gut durchgerührte Suppe. Wegen den oben geschilderten Tatsachen ist es besser, vor einer Bergtour nur heißes Wasser in die Thermoskanne zu füllen und die restlichen Zutaten für die Suppe oder den Kaffee separat mitzunehmen und erst später hinzuzufügen. Unter Extrembedingungen kann dies durchaus eine lebenswichtige Entscheidung sein. [14-17]

### Gummibärchen in heißem und kaltem Wasser

#### **Material**

- 2 Gummibärchen
- 2 Gläser
- heißes Wasser
- kaltes Wasser

## Durchführung und Beobachtung

Ein Gummibärchen wird in ein Glas mit kaltem Wasser gelegt und über Nacht stehen gelassen. Man kann beobachten, dass das Gummibärchen danach viel dicker geworden ist. Ein zweites Gummibärchen legt man in ein Glas mit heißem Wasser. Nach kurzer Zeit hat sich das Gummibärchen vollständig aufgelöst und es bleibt nur mehr ein farbiger Fleck am Glasboden übrig.



Abbildung 22: Gummibärchen in heißem (links) und kaltem Wasser (rechts) (Bild: W. Winkler)

## Die Physik/Chemie

Gummibärchen bestehen hauptsächlich aus Gelatine, welche aus tierischem Bindegewebe hergestellt wird. Diese Substanz ist quellfähig und kann viel Wasser aufnehmen. Durch diese Wassereinlagerung nimmt das erste Gummibärchen an Volumen zu. Gelatine löst sich aber bei etwa 50 °C auf und wird flüssig. Daher schmilzt das zweite Gummibärchen im heißen Wasser.

## Anmerkungen

Lässt man Gelatine wieder abkühlen, wird sie wieder fest. [18]

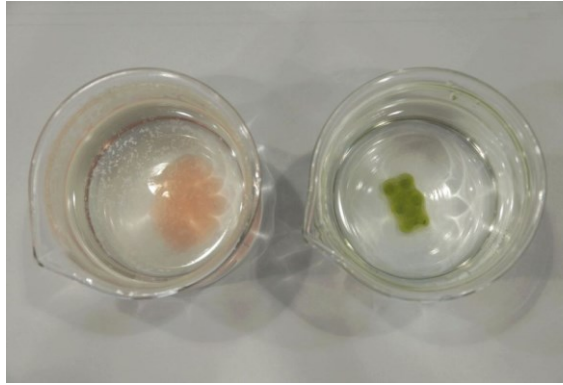


Abbildung 23: Gummibärchen nach einigen Minuten im Wasser) (Bild: W. Winkler)



Abbildung 24: Größenvergleich frisches Gummibärchen (links) und gequollenes Gummibärchen (rechts) (Bild: W. Winkler)

## Rindszunge auf gefrorener Eisenplatte

### **Material**

- eine kleine Rindszunge
- flüssiger Stickstoff
- Aluminiumprofil

### **Durchführung und Beobachtung**

Man kühlt das Aluminiumprofil mit flüssigem Stickstoff stark ab und drückt diese auf eine benetzte Rindszunge. Hebt man das Metallstück wieder an, bleibt die Rindszunge daran kleben.

### **Die Physik**

Die Zungenoberfläche ist sehr rau und feucht. Da Metall ein sehr guter Wärmeleiter ist, kann es die Wärme der Zunge sehr schnell ableiten. Kommt die Oberfläche mit dem kalten Aluminiumprofil, welches ebenfalls eine raue Oberfläche aufweist in Berührung, gefriert das Wasser auf der Zunge. Dabei verhaken sich die entstehenden Eiskristalle in den Poren der Oberflächen und wirken wie ein Kleber, so dass Zunge und Metall aneinander kleben.

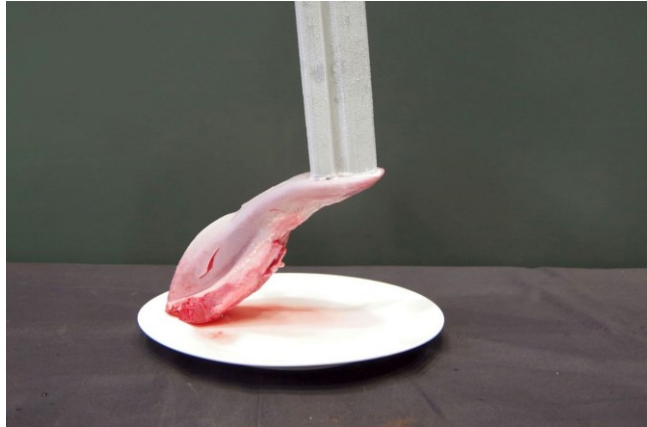


Abbildung 25: Rindszunge am Aluminiumprofil festgefroren  
(Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Hier sei auf die Gefahr der Verletzung hingewiesen, wenn man versucht, Eis von einem Metallgegenstand zu lecken. Friert man mit der Zunge z.B. an einem Laternenpfahl fest, versucht man am besten die Kontaktstelle mit den Händen, oder mit warmen Wasser anzuwärmen.

Damit der Versuch funktioniert muss die Rindszunge ordentlich befeuchtet werden. Die Oberfläche des Metallstücks darf auch nicht zu glatt sein, da sonst das Eis nicht daran haftet. Ist die Temperatur des Metallstückes zu tief, verbindet sich das Gewebe mit dem Metallstück auch nicht richtig. Daher wartet man kurz und versucht dann das Metallstück an die Zunge zu kleben. In der Natur ist dieses Phänomen von Bedeutung, da in Gebirgen Gesteinsmassen durch Permafrost aneinander frieren. Durch das Schmelzen des Permafrosts kommt es dann zu Steinschlag oder Felsstürzen. [19]

### Salz in Wasser mit Eiswürfeln

#### Material

- Wasser
- 1 Glas
- Eiswürfel
- Salz



- Temperaturmessgerät Testo 925

### Durchführung und Beobachtung

Man gibt Eiswürfel in ein Glas Wasser und misst die Temperatur. Das Messgerät zeigt eine Temperatur etwas oberhalb des Gefrierpunktes von Wasser an. Dann gibt man eine größere Menge Salz (idealerweise  $300 \text{ g l}^{-1}$ ) hinzu, rührt etwas um und misst wieder die Temperatur. Dabei stellt man fest, dass eine Temperatur unter  $0 \text{ °C}$  erreicht wird. Beim vorliegenden Versuch zeigte das Temperaturmessgerät eine Temperatur von  $-1,9 \text{ °C}$  an. Werte von etwa  $-20 \text{ °C}$  sind möglich.

### Die Physik

Durch die Zugabe von Salz wird der Gefrierpunkt der Mischung erniedrigt und das Eis beginnt zu schmelzen. Die dazu benötigte Wärmeenergie holt sich die Mischung aus sich selbst und wird kälter. Dabei sinkt die Temperatur auf unter  $0 \text{ °C}$ .

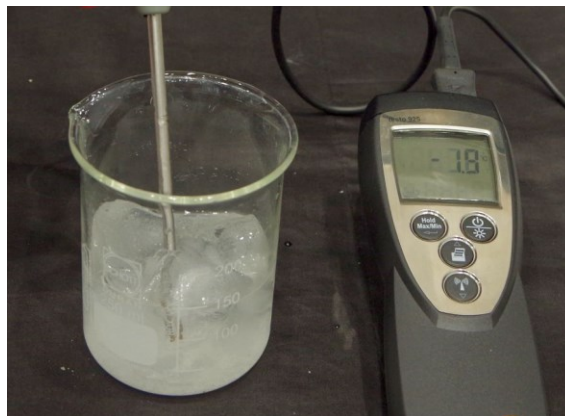


Abbildung 26: Wassertemperatur von  $-1,9 \text{ °C}$  (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Mit diesem Phänomen kann man sehr leicht Getränke schnell abkühlen. Man stellt die Getränke in eine Schüssel mit Wasser und Eiswürfel, gibt ausreichend Salz dazu und die Getränke werden schnell abgekühlt. Mit dieser Methode hat man früher Eis hergestellt. [20]

## Fettbrand

### **Material**

- Teelicht
- Bunsenbrenner
- Stativ mit Gitter
- Sprühflasche mit Wasser

### **Durchführung und Beobachtung**

Ein Teelichte mit nur einem Viertel des Wachsinnhaltes wird auf ein Gitter gestellt, das waagrecht an einem Stativ befestigt ist. Mit einem Bunsenbrenner erhitzt man das Teelicht so lange, bis das Wachs zu brennen beginnt. Anschließend sprüht man mit der Sprühflasche Wasser darauf. Eine mächtige Feuersäule ist zu beobachten.

### **Die Physik**

Das brennende Wachs ist mehrere hundert Grad heiß und das darauf gesprühte Wasser verdampft sofort. Dabei nimmt es an Volumen stark zu. Der Wasserdampf reißt nun Wachsmoleküle mit sich, die sich an der Flamme entzünden und das Wachs verpufft mit einer großen Feuererscheinung.



*Abbildung 27: Verpuffung des heißen Kerzenwachses  
(Bild: W. Winkler)*

## **Anmerkungen**

Dieser Versuch demonstriert sehr eindrucksvoll wie wichtig die Bekämpfung eines Brandes mit den richtigen Mitteln ist. Einen Fettbrand in der Küche bekämpft man am besten mit der Unterbindung der Sauerstoffzufuhr, also mit dem Zudecken der Pfanne mit einem Deckel, einer Löschdecke oder ähnlichem. [21]

[Flaschengeist mit Alkohol](#)

## **Material**

- Ballonflasche
- Ethanol
- Sicherheitsstabfeuerzeug

## **Durchführung und Beobachtung**

Etwa 10 ml Ethanol werden in eine großvolumige Ballonflasche geleert. Die Flasche wird anschließend geschwenkt, so dass sich der Alkohol gut in der Flasche verteilt. Dann stellt man die Flasche auf eine feste Unterlage und platziert das Sicherheitsstabfeuerzeug über der Öffnung der Flasche. Unmittelbar nach Betätigung des Feuerzeuges schießt aus der Flasche eine Flamme begleitet von einem lauten Zischen. Kurz danach bleibt noch eine blaue Flamme in der Flasche, die vertikal oszilliert und an einen Flaschengeist erinnert.

## **Die Physik**

Ethanol verdampft schon bei Zimmertemperatur. Durch das Schwenken der Flasche wird der Ethanol über die ganze Oberfläche an der Innenseite der Flasche verteilt und kann somit leichter verdampfen. In der Flasche entsteht ein Ethanol-Luft-Gemisch, welches sehr leicht entzündlich ist. Die aus der Flasche austretenden Dämpfe werden durch die Wärme-

energie der Flamme des Sicherheitsstabfeuerzeuges entzündet und erreichen eine Temperatur von mehreren hundert Grad Celsius. Die brennenden Gase entzünden das in der Nähe befindliche Ethanol, welches einen Flammpunkt von 81 °C aufweist. Die Flammen breiten sich rasch in der ganzen Flasche aus und die darin befindliche Luft dehnt sich durch die Erhöhung der Temperatur stark aus. Ein Teil des entflammten Ethanol-Luft-Gemisches wird so aus dem Flaschenhals gedrückt und erzeugt die helle Stichflamme mit dem charakteristischen Zischen. Ist die Stichflamme erloschen verbrennt das restliche Ethanol-Luft-Gemisch mit blauer Flamme in der Flasche. Diese Flamme pulsiert und wandert in der Flasche in vertikaler Richtung, da frischer Sauerstoff in die Flasche gezogen wird und dieser die Dämpfe neu entzündet. Das geschieht so lange, bis das Ethanol-Luft-Gemisch vollständig verbrannt ist.

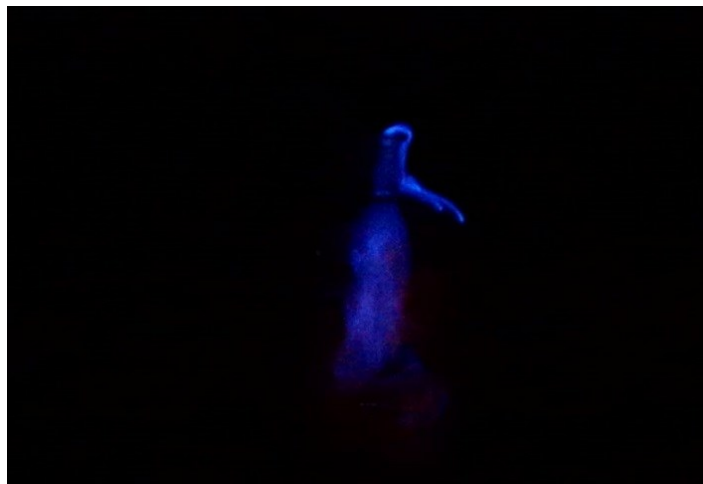


Abbildung 28: Geist in der Flasche (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Um den Versuch gut zeigen zu können, sollte der Raum etwas abgedunkelt werden. Ist es zu dunkel wird das Hantieren mit dem Feuerzeug schwieriger und es besteht die Gefahr sich zu verbrennen. Bei diesem Versuch sollte man unbedingt eine Schutzbrille tragen und zur Sicherheit eine Löschdecke, oder einen Feuerlöscher bereitstellen. Über der Flaschenöffnung sollten sich keine brennbaren Materialien befinden. Möchte man den Versuch ein zweites Mal wiederholen, muss man einige Minuten warten, bis sich das Innere der Flasche wieder mit frischer Luft gefüllt hat, da sonst zu viel Kohlendioxid in der Flasche vorhanden wäre, welches beim Verbrennungsvorgang davor entstanden ist. [22]

### 3.3 Versuche zur Mechanik

#### Kesselgleichung mit Würstchen

##### **Material**

- Frankfurter Würstchen
- Kochtopf
- Herdplatte
- Wasser

##### **Durchführung und Beobachtung**

Ein Frankfurter Würstchen wird in einen Topf mit siedendem Wasser gelegt. Nach einiger Zeit kann man beobachten, dass das Würstchen der Länge nach aufgeplatzt ist.

##### **Die Physik**

Das Würstchen kann näherungsweise als rotationssymmetrischer Körper betrachtet werden. Bei Kochen des Würstchens herrscht durch die Temperaturerhöhung in einem solchen Körper der Dicke  $D$  ein statischer Druck  $p$ . Da ja der Druck die Kraft pro Flächeninhalt ist, auf die diese wirkt, kann man die wirkenden Kräfte ermitteln. Diese Kräfte „ziehen“ am Querschnitt der Wursthaut mit der Dicke  $s$ , was man Spannung  $\sigma$  nennt. Die Wursthaut reißt, wenn diese Spannung größer als die zulässige Spannung der Wursthaut wird. Resultat des statischen Drucks ist ein 3-achsiger Spannungszustand: Zum einen tritt eine Spannung  $\sigma_{rad}$  in radialer Richtung, normal zur Wandung auf, eine Spannung  $\sigma_{ax}$  in axialer Richtung, also der Länge nach und eine Umfangsspannung  $\sigma_{tan}$  in tangentialer Richtung entlang einer Wurstradlänge  $L$ .

Für die Radialspannung gilt

$$\sigma_{rad} = \frac{p_i}{2}. \quad (2)$$

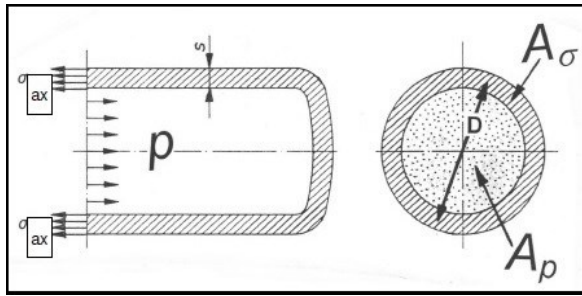


Abbildung 29: Zur Herleitung der Axialspannung (Bild: <http://www.win-ing.de/daten/kesselformel>)

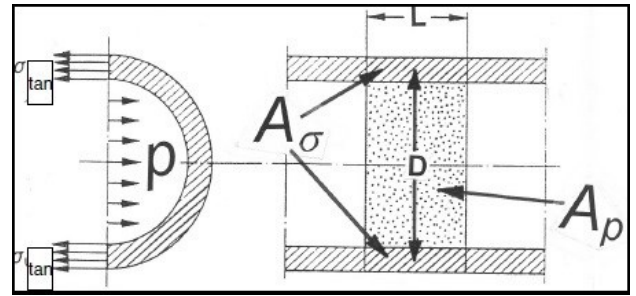


Abbildung 30: Zur Herleitung der Tangentialspannung (Bild: <http://www.win-ing.de/daten/kesselformel>)

Durch den Druck  $p$  wirkt eine Kraft  $F$  auf eine Projektions- oder Schnittfläche der Wursthaut  $A_{proj}$  wobei

$$F = pA_{proj} \quad (3)$$

ist. Diese Projektionsfläche ist bei der Axialspannung  $\sigma_{ax}$  eine Kreisfläche mit dem Inhalt  $\frac{D^2\pi}{4}$ . Mit (3) und der Schnittfläche

$$A_r \cong D\pi s. \quad (4)$$

auf welche die Kraft wirkt, ergibt sich

$$\sigma_{ax} = \frac{F}{A_r} \quad (5)$$

zu

$$\sigma_{ax} = \frac{pD}{4s}. \quad (6)$$

Bei der Tangentialspannung  $\sigma_{tan}$  ist die Projektionsfläche ein Rechteck mit dem Flächeninhalt  $Dl$ . Hier ist Schnittfläche eine Längsfläche  $A_l$  der Wursthaut, für die gilt

$$A_l = 2Ls. \quad (7)$$

Damit ergibt sich die Tangentialspannung

$$\sigma_{tan} = \frac{F}{A_l} \quad (8)$$

zu

$$\sigma_{tan} = \frac{pD}{2s}. \quad (9)$$

Aus (6) und (9) folgt, dass die Wurst immer der Länge nach aufreißt, da die Spannung in der Wursthaut in Tangentialrichtung immer doppelt so hoch ist, wie die Spannung in Längsrichtung. [23-25]

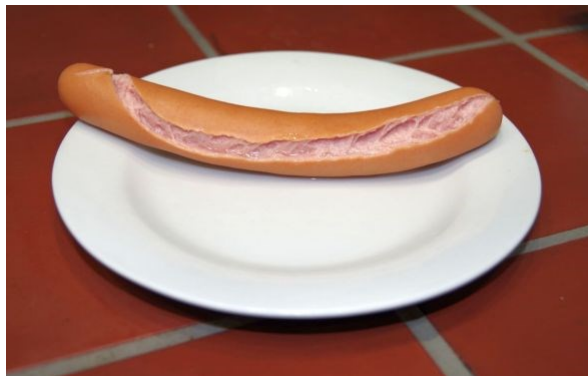


Abbildung 31: aufgeplatztes Würstchen (Bild: W. Winkler)

### Ketchup als thixotropes Medium

#### **Material**

- Ketchup in einer Glasflasche
- Teller

## **Durchführung und Beobachtung**

Ketchup wird gerne als Soße für verschiedene Speisen verwendet, zum Beispiel zum Eintunken für Pommes frites. Drückt man das Ketchup aus einer Kunststoffflasche, kann man eine leicht zähe Konsistenz erkennen. Will man das Ketchup aus einer Glasflasche holen, so stellt dies eine besondere Herausforderung dar. Das Klopfen auf den Boden der kopfüber gehaltenen Flasche, wie es häufig zu beobachten ist, führt nicht dazu, die Soße in großen Mengen auf den Teller zu bekommen. Will man das Ketchup aus der Flasche holen, eignet es sich besser, mit der Faust von unten gegen das Handgelenk zu schlagen. Eine weitere Methode ist, die Flasche mit zugeschraubtem Deckel an der Unterseite zu nehmen und mit den Armen fest nach unten zu schwingen. Man kann die Flasche vor dem Öffnen auch gut schütteln, um damit das Ketchup besser aus der Flasche rinnt, oder man schlägt die Flasche in einem geeigneten Winkel mehrfach schnell gegen die weiche Kante der Faust. Das Ketchup zu verflüssigen indem man die Flasche in einem Wasserbad erwärmt, stellt ebenfalls eine gute Methode dar. Man kann aber auch mit einem langen dünnen Gegenstand (zum Beispiel einem Essstäbchen) durch den Flaschenhals stochern, damit die Soße besser aus der Flasche rinnt.

## **Die Physik**

Ketchup ist ein gutes Beispiel für ein thixotropes Medium. Thixotropie bedeutet, dass Gele ihre Viskosität verringern können. Bei Einwirkung von Scher- oder Schubspannung, zum Beispiel Schütteln oder Rühren, kann sich das Medium verflüssigen. Ist die Einwirkung zu Ende, verfestigt sich eine solche Substanz wieder. Für diese Eigenschaft ist im Ketchup die darin enthaltene Stärke verantwortlich. Stärkemoleküle haben eine lange kettenförmige Form, zwischen denen sich schwache Bindungen durch Mischung mit Wasser und Erhitzen, oder durch Enzyme ausbilden. Dadurch entsteht eine gelatinöse, teigige Matrix.

Beim Schlagen auf den Boden der kopfüber gehaltenen Flasche, wird die Soße aufgrund ihrer Trägheit in Relation zur Flasche in entgegengesetzte Richtung getrieben und eher in die Flasche zurückgedrückt. Durch das Schlagen mit der Faust von unten gegen das Handgelenk mit der die Flasche gehalten wird, bekommt das Behältnis einen Impuls nach oben und durch die Trägheit der Soße rinnt das Ketchup aus der Flasche.



Schwingt man die Flasche mit den Armen herum, nutzt man das Prinzip einer Zentrifuge. Die Soße wird so besonders heftig aus der Flasche gedrängt.

Durch das Schütteln der Flasche brechen einige der Bindungen zwischen den Stärkemolekülen auf und das Ketchup rinnt nun stetig aus der Flasche.

Die Flasche mehrfach schnell gegen die Kante der Hand zu schlagen, bewirkt Schwingungen im Medium, wodurch die Bindungen ebenfalls aufbrechen und das Ketchup wird dadurch flüssiger.

Da die viskose Liquidität von der Temperatur abhängig ist, bewirkt das Erwärmen ein Aufbrechen der Bindungen zwischen den Molekülschichten und diese gleiten dann leichter aneinander entlang.

Stochert man mit einem dünnen Gegenstand durch den Flaschenhals, bricht dies einerseits die Luft-Soße-Barriere auf, andererseits führt man dem Medium so Energie durch Scherkräfte zu und das Ketchup fließt leichter aus der Flasche.



*Abbildung 32: Ketchup aus der Flasche holen  
(Bild: W. Winkler)*

## **Anmerkungen**

Thixotropie steht im Gegensatz zu dilatanten Medien, bei denen die Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit zunimmt (siehe Versuch „Nicht-Newton'sche Flüssigkeit mit Maisstärke). Die letzte Methode, die Flasche jahrelang stehen zu lassen ist für die praktische Anwendung nicht geeignet. [16, 26]

### Nicht-Newton'sche Flüssigkeit mit Maisstärke

## **Material**

- 300 g Maisstärke
- 250 ml Wasser
- Schüssel
- Löffel
- Alufolie
- Vibrationssiebmaschine von Retsch

## **Durchführung und Beobachtung**

In einer Schüssel werden 300 g Maisstärke mit 250 ml Wasser verrührt. Rührt man langsam durch die Flüssigkeit, kann man leicht durch die Mischung gleiten. Versucht man den Löffel schneller zu bewegen, spürt man plötzlich einen starken Widerstand. Stellt man das Maisstärke-Wasser-Gemisch in einer zu einer Schale geformten Alufolie auf eine Rüttelplatte, schaltet diese ein und stellt verschiedenste Amplituden ein, so kann man bei höheren Amplituden Ausstülpungen der Flüssigkeit beobachten.

## **Die Physik**

Gibt man die Stärke in Wasser, so löst sie sich darin nicht. Vielmehr entsteht eine Suspension, in der sich ein feiner Wasserfilm um die Stärkekörner bildet. Durch diesen Wasserfilm

können die Stärkekörner sehr leicht aneinander vorbeigleiten und das Gemisch verhält sich wie eine Flüssigkeit. Wirken nun aber große Scherkräfte auf die Flüssigkeit, wird das Wasser in diesem Bereich zwischen der Stärke herausgedrückt und die Körner verhaken sich. Die hydrodynamischen Kräfte sind zu stark für den Diffusionstransport um den Gleichgewichtszustand der kolloiden Partikel in der Lösung wiederherzustellen. Es entstehen sogenannte Hydrocluster aus Stärketeilchen in einem nicht-equilibrium Zustand. Eine Masse bildet sich, die sich eher wie ein Festkörper verhält. Beim schnellen Umrühren spürt man daher einen starken Widerstand.

Mittels harmonischer Schwingungen der Vibrationssiebmaschine kommt es ebenfalls zu Druckunterschieden in der Flüssigkeit. Aufgrund der Energiezufuhr durch höhere Amplituden der stehenden Wellen treten Bereiche höheren Drucks auf, die Flüssigkeit verfestigt sich und es entstehen kleine unförmige „Maisstärkemonster“. Die harmonischen Schwingungen stabilisieren das System in diesem Zustand der weit vom Equilibrium entfernt ist und Vibro-Levitation tritt auf. Dieses Phänomen lässt sich dann als Problem der Stabilität einer Kette von inversen Pendeln betrachten.

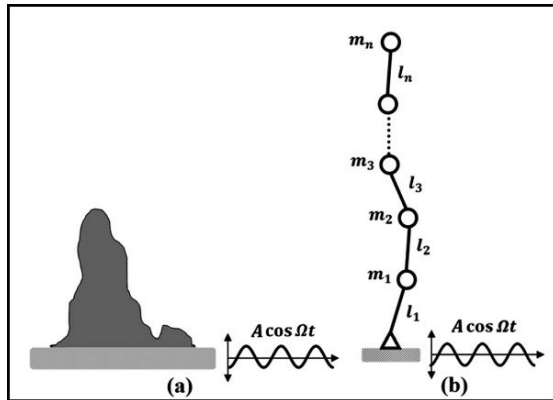


Abbildung 33: (a) "Maisstärkemonster" auf einer vibrierenden Unterlage, (b) entsprechendes vereinfachtes System multipler inverser Pendel, mit  $m_1, m_2 \dots, m_n$  als Hydrocluster der Maistärketeilchen (Bild: *Soft-Matter*, 2014, 10, 4637)



Abbildung 34: Vibro-levitation der "Maisstärkemonster" (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Braucht man größere Mengen nicht-Newtonscher Flüssigkeit beginnt man beim Anrühren mit einem Volumenverhältnis von etwa 1:1 und korrigiert die Konsistenz durch Hinzufügen von Maisstärke oder Wasser. Besser ist es aber, die Flüssigkeit dicker anzurühren, da das

Hinzufügen von Wasser einfacher ist. Erwischt man zu viel Wasser, reicht dann die vorhandene Menge Maisstärke eventuell nicht aus, um die Suspension mit den oben genannten Eigenschaften zu erhalten. Die angerührte Flüssigkeit ist nicht lagerfähig, da nach kurzer Zeit Gärung einsetzt und die Suspension unbrauchbar macht. Statt einer Vibrationsmaschine kann man auch einen Lautsprecher verwenden. Man gibt Frischhaltefolie auf die Lautsprechermembran und dann die Flüssigkeit darauf. Spielt man eine sehr basslastige Musik ab, kann man auch die unförmigen Ausstülpungen beobachten. [27, 28]

### Sirup mit Gedächtnis

#### **Material**

- Glycerin in zwei unterschiedlichen Farben
- Behälter mit drehbarer Walze
- Spritze mit langer Injektionsnadel

alternativ:

- Zuckerrübensirup
- Styroporkügelchen

#### **Durchführung und Beobachtung**

Das hellere Glycerin wird in den Behälter mit der Walze gefüllt. Die dunklere Flüssigkeit nimmt man mit der Spritze auf und injiziert damit am Gefäßrand einen senkrechten Streifen. Nun dreht man die Walze langsam drei bis vier Mal, bis der dunkle Streifen verläuft. Dann dreht man gleich viele Umdrehungen in die Gegenrichtung erscheint der Streifen wieder.

## Die Physik

Glycerin ist eine zähe Flüssigkeit, bei der die Molekülketten stark miteinander verknüpft sind. Beim Drehen der Walze werden die einzelnen Bereiche der Flüssigkeit auseinandergezogen, wobei sich die Teilchen in der Mitte in einem festen Verhältnis zu den Teilchen am Rande bewegen. Stoppt die Drehung, bleiben alle Teilchen sofort stehen. Es treten keine Verwirbelungen auf, die das geordnete Verhältnis aller Teilchen stören. Beim Zurückdrehen findet nun jeder laminare Flüssigkeitsbezirk seinen Weg in die Ausgangsposition zurück.

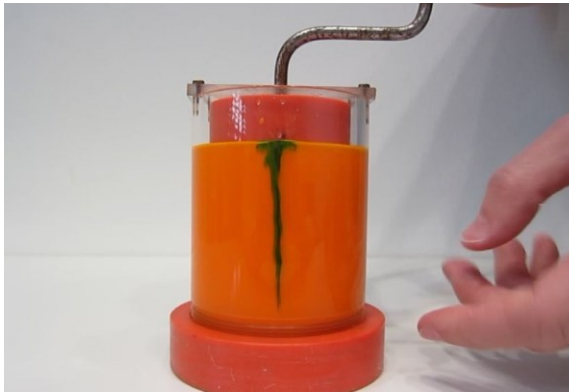


Abbildung 35: Vor dem Drehen (Bild: W. Winkler)



Abbildung 36: Nach dem Drehen (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Dieser Versuch wurde mit Glycerin durchgeführt, jedoch funktioniert der Versuch auch mit Zuckerrübensirup. Dabei kann man auf die Oberfläche Styroporkügelchen zu einem kleinen Kreis aufstreuen und dreht die Walze für einige Umdrehungen, sodass die Form des Kreises verschwindet. Dreht man die gleiche Anzahl an Umdrehungen zurück, erscheint der Kreis wieder. Zu heftiges Drehen der Walze sollte man vermeiden, da es sonst zu Verwirbelungen kommt. Auch bewirkt die Diffusion, dass der Streifen nach dem Zurückdrehen nicht mehr ganz so scharf begrenzt wie zu Beginn erscheint. Um die Diffusion zu minimieren, sollte beide Flüssigkeiten dieselbe Temperatur aufweisen. Diesen Versuch kann man auch als Analogie zum Spin-Echo Effekt der Quantenmechanik verwenden. [29]

## Zähigkeit mit Honig

### **Material**

- Honig
- Löffel

### **Durchführung und Beobachtung**

Ein Löffel wird in eine Honigglas getaucht und wieder herausgezogen. Man beobachtet, dass Honig am Löffel haften bleibt und aus dem Glas mit herausgenommen wird. Der Honig fließt nur langsam wieder vom Löffel herunter.

### **Die Physik**

Durch die Haftreibung zwischen Honig und Löffel werden mit dem Löffel direkt benachbarte Flüssigkeitsschichten mitgenommen. Hierbei tritt ein Geschwindigkeitsgefälle in Richtung senkrecht zur Löffelbewegung auf. Dies geschieht, weil auf Grund der thermischen Bewegung die Flüssigkeitsmoleküle in die benachbarte Schicht eintreten und dabei ihren Impuls teilweise übertragen können. Man spricht hier von innerer Reibung, welche aus diesem Impulstransport resultiert. Das Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids ist die Viskosität. [15]



*Abbildung 37: Zähflüssiger Honig  
(Bild: W. Winkler)*

## Abgestandenes Bier in Vakuum

### **Material**

- Bier
- Bierglas
- Vakuumglocke
- Drehschieber-Vakuumpumpe

### **Durchführung und Beobachtung**

Ein Bier wird in ein Bierglas gefüllt und stehen gelassen. Nach einer Weile ist die anfängliche Schaumkrone zusammengefallen. Man stellt nun das Bierglas in eine Vakuumglocke und legt mit einer Pumpe ein Vakuum an. Sogleich sieht man Gasblasen aus dem Bier aufsteigen und es entwickelt sich eine volle Schaumkrone. Herrscht in der Vakuumglocke wieder normaler Luftdruck fällt der Bierschaum schnell wieder in sich zusammen.

### **Die Physik**

Während des Bierbrauens entsteht durch den Gärungsprozess Kohlendioxid. Zusätzlich wird während des Bierzapfens in Gaststätten dieses Gas über eine Druckanlage in das Bier gepresst. Die Gasbläschen steigen nach dem Zapfen nach oben und bilden auf der Oberfläche des Bieres eine Schaumkrone. Das ist deswegen möglich, weil Bestandteile des Bieres die Oberflächenspannung des Wassers senken und um die aufsteigenden Kohlendioxidbläschen kann sich so eine Flüssigkeitshaut legen. Proteine und weitere langkettige Moleküle stabilisieren ebenso die Bläschen und helfen eine Blume zu formen. Sind im Bierglas Reste von Spülmittel hält sich der Schaum nicht sehr lange. Die Oberflächenspannung wird dann so weit herabgesetzt, dass die Schaumbläschen reißen. Aber auch ohne Spülmittelreste zerfällt der Schaum nach einiger Zeit (siehe Versuch „Bierschaumzerfall“). Mit der Zeit verliert das Bier das hineingepresste Kohlendioxid und es kommt zu einem Gleichgewicht mit dem umgebenden Luftdruck. Unter der Vakuumglocke pumpt man die Luft heraus, die das Bierglas umgibt und das Gleichgewicht wird gestört. Das noch gelöste Kohlendioxid im

Bier kann durch den geringeren Luftdruck aufsteigen und neuen Bierschaum bilden. Wird durch das Einlassen von Luft in die Glocke wieder der normale Luftdruck hergestellt, fällt der Schaum wieder zusammen.



Abbildung 38: Abgestandenes Bier bei Umgebungs-  
luftdruck (Bild: W. Winkler)



Abbildung 39: Das Bier in Vakuum (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Für die praktische Anwendung in Gaststätten ist diese Methode des Aufschäumens von abgestandenem Bier eher zu kompliziert und wird keine große Verbreitung finden. Den Zapfhahn kurz aufdrehen bringt neues Bier in das Glas, aber nur eine magere Schaumkrone. Bei einer Zapfanlage mit Kompensatorhahn kann man durch eine schnelle Hebelbewegung nach hinten reinen Schaum aus dem Hahn lassen und dem Bier wieder eine schöne Schaumkrone aufsetzen. [8, 16, 30]



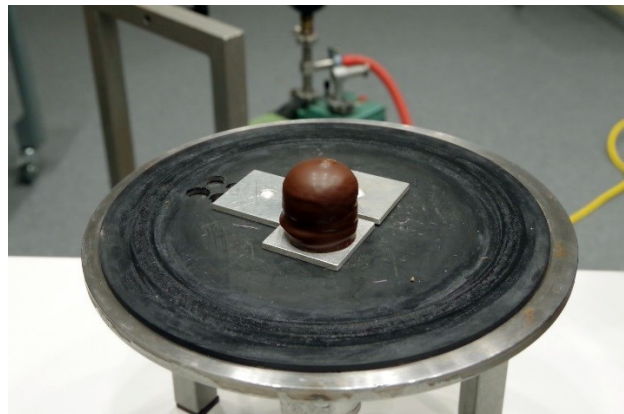
## Schwedenbombe in Vakuum

### **Material**

- Schwedenbombe
- Vakuumglocke
- Drehschieber-Vakuumpumpe

### **Durchführung und Beobachtung**

Eine Schwedenbombe wird in die Vakuumglocke gestellt. Legt man ein Vakuum an, reißt die Schokoglasur auf und die Schwedenbombe bläht sich auf das Vielfache ihres Anfangsvolumens auf. Stellt man wieder einen Umgebungsluftdruck her, so schrumpft die Schwedenbombe wieder auf etwas weniger als das Anfangsvolumen zusammen.



*Abbildung 40: Schwedenbombe bei Umgebungsluftdruck  
(Bild: W. Winkler)*

### **Die Physik**

In der Eiweißmasse der Schwedenbombe sind kleine Luftbläschen eingeschlossen. Durch das Anlegen eines Vakuums entsteht im Vergleich zum Druck der Luft die im Eiweiß eingeschlossen wurde ein Unterdruck. Auf Grund des Druckgradienten dehnt sich die Luft in einem Eiweißschaumbläschen aus und gemäß der allgemeinen Gasgleichung sinkt infolge der Volumenzunahme der Druck im Bläschen. Durch die Elastizität der Bläschenhaut resultiert

ein relativ gesehen kleiner Druck auf das Bläschen, der der Volumenzunahme entgegenwirkt. Die Änderung des Volumens eines Bläschens ist gering, aber alle Bläschen zusammen ergeben ein merkliches Aufblähen der Schwedenbombe, sodass die Schokoglasur, welche nicht elastisch ist, aufbricht. Auf Grund der Druckdifferenz zwischen Luft außerhalb und innerhalb des Bläschens bricht die Bläschenwand bei Erreichen der maximalen Volumenzunahme und die Schwedenbombe ist nach dem Versuch bei Umgebungsluftdruck kleiner als zuvor.



Abbildung 41: Schwedenbombe in Vakuuum (Bild: W. Winkler)



Abbildung 42: Schwedenbombe nach dem Versuch bei Umgebungsluftdruck (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Da die Bindungen der Eiweißmoleküle leicht aufbrechen, reicht bereits ein geringer Unterdruck um die Schwedenbombe platzen zu lassen. [8, 31]

[Karotte durch ein Holzbrett schießen](#)

## Material

- Karotte
- Druckluftflasche mit 200 bar
- Rohr mit Gewindeaufsatz für die Druckluftflasche
- Holzbrett
- Stativwagen

- Stativstangen
- Schraubzwingen

### Durchführung und Beobachtung

Ein Holzbrett wird mit Schraubzwingen vertikal an Stativstangen befestigt und in einiger Entfernung in der Höhe des Ventils der Druckluftflasche aufgestellt. Eine Karotte wird so zugeschnitten, dass sie in das hintere Ende des Rohres gedrückt werden kann. Das Rohr wird dann an die Druckluftflasche geschraubt und auf das Holzbrett gerichtet. Wird das Ventil kurz geöffnet und schnell wieder geschlossen, tritt die Luft aus der Flasche. Die Karotte wird aus dem Rohr gedrückt und durchschlägt das Holzbrett.



Abbildung 43: Karotte im "Lauf" (Bild: W. Winkler)

### Die Physik

Die Flasche steht unter hohem Druck, da sich in ihr komprimierte Luft befindet. Wird das Ventil geöffnet, dehnt sich das komprimierte Gas aus. Die Karotte kann dem Druck von 200 bar nichts entgegen setzen und wird mit hoher Geschwindigkeit aus dem Rohr getrieben. Die kinetische Energie der Karotte ist groß genug, um ein Stück Holz, das nicht zu hart ist zu durchschlagen. Bei diesem inelastischen Stoß ist ein Teil der kinetischen Energie in „innere Energie“ verwandelt worden und im Holzstück bleibt ein rundes Lock zurück.



Abbildung 44: Kurzes Öffnen des Ventils der Druckluftflasche (Bild: W. Winkler)

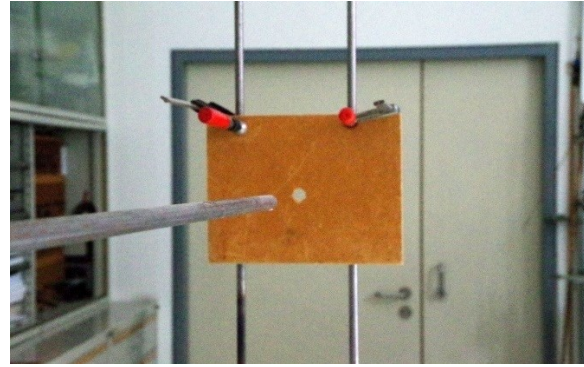


Abbildung 45: Durchschlag im Holzbrett (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Verwendet man eine sehr weiche Karotte und Hartholz, durchstößt die Karotte das Holzbrett nicht, aber man hat dann die wahrscheinlich schnellste Methode eine Karotte zu zerkleinern. [15]

[Cola light Dose schwimmt](#)

## Material

- Wasserbad mit Glaswänden
- Dose Cola
- Dose Cola light

## Durchführung und Beobachtung

In das Wasserbad werden nacheinander vorsichtig die vollen und verschlossenen Dosen Cola und Cola light der gleichen Größe und Form gestellt. Man beobachtet, dass die Dose Cola untergeht, während die Dose Cola light schwimmt.

## Die Physik

Ob ein Körper in einer Flüssigkeit schwimmt oder absinkt, ist von der mittleren Dichte des Gegenstands im Vergleich zur Dichte der Flüssigkeit abhängig. Da die Dosen das gleiche Volumen Flüssigkeit beinhalten, muss die Masse der beiden Dosen unterschiedlich sein. Softdrinks enthalten meist einen hohen Anteil an Zucker. Light-Getränken wird statt Zucker eine geringe Menge Süßstoff zugegeben. Die Gewichtskraft der Dose Cola ist somit größer als ihre Auftriebskraft in Wasser und die Dose sinkt. Die geringe Menge an Süßstoff in der Dose Cola light bewirkt, dass der Auftrieb im Wasser zum Schwimmen ausreicht.

## Anmerkungen

Beim Eintauchen der Dosen in das Wasser muss darauf geachtet werden, dass kein Wasser auf den Dosendeckel gelangt oder sich Luft in der Einbuchtung am Dosenboden befindet. Dies würde das Ergebnis verzerren. Da es viele Hersteller von Cola am Markt gibt, ist auch nicht sicher, ob der Versuch mit allen Dosen gelingt. Sinken beide Dosen kann man probieren, die Dichte des Wassers durch Zugabe von Salz oder Zucker zu erhöhen, bis die Light-Dose schwimmt. [31, 32]



Abbildung 46: Cola light Dose schwimmt, Cola Dose sinkt  
(Bild: W. Winkler)

## Öl auf Wasser mit Eiswürfel

### **Material**

- Trinkglas
- Wasser
- Speiseöl
- Eiswürfel
- Löffel

### **Durchführung und Beobachtung**

In ein Glas mit Wasser wird ein Eiswürfel gelegt. Ein Großteil des Volumens des Eiswürfels befindet sich unter der Wasseroberfläche. Anschließend wird vorsichtig etwas Speiseöl über das Wasser geschichtet. Dazu lässt man das Öl über die Rückseite eines Löffels an der Glaswand entlang rinnen. Nun liegt nur ein kleiner Teil des Volumens des Eiswürfels im Wasser und ein Großteil ragt in Öl.

### **Die Physik**

Bei 20 °C beträgt die Dichte von Wasser  $0,9982 \text{ kg/dm}^3$  und die Dichte von Speiseöl liegt bei etwa  $0,91 \text{ kg/dm}^3$ . Die Dichte des Eiswürfels liegt bei  $0,917 \text{ kg/dm}^3$ . Dadurch steigt der Eiswürfel bis zur Grenzschicht zwischen Wasser und Öl bis sich ein Kräftegleichgewicht zwischen Gewichtskraft und Auftrieb in der jeweiligen Flüssigkeit eingestellt hat. [14, 33]

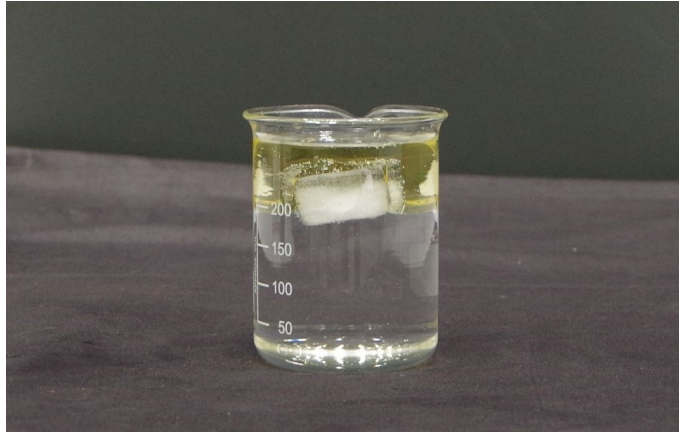


Abbildung 47: Eiswürfel zwischen Wasser und Öl (Bild: W. Winkler)

### Öltropfen in Alkohol-Wasser-Gemisch

#### **Material**

- viereckiger Glasbehälter
- Wasser
- Brennspritus
- Speiseöl
- Löffel
- Stricknadel

#### **Durchführung und Beobachtung**

Im Glasbehälter werden Wasser und Brennspritus etwa zu gleichen Teilen gemischt. Über einen Löffelrücken lässt man etwas Öl in die Mischung laufen. Ist das Öl noch an der Oberfläche, gibt man so lange vorsichtig Brennspritus in das Gemisch, bis das Öl in der Flüssigkeit schwebt. Damit das Öl nicht zu Boden sinkt, unterschichtet man das Gemisch mit Wasser, das man an der Gefäßwand langsam hineinfließen lässt. Man beobachtet nun, dass das Öl sofort in eine kugelige Form übergeht. Kleinere Tropfen, die sich abtrennen kann man mit einer Stricknadel wieder mit dem großen Tropfen vereinen.

## Die Physik

Wasser und Speiseöl stoßen einander ab, da ihre jeweilige Kohäsionskraft größer ist, als die gegenseitige Adhäsion. Diese Anziehungskräfte bedingen eine Flüssigkeit, bei der die Moleküle nicht wie bei einem Gas leicht auseinanderfliegen. Teilchen in der Mitte einer Flüssigkeit sind von allen Seiten von gleichen Molekülen umgeben, weshalb auf diese Teilchen gleich große Kräfte wirken. Auf ein Teilchen am Rand der Flüssigkeit ist die Kräfteverteilung anders. Die freie Verschiebbarkeit der Moleküle gilt hier nun nicht mehr, da die resultierende Kraft auf ein Molekül an der Oberfläche, welche von den Molekülen in seiner Umgebung ausgeübt wird nicht mehr Null ist. Außerhalb der Flüssigkeit gibt es keine gleichartigen Teilchen und die Anziehung nach außen fehlt. Die inneren Teilchen ziehen die Teilchen am Rand nach innen, wodurch die Flüssigkeit bestrebt ist, sich zu verkleinern. Dieses Bestreben sich zusammenzuziehen nennt man Oberflächenspannung. Da verschiedene Flüssigkeiten aus verschiedenen Teilchen bestehen, variiert die Oberflächenspannung. Die Kräfte sind unterschiedlich groß. Bei Wasser ist dieses Bestreben sich zusammenzuziehen geringer als zum Beispiel bei Quecksilber. Die Flüssigkeitsoberfläche wird durch diesen Trend zum Zusammenziehen gekrümmt und es entsteht eine Kugelform, da dies die Form der kleinsten Oberfläche ist und sich so ein Energieminimum einstellt. Deshalb nimmt der Öltropfen im Alkohol-Wasser-Gemisch eine kugelige Form an. Bei diesem Versuch war jedoch eine leicht elliptische Form des Öltropfens zu erkennen. Dies könnte daran liegen, dass sich der Brennspiritus und das Wasser nicht homogenisiert haben und die unterschiedliche Auftriebskraft in den beiden Phasen den Öltropfen deformiert haben.

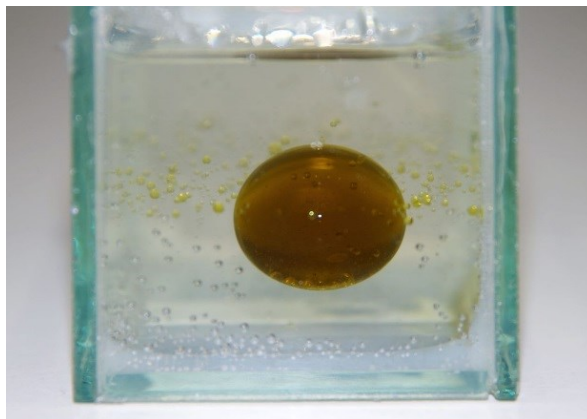


Abbildung 48: Öltropfen im Alkohol-Wasser-Gemisch  
(Bild: W. Winkler)



## **Anmerkungen**

Versetzt man den Öltropfen zum Beispiel mit einem Draht in Rotation plattet sich der Öltropfen ab und bei genügend großer Zentrifugalkraft löst sich ein Öling ab. Wegen der Oberflächenspannung besteht der Ring nicht sehr lange und er zerfließt in kleine Tröpfchen, die mit der zentralen Kugel rotieren. Unser Planetensystem soll nach dem französischen Physiker LAPLACE (1749-1827) so entstanden sein, dass sich die Planeten von der rotierenden Sonne abgelöst haben. Als Bekräftigung dieser Theorie hat man früher oft dieses Experiment vorgeführt. Heute weiß man jedoch, dass die Planeten aus einem Urnebel entstanden sind. [5, 8, 15]

[Wasser und Schnaps vertauschen](#)

## **Material**

- 2 Schnapsgläser
- 1 Spielkarte
- Wasser
- Schnaps (am besten färbigen)

## **Durchführung und Beobachtung**

Ein Schnapsglas wird randvoll mit färbigem Schnaps gefüllt. Ein zweites wird ebenso randvoll mit Wasser gefüllt und eine Spielkarte wird so daraufgelegt, sodass die Öffnung des Glases ganz bedeckt wird. Man kann das Schnapsglas mit der Spielkarte nun auf den Kopf stellen, ohne dass die Flüssigkeit herausläuft (siehe Versuch „[Glas Wasser mit Karte umdrehen](#)“). Dann wird dieses Schnapsglas so auf das Erste gestellt, dass sich die beiden Öffnungen genau decken. Nun wird die Spielkarte etwas zur Seite gezogen, dass ein kleiner Spalt zwischen den beiden Öffnungen entsteht. Sofort kann man beobachten, dass sich die beiden Flüssigkeiten beginnen auszutauschen und das untere Glas in dem vorher der Schnaps war sich mit Wasser füllt und der Schnaps aus dem unteren Glas in das obere Glas steigt.

Haben sich die beiden Flüssigkeiten vollständig ausgetauscht, kann man die Karte wieder zurückschieben und das obere Glas, wie es daraufgestellt wurde, wieder herunternehmen.

### Die Physik

Die Flüssigkeiten tauschen sich aus, da der Schnaps durch seinen Alkoholgehalt eine viel geringere Dichte als das Wasser hat. Das Wasser strömt daher durch die kleine Öffnung an den Glasrändern in das untere Glas. Dabei wird der Schnaps verdrängt und wegen der Adhäsion an der benetzten Glaswand fließt er nicht nach außen weg, sondern steigt in das obere Glas hoch. An den strömenden Flüssigkeiten bildet sich nun eine Grenzschicht, die verhindert, dass diese sich vermischen. Ist die Strömungsgeschwindigkeit jedoch sehr hoch, bilden sich Verwirbelungen aus und es tritt Vermischung auf.

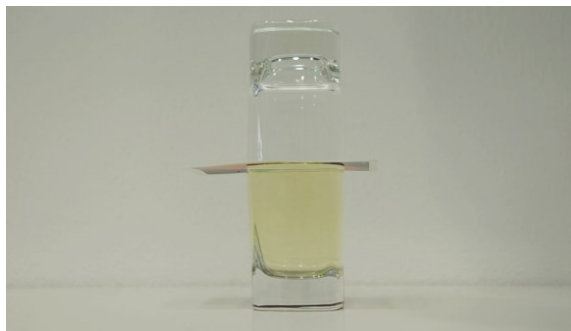


Abbildung 49: Wasser oben und Schnaps unten  
(Bild: W. Winkler)

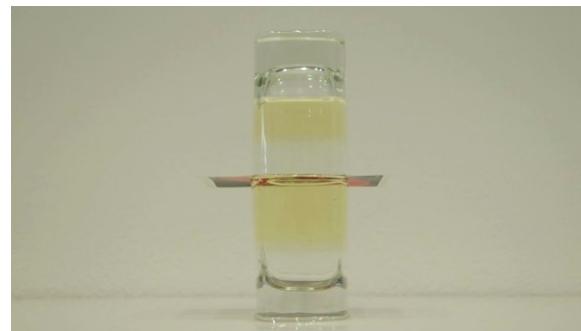


Abbildung 50: Wasser und Schnaps vertauschen sich  
(Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Dauert der Austausch der Flüssigkeiten sehr lange, wenn etwa der Spalt sehr klein ist, dann können sich die Flüssigkeiten durch Diffusion vermischen, bevor ein vollständiger Austausch stattgefunden hat. [5]

## **Material**

- Ethanol 96 %
- Wasser
- 2 Maßkolben 1000 ml
- 1 Maßkolben 2000 ml

## **Durchführung und Beobachtung**

Jeweils 1000 ml der beiden Flüssigkeiten werden mit den Maßkolben abgemessen. Leert man beide Flüssigkeiten in den 2000 ml Maßkolben zusammen, so ist dieser nicht bis zur Graduierung gefüllt. Es sind weniger als 2000 ml im Gefäß.

## **Die Physik**

Mischt man zwei Flüssigkeiten, entspricht die Gesamtmasse der Mischung der Summe der beiden Einzelmassen. Das Gesamtvolumen muss aber nicht die Summe der Einzelvolumina sein, wenn die Flüssigkeiten unterschiedliche Dichten aufweisen. Eine sehr grobe Analogie ist ein mit Steinen gefülltes Gefäß, in das man Sand füllt. Die Massen addieren sich, aber dadurch, dass der Sand in die Lücken zwischen den Steinen rieselt, verschiebt sich der obere Rand des Inhaltes nicht nach oben. Die Dichte ändert sich beim Mischen von Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte nicht linear mit dem Mischungsverhältnis. Wasser hat bei 20 °C eine Dichte von 998,20 g l<sup>-1</sup>. Das Europäische Arzneibuch gibt für Ethanol mit 96,0 Volumenprozent eine Dichte von 807,42 g l<sup>-1</sup> an, was 93,84 Massenprozent entspricht. Daher setzen sich die 807,42 g des Ethanols aus 757,68 g Alkohol und 49,74 g Wasser zusammen. Vereint man jeweils einen Liter der beiden Flüssigkeiten hat man in Summe 1805,62 g wovon 757,68 g Alkohol und 1047,94 g Wasser sind. Das sind nun 41,96 Massenprozent. Laut Europäische Arzneibuch entspricht das einer Dichte von 931,12 g l<sup>-1</sup> und 49,5 Volumenprozent. Hier sieht man, dass sich die Volumenprozent nicht aus dem arithmetischen Mittel der Volumenprozent der beiden Einzelflüssigkeiten ergeben. Mit der Dichte des

Gemisches und der Masse kann man dann auf das Volumen schließen, das sich dann zu 1939,19 ml ergibt. Das heißt, dass das Gesamtvolumen um 60,81 ml, oder um 3 % geringer ist, als erwartet.



Abbildung 51: Je 1000 ml Wasser (links) und Alkohol 96%ig (rechts) (Bild: W. Winkler)

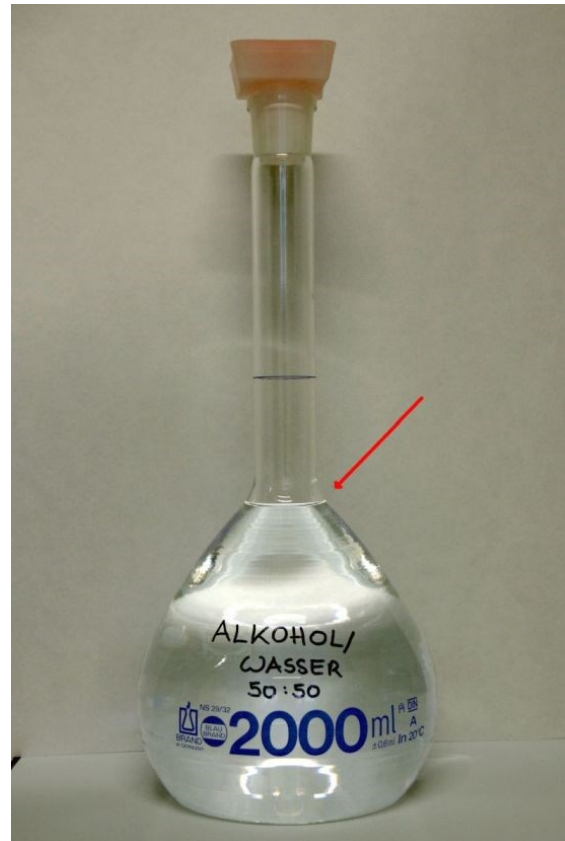


Abbildung 52: Volumenkontraktion des Alkohol-Wasser-Gemisches (Pfeil markiert Meniskus) (Bild: W. Winkler)

### Anmerkung

Eine eventuell auftretende Trübung beim Mischen von Alkohol und Wasser ist nicht auf diese Volumenkontraktion zurückzuführen, sondern auf ätherische Öle im Alkohol, die sich nicht mit dem Wasser mischen und das Licht streuen. [34, 35]

## **Material**

- Ketchup Beutel
- PET-Flasche
- Wasser

## **Durchführung und Beobachtung**

Ein Ketchup Beutel wird in eine PET-Flasche gesteckt. Die Flasche füllt man dann randvoll mit Wasser und verschraubt sie fest. Der Ketchup Beutel schwimmt ganz oben in der Flasche. Drückt man die Flaschenwand mit beiden Händen fest zusammen, sinkt der Beutel und steigt wieder hoch, wenn man loslässt. Durch geschicktes Drücken kann man den Beutel sogar tanzen, oder in der Mitte schweben lassen.

## **Die Physik**

Durch das Zusammenpressen der Flasche übt man einen Druck auf das Wasser im Inneren aus. Flüssigkeiten sind aber nicht gut komprimierbar und der Druck überträgt sich auf den Ketchup Beutel. Dieses enthält neben der Soße auch eine gewisse Menge an Luft. Luft lässt sich komprimieren und das Volumen des Beutels nimmt ab. Dies erhöht nun seine Dichte bis zu dem Punkt, an dem der Beutel nicht mehr schwimmen kann. Er sinkt bis zu dem Punkt, an dem die Gewichtskraft gleich der Auftriebskraft ist und steigt erst wieder nach oben, wenn man den Druck vermindert indem man die Flasche loslässt. Durch variieren des Drucks auf die Flaschenwand kann man die Dichte des Beutels leicht ändern, dass der Beutel tanzt. Dabei muss man die Trägheit des Beutels berücksichtigen und den Druck geschickt zeitlich abstimmen. Übt man die richtig dosierte Kraft auf die Flasche aus schwebt der Beutel an entsprechender Stelle.



Abbildung 53: Ketchup Beutel als U-Boot (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Man kann den Druck auf die Flasche auch dadurch erzielen, indem man eine Schraubzwinge verwendet, oder die Flasche zwischen Türrahmen und Tür einklemmen. U-Boote funktionieren im Wesentlichen nach demselben Prinzip. Sie füllen Ihre Ballasttanks je nach Bedarf mit Wasser oder mit Luft und können so abtauchen oder aufsteigen. [16]

## Kraftprobe zwischen Kaffee und Alkohol

### Material

- Flacher Teller
- Brennspiritus
- Kaffee

### Durchführung und Beobachtung

In einen flachen Teller wird ein dünner Film Kaffee gegossen. Dann gibt man einige Tropfen Alkohol hinzu. Man kann beobachten, dass sich ein kreisförmiger Bereich bildet, wo beide Flüssigkeiten verdrängt werden und man den Tellerboden sehen kann. Kurz darauf beginnt sich der kreisförmige Bereich zu schließen und der Kaffee kommt wieder zurück. Am Rand des Bereiches hat man den Eindruck, dass die Flüssigkeit siedet.

## Die Physik

Ethanol und Kaffee haben unterschiedliche Oberflächenspannungen. Die Oberflächenspannung von Alkohol beträgt  $22,3 \text{ mN m}^{-1}$ , die von Wasser woraus Kaffee hauptsächlich besteht hingegen  $72,7 \text{ mN m}^{-1}$ . Wasser ist ausgenommen von Quecksilber die Flüssigkeit mit der größten Kohäsionskraft. Kommt der Alkohol mit dem Kaffee in Berührung ziehen sich die Wassermoleküle des Kaffees gegenseitig mehr an, als sie die Moleküle des Alkohols anziehen. Dadurch „fliehen“ die Wassermoleküle vor den Alkoholmolekülen und der Kaffee entfernt sich von dem Bereich mit hoher Alkoholkonzentration. Die gesamte Kaffeeoberfläche wird somit kleiner und damit auch die Gesamtenergie der Flüssigkeitsoberfläche, was dem Bestreben nach dem Minimieren der potentiellen Energie entspricht. Verdünnt sich der Alkohol mit dem Kaffee schließt sich der Bereich wieder und die Oberfläche der Flüssigkeit ist wieder geschlossen. Das „Sieden“ am Rand des Bereiches entsteht durch Dichtekonvektion in den beiden Flüssigkeiten (siehe Versuch „Schlagobers auf Tia Maria“). [14, 36-39]



Abbildung 54: Alkohol verdrängt Kaffee (Bild: W. Winkler)

### Flüssiger Stickstoff, Wasser und Alkohol in Filzhut

#### Material

- Wasser
- flüssiger Stickstoff
- Alkohol

- Filzhut

### **Durchführung und Beobachtung**

In einen Filzhut wird nacheinander flüssiger Stickstoff, Alkohol und Wasser gegossen. Dazwischen wird der Filzhut immer wieder ausgeklopft und getrocknet. Der flüssige Stickstoff fließt fast ungehindert durch den Filzhut durch und es "raucht". Der Alkohol rinnt etwas langsamer durch den Hut und das Wasser bleibt im Hut und rinnt nicht durch.

### **Die Physik**

Der Filzhut besteht aus verarbeiteter Schafwolle. Dabei sind die einzelnen langen Fasern der Schafwolle ungeordnet und verkeilen sich beim Filzen stark, so dass ein festes textiles Flächengebilde entsteht. Zwischen den Fasern sind jedoch kleinste Lücken vorhanden, durch die Luft und je nach Verarbeitung auch Wasser dringen kann. Die feinen Lücken des Filzes teilen die Gesamtoberfläche der Flüssigkeiten in kleine Parzellen auf. Eine Flüssigkeit kann in diesen Lücken je nach Oberflächenspannung eine Haut bilden, welche die Oberflächen stabilisiert und somit die Flüssigkeit nicht durch die Lücken fließt. Die drei Flüssigkeiten haben unterschiedliche Oberflächenspannungen. Trifft der flüssige Stickstoff auf den Filzhut, verdampft ein Teil sofort und die Luftfeuchtigkeit kondensiert, was als „Rauch“ zu beobachten ist. Der Rest der Flüssigkeit geht aufgrund der niedrigen Oberflächenspannung durch den Filzhut. Der Alkohol hat auch eine niedrige Oberflächenspannung und rinnt ebenso durch den Hut. Das Wasser hat eine ausreichend hohe Oberflächenspannung, dass die kleinen Parzellen der Wasseroberfläche in den feinen Lücken des Filzes stabil bleiben und das Wasser nicht durch den Filzhut fließt.





Abbildung 55: flüssiger Stickstoff in Filzhut gegossen (Bild: W. Winkler)



Abbildung 56: Alkohol rinnt durch den Filzhut (Bild: W. Winkler)



Abbildung 57: Wasser in Filzhut gegossen (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Ein Filzhut ist ein guter Schutz vor Regen. Schafwolle ist mit wasserabweisenden Substanzen versetzt, was zusätzlich zu einem Schutz vor Durchnässung führt. [40, 41]

## Schlagobers auf Tia Maria

### Material

- flache Likörschale
- Ungeschlagenen Schlagobers
- Tia Maria (Kaffeelikör)
- einen Löffel

### Durchführung und Beobachtung

In die Likörschale wird 1 cm Tia Maria gegossen. Über einen Löffelrücken lässt man dann das Schlagobers in das Likörglas laufen, sodass er sich auf der Oberfläche des Tia Maria verteilt. Sogleich reagiert das Schlagobers mit dem Likör darunter und die Oberfläche des Schlagobers bricht zu einem Muster an Zellen auf. Vertikale Wirbel, die wie Stürme aussehen, sind im Likörglas zu sehen.

## Die Physik

Die wirbelnden Muster werden von Konvektion verursacht. In der Regel werden diese Bewegungen von Temperaturdifferenzen hervorgerufen. Bei diesem Versuch sind es jedoch Konzentrationsgradienten gelöster Stoffe der beiden Flüssigkeiten, die die Konvektion antreiben. Man spricht hier auch von Dichtekonvektion. Die treibende Kraft sind destabilisierende Oberflächenspannungen, in diesem Fall 26,5% Alkohol im Tia Maria. Dieser beginnt aufgrund der unterschiedlichen Dichte durch das Schlagobers hindurch zu diffundieren, nachdem dieser auf den Likör aufgebracht wurde. Kommt der Alkohol auf der Oberfläche an, reduziert er dort die Oberflächenspannung und die verbleibenden Bereiche mit höherer Oberflächenspannung ziehen die Flüssigkeit mit niedriger Oberflächenspannung zu sich heran. Tia Maria steigt dann in den Bereichen nach oben, wo Flüssigkeit weggezogen wurde und füllt die Lücke. Dieser Vorgang wird zu einem sich selbst erhaltenden Konvektionszyklus, da der Likör noch weniger Oberflächenspannung aufweist, als die wegtransportierte Flüssigkeit. Dieser Zyklus hält so lange an, bis keine Konzentrationsdifferenz zwischen Schlagobers und Tia Maria besteht.

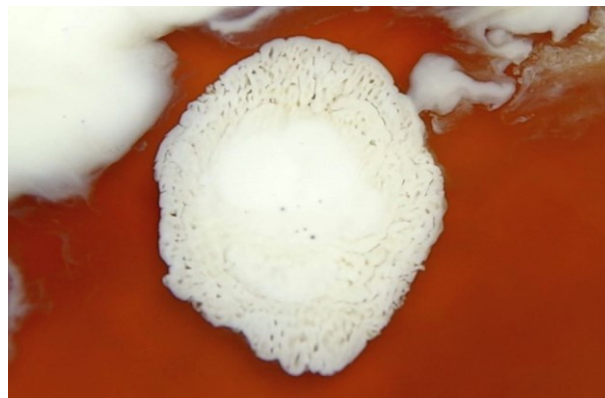


Abbildung 58: Konvektionszellen im Schlagobers (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Konvektion, die durch Oberflächenspannung ausgelöst wird, bezeichnet man auch als Marangoni-Konvektion. Sie ist unter anderem auch für die sogenannten Weintränen, oder wie unterschiedliche Farben trocken, verantwortlich. Die Konturen der Konvektionsmuster sind

bei diesem Versuch anders als bei anderen Systemen. Hier sind es wurmartige Rollbewegungen und isolierte Zellen, statt runder oder sechseckiger Muster. [16, 42]

## Müsli entmischt sich

### **Material**

- Müsli in durchsichtiger Verpackung

### **Durchführung und Beobachtung**

Wird die Packung Müsli rhythmisch geschüttelt, so sammeln sich die kleineren Bestandteile am Boden und größere Klumpen oder Nüsse steigen nach oben. Die größeren Bestandteile driften im Rhythmus des Hoch- und Niederschüttelns nach oben um sich schließlich in den oberen Schichten zu sammeln, obwohl bei der Herstellung für eine gute Durchmischung der Bestandteile gesorgt wurde.

### **Die Physik**

Zur Erklärung dieses als Paranus- Effektes bekannten Phänomens kann das sogenannte „Lückenmodell“ herangezogen werden. Dieses geht davon aus, dass sich die Teilchen des Müslis beim schnellen hoch- und niederbewegen auf Grund der Trägheit für einen kurzen Moment in eine Situation, in der die Schwerkraft stark herabgesetzt wird und somit die Reibungskräfte, die die Anfangskonstellation stabilisieren vermindert werden. Dadurch reichen kleine Störungen aus, um die Teilchen gegeneinander zu verschieben und im Moment der Bewegungsumkehr von Ab- nach Aufwärts in eine neue Anfangskonstellation zu stabilisieren. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit, dass kleinere Bestandteile des Müslis in die Zwischenräume der größeren geraten größer, als umgekehrt die großen Teilchen in die kleinen Lücken der kleinen gelangen. Außerdem ist es während des Falls wahrscheinlicher, dass kleine Bestandteile ein Stück weit an den größeren vorbeiziehen als umgekehrt, da die grö-

ßeren Teilchen einen größeren Querschnitt der Packung ausfüllen und so der Überholvorgang von mehreren kleinen Bestandteilchen behindert wird. Auf Grund des fast kräftefreien Zustands während der Abwärtsbewegung der Packung können die kleineren Teilchen in den Lücken der größeren mehr Platz einnehmen als vorhanden ist. Dadurch landen die größeren Bestandteile bei der Bewegungsumkehr und der erneuten schwerkraftbedingten Fixierung der Mischung in eine leicht erhöhte Lage. Diese Lage wird beim erneuten Aufwärtsbewegen der Packung zum neuen Anfangszustand und der Prozess kann sich wiederholen, bis sich die größeren Bestandteile in den oberen Schichten befinden. Nach dem „Strömungsmodell“ unterliegen alle Teilchen einer Konvektionsbewegung



*Abbildung 59: große Bestandteile sind oben  
(Bild W. Winkler)*

### **Anmerkung**

Die beobachtbare Zunahme von Ordnung in der Müslipackung steht auf dem ersten Blick in Konflikt mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, da die Einseitigkeit der Ablaufrichtung natürlicher Vorgänge sich durch Energiedissipation oder Zunahme der Entropie beschreiben lässt. Dem System wird durch das Schütteln mechanische Energie zugeführt, die

im Zuge der Umwälzungen der Partikel durch Reibung dissipiert wird. Die Ordnungszunahme des Systems wird durch die Unordnungszunahme durch Dissipation auf Energieebene mehr als kompensiert. Insbesondere Mischungsvorgänge sind Beispiele für Energiedissipation oder die Zunahme der Unordnung. Diese Entmischung durch Schütteln auf Grund Größenunterschiede der Teilchen muss auch von einem Siebvorgang unterschieden werden, bei dem kleinere Teilchen durch die Zwischenräume der größeren durchlaufen.

In der Pharmazie ist dieser Effekt als Segregation bekannt und unerwünscht, da sich der Wirkstoff in einer Darreichungsform homogen verteilen soll.

Wenn Äcker trotz alljährlicher Befreiung von Steinen nie steinfrei werden, spielt die oben geschilderte Entmischung eine Rolle. [43, 44]

### Spaghetti brechen

#### **Material**

- trockene Spaghetti

#### **Durchführung und Beobachtung**

Ein Strang trockene Spaghetti wird an den Enden festgehalten und soweit gebogen bis er bricht. Dabei zerbricht die Nudel immer in drei oder mehr Teile. Selbst wenn man meint, dass zwei Bruchstücke entstanden sind, findet man Splitter, die weiter weg verstreut liegen.

#### **Die Physik**

Für das ungewöhnliche Zerbrechen der Nudel sind sogenannte BiegeWellen verantwortlich. Erreicht die Krümmung einen kritischen Wert, kommt es zum ersten Bruch. Hier spielen auch Defekte im Teig eine Rolle, da die Kombination von Materialbelastung und Defektgröße den Bruch bedingt. Durch den ersten Bruch kommt es zu einem Schock, der eine BiegeWelle verursacht, welche mit hoher Amplitude und Geschwindigkeit entlang der zwei

verbleibenden Nudelstücke schwingt. Die Biegewelle trifft die Stücke noch bevor diese sich ganz entspannt haben und verstärkt ihre Krümmung. Weitere Frakturen der Nudelstücke sind die Folge und es kommt zu einer Kaskade von Brüchen. Daher findet man oft mehr als drei Bruchstücke beim Zerschneiden eines Stranges Spaghetti.



Abbildung 60: Spaghetti bricht in drei Teile (Bild W. Winkler)

### Anmerkungen

Die wegfliegenden Bruchstücke gehorchen der Drehimpulserhaltung. Fliegen zwei Teile weg, dreht sich eines nach rechts und das andere nach links (siehe Diplomarbeit von Milan NEMLING „*Zeitlupendarstellung physikalischer Prinzipien mit Schwerpunkt Wellenlehre*“). Aus den Erkenntnissen, die man durch die Untersuchung dieses Phänomens gewonnen hat, kann man auch wichtige Informationen über das Bruchverhalten von menschlichen Knochen oder Brücken ableiten. [16]

[Glas Wasser mit Karte umdrehen](#)

### Material

- Glas
- Wasser
- Spielkarte

## Durchführung und Beobachtung

Ein Glas wird mit Wasser gefüllt und mit einer Spielkarte zugedeckt. Die Spielkarte wird festgehalten und das Glas wird umgedreht. Lässt man die Karte los, läuft kein Wasser aus dem Glas und die Spielkarte „klebt“ am Glas.

## Die Physik

Verantwortlich für dieses Phänomen ist die uns umgebende Luft, die auf Meeresebene mit etwa 1013,25 hPa auf allem lastet, was sich auf der Erdoberfläche befindet. Da der Druck von allen Seiten wirkt, merken wir davon nichts und wir haben nach dieser Gleichgewichtssituation unsere Intuition ausgerichtet. In diesem Versuch wird das Gleichgewicht gestört, da zwischen Wasser und Glas ein luftleerer Raum entstehen würde, wenn das Wasser aufgrund der eigenen Schwere aus dem umgestülpten Glas herausfließen würde. Die Luft von unten möchte das Entstehen eines Vakuums verhindern. Dabei ist das Wasser im Weg und es wird daher von der umgebenden Luft hochgedrückt. Üblicherweise befindet sich die Wasseroberfläche in einem labilen Gleichgewicht und verformt sich bei kleinsten Störungen, sodass ein Luftdruckausgleich stattfinden kann. Die Karte stabilisiert aber die Wasseroberfläche, sodass das Wasser in einem Stück bleibt und nicht aus dem Glas läuft.



Abbildung 61: Wasser läuft nicht aus dem Glas (Bild: W. Winkler)

## **Anmerkungen**

Dieser Versuch gelingt auch mit einem Küchensieb, welches man über das Wasserglas stülpt. Dreht man das ganze vorsichtig um, läuft auch kein Wasser heraus. Zwischen den feinen Maschen des Siebes übernimmt die aufgrund der Oberflächenspannung ausgebildete Haut die Stabilisierung der kleinen Wasseroberflächen. [14, 40]

## Der trockene Finger

### **Material**

- Wasserglas
- Zimtpulver

### **Durchführung und Beobachtung**

Auf die Oberfläche des Wassers im Glas streut man eine gleichmäßige Schicht Zimtpulver. Dann wird ein Finger langsam in das Wasser getaucht und wieder herausgezogen. Der Finger ist nur von etwas Zimtpulver bedeckt, aber noch trocken.

### **Die Physik**

Die Kohäsionskräfte im Wasser sind größer als die Adhäsionskräfte zwischen Zimtpulver und Wasser. Daher wird das Pulver vom Wasser nicht benetzt. Bespritzt man Zimtpulver, das auf einer Unterlage liegt mit Wasser, so bilden sich Wassertropfen auf dem Zimtpulver und die Grenzfläche zwischen Pulver und Wasser wird so minimiert. Taucht man einen Finger in das Wasser, dessen Oberfläche mit Zimtpulver bestreut ist, so umgibt den Finger eine dünne Pulverschicht. Die einzelnen Pulverteilchen können nicht benetzt werden und der Finger bleibt trocken. Erst wenn man den Finger soweit eintaucht, dass er nicht mehr vollständig mit dem Zimtpulver bedeckt ist, kommt er mit dem Wasser in Berührung.



## Anmerkungen

Wird die Oberfläche besonders dicht bestreut, kann man den Finger sehr weit eintauchen, da viel Pulver die Oberfläche des Fingers umschließen kann. Reißt der Pulverfilm auf der Wasseroberfläche, zum Beispiel durch lange Fingernägel, funktioniert dieser Versuch nicht. Mit kaltem Wasser ist der Versuch besonders eindrucksvoll, da das Kältegefühl den Eindruck erweckt, dass der Finger doch nass ist. Mit Bärlappsporen gelingt dieser Versuch auch sehr gut. [45]

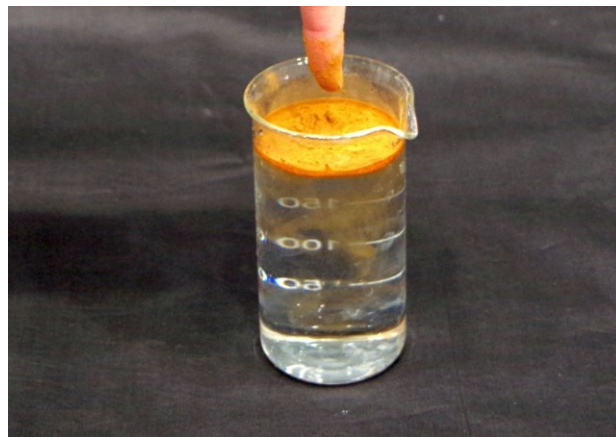


Abbildung 62: Der Finger bleibt nach dem Eintauchen trocken (Bild: W. Winkler)

## Pfeffer auf Wasser

### Material

- flacher Teller
- Wasser
- Pfefferstreuer
- Spülmittel

### Durchführung und Beobachtung

Man füllt den Teller einige Millimeter mit Wasser und streut eine gleichmäßige Schicht gemahlener Pfeffer darüber. Dann gibt man einen Tropfen Spülmittel auf die Kuppe eines

Fingers und berührt damit die Wasseroberfläche. Der gesamte Pfeffer bewegt sich sofort zum Tellerrand hin.

### Die Physik

Durch die große Oberflächenspannung des Wassers schwimmt der gemahlene Pfeffer. Spülmittel besteht zum Großteil aus Detergentien, welche die Fähigkeit haben, die Oberflächenspannung der Lösung in der sie sich befinden zu erniedrigen. In dem Bereich der Wasseroberfläche die mit dem Spülmittel nun in Verbindung kommt, wird die Oberflächenspannung herabgesetzt und die verbleibende Oberflächenspannung an den Randbereichen des Tellers zieht nun den gemahlene Pfeffer zu sich heran.



Abbildung 63: Pfeffer wird an den Rand gezogen (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Der Teller sollte einfarbig weiß sein, da ein Muster das Beobachten eher stört. Der Pfeffer sollte nicht zu grob gemahlen sein, damit er schwimmt. Stücke die zu groß sind, sinken auf den Boden. [45]

## Fakirapfel

### **Material**

- Apfel
- Holzbrett (ca. 10 cm x 10 cm) aus nicht splitterndem, weichem Holz
- 26 Nägel 4,2 mm x 100 mm
- Hammer
- Holzstücke als Unterlagen
- 

### **Durchführung und Beobachtung**

Ein Nagel wird in die Mitte des Holzbrettes geschlagen und die fünf und zwanzig verbleibenden in 5 x 5 Reihen und regelmäßigen Abständen zueinander auf der gegenüberliegenden Seite durch das Brett getrieben. Dabei empfiehlt es sich, Löcher vorzubohren, damit das Holz nicht springt. Dieses Brett stellt man mit dem einen Nagel nach oben zeigend auf die Unterlagen. Lässt man einen Apfel von einer definierten Höhe auf den Nagel fallen, so bohrt dieser sich bis zu einer gewissen Tiefe in den Apfel (Experiment a). Dreht man das Nagelbrett um und lässt wieder den Apfel darauf fallen, so bohren sich die Nägel nicht mehr so tief in den Apfel wie zuvor (Experiment b).

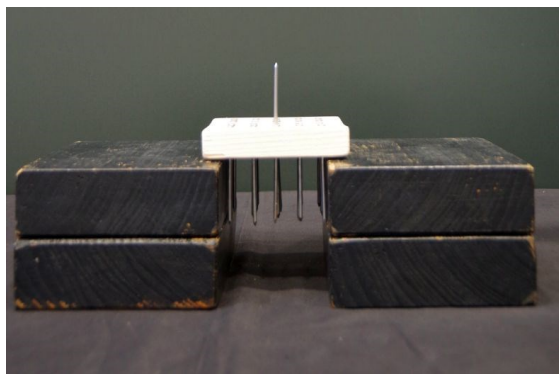


Abbildung 64: Versuchsaufbau mit einem Nagel oben (Bild: W. Winkler)

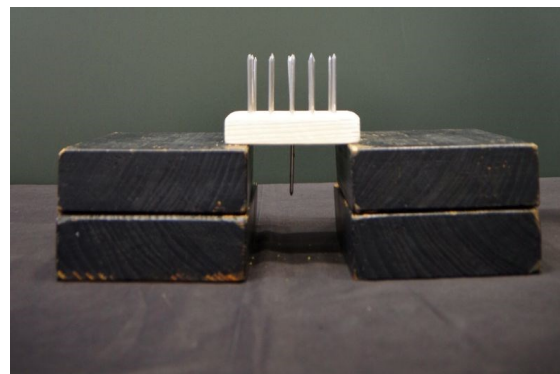


Abbildung 65: Versuchsaufbau mit mehreren Nägeln oben (Bild: W. Winkler)

## Die Physik

Wie tief die Nägel in den Apfel eindringen, hängt von dem Druck ab, den sie an der Berührungsfläche der Apfelhaut erzeugen. Der Druck  $p$  ist definiert als das Verhältnis einer senkrecht auf eine Fläche wirkende Kraft  $F$  zur Größe  $A$  dieser Fläche:

$$p = \frac{F}{A} \quad (10)$$

Der Betrag der Kraft mit denen die Nägel auf die Apfeloberfläche drücken, ist bei beiden Varianten des Versuches gleich, da derselbe Apfel aus der derselben Höhe fallen gelassen wird, d.h. mit dem gleichen Impuls auftrifft. Beim Experiment (a) ist die die Fläche der Querschnitt des Nagels. Diese geht reziprok in die Gleichung für  $p$  ein und bei konstantem  $F$  den Druck

$$p_a = \frac{F}{A_a} \quad (11)$$

erzeugt.

Beim Experiment (b) trifft der Apfel auf alle Nägel die innerhalb der senkrecht nach unten auf das Nagelbrett projizierten Silhouette des Apfels liegen, wodurch die Fläche  $A_b$  größer als  $A_a$  ist. Das können je nachdem wie dicht die Nägel stehen z.B. zehn Nagelquerschnitte sein. Für (b) ergibt sich somit ein auf die Apfeloberfläche ausgeübter Druck von

$$p_b = \frac{F}{A_b} = \frac{F}{10A_a} = \frac{1}{10}p_a \quad (12)$$

Der Druck ist also geringer, auf je mehr Nägel der Impuls des Apfels verteilt wird und desto kleiner ist somit die Eindringtiefe.

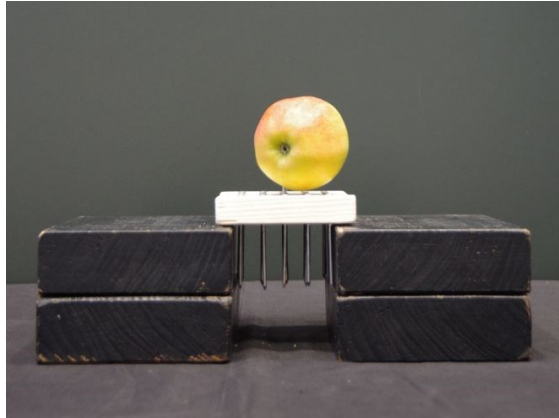


Abbildung 66: Apfel fällt auf einen Nagel (Bild: W. Winkler)

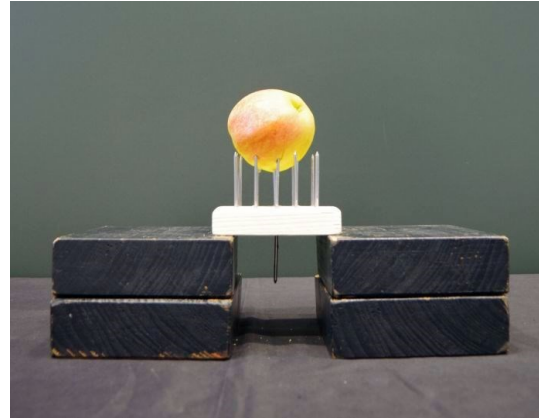


Abbildung 67: Apfel fällt auf mehrere Nägel (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Aufgrund seiner konvexen Form trifft der Apfel nicht auf alle Nägel innerhalb des senkrecht auf das Nagelbrett projizierten Apfelquerschnitts. Die Nägel in der Mitte müssen schon eine gewisse Tiefe eingedrungen sein, bevor die Nägel am Rand die Apfeloberfläche berühren. Daher ist die Anzahl der den Apfel berührenden Nägel zeitabhängig. Des Weiteren ist die wirksame Kraft von der Abbremszeit abhängig, welche von der Anzahl der beteiligten Nägel beeinflusst wird. Der tatsächliche Sachverhalt ist also komplizierter und die obigen Ausführungen stellen eine starke Vereinfachung dessen dar. [31]

## Sodawasser bläst Luftballon auf

### Material

- Flasche Sodawasser
- Luftballon

### Durchführung und Beobachtung

Ein Luftballon wird vollständig aufgeblasen um den Gummi etwas vorzudehnen. Danach wird die Luft wieder ausgelassen. Danach öffnet man eine frische Flasche Sodawasser und

stülpt den Luftballon mit seiner Öffnung über den Flaschenhals. Dabei achtet man darauf, dass der Luftballon gut am Flaschenhals sitzt. Schüttelt man dann die Flasche, bläht sich der Luftballon zu einer beträchtlichen Größe auf.

## Die Physik

Je höher der Druck ist, desto größer ist die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten. Das Gesetz von Henry (1803) beschreibt den quantitativen Zusammenhang zwischen Lösungskonzentration  $c_{Lösung}$  und Partialdruck  $p_{Gas}$  folgendermaßen:

$$c_{Lösung} = \alpha p_{Gas} \quad (13)$$

$\alpha$  ist hierbei der Löslichkeitskoeffizient, also eine Kennzahl für die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten.

Durch das Schütteln weisen Bereiche der Flüssigkeit einen niedrigeren Druck auf und das gelöste Kohlendioxid im Wasser perlt aus. Das Gas nimmt nach der Zustandsgleichung idealer Gase entsprechend der absoluten Umgebungstemperatur  $T$  und dem Umgebungsdruck  $p$  im Luftballon ein bestimmtes Volumen  $V$  ein:

$$V = N \frac{kT}{p} \quad (14)$$

( $N$ : Volumen, das das Gas einnimmt nach dem es aus der Lösung geht; Boltzmann Konstante  $k = 1,38066 \text{ J K}^{-1}$ )

In der Gasphase wird nun die Anzahl  $N$  der Kohlendioxidmoleküle durch das Ausperlen des Gases erhöht. Da Druck und Temperatur konstant bleiben folgt daraus eine Volumenzunahme und der Luftballon wird aufgeblasen. Das Volumen, das die Gasmoleküle im gelösten Zustand in der Flüssigkeit einnehmen und das durch das Ausschütteln des Gases kleiner wird, kann hier vernachlässigt werden. [31, 46]



Abbildung 68: austretendes Kohlendioxid bläst den Luftballon auf (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Das Volumen welches der Luftballon erreicht, ist erstaunlich groß, sodass oft das Volumen der Flasche übertroffen wird. Man kann das Volumen des aufgeblasenen Luftballons leicht über das Messen des Umfangs berechnen indem man eine Kugelform des Luftballons annimmt.

## Backpulverrakete

### Material

- Plastikflasche
- Backpulver
- Essig
- Gummistopfen
- dickere Strohhalm

### Durchführung und Beobachtung

Auf eine feste Unterlage werden die Strohhalm so ausgelegt, dass die ganze Länge der Plastikflasche darauf Platz hat und Rollen kann. In die leere Plastikflasche werden dann zwei

bis vier Packpulverpäckchen gefüllt. Darauf wird so viel Essig gegeben, dass das Backpulver ganz bedeckt ist und die Flasche wird anschließend rasch mit dem Gummistopfen verschlossen. Dann wird das ganze kräftig geschüttelt, damit das Backpulver und der Essig sich gut durchmischen. Dabei kann man beobachten wie das Backpulver und der Essig schäumen. Die Flasche wird dann horizontal auf die Rollen gelegt und nach kurzer Zeit, in der der Essig und das Backpulver miteinander reagieren, wird der Gummistopfen aus dem Flaschenhals getrieben. Die Flasche wird dabei in die entgegengesetzte Richtung geschossen.

### Die Physik/Chemie

Bei der Reaktion von Essig und Natriumhydrogencarbonat, woraus Backpulver besteht, entweicht Kohlendioxid unter starkem Aufbrausen. Diese gasförmige Kohlenstoffverbindung nimmt mehr Volumen ein, als gebunden im Backpulver und es entsteht in der verschlossenen Flasche ein Überdruck. Ist die Kraft durch diesen Druck groß genug um die Reibungskräfte zu überwinden, die den Gummistopfen im Flaschenhals halten, wird der Stopfen mit der Masse  $m_{\text{Stopfen}}$  mit der Geschwindigkeit  $v_{\text{Stopfen}}$  herausgeschossen. Dadurch wird ihm der Impuls

$$p_{\text{Stopfen}} = m_{\text{Stopfen}} v_{\text{Stopfen}} \quad (15)$$

übertragen. Ein kleiner Teil des Kohlendioxids wird ebenso mit dem Impuls  $p_{\text{CO}_2}$  aus der Flasche herausgetrieben. Die Flasche startet im ruhenden Bezugssystem des Raumes, wo das System Flasche und Stopfen den Impuls  $p_0 = 0$  hatte. Auf Grund der Impulserhaltung muss die Flasche den Impuls

$$p_{\text{Flasche}} = m_{\text{Flasche}} v_{\text{Flasche}} \quad (16)$$

erhalten, wobei

$$p_{\text{Stopfen}} + p_{\text{CO}_2} + p_{\text{Flasche}} = p_0 = 0 \quad (17)$$

gilt. Aus (17) folgt



$$p_{\text{Flasche}} = -(p_{\text{Stopfen}} + p_{\text{CO}_2}). \quad (18)$$

Daher bewegt sich die Flasche in die entgegengesetzte Richtung des Stopfens. Bei diesem Vorgang dienen die Strohhalmte der Verminderung der Reibung. Etwas von der Backpulver-Essig-Mischung wird durch die Trägheit ebenso aus der Flasche treten, was bei den obigen Überlegungen nicht berücksichtigt wurde.



Abbildung 69: Rakete vor dem Start (Bild: W. Winkler)



Abbildung 70: Rakete beim Start (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Um möglichst viel Druck in der Flasche zu erzeugen ist rasches Hantieren notwendig, damit nicht zu viel Gas aus der Flasche entweicht, bevor der Gummistopfen in den Flaschenhals gedrückt wurde. Die Unterlage sollte abwischbar sein, da das durch die Trägheit austretende Backpulver-Essig-Gemisch eine Pfütze hinterlässt. Eine mögliche Variante wäre, den Versuch in einem kleinen Wasserbecken durchzuführen. [31, 46]

## Gasbläschen im Sektglas

### Material

- Sektglas
- Sekt oder Sodawasser

## **Durchführung und Beobachtung**

Sekt oder Sodawasser wird in ein Sektglas gegossen. Nachdem das Glas gefüllt ist kann beobachtet werden, dass sich Gas in kleinen Bläschen in der Flüssigkeit sammelt und diese Bläschen dann, wenn sie eine bestimmte Größe erreicht haben, von ihrem Entstehungsort an der Glaswand perlchnurartig aufsteigen. Das Ablösen der Bläschen erfolgt in sehr regelmäßigen Abständen, die Blasen werden nach oben hin jedoch größer und schneller. An der Oberfläche zerplatzen die Bläschen dann mit einem Knistern und man spürt auf der Hand kleine Stiche, wenn die Tröpfchen auf der Haut landen.

## **Die Physik**

Der Inhalt des Glases ist eine Flüssigkeit, die mehr gelöstes Gas enthält, als es dem äußeren Luftdruck entspricht. Bei der Herstellung einer solchen mit gelöstem Gas übersättigten Flüssigkeit wird diese bei einem Druck von 2000 bis 3000 hPa mit Kohlendioxid versetzt und in Flaschen abgefüllt. Die Löslichkeit von Gas in Flüssigkeiten nimmt ja mit der Stärke des Luftdrucks zu. Über der Flüssigkeitsoberfläche stellt sich in der verschlossenen Flasche ein Gleichgewichtsdruck ein, bei dem im zeitlichen Mittel genauso viele Teilchen des Gases die Flüssigkeit verlassen, wie wieder von ihr aufgenommen werden. Daher entweicht das Gas aus der Flüssigkeit, wenn sich diese unter Normalbedingungen befindet. Eigentlich wäre ein unendlich hoher Druck für das Entstehen eines Bläschens nötig, da der Druck in einer Gasblase umgekehrt proportional zum Radius steigt. Der Grund dafür ist die Oberflächenspannung der Bläschenhaut, durch die jede Flüssigkeit versucht, bei vorgegebenen Volumen eine Form mit minimaler Oberfläche einzunehmen. Die Gasbläschen entstehen jedoch nicht an zufälligen Stellen, sondern an mikroskopisch kleinen Verunreinigungen oder Minifissuren auf der Glaswand. Diese Stellen enthalten meist selbst Luft und wirken als Keime für die Bildung von Blasen. Zu einer Ablösung des Bläschens von der Wand kommt es aber erst, wenn eine kritische Größe erreicht ist und die Auftriebskraft größer ist, als die Adhäsionskraft mit der die Gasblase an der Wand haftet. Dies geschieht sehr rasch, da die Auftriebskraft proportional zum Volumen, die Adhäsionskraft jedoch nur proportional mit der Oberfläche wächst. Die abgelöste Blase hinterlässt einen kleinen Gasrest, aus dem sofort wieder ein neues Bläschen heranwächst. Da das Ablösen bei Erreichen einer kritischen

Größe erfolgt, folgen die Blasen einander nach fast gleichen Zeitabständen nach, sind somit gleich groß und haben einen ähnlichen räumlichen Abstand. Beim Aufsteigen nimmt das Bläschen aus der umgebenden Flüssigkeit auch weiterhin Gas auf und nimmt daher an Volumen zu. Die Druckabnahme mit der Höhe der Flüssigkeitssäule ist hierbei vernachlässigbar klein um das Blasenwachstum zu erklären. Die Zunahme des Volumens hat nun eine Vergrößerung des Auftriebs und somit eine Beschleunigung zur Folge, wodurch die Bläschen nach oben hin schneller werden.

Für ein Bläschen gegebener Größe lässt sich die Steiggeschwindigkeit größenordnungsmäßig folgendermaßen abschätzen:

Auf ein kugelförmiges Bläschen wirkt die Auftriebskraft

$$F = V(\rho_F - \rho_G)g = V\rho g \quad (19)$$

mit  $V$  als dem Volumen der Blase,  $\rho_F$  als Dichte der Flüssigkeit,  $\rho_G$  als Dichte des Gases und  $g$  als Erdbeschleunigung. Hierbei wird angenommen, dass die Dichte des Gases im Verhältnis zur Dichte der Flüssigkeit vernachlässigbar klein ist. Im Allgemeinen behält das Bläschen beim Aufsteigen die Kugelgestalt bei, wobei die Auftriebskraft  $F$  durch die Stoke'sche Reibungskraft

$$F_R = 6\pi\eta r v \quad (20)$$

kompensiert wird.  $\eta$  (20 °C) =  $10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  ist die Viskosität der Flüssigkeit bei Normaltemperatur, der Radius  $r$  kurz nach dem Ablösen wird mit 0,1 mm angenommen und  $v$  ist die Geschwindigkeit, mit der das Bläschen aufsteigt. Setzt man (19) mit (20) gleich und löst nach  $v$  auf, erhält man

$$v = \frac{2g\rho r^2}{9\eta} = 2 \text{ cm s}^{-1} \quad (21)$$

Dieser Wert stimmt größenordnungsmäßig sehr gut mit den Beobachtungen überein.



*Abbildung 71: Gasbläschen steigen in einem Sektglas auf  
(Bild: pixabay.com)*

An der Oberfläche der Flüssigkeit zerplatzt das Bläschen mit dem charakteristischen Knistern, weil kleine Störungen die durch Oberflächenspannung entstandene „Flüssigkeits-haut“ zerstören können. Auf Grund des relativ hohen Gasdrucks im Bläschen werden dann kleine Flüssigkeitströpfchen weggeschleudert. Treffen diese auf die Haut, entziehen sie dieser eine verhältnismäßig große Verdunstungswärme und man spürt ein erfrischendes Kribbeln.

### **Anmerkungen**

In sehr reinen Gläsern wäre die Bläschenentwicklung eher unterentwickelt und der Sektgenuss wäre nicht komplett. Durch moderne Glasherstellungsverfahren werden sehr glatte Glasoberflächen erzeugt, die es notwendig machen, kleine Unregelmäßigkeiten einzubauen, damit das Perlen entsteht. [15, 47]

## **Material**

- Sektglas
- Sodawasser
- Rosinen

## **Durchführung und Beobachtung**

In ein Sektglas wird Sodawasser gefüllt und einige Rosinen dazugegeben. Die Rosinen sinken zum Boden des Glases. Nach kurzer Zeit beginnen die Rosinen in der Flüssigkeit aufzusteigen und nach kurzer Verweildauer an der Oberfläche wieder abzusinken. Dieser Zyklus wiederholt sich einige Zeit lang immer wieder.

## **Die Physik**

Da die Rosinen eine höhere Dichte als das Sodawasser aufweisen, sinken sie anfänglich zu Boden. Kommen die Rosinen am Glasboden an, beginnen sich Kohlendioxidbläschen an der Oberfläche der Rosinen zu sammeln. Die Oberfläche der Rosinen ist rau und stellt gute Kernbildungsstellen für die Entwicklung von Gasbläschen dar (siehe Versuch „Gasbläschen im Sektglas“). Durch die Adhäsionskraft zwischen Rosinenoberfläche und Flüssigkeitshaut um die Gasbläschen bleiben diese an den Rosinen haften und nehmen durch die Aufnahme von weiterem Kohlendioxid aus der umgebenden Flüssigkeit an Volumen zu. Sind die Bläschen groß genug, reicht die Auftriebskraft um die Rosinen aufsteigen zu lassen. Kommen die Gasbläschen an den Rosinen mit der Oberfläche in Kontakt, platzen sie und die Rosinen sinken wieder zu Boden und der Zyklus beginnt von Neuem. Lässt man das Glas lange genug stehen, steigen keine Rosinen mehr auf, da das Sodawasser schal wird und sich keine Gasbläschen an den Rosinen bilden können.



*Abbildung 72: Rosinen levitieren und sinken im Glas (Bild: W. Winkler)*

### **Anmerkungen**

Bei zu kohlenensäurehaltigen Getränken funktioniert dieser Versuch nicht, da sich Bläschen so rasch bilden, dass die Rosinen keine Zeit mehr haben, auf den Boden zu sinken. Dieser Versuch gelingt mit gekochtem Reis auch sehr gut. Dieser weist mehr Kernbildungsstellen als roher Reis auf. [16]

### Schaumbildung in nassem und trockenem Glas

#### **Material**

- 500 ml Bier
- 2 Bechergläser 1000 ml
- 2 Bechergläser 250 ml
- Mehl
- Olivenöl

## Durchführung und Beobachtung

Ein großes Becherglas wird innen mit einer Schicht Olivenöl versehen, das andere innen mit Mehl eingestaubt. Das Bier wird in die beiden kleineren Bechergläser aufgeteilt und rasch aus etwas größerer Höhe in jeweils ein großes Becherglas geschüttet. Das Bier im mit Öl benetzten Glas schäumt viel weniger, als das mit Mehl ausgekleidete.

## Die Physik

Bier stellt eine mit Kohlendioxid übersättigte Flüssigkeit dar (siehe Versuch "Abgestandenes Bier in Vakuum"). Die Gesetze der Thermodynamik begünstigen zwar den Übergang aus dem gelösten Zustand in die Gasform, aber da die Bläschenbildung klein anfangen muss, herrscht in den kleinen Bläschen ein so großer Druck durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeitskugelschale, dass das Gas genauso schnell wieder in die gelöste Form zurückgedrängt wird, wie es sich bildet. Der Überdruck sinkt mit wachsendem Kugelradius. Sind Kernbildungsstellen wie Kratzer, Staubkörner oder Fasern vom Geschirrtuch vorhanden entstehen an diesen hydrophoben Stellen „Gastaschen“. Erreicht so eine Gastasche eine kritische Größe kommt es nicht mehr zum Kollaps und ein Kohlendioxidbläschen entsteht. Sind viele solcher Kernbildungsstellen vorhanden kommt es zu einem Kaskaden-Effekt und es werden durch die Bläschen selbst noch mehr Gasblasen freigesetzt. Die Flüssigkeit schäumt dann entsprechend stark, was man am Becherglas mit Mehl gut beobachten kann. Ist das Glas jedoch nass oder wie bei diesem Versuch mit Olivenöl benetzt, sind alle Störungsstellen mit einem Feuchtigkeitfilm überzogen und die Diffusion der Kohlendioxid zu den Gastaschen geht nur langsam vor sich. Es entstehen zwar schon noch Bläschen, aber der Kaskaden-Effekt bleibt aus und die Schaumbildung ist nicht mehr so stark. [16]



Abbildung 73: Vor dem Versuch (trockenes Glas links, nasses Glas rechts) (Bild: W. Winkler)



Abbildung 74: Vergleich der Schaumentwicklung (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Aus diesem Grund werden Weißbiergläser vor dem Einschenken immer ausgespült. Werden Millionen Keimbildungszentren in Form von einem Löffel Kristallzucker in das Getränk gegeben, fällt die Schaumbildung besonders explosiv aus.

## Radler mischen

### Material

- Bier
- Limonade
- 2 Bechergläser 1000 ml
- 2 Bechergläser 250 ml

### Durchführung und Beobachtung

Das Bier wird in je ein großes und ein kleines Becherglas aufgeteilt. Mit der Limonade verfährt man ebenso. Dann schüttet man die Limonade schwungvoll in das große Becherglas mit Bier. Die Mischung schäumt heftig auf. Anschließend gießt man ebenso rasch das Bier in das große Becherglas mit Limonade. Die Schaumentwicklung ist nicht so heftig wie vorher.



## Die Physik

Bier enthält sogenannte oberflächenaktive Substanzen wie Proteine und andere langkettige Moleküle, welche die Schaumbläschen stabilisieren und so eine schöne Schaumkrone formen helfen. Wird Limonade in das Bier geschüttet, sinkt es zu Boden. Von dort steigt es unter Bläschenbildung wieder hoch. Die Bläschen nehmen beim Aufsteigen die oberflächenaktiven Substanzen des Bieres mit und bilden mit deren Hilfe auf der Oberfläche des Bieres eine beträchtliche Schaumschicht. Während des Einschenkens zerfallen zwar einige Schaumbläschen an der Oberfläche wieder, aber durch die stabilisierenden Substanzen im Bier entsteht mehr Schaum, als in dieser Zeit zerfällt (siehe Versuch „Bierschaumzerfall“). Das in die Limonade gegossenen Bier sinkt zwar auch auf den Boden des Becherglases, aber die freigesetzten Gasbläschen steigen durch die Limonade, die keine oberflächenaktiven Substanzen enthält hoch und platzen an der Oberfläche der Flüssigkeit recht bald. Das Getränk schäumt weniger als jenes vorhin, da sich die Flüssigkeit sich schon etwas beruhigt hat bis ausreichend Bier in den oberen Schichten angekommen ist.



Abbildung 75: Vor dem Versuch (Bild: W. Winkler)



Abbildung 76: Vergleich der Schaumentwicklung (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Für die Schaumbildung ist auch die Heftigkeit des Einschenkens ausschlaggebend. Daher sollte beide Male gleich zügig eingeschenkt werden. Die Bechergläser in welche hineingeleert wird, sollten ausreichend hoch sein, da man die Schaumentwicklung nicht unterschätzen sollte. [16]

## Schlag auf Bierflasche

### **Material**

- 2 Bierflaschen

### **Durchführung und Beobachtung**

Die Bierflaschen sollten ruhig gelagert und gekühlt sein, damit der Versuch gut gelingt. Beide Flaschen werden geöffnet und in der Hand gehalten. Mit dem Boden der einen Bierflasche wird auf die Öffnung der anderen Flasche gestoßen. Der Stoß sollte kurz und nicht zu zaghaft, aber wegen der Glasbruchgefahr auch nicht zu fest sein. Beim Zusammenstoß steigen kleine „Gaswölkchen“ vom Boden der unteren Flasche auf und sie schäumt über, während bei der oberen Flasche nichts passiert.

### **Die Physik**

In beiden Flaschen bildet sich durch den Stoß eine Schallwelle aus, welche von Anstoßpunkt durch die ganze Flüssigkeit wandert. In der unteren Flasche wird diese Schallwelle am Flaschenboden reflektiert und wandert dann wieder zum Flaschenhals. Dabei entsteht eine stehende Welle mit Volumenelementen der Flüssigkeit, die an Schwingungsknoten ständig in Ruhe sind und an Schwingungsbäuchen mit maximalen Amplitude schwingen. Die Teilchen bleiben hier jeweils ortsfest. Dadurch entstehen in der Flasche Bereiche mit unterschiedlichem Druck. Aus den Niederdruckbereichen wird Kohlendioxid freigesetzt, ähnlich dem Öffnen einer Mineralwasserflasche. Das Gas steigt dann auf und bringt die Flasche zum Überschäumen. In der oberen Flasche kann sich keine stehende Welle ausbilden, da die Schallwellen an der Öffnung der Flasche nicht reflektiert werden.



Abbildung 77: Bier schäumt nach dem Schlag über (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Für diesen Versuch ist jede Biersorte geeignet, aber mit Weizenbier funktioniert der Versuch am besten. Zur Vorsicht, sollte man wegen möglicher Glassplitter das Bier nachher nicht trinken. [48]

## Cola und Mentos

### Material

- 1,5 l Flasche Cola light
- 1 Rolle Mentos-Pfefferminzzuckerl

### Durchführung und Beobachtung

Die Flasche Cola light wird auf einem großen Platz im Freien so auf den Boden gestellt, dass sie nicht umfallen kann. Öffnet man die Rolle Mentos und wirft alle Zuckerl gleichzeitig in die Flasche, schießt eine Fontäne Cola einige Meter senkrecht aus der Flasche.

### Die Physik

Cola light besteht im Wesentlichen aus Wasser, Phosphorsäure, Süßstoff und Kohlendioxid in Lösung. Ursprünglich war die Theorie, dass Gummiarabikum und Gelatine, die in den

Zuckerl enthalten sind, die Oberflächenspannung der Flüssigkeit, die alle Bläschen zurückhält, aufbrechen und dem Kohlendioxid ermöglicht sich in große Gasblasen auszudehnen und sehr schnell freizusetzen. Doch dieser Vorgang wäre nicht heftig genug, um die beobachtete Fontäne zu erklären. Die Ursache ist in der Oberflächenbeschaffenheit der Zuckerl zu finden. Winzige Dellen, die man auch beim Lutschen spürt, überziehen die gesamte Oberfläche der Mentos. Diese Dellen wirken als Kernbildungsstellen für die Freisetzung von Kohlendioxid aus der Flüssigkeit (siehe Versuch „Gasbläschen im Sektglas“). Zusätzlich haben die Zuckerl eine größere Dichte als das Cola und sinken schnell auf den Boden der Flasche. Dabei kommen sie mit einer großen Menge der Flüssigkeit in Kontakt und setzen mehr Kohlendioxid frei. Die entstandenen Bläschen wirken selber wieder als Störung des Gleichgewichtszustandes der Lösung und mehr Gasbläschen entstehen. Das freiwerdende Kohlendioxid nimmt mehr Volumen als das gelöste ein und der Druck in der Flasche steigt. Der einzige Weg den Druck auszugleichen ist ein rasches Ausströmen der Flüssigkeit durch die Flaschenöffnung und eine riesige Fontäne schießt für mehrere Sekunden aus der Flasche.

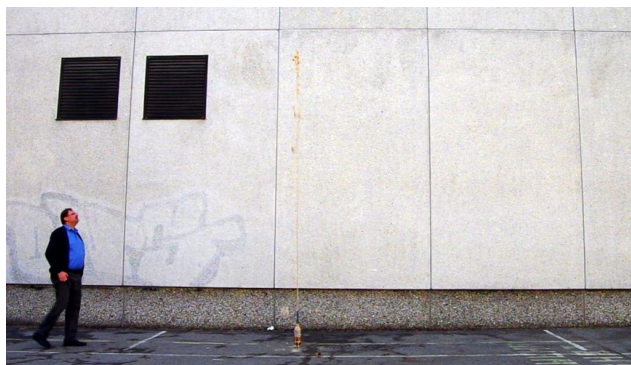


Abbildung 78: Cola-Fontäne (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Man kann die Zuckerl mit Hilfe eines Blattes Papier, das man zu einer Rolle geformt hat einfach und schnell in die Flasche befördern. Bei diesem Versuch wurde eine eigens angefertigte Vorrichtung verwendet. In ein Plastikrohr mit einem etwas größerem Durchmesser als die Mentoszuckerl wurde innen ein Gewinde geschnitten, sodass man das Röhrchen auf die Flasche schrauben kann. Das Röhrchen hat die Länge einer Mentosrolle und besitzt an der Unterseite kurz über dem Gewinde zwei Bohrungen, durch die man eine Klammer an

einer Schnur durchschieben kann. Diese Klammer dient zum Fixieren der Mentos. Mit einem Zug am Faden kann man so aus einiger Entfernung die Zuckerl freigeben und diese fallen in die Flasche. Zusätzlich verjüngt sich das Röhrchen an der Oberseite, sodass eine Düse entsteht, durch die die Fontäne noch höher wird. Aus Erfahrung weiß man, dass dieser Versuch mit light-Getränken besser funktioniert, als mit zuckerhaltigen. Auch sind diese Getränke nicht so klebrig, was das Säubern sehr erleichtert. Das in light-Getränken enthaltene Aspartam erniedrigt die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und vergrößert dadurch die Fontäne. Koffein hat keinen Einfluss auf dieses Phänomen. [16, 49]

### Bierschaumzerfall

#### **Material**

- 1 Flasche dunkles Weißbier
- 2 Bechergläser 2000 ml
- Lineal
- Klebeband

#### **Durchführung und Beobachtung**

Das Becherglas wird gründlich ausgespült, damit sich keine Spülmittelreste mehr darin befinden. Gut abgetrocknet wird es auf eine feste Unterlage gestellt und das Lineal daran senkrecht mit Klebeband befestigt. Leert man das dunkle Weißbier zügig aus einiger Höhe in das Becherglas, entsteht eine mächtige Schaumkrone auf der dunklen Flüssigkeit. Dann wird die Schaumhöhe zu Beginn, nach zehn Sekunden und dann alle fünfzehn Sekunden bis der Schaum fast ganz zerfallen ist notiert. Dabei ist zu beachten, dass sich sowohl die obere als auch die untere Schaumgrenze im Laufe der Zeit verschiebt. Trägt man die Schaumhöhe in einem Diagramm gegen die Zeit auf, ergibt sich eine Exponentialkurve.

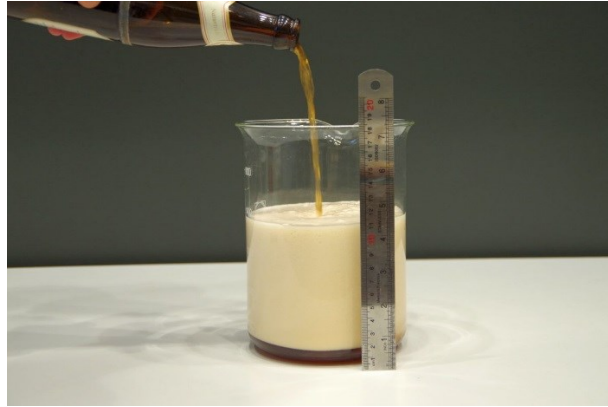


Abbildung 79: Bildung des Bierschaumes (Bild: W. Winkler)

## Die Physik

Durch das zügige Einschenken entsteht eine mächtige Schaumkrone. Eventuelle Spülmittelreste würde das beeinträchtigen, da diese die Oberflächenspannung herabsetzen und die Schaumbläschen zerstören. Im Vergleich zum äußeren Luftdruck herrscht in den Schaumbläschen ein Überdruck (siehe Versuch „Schaumbildung in nassem und trockenem Glas“). In Folge der Schwerkraft fließt mit der Zeit immer mehr Flüssigkeit vom oberen in den unteren Teil der Bläschenhaut. Entstehen Inhomogenitäten in der Dicke der Wand, platzt das Bläschen aufgrund des Überdrucks. Die Flüssigkeit der Bläschenhaut geht dann in die restliche Flüssigkeit unter der Schaumkrone über. Alle Bläschen besitzen somit eine Zerfallswahrscheinlichkeit  $\lambda$ . Damit kann man den Anteil  $d$  aller Bläschen  $n$ , der in der Zeit  $dt$  zerfällt mit

$$dn = -\lambda n dt \quad (22)$$

Beschreiben. Durch Integration ergibt sich (22) zu

$$n = n_0 e^{-\lambda t} \quad (23)$$

mit  $n$  als Anzahl der Schaumbläschen zur Zeit  $t$  und  $n_0$  als Anzahl der Schaumbläschen zu Beginn. Da die Schaumhöhe proportional zur Anzahl der Bläschen ist, kann man den exponentiellen Zerfall auch anhand dieser darstellen (siehe Abbildung 80: Exponentieller Zerfall des Bierschaumes). [30]

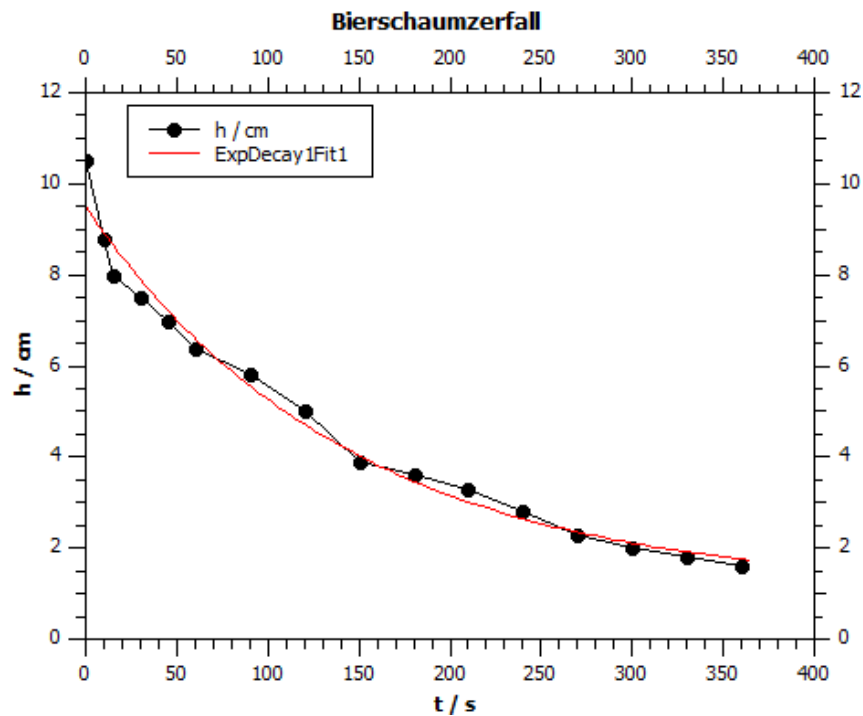


Abbildung 80: Exponentieller Zerfall des Bierschaumes

## Milch aus der Packung leeren

### Material

- Packung Milch
- Glas

### Durchführung und Beobachtung

Gießt man die Milch aus einer Milchpackung verschieden schnell aus, so beobachtet man, dass bei langsamen Einschenken die Milch am Rand der Packung hängenbleibt, die Wand der Verpackung entlangläuft und neben dem Glas landet. Leert man die Packung jedoch zügig, so läuft die Milch ungehindert in das Glas.

## Die Physik

Beim Kippen der Verpackung steigt der Flüssigkeitspegel darin und reicht bei ausreichender Neigung der Packung bis zur Öffnung. Neigt man die Packung weiter, wirkt auf die Milch eine Kraft durch die nachrinnende Milch und diese erzeugt einen Druck an der Öffnung. Neben dieser Kraft wirken dort auch Kräfte der Oberflächenspannung auf die Milch, die sie zur Schachtelwand hinziehen. Leert man die Packung schnell aus, kann der Druck der Milch in der Packung eine größere Kraft als die Oberflächenspannung ausüben und die Milch läuft in einer berechenbaren Parabel in das Glas. Bei geringerer Fließgeschwindigkeit kann die Oberflächenspannung den Strahl ablenken und die Milch setzt sich am oberen Rand der Milchpackung fest. Dadurch und in Folge des Coandă-Effektes bleibt dort immer mehr Flüssigkeit hängen.

1930 hat Henri-Marie COANDĂ herausgefunden, dass ein strömendes Medium einer flachen oder einer leicht von der Strömung weggekrümmten Oberfläche in seiner Nähe folgt. Dies kann man zum Beispiel daran beobachten, indem man einen Löffelrücken vertikal unter den Strahl eines Wasserhahnes hält. Der Wasserstrahl wird entlang der Krümmung des Löffelrückens abgelenkt und man spürt, dass der Löffel etwas zum Strahl hingezogen wird. Daher fließt die Milch beim langsam Ausgießen entlang der Packungswand und landet neben dem Glas. Das „Gluckern“ beim Ansaugen der nach Innen strömenden Luft darf hier auch nicht unberücksichtigt bleiben. Dadurch schwankt der Flüssigkeitsstrom und führt auch bei höherem Gießtempo zum Anhaften an der Oberfläche und zum Verschütten der Flüssigkeit.





Abbildung 81: Milch läuft an der Packungswand entlang (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Den Coandă-Effekte kann man auch dabei beobachten, indem man eine Kerze hinter einem schmalen Zylinder wie zum Beispiel eine Weinflasche auszublasen versucht. Die Kerze ist hinter dem Zylinder scheinbar vor dem Luftstrom geschützt, aber dennoch wird die Flamme erlöschen, da der Luftstrom an der Zylinderwand anhaftet. [16, 50]

## Butter mit Zentrifuge herstellen

### Material

- Vollmilch
- Zentrifugen Röhren 50 ml (Corning CentriStar™)
- Eppendorf-Reaktionsgefäße 1,5 ml
- Mikrozentrifuge Z300, Hermle Labortechnik
- Hochgeschwindigkeitszentrifuge Eppendorf 5804 R
- kleiner Löffel

## Durchführung und Beobachtung

Je 50 ml Vollmilch wird in zwei Zentrifugen Röhren gegeben und das Ganze in die Mikro-zentrifuge gestellt. Dann wird die Zentrifuge bei 13500 Umdrehungen pro Minute für 5 Minuten laufen gelassen. Nach Ende des Zentrifugier Vorgangs kann man erkennen, dass sich in den oberen Bereichen der Gefäße eine dunklere, sämigerere Flüssigkeitsschicht entwickelt hat. Dieser Teil der Flüssigkeit wird entnommen und in kleine Eppendorf-Gefäße überführt. Nun wird für 10 Minuten bei 14000 Umdrehungen pro Minute in der Hochgeschwindigkeit-zentrifuge zentrifugiert. Aus dem oberen Teil des Reaktionsgefäßes kann man nun den Rahm abschöpfen. Im unteren Teil des Eppendorf-Gefäßes bleibt eine leicht trübe Flüssigkeit zurück.

## Die Physik

Milch ist eine Fett-in-Wasser-Emulsion und besteht zu ca. 88 % aus Wasser und zu 3 bis 5,6 % aus Fett. Der Rest sind Proteine und Kohlenhydrate sowie anorganische Salze. Butter wird aus dem Rahm, also dem fetthaltigen Milchbestandteil durch Schlagen gewonnen und stellt eine Wasser-in-Fett-Emulsion dar. Den Rest nennt man Magermilch. Da Magermilch eine höhere Dichte als Rahm hat, kann man die beiden Bestandteile durch Zentrifugieren trennen. Gibt man nun Vollmilch in die Zentrifuge, bleibt dichtere Magermilch unten im Gefäß zurück und der spezifisch leichtere Rahm setzt sich oben ab.



Abbildung 82: Zentrifugen Röhren mit Vollmilch in der Mikrozentrifuge (Bild: W. Winkler)

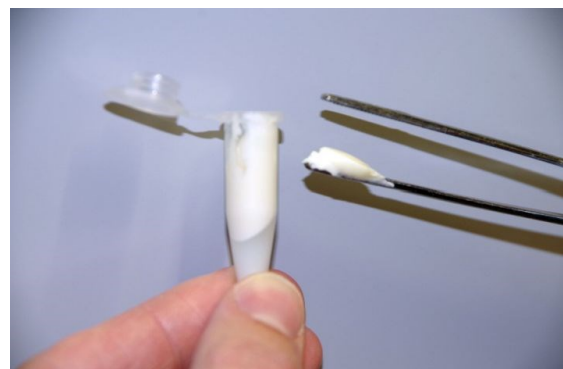


Abbildung 83: Zentrifugierter Rahm (Bild: W. Winkler)

## **Anmerkungen**

Dieser Versuch klappt nur mit Vollmilch, da hier der Rahm noch zu einem größeren Teil in der Milch ist. Die Konsistenz des in diesem Versuch erhaltenen Rahms war in etwa die einer sehr streichfähigen Butter. [51]

[Sektflasche sabrieren](#)

## **Material**

- Flasche Sekt oder Champagner
- Champagnersäbel Laguiole L'Eclair

## **Durchführung und Beobachtung**

Bei einer gekühlten und nicht geschüttelten Flasche Sekt oder Champagner wird der dünne Metallmantel vom Korke und der Drahtkorb entfernt. Dann nimmt man die Flasche so in die nichtdominante Hand, dass der Flaschenhals in einem flachen Winkel von sich weg zeigt. Die Finger stützen dabei die Flasche von unten und der Daumen greift die Vertiefung am Flaschenboden, damit man die Flasche gut halten kann. Der Arm ist gestreckt und die Naht der Flasche zeigt nach oben. Dann nimmt man den Champagnersäbel in die andere Hand und legt die Klinge in einem Winkel von etwa zwanzig Grad an die Stelle auf die Naht, wo sich die Flasche verjüngt. Dann führt man den Säbel mit einer schwungvollen Bewegung entlang der Flasche in Richtung Flaschenhals. Trifft der Säbel auf den Wulst des Flaschenkopfes, fliegt dieser zusammen mit den Korke und etwas Flüssigkeit nach vorne weg und der Inhalt kann getrunken werden.

## **Die Physik**

Glas wird aus einer Siliziumdioxidschmelze der man Soda und Kalk hinzufügt, gewonnen und ist ein amorpher Festkörper ohne periodischer Anordnung Teilchen. Die Eigenschaften

dieser Stoffe weichen von denen der übrigen Festkörper ab, sodass man sie als unterkühlte Flüssigkeiten bezeichnet. Die Zugfestigkeit von Glas beträgt 30 bis 100 N mm<sup>-1</sup> und wird stark von Störstellen wie mikroskopische Risse und Kerben beeinflusst. Die Naht an der Flasche entsteht bei der Fertigung und ist eine Unregelmäßigkeit im Material und dadurch eine Schwachstelle. Bei der Herstellung von Sekt oder Champagner entsteht durch den Gärungsprozess Kohlensäure, wodurch in den Flaschen ein Druck von 3,5 bis 7 bar herrscht. Trifft der Champagnersäbel auf den Wulst des Flaschenkopfes, übt dieser eine große Kraft auf die Stelle aus und die Elastizitätsgrenze wird überschritten. Das Versagen tritt wie bei allen spröden Stoffen schlagartig ein und der Kopf des Flaschenhalses wird zusätzlich durch den Druck in der Flasche mit einer Geschwindigkeit von bis zu 200 km h<sup>-1</sup> weggeschleudert. Dabei sind Weiten von 20 m nicht unüblich. Der Bruch ist meistens sehr glatt und eventuelle Glassplitter werden von der herauslaufenden Flüssigkeit mitgerissen, sodass der Inhalt der Flasche getrunken werden kann.



Abbildung 84: Sabrieren der Sektflasche (Bild: W. Winkler)



Abbildung 85: Geköpft Sektflasche mit Champagnersäbel (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Der Ursprung des Sabrierens geht möglicherweise auf die französische Kavallerie unter Napoleon zurück, die dies sogar im vollen Galopp durchgeführt haben sollen. Heute wird diese Tradition vor allem von der Bruderschaft Confrérie du Sabre d'Or fortgesetzt. Das Sabrieren sollte man nicht im alkoholisierten Zustand durchführen und darauf achten, dass sich keine Personen oder Gegenstände in der Schusslinie befinden. Beim Entsorgen der geköpften Flasche sollte man sicherstellen, dass die Bruchkante keine Verletzungen verursachen

kann. In Frankreich ist es üblich, nach dem Öffnen der Flasche mit dem Säbel den Flaschenkopf mit dem Korken mit dem Datum zu versehen und als Glücksbringer aufzubewahren. [17, 46, 52-54]

## Portweinzange

### **Material**

- Flasche Portwein
- Portweinzange
- Bunsenbrenner
- Becherglas mit kaltem Wasser
- Eiswürfel
- Tuch

### **Durchführung und Beobachtung**

Die Ummantelungen des Flaschenhalses werden entfernt und die Flasche auf eine feste Unterlage gestellt. In das Becherglas mit Wasser werden einige Eiswürfel gelegt und das Tuch darin eingeweicht. Der vordere Teil der Portweinzange wird dann in die Flamme eines Bunsenbrenners oder eines offenen Feuers gehalten. Glüht die Zange, wird mit ihr der Hals der Flasche kurz über dem unteren Ende des Korkens gepackt. Man hält ihn mindestens eine halbe Minute fest, damit das Glas an der Stelle schön heiß wird. Dann wird die Zange weggelegt und das Tuch aus dem Wasser genommen und ausgedrückt. Damit umschließt man die heiße Stelle und ein Knacken ist zu hören. Dann hält man den Flaschenhals fest und kann das obere Stück mit dem Korken einfach abziehen.

### **Die Physik**

Portweinzangen werden aus Eisen gefertigt. Glüht das Material, liegt eine Temperatur von mindestens 800 K vor. Umfasst man mit der glühenden Zange den Flaschenhals, erhitzt sich

das Glas sehr schnell und es kommt zu Wärmedehnung des Materials. Dabei nimmt die Amplitude der schwingenden Moleküle zu und das Volumen des Stoffes vergrößert sich, da sich der gegenseitige Abstand der Moleküle vergrößert. Wird der äußere Bereich des Flaschenhalses mit dem eiswassergetränkten Tuch schnell abgekühlt, während der Innere noch heiß ist, kommt es zu Spannungen zwischen den Bereichen. Überschreiten diese Spannungen durch einen großen Temperatursprung einen gewissen Wert, kommt es zu Rissen im Material und zum Bruch.



Abbildung 86: Heiße Portweinzange um den Flaschenhals (Bild: W. Winkler)



Abbildung 87: Kopf des Flaschenhalses bricht durch das kalte Tuch (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Vintage Port ist für jahrelange Lagerung vorgesehen, damit sich der Wein mit dem beige-mengten Branntwein Zeit hat sich zu „vermählen“ und zu reifen. Es gibt die Tradition eine Kiste Portwein in den Keller zu legen, wenn ein Sohn auf die Welt kommt und den Wein erst wieder hervorzuholen, wenn der Sohn erwachsen ist. Daher kann es oft sein, dass der Korken schon sehr weich und mürbe ist, dass er mit herkömmlichen Methoden nicht aus der Flasche zu bekommen ist. Stilvoller ist es, statt eines Tuches eine in kaltes Wasser getauchte Feder zu nehmen und damit über die erwärmte Stelle am Flaschenhals zu streichen. Das Glas springt meist so sauber, dass keine Splitter entstehen. [17, 55, 56]

## Mit Brot radieren

### **Material**

- Weizenbrot
- Papier
- Bleistift

### **Durchführung und Beobachtung**

Mit einem Bleistift wird eine Fläche auf dem Papier schraffiert. Einigen weiche Brocken aus dem Inneren des Brotes werden fest zusammengedrückt, sodass eine kompakte Kugel entsteht. Mit diesem Brotklumpen reibt man dann über die Bleistiftschraffur und kann beobachten, wie die dunklen Flächen verschwinden.

### **Die Physik**

Weizenbrot enthält einen hohen Anteil an Glutamin. Glutamin ist eine Aminosäure mit ungeladenen polaren amid-tragenden Seitenketten und hat eine bindende Wirkung. Daher bleiben die Graphit-Ton-Teilchen des Bleistiftstriches an dem klebrigen Protein haften, wenn man mit dem Brot über die Schraffur reibt.



*Abbildung 88: Brot radiert den Bleistiftstrich aus (Bild: W. Winkler)*

## **Anmerkungen**

Glutaminhaltige Substanzen werden in der Chemie zu Reinigungszwecken genutzt. Speiseöl, Erde oder Marmelade lassen sich ebenso mit Brot wieder entfernen. [4, 46]

### Teeblätter in der Mitte der Tasse

#### **Material**

- Tasse
- Löffel
- heißes Wasser
- Teeblätter

#### **Durchführung und Beobachtung**

In eine Tasse werden einige kleine Teeblätter gegeben und mit heißem Wasser aufgegosen. Dann rührt man den Tee um und beobachtet, dass die Teeblätter mit der Flüssigkeit mitkreisen. Nimmt man den Löffel aus der Tasse, kann man sehen, dass sich die Teeblätter in der Mitte der Tasse auf dem Boden sammeln. Je heftiger man rührt, desto schneller lagern sich die Blätter in der Bechermitte ab.

#### **Die Physik**

Aus der Intuition heraus würde man erwarten, dass die Teeblätter in der kreisenden Flüssigkeit nach außen treiben. Durch das Umrühren mit dem Löffel wird die Flüssigkeit stetig beschleunigt und aufgrund der Reibungskraft zwischen den Teeblättern und dem Wasser werden auch diese mitbeschleunigt. Die Rotation drängt die Flüssigkeit nach außen und am Rand wird der Druck erhöht. Das kann man deutlich an der Einbuchtung im Zentrum der kreisenden Oberfläche erkennen. Damit die umgerührte Flüssigkeit und die Teeblätter in der Tasse bleiben, muss der durch die Rotation erzeugte Zentrifugal- beziehungsweise



Trägheitskraft ein Druckgefälle im Inneren entgegenwirken. Die Flüssigkeit in der Tasse kann man sich als äquidistante, konzentrische Zylindermantelschichten infinitesimaler Dicke um die Mittelachse aufgeteilt vorstellen. Die von der Tassenwand ausgeübte Kraft  $F$  wird auf die Grenzfläche der nach innen folgenden Wasserschicht der Fläche  $A$  weitergegeben. Auf die äußere Wasserschicht übt die Innenwand der Tasse daher einen Druck

$$p = \frac{F}{A} \quad (24)$$

aus. Es gilt:

$$F = m(r)\omega^2 r \quad (25)$$

und

$$A = 2\pi r h \quad (26)$$

Dabei ist  $m(r)$  und  $\omega$  die Masse und die Winkelgeschwindigkeit der Wasserschicht,  $r$  der Abstand der Flüssigkeitsschicht zur Tassenmittelachse und  $h$  die Wassertiefe in der Tasse. Da das Volumen und somit auch die Masse der Wasserschichten nach innen hin kleiner werden, nimmt der Druck zur Mitte der Tasse hin ab da  $p \propto m(r)$ . Die Teeblätter folgen dem Druckgradienten bis die Kraft aus diesem Druckgradienten gleich der Zentripetalkraft ist, die für die Kreisbewegung erforderlich ist und es stellt sich ein stabiles Gleichgewicht ein. Dies nennt man Druck-Impuls-Gleichgewicht in rotierenden Flüssigkeiten.

Zieht man den Löffel aus der Tasse, werden die Flüssigkeit und damit die Teeblätter nicht mehr beschleunigt und Wasser als auch Teeblätter reiben mit Tassenboden. Da der Reibungskoeffizient zwischen Teeblätter und Tassenboden größer ist, als der Reibungskoeffizient zwischen Wasser und Tassenboden, werden die Teeblätter stärker abgebremst. Da die Winkelgeschwindigkeit der Teeblätter kleiner geworden ist, ist auch die für eine Kreisbewegung erforderliche Zentripetalkraft kleiner geworden und das Kräftegleichgewicht ist gestört. Daraus folgt, dass das Teeblatt sich in infinitesimalen kleinen Schritten nach innen bewegt, bis das Kräftegleichgewicht wieder erreicht ist und es in der Mitte der Tasse zur Ruhe kommt.

An der Oberfläche reibt sich das Wasser nur mit der Luft und diese Reibung ist viel schwächer als die Reibung am Boden der Tasse oder an den Wänden. Es herrscht also im oberen Bereich der Tasse ein hoher Druck nach außen und ein kleiner in Bodennähe. Dadurch werden einerseits sich an der Oberfläche befindliche Teeblätter nach außen gedrückt und andererseits auch zum Boden der Tasse hin. Es entsteht somit eine Zirkulationsströmung der Flüssigkeit senkrecht zum Boden in der die umgerührte Flüssigkeit über die Oberfläche nach außen, die Wände der Tasse hinunter, den Tassenboden einwärts und in der Mitte wieder hinaufläuft. Dadurch und durch die Gravitation sammeln sich auch Teilchen welche schwerer als Wasser sind in der Mitte des Tassenbodens.



*Abbildung 89: Teeblätter sammeln sich nach dem Umrühren in der Mitte der Tasse (Bild: W. Winkler)*

### **Anmerkungen**

Diese Ansammlung von Partikeln wird als hydrodynamische Grenzschicht bezeichnet. Bei Gefäßen mit optimal glatten Oberflächen, wäre dieser Effekt viel schwächer ausgeprägt. Eine technische Anwendung findet dieses Phänomen bei der Anreicherung von Uran 235 in Gaszentrifugen. Die hier wirkenden Kräfte sind auch dafür verantwortlich, dass sich Staub in der Wohnung, oder Laub auf der Straße an bestimmten Stellen sammelt. [8, 16, 31]

## 3.4 Versuche zu Elektrodynamik, Magnetismus

### Leuchtendes Essiggurkerl

#### **Material**

- Essiggurke
- Teller
- Kabel mit Krokodilklemmen
- Schweißdrahtstücke
- zweipoliger Ausschalter (Leybold 504 50)
- Steckdose mit 230 V

#### **Durchführung und Beobachtung**

In die Enden der Essiggurke, die auf einem Teller liegt, steckt man ein Stück Schweißdraht und klemmt die Kabel daran an. Austretende Flüssigkeit wird weggewischt. Über einen zweipoligen Ausschalter wird an die Kontakte Netzspannung angelegt und das Essiggurkerl beginnt zu leuchten.

#### **Die Physik**

Essiggurken enthalten eine Menge Natriumchlorid durch das Einlegen in Essig, Gewürzen und Salz. Legt man Strom an, so kommt es zu einer starken lokalen Erwärmung und die salzhaltige Flüssigkeit in der Gurke verdampft. Natrium-Atome werden so in einen elektronisch angeregten Zustand gebracht und emittieren bei der Rückkehr in den Grundzustand (Übergang  $3p \rightarrow 3s$ ) Licht diskreter Wellenlängen. Hier ist dies gelbes Licht mit einer Wellenlänge von 590 nm, das charakteristisch ist für die Natrium-D-Linien Emission. Genauer gesagt, setzt sich diese Linie aus dem Duplett der  $D_1$ - und  $D_2$ -Linie zusammen.



Abbildung 90: Leuchtendes Essiggurkerl (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Bei diesem Versuch muss darauf geachtet werden, dass die Elektroden sich nicht berühren und mindestens einen Abstand von 2 cm haben. Besser sichtbar ist das Leuchten, wenn man den Raum etwas abdunkelt. Natrium-Dampflampen als Straßenbeleuchtung weisen ebenso diese weiche, gelbliche Farbe auf. Mit einem Spektroskop lässt sich das Emissionsspektrum der gelben Natriumflamme bei einer Prüfung auf Natrium-Ionen über eine Flammenfärbung als Linie beobachten. [57-59]

### Würstel mit Strom grillen

#### Material

- Frankfurter Würstel
- Teller
- zweipoliger Ausschalter (Leybold 504 50)
- Krokodilklemmen
- Schweißdraht
- Steckdose mit 230 V

## Durchführung und Beobachtung

Das Frankfurter Würstel wird mit Hilfe der Krokodilklemmen, der Schweißdrähte und des zweipoligen Ausschalters in einen Stromkreis eingebaut. Kurz nach Anlegen der Netzspannung wird das Würstel heiß und beginnt zu zischen. An den Kontaktstellen verkohlt die Wursthaut und es tritt Rauch auf.

## Die Physik

In der Wurst liegen Natriumchlorid-Ionen gelöst vor. Durch diese Elektrolyte können Ladungen transportiert werden und es kann daher nach Anlegen einer Spannung Strom fließen. Fließt Strom durch einen elektrischen Leiter bestimmten Widerstandes, verliert er an Energie. Diese Energie bleibt im Allgemeinen als Wärme im Leiter zurück. Die Garzeit hängt bei diesem Versuch stark von der Zusammensetzung der Wurst und somit vom elektrischen Widerstand  $R$  und dem Durchmesser  $d$  ab. Durch eine größere Querschnittsfläche

$$A = \frac{d^2}{4} \pi \quad (27)$$

ergibt sich auch ein größerer spezifischer Widerstand  $\rho$  der mit der Querschnittsfläche  $A$ , der Länge  $l$  und dem elektrischen Widerstand  $R$  des Leiters durch

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (28)$$

verknüpft ist. Ist der spezifische Widerstand höher, verkürzt sich die Garzeit. Zum Beispiel kann ein niedrigerer Wassergehalt den elektrischen Widerstand erhöhen und die Garzeit dadurch verkürzen.

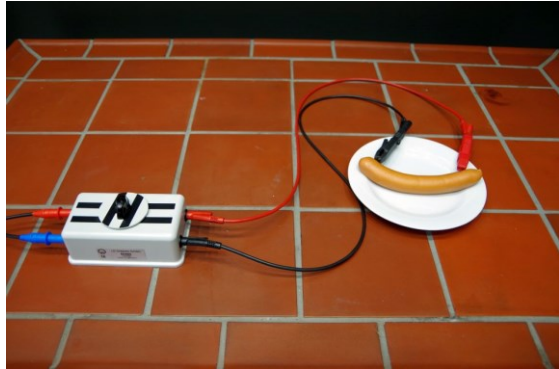


Abbildung 91: Versuchsaufbau (Bild: W. Winkler)



Abbildung 92: Würstel wird heiß (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Durch die Verwendung von Netzspannung ist bei diesem Versuch größte Vorsicht geboten. Die Verwendung eines zweipoligen Ausschalters ist hier zweckmäßig. [60, 61]

## Glühlampe leuchtet mit Salz

### Material

- Wasser
- Salz
- Becherglas
- Labornetzgerät (Laboratory DC Power Supply GPR-3020, GW, Taiwan)
- 6 V Glühlampe mit Fassung und Anschlüssen
- mehrere Kabel mit Stecker

### Durchführung und Beobachtung

Man baut einen Stromkreis gemäß Abbildung auf und füllt das Becherglas vorerst nur mit Wasser. Nach Anlegen einer Spannung leuchtet die Glühlampe nicht. Rührt man ein bis zwei Teelöffel Kochsalz in das Wasser, leuchtet die Glühlampe.

## Die Physik

Die elektrische Leitfähigkeit von Leitungswasser ist sehr gering ( $\sim 0,05 \text{ S/m}$ ) und hängt sehr stark von den darin gelösten Stoffen ab. Bringt man Kochsalz, eine ionische Verbindung von  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  in Wasser, dissoziiert das Salz. Das heißt, dass durch die lösende Wirkung der Wassermoleküle die Ionen auseinandergezogen werden und sich die Wassermoleküle um die Ionen orientieren. Diese liegen nun frei in der Lösung vor und können elektrischen Strom leiten, wenn man eine Spannung anlegt. Dabei wandern die Natriumionen zur Kathode und die Chlorionen zur Anode.

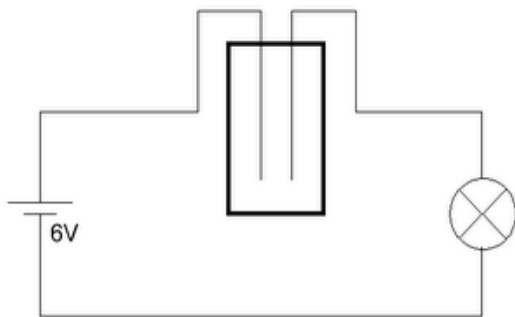


Abbildung 93: Elektrisches Schaltbild (Bild: kids-and-science.de)



Abbildung 94: Glühlampe leuchtet mit Salz im Wasser (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Man soll auf keinen Fall die Gefahr eines Stromschlages beim Hantieren mit Elektrogeräten und Wasser unterschätzen. Fällt der Fön in die eingelassene Badewanne in der man sitzt, droht ein Herzstillstand. [62-64]

## Material

- Mikrowellenherd
- zwei Tafeln Schokolade
- Lineal

## Durchführung und Beobachtung

Zwei Tafeln Schokolade werden nebeneinander auf einen flachen Teller gelegt, sodass sie ganz aufliegen. Der Teller wird dann auf den Tellerständer in der Mikrowelle gestellt, damit sich die Schokolade in der Mikrowelle nicht bewegt. Schaltet man dann die Mikrowelle für etwa dreißig Sekunden auf höchster Stufe ein, beginnt die Schokolade an einigen Stellen zu schmelzen. Nimmt man die Schokolade aus der Mikrowelle und misst den Abstand der Zentren zweier geschmolzenen Stellen, kann man mit Hilfe der Frequenz der Mikrowellen die Lichtgeschwindigkeit berechnen. Bei diesem Versuch wurde ein Abstand von 6,5 cm gemessen.

## Die Physik

Mikrowellengeräte erzeugen elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz  $f$  von  $2,45 \times 10^9$  Hz. Diese Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Der Abstand zwischen zwei geschmolzenen Stellen entspricht genau  $\frac{\lambda}{2}$ , also einer halben Wellenlänge der Mikrowellen, da hier die stehende elektromagnetische Welle die Schokolade durchdringt. Bei diesem Versuch wurde also eine Wellenlänge von 13 cm ermittelt. Da man die Frequenz und die Wellenlänge kennt, kann man über die Beziehung

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (29)$$



die Lichtgeschwindigkeit  $c$  berechnen. Hier ergab sich ein Wert von  $3,185 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ , was sehr nah am wahren Wert der Lichtgeschwindigkeit von  $2,997 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  liegt.



Abbildung 95: Schokolade im Mikrowellenherd (Bild: W. Winkler)

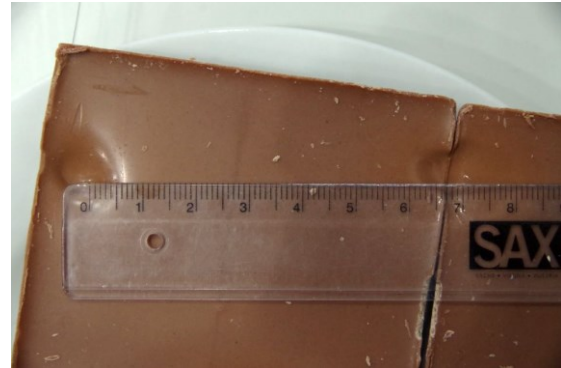


Abbildung 96: Abstand der beiden geschmolzenen Bereiche (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Man findet die richtige Stelle in der Mikrowelle, wo die Schokolade liegen muss oft nicht gleich, weshalb man mehrere Schokoladen vorbereiten sollte. Erhält man nur einen geschmolzenen Bereich, merkt man sich die Stelle, damit man die nächsten Schokoladetafeln richtig platziert um zwei oder mehrere geschmolzene Bereiche zu erhalten. Liegt die Schokolade nicht plan auf dem Teller auf, verrutscht sie beim Erhitzen und die Messung ist ungenau. Mit einer gefrorenen Schokolade zeichnen sich die geschmolzenen Stellen deutlicher ab. [14, 16]

## **Material**

- Maisstärke
- Speiseöl
- Holzlöffel
- Schüssel
- Luftballon
- Wolltuch oder Wollpullover

## **Durchführung und Beobachtung**

Die Maisstärke wird in der Schüssel mit dem Speiseöl zu einer dicken Paste vermischt. Der aufgeblasene Luftballon wird am Wolltuch elektrostatisch aufgeladen. Hält man einige Strähnen die vom Löffel mit der Maismehl-Speiseöl-Mischung hängen zum Luftballon hin, verdickt sich das Gemisch und die Strähnen bewegen sich unabhängig vom Holzlöffel zum Luftballon hin. Nähert man sich dem Luftballon sehr, fliegen einige Fetzen der Mischung auf den Ballon zu.

## **Die Physik**

Das Reiben des Luftballons an dem Wolltuch bewirkt, dass sich positive elektrische Ladungen an der Außenhaut des Luftballons sammeln. Die Elektronen der Stärkepartikel im Maismehl sind hingegen negativ geladen. Da zwischen entgegengesetzten Ladungen eine Anziehungskraft wirkt, zieht der Ballon die Partikel an. Die dem Ballon zugewandte Seite der Maismehlmischung ist somit negativer als die dem Ballon abgewandte Seite, die nun positiver ist. Obwohl von den positiven Seiten der Partikel eigentlich eine abstoßende Wirkung ausgeht, müssen sie der Bewegung folgen, da kein entgegengesetzt geladenes Pendant existiert. Die negativ geladenen Seiten der Partikel haben als solches ja den Luftballon. Die Ladungen können sich zwar zwischen den Stärketeilchen nicht frei bewegen, da das Öl sie

abschirmt, aber sie können sich komprimieren, da die dem Ballon abgewandten positiv geladen Seiten der Partikel die negativ geladenen Seiten anziehen. Dadurch rücken die Teilchen enger zusammen und die Paste verdickt sich.



Abbildung 97: Maismehl-Speiseöl-Gemisch wird von Luftballon angezogen (Bild: W. Winkler)

## Anmerkungen

Der Holzlöffel ist deshalb notwendig, da Holz ein Nichtleiter ist und die Ladungen nicht über ihn abfließen können. [16]

## Eisen in Cornflakes

### Material

- mit Eisen angereicherte Cornflakes
- starker Magnet
- PET-Flasche
- Schüssel
- Stößel
- Wasser

## Durchführung und Beobachtung

Die Frühstücksflocken werden in einer Schüssel mit einem Stößel zerkleinert, in die leere PET-Flasche gegeben und mit warmen Wasser übergossen. Dann wird die Flasche gut geschüttelt und etwa 20 Minuten stehen gelassen, bis sich eine eher dünnflüssige, breiige Konsistenz einstellt. Fährt man mit einem starken Magneten außen an der Flaschenwand entlang, kann man beobachten, dass immer mehr schwarze Späne der Bewegung des Magneten folgen. Hebt man den Magneten von der Flaschenwand, bleibt ein Fleck dieser Späne zurück und setzt sich wieder in Bewegung, wenn man den Magneten seitlich den Spänen nähert.

## Die Physik

Die Anreicherung von Nahrungsmitteln mit Eisen kann eine gute Maßnahme zur Gesundheitsförderung darstellen. Frühstücksflocken werden oft elementares Eisen in Mengen von etwa 8 bis 14 mg je 100 g zugefügt. Eisen kann magnetisiert werden, das heißt man beobachtet in einem Magnetfeld eine magnetische Polarisierung der Materie. Sie entsteht durch atomare magnetische Momente, die durch ein äußeres Magnetfeld  $B$  ausgerichtet werden. Eisen hat die Elektronenkonfiguration  $3d^6 4s^2$ . Die  $d$ -Elektronen sind hier für den Ferromagnetismus von Eisen verantwortlich. Das bedeutet, dass das Material permanent magnetisiert bleibt, wenn kein äußeres Magnetfeld vorherrscht. Ist die  $d$ -Unterschale gefüllt, tragen das magnetische Moment des Bahndrehimpulses und des Spins nicht mehr zu den magnetischen Eigenschaften des Elementes bei. Wird der Innenraum einer Spule der Fläche  $A$  mit Materie (z.B. einem Eisenkern) gefüllt, verändert sich der magnetische Kraftfluss

$$\Phi_m = \int B \cdot dA \quad (30)$$

um einen Faktor  $\mu$ . Dabei gilt für die magnetische Kraftflussdichte

$$B_{Materie} = \mu B_{Vakuum} \quad (31)$$

$\mu$  ist eine dimensionslose Materialkonstante und heißt relative Permeabilität. Diese ist für Eisen je nach Vorbehandlung mit 500-10000 angegeben. Das heißt, dass die magnetische Kraftflussdichte durch die Anwesenheit von Eisen erhöht wird. Der starke Magnet kann daher die Eisenspäne in den Frühstücksflocken anziehen und ansammeln.



Abbildung 98: Eisenspäne in Frühstücksflocken (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Es wird spekuliert, ob die Eisenspäne nicht auch vom Abrieb der Maschinen bei der Fertigung stammen könnte. Die Anreicherung von Nahrungsmitteln mit Eisen ist umstritten, da die Spanne zwischen Mangel und Eisenüberladungen des Organismus sehr klein ist. Relevant ist auch, in welcher Form das Eisen vorliegt, da dies die Bioverfügbarkeit maßgeblich beeinflusst. 2007 verschwand das häufig zur Anreicherung von Cornflakes verwendete Eisen-III-Diphosphat von der Liste der Europäischen Union welche Vitamine und Mineralstoffe bei der Herstellung von Nahrungsergänzungsmitteln verwendet werden dürfen. [15, 32, 58, 65-68]

## **Material**

- 1 Weintraube
- Teller
- Messer
- Mikrowelle mit Tellerständer

## **Durchführung und Beobachtung**

Eine Weintraube wird geteilt und eine Hälfte nochmal der Länge nach halbiert, sodass die beiden Hälften nur mehr von der Haut der Weintraube zusammengehalten werden. Das Stück Weintraube wird dann auf einen Teller gelegt und in die Mikrowelle gestellt. Man verwendet den Tellerständer, damit sich die Weintraube in der Mikrowelle nicht dreht. Danach schließt man die Mikrowelle und schaltet diese bei höchster Leistungsstufe ein. Nach einigen Sekunden kann man einen hellen Lichtbogen über der Weintraube beobachten, der von einem Brummen begleitet wird.

## **Die Physik**

Die Weintraube ist eine Frucht mit einem sehr hohen Wassergehalt. Das Wasser kann als Dielektrikum, also als ein Medium, das den Durchgang der Kraftlinien eines elektrostatischen Feldes erlaubt, aber keinen Strom leitet, angesehen werden. Die dielektrische Erwärmung von Lebensmitteln, insbesondere der Wassermoleküle darin ist das Hauptprinzip beim Kochen mit der Mikrowelle. Der Mikrowellenofen generiert eine Leistung von 800 W bei einer Frequenz von 2,4 MHz, was einer Wellenlänge von 12,5 cm entspricht. Die Wellenlänge im Ofen wird beim Durchgang durch dielektrisches Wasser auf 1,4 cm reduziert. Um eine Bogenbildung in der Luft der Mikrowelle zu erreichen, muss eine elektrische Feldstärke von  $30000 \text{ V cm}^{-1}$  generiert werden. Dadurch, dass die Traube nicht ganz durchgetrennt wurde, wirkt diese nun als Dipolantenne, bei der das Feld der Mikrowellen zwischen

den beiden Teilstücken fließt. Wird ein Spalt von 1 mm angenommen, muss nun ein Potential von 3000 V anliegen um eine Bogenbildung zu beobachten. Innerhalb der Traube und im kleinen Spalt werden die Äquipotentiallinien des Feldes verdichtet und der Spannungsgradient wird erhöht. Das verdichtete Feld erreicht nun mehr als 3000 V. Erhitzt sich die Traube, verdampft das Wasser im Inneren und durch dieses hohe Potential wird der Dampf in einen Plasmazustand angeregt. Das Plasma bildet nun einen kurzgeschlossenen Leiter und es entsteht im Bereich des Dampfes ein Lichtbogen.

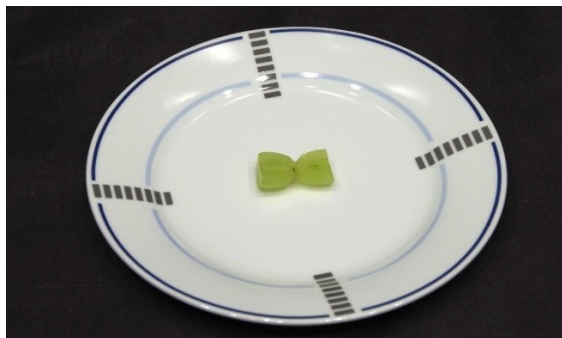


Abbildung 99: geschnittene Weintraube auf dem Teller (Bild: W. Winkler)

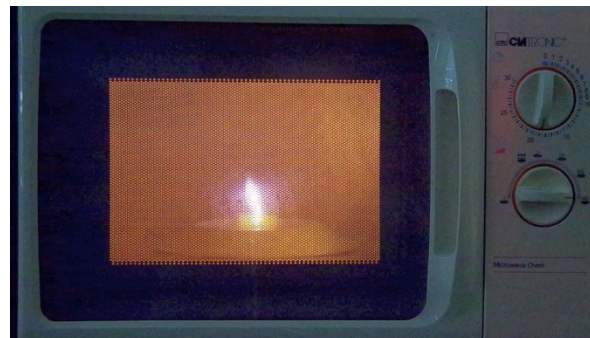


Abbildung 100: Plasma über der Weintraube (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

In der Traube befindet sich nicht reines Wasser, sondern die Flüssigkeit ist säurereich. Daher ist die Reaktion sicherlich komplexer als hier geschildert. Des Weiteren verdampft das Wasser in den Trauben sehr schnell, was den Mikrowellenofen beschädigen könnte, da eine Mikrowelle niemals ohne zu kochendes Material im Inneren betrieben werden sollte. Dies könnte das Magnetron der Mikrowelle beschädigen. Ein Glas Wasser im Inneren ist eine geeignete Last für das Magnetron. Jedoch funktioniert der Versuch dann nicht. Also sollte die Mikrowelle nach Bildung des Lichtbogens nicht zu lange in Betrieb sein. [8, 69]

## Material

- Würfelzucker
- Hammer
- Amboss
- Wintergrünöl

## Durchführung und Beobachtung

Ein Stück Würfelzucker wird auf einen Amboss gelegt und mit einigen Tropfen Wintergrünöl beträufelt. Dann wird in völlig dunkler Umgebung mit einem Hammer auf den Zucker geschlagen. Wird der Zucker vom Hammer zerdrückt, kann man einen bläulichen Lichtblitz, der vom Zucker ausgeht beobachten.

## Die Physik

Zucker, oder Saccharose ist ein Kohlenhydrat, das zu den nichtreduzierenden Disacchariden gehört und ist im festen Zustand ein kristalliner Festkörper. Das Molekül wird durch eine  $\alpha$ - $\beta$ -glycosidische Verknüpfung von  $\alpha$ -D-Glucose mit  $\beta$ -D-Glucose gebildet. Aufgrund des ungeordneten Auseinanderbrechens der Kristallstrukturen des Zuckers beim Zertrümmern der Kristalle mit dem Hammer entstehen Mikropartikel die elektrisch geladen sind. In den dadurch erzeugten elektrischen Feldern werden freie Elektronen beschleunigt. Auf Ihrer Bahn durch die luftgefüllten Zwischenräume der Kristallteile treffen diese auf Stickstoffmoleküle, die die Energie der Kollision absorbieren. Dabei wird Energie in Form von Licht abgestrahlt. Der Großteil der Strahlung liegt im für das menschliche Auge unsichtbaren UV-Bereich des elektromagnetischen Spektrums, aber ein kleinerer Teil liegt im sichtbaren Bereich und wird als blauer Lichtblitz wahrgenommen. Ein einzelner Lichtblitz dauert zwar nur etwa  $1 \mu\text{s}$ , aber die große Anzahl der Lichtblitze zusammen ergeben diese beobachtbare Leuchterscheinung.





Abbildung 101: Schlag mit dem Hammer auf den Würfelzucker (Bild: W. Winkler)

### Anmerkungen

Der Begriff Tribolumineszenz kommt vom griechischen „tribein“ für reiben. Diese Leuchterscheinung ist auch beim Abreißen von Klebestreifen zu beobachten. Hier sind aber auch die Moleküle des Klebers und der Unterlage beteiligt, die von den Elektronen angeregt werden und beim Übergang in den Grundzustand Licht emittieren. Für das Beobachten des Lichtes ist unbedingt ein dunkeladaptiertes Auge notwendig, da das Leuchten sonst nicht wahrgenommen werden kann. Eine weitere Variante des Versuches ist, eine Stahlkugel durch einen durchsichtigen Zylinder mit geringfügig größerem Durchmesser als die Kugel auf den Würfelzucker fallen zu lassen. Wintergrünöl ist für diesen Versuch nicht zwingend notwendig, verstärkt aber die Lichtblitze, sodass diese auch bei weniger abgedunkelten Räumen sichtbar sind.

Bei der Durchführung des Versuches war es leider nicht möglich die Leuchterscheinung fotografisch festzuhalten, aber ein Leuchten war auf jeden Fall zu sehen. [30, 46]

## 3.5 Versuche zur Akustik

### Klänge aus der Tasse

#### **Material**

- Kaffeetasse aus Keramik
- Löskaffee
- Kaffeelöffel

#### **Durchführung und Beobachtung**

Zwei Kaffeelöffel Löskaffee werden in eine Tasse gegeben und mit heißem Wasser aufgebraht. Nach dem Umrühren, schlägt man etwa eine Minute lang wiederholt mit dem senkrecht gehaltenen Löffel von innen auf den Boden der Tasse. Dabei erzeugt der auf den Tassenboden treffende Löffel immer höher werdende Klänge.

#### **Die Physik**

Die Kaffeetasse verhält sich beim Anschlagen wie eine Glocke, wobei der Klang hauptsächlich von der Geometrie, dem Material und der Dicke der Tasse abhängt. Außerdem beeinflusst der Flüssigkeitsstand in der Tasse auch die Tonhöhe. Das kann man beim Einschenken einer Tasse beobachten, wo mit zunehmender Füllstandhöhe der Klang aus der Tasse immer höher wird. Daher könnte man vermuten, dass der Grund im Umrühren liegt, wodurch der Pegel in der Mitte leicht absinkt und am Rand der Tasse etwas steigt (siehe Versuch „Teeblätter in der Mitte der Tasse“). Aber diese Änderungen des Pegels reichen bei weitem nicht aus um die bis zu einer vollen Oktave ansteigenden Tonhöhen zu erklären. Hinzu kommt, dass das Phänomen auch bei ruhender Flüssigkeit auftritt. Die Ursache der ansteigenden Tonhöhe liegt in den Luftbläschen in der Flüssigkeit die entstehen, wenn man den Löskaffee mit Wasser übergießt. Löst sich der Kaffee bilden die flüchtigen Bestandteile des Extraktes kleine Bläschen. Zusätzlich ist auch im Wasser gelöste Luft vorhanden und die Pulverkörnchen wirken als Kristallisationskeime für die Entstehung weiterer Luftbläschen

(siehe Versuch „Gasbläschen im Sektglas“). Diese Bläschen verringern die Ausbreitung des Schalles in der Flüssigkeit, da die Schallgeschwindigkeit in Luft geringer ist als in Wasser. Die Schallgeschwindigkeit in einer Flüssigkeit oder einem Gas hängt von der Komprimierbarkeit und der Massendichte ab. Die Luftbläschen verdichten vorübergehend die Schallwellen, wodurch zunächst die Tonhöhe niedriger ist, wenn sich das Pulver löst. Steigen nach und nach die Gasbläschen an die Flüssigkeitsoberfläche und platzen, ist die Schallgeschwindigkeit nur mehr in einem kleineren Teil der Flüssigkeit erniedrigt und die Tonhöhe steigt entsprechend.



Abbildung 102: Versuchsdurchführung (Bild: W. Winkler)

### **Anmerkungen**

Das Anschlagen des Becherbodens führt zu größeren Tonintervallen, als das Anschlagen der Seitenwände der Tasse, da die Schallwellen einen größeren Weg zur Flüssigkeitsoberfläche zurücklegen müssen. Rührt man abermals um und schlägt an den Tassenboden ist die Tonhöhe erneut niedriger, da neue Gasbläschen entstehen und der Effekt wie oben beschrieben tritt erneut auf. Jedoch ist mit jeder Wiederholung die anfängliche Erniedrigung der Tonhöhe kleiner, da weniger Gas aus der Lösung gehen kann und weniger Luftbläschen in der Flüssigkeit vorhanden sind. Mit kaltem Wasser funktioniert dieser Versuch nicht so gut, da hier mehr Gas in Lösung bleibt. Mit Tee funktioniert dieser versuch nicht so gut, da weniger Bläschen als bei löslichem Kaffee entstehen. [16, 70]

## **Material**

- dunkle, quadratische Metallplatte mit Halterung
- Stativ
- Zucker
- gut gespannter und kolophonierter Geigenbogen

## **Durchführung und Beobachtung**

Die Metallplatte wird waagrecht in der Mitte auf einen Stativständer montiert und mit etwas Zucker bestreut. Streicht man mit einem Geigenbogen über die Kante der Platte, hört man einen Klang und es entstehen Muster aus Zucker auf der Platte. Variiert man die Stelle wo man streicht, oder hält einen Finger an einer beliebigen Stelle der Plattenkante, so verändern sich die entstehenden Muster. Streicht man verschieden stark über die Kante, verändert sich der Ton und die Muster werden komplexer.

## **Die Physik**

Musikinstrumente genauso wie das atomare Gitter der Metallplatte bevorzugen bestimmte Schwingungs- und Wellenformen. Durch das Anstreichen der Außenkanten mit dem Geigenbogen, wird die Platte zu klingenden Eigenschwingungen angeregt. Diese zweidimensionalen Eigenschwingungen äußern sich als stehende Wellen mit Schwingungsknoten und -bäuchen. An den Knotenflächen im Abstand von  $\lambda/2$  ruhen die Teilchen und an den Bauchflächen schwingen sie maximal. Dadurch bleibt der Zucker an den Stellen der Schwingungsknoten liegen und wird an allen anderen Bereichen weggeschleudert. Das Mehl zeichnet deutlich die Schwingungsform der Platte nach und die Knotenlinien erscheinen als helle Linien auf dunklem Untergrund. Streicht man stärker mit dem Bogen über die Kante, werden auch verschiedene Oberschwingungen angeregt und kompliziertere Muster

mit mehreren Knoten entstehen. Durch das Niederdrücken der Plattenkante mit einem Finger verändert man die Randbedingungen und gibt einen Knotenpunkt vor. Dadurch entstehen wiederum andere Muster. [15, 71]



Abbildung 103: Chladnische Klangfigur (Bild: W. Winkler)

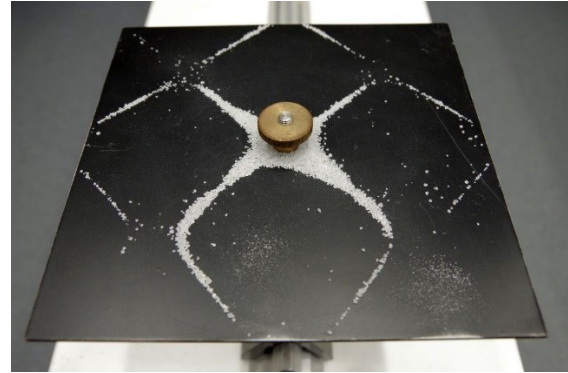


Abbildung 104: Chladnische Klangfigur (Bild: W. Winkler)

### 3.6 Versuche zur Optik

#### Atmosphäre aus Milch

##### **Material**

- Milch
- Wasser
- Becherglas
- Taschenlampe

##### **Durchführung und Beobachtung**

In ein Becherglas mit Wasser gibt man etwas Milch, sodass eine leichte Trübung auftritt, aber man nicht mehr durchblicken kann. Wird der Raum verdunkelt und leuchtet man mit einer Taschenlampe von hinten auf das Becherglas, sieht man einen bläulichen Lichtschein. Leuchtet man von der Seite auf die Flüssigkeit, so erscheint das Licht rötlich.

## Die Physik

Aus dem Huygens-Fresnel'schen Prinzip folgt, dass Wellen ihre Ausbreitungsrichtung ändern, wenn sie auf Spalte oder Partikel stoßen. Diese Erscheinung, dass ein Teil von Licht aus der geradlinigen Bahn abgelenkt wird, nennt man Streuung. Da die Intensität des gestreuten Lichtes proportional zu  $1/\lambda^4$  ist, wirken sich kleine Wellenlängen stärker aus als große. Violette und blaues Licht wird viel stärker gestreut als rotes und oranges. Beim Durchgang des Lichts in Blickrichtung dominiert der nicht so stark gestreute und damit stärker hindurchgehende rote Anteil des Lichts. Beim Betrachten des Lichts von der Seite, dominiert der intensiver gestreute blaue Anteil des weißen Lichts und die Flüssigkeit erscheint bläulich. Bei Teilchen, die kleiner als die Wellenlänge des Lichts sind, zum Beispiel Atome und Moleküle, kommt es zur sogenannten Rayleigh-Streuung. Sind die Teilchen sehr viel größer als die Wellenlänge, reflektieren diese einfach mit ihrer Oberfläche das Licht, was man als Zusammenwirken vieler Huygens-Streuzentren darstellen kann. Haben die Teilchen etwa die Größe der Wellenlänge, tritt ein Übergangsfall auf, die Mie-Streuung wo die  $1/\lambda^4$ -Abhängigkeit nicht gilt. Dies ist als der sogenannte Tyndall-Effekt bekannt und ist bei seitlicher Betrachtung sichtbar. Die Fettkügelchen in der Emulsion sind nicht viel größer als die Wellenlängen, sodass hier noch die Mie-Streuung gilt und alle Wellenlängen gleich stark gestreut werden. Daher erscheint das Licht bei seitlicher Betrachtung bläulich.



Abbildung 105: Licht von der Seite (Bild: W. Winkler)



Abbildung 106: Licht von hinten (Bild: W. Winkler)

## **Anmerkungen**

Man sollte zuerst nur eine kleine Menge Milch dem Wasser zugeben, da bei einer zu trüben Emulsion das oben geschilderte nicht gut beobachtbar ist. Dieser Versuch ist sehr gut geeignet um die Phänomene des blauen Himmels und des Abendrots zu erklären. [17, 71-73]

## Fettfleckphotometer

### **Material**

- Fettfleckfotometer mit Fettfleck und zwei Kerzen

### **Durchführung und Beobachtung**

Man zündet die beiden Kerzen links und rechts des Fettflecks an und beobachtet den Fettfleck. Ist er noch sichtbar, verschiebt man die Kerzen solange, bis der Fettfleck von beiden Seiten unsichtbar wird. Verwendet man eine Normallichtquelle mit bekannter Lichtstärke, kann man mit diesem Apparat die Lichtstärke der zweiten Lichtquelle messen.

### **Die Physik**

Unser Auge kann Helligkeit sehr schlecht absolut messen, aber die die Beleuchtungsstärken zweier benachbarter Bereiche sehr genau vergleichen, wenn auf beide Licht gleicher Farbe trifft. Ist der Fleck unsichtbar, dann sind die Beleuchtungsstärken beiderseits gleich. Ein Teil des Lichtes geht durch den Fettfleck hindurch, der andere Teil wird reflektiert und absorbiert. Wird das Licht das durch den Fettfleck durchgeht, genau durch das Licht kompensiert, das von der anderen Seite durchkommt, kann man den Fleck nicht mehr erkennen. Ermittelt man die Abstände der beiden Lichtquellen zum Fettfleck  $r_1$  und  $r_2$ , kann man über die Beziehung

$$\frac{I}{r_2^2} = \frac{I_0}{r_1^2} \quad (32)$$

die zu messende Lichtstärke  $I$  zu

$$I = I_0 \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (33)$$

ermitteln.  $I_0$  ist hier die bekannte Lichtstärke.



Abbildung 107: Fettfleckfotometer (Bild: W. Winkler)

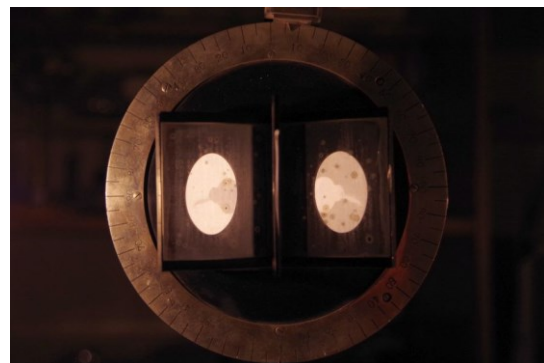


Abbildung 108: Unterschiedliche Helligkeit des Fettflecks (Bild W. Winkler)

### Anmerkungen

Das Fettfleckphotometer nach Robert Wilhelm. BUNSEN kann man auch mit einfachen Mitteln selber nachbauen. Mit zwei unterschiedlich starken Glühlampen und einem Blatt Papier mit einem Fleck aus Speiseöl kann man die Helligkeit der Lampen qualitativ bestimmen. Man ermittelt wieder die Abstände der beiden Lichtquellen zum Fettfleck wo dieser verschwindet und kann durch das Verhältnis der Abstände zum Quadrat auf die Helligkeitsverhältnisse schließen. [4, 71]



## 4. Literaturverzeichnis

1. Wiesner H, Schecker H, Hopf M (2011) Physikdidaktik kompakt. [Hallbergmoos] : Aulis-Verl.
2. Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen, Fassung vom 13.06.2017 . <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008568>. Accessed 06/13 2017
3. Bublath J (1989) Das Knoff-Hoff Buch. Wilhelm Heyne Verlag, München
4. Churchill ER, Loeschig LV, Mandell M, Zweifel FW (2000) 365 einfache Experimente für junge Forscher. Könenmann, Köln
5. Wittmann J (1994) Trickkiste 1, Experimente wie sie nicht im Physikbuch stehen. Bayerischer Schulbuch-Verl, München
6. Moffatt HK, Shimomura Y (2002) Classical dynamics: Spinning eggs - a paradox resolved. Nature 416:385
7. Die Auflösung unseres Osterrätsels 2013 . <http://pro-retina-rgstuttgart.de/2013/die-aufloesung-unseres-oster-raetsels-2013/>. Accessed 04/13 2017
8. Bublath J (1988) Das neue Knoff-Hoff Buch. G+G Urban Verlag, München
9. Erdbeereis aus flüssigem Stickstoff . <http://www.experimentalchemie.de/versuch-037.htm>. Accessed 04/13 2017
10. Warum poppt Popcorn?. <http://www.wdr.de/tv/kopfball/sendungsbeitraege/2010/0117/popcorn.jsp>. Accessed 04/13 2017
11. Schwedenbombe in der Mikrowelle (2014). [https://youtu.be/tEJX\\_0RelA8](https://youtu.be/tEJX_0RelA8). Accessed 05/28 2017
12. Ein Minifeuerwerk in der Adventszeit . <http://www.kids-and-science.de/experimente-fuer-kinder/detailansicht/datum/2009/10/18/ein-minifeuerwerk-in-der-adventszeit.html>. Accessed 02/04 2017
13. Draht schmilzt durch Eisblock . <http://physikshow.uni-bonn.de/versuche/DrahtEisblock.html>. Accessed 04/13 2017
14. Kuchling H (2014) Taschenbuch der Physik. Hanser Fachbuchverlag

15. Experimentalphysik 1; Mechanik und Wärme (2015) Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 7. Aufl. 2015
16. O'Hare M (2009) Wie man mit einem Schokoriegel die Lichtgeschwindigkeit misst und andere nützliche Experimente für den Hausgebrauch. Fischer-Taschenbuch-Verl., Frankfurt, M.
17. Giancoli DC (2010) Physik; Lehr- und Übungsbuch. Pearson Studium / Pearson, Higher Education, München [u.a.]
18. Ein Versuch mit Gummibärchen . <http://www.kids-and-science.de/experimente-fuer-kinder/detailansicht/datum/2009/08/06/ein-versuch-mit-gummibaerchen.html>. Accessed 01/14 2017
19. Vogelfuß auf Eis . <http://www.weltderphysik.de/thema/hinter-den-dingen/winterphaenomene/vogelfuss-auf-eis/>. Accessed 04/20 2017
20. Kältemischung selber herstellen - mit Wasser Eis und Kochsalz . <http://www.kids-and-science.de/experimente-fuer-kinder/detailansicht/datum/2009/11/04/kaeltemischung-selber-herstellen-mit-wasser-eis-und-kochsalz.html>. Accessed 02/04 2017
21. Versuch 66: Fettbrand . <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/2630>. Accessed 04/20 2017
22. Whoosh Bottle . <http://weirdsciencekids.com/Whooshbottle.html>. Accessed 04/20 2017
23. Kesselformel . <http://www.win-ing.de/daten/kesselformel>. Accessed 05/26 2017
24. Kesselformel, Kessel-Formel, Bockwurst-Formel . <http://www.wipo.krv.de/begriffserklaerungen/75-kesselformel.html>. Accessed 04/14 2017
25. Warum platzt die Wurst immer der Länge nach . <http://www.wurstakademie.com/blog/physik-warum-platzt-wurst-immer-der-laenge-nach>. Accessed 06/07 2017
26. Thixotropie . <http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/thixotropie.glos.html>. Accessed 05/01 2017
27. Bublath J (1993) Das neue Knoff-Hoff Buch. Wilhelm Heyne Verlag, München
28. Ramachandran R, Nosonovsky M (2014) Vibro-levitation and inverted pendulum: parametric resonance in vibrating droplets and soft materials. Soft Matter. Doi:10.1039/C4SM00265B

29. Fluid Dynamics . [http://sirius.ucsc.edu/demoweb/fl\\_pr ht/dynamic.php](http://sirius.ucsc.edu/demoweb/fl_pr ht/dynamic.php). Accessed 05/01 2017
30. Berthold C, Hilscher H (2004) Akustik, Wärme, Elektrizität, Magnetismus, Optik; Physikalische Freihandexperimente. Aulis Verl. Deubner, Köln
31. Berthold C, Hilscher H (2004) Mechanik; Physikalische Freihandexperimente. Aulis Verl. Deubner, Köln
32. Spangler S (2010) Naked eggs and flying potatoes; unforgettable experiments that make science fun. Greenleaf Book Group Press, Austin, Tex.
33. Eine merkwürdige Flüssigkeit – Anomalie des Wassers (2009). <https://www.sonnetaler.net/aktivitaeten/materie/wasser/anomalie/>. Accessed 05/28 2017
34. Amtlich herausgegeben (2014) Europäisches Arzneibuch.
35. 5. Das Problem der Volumprozent (2007). <http://pxp-wien.pharmxplorer.at/uebungen/ccmath/ck0105.php>. Accessed 05/26 2017
36. Kaffee und Alkohol - Kampf der Oberflächenspannungen . <http://www.kids-and-science.de/experimente-fuer-kinder/detailansicht/datum/2009/08/11/kaffee-und-alkohol-kampf-der-oberflaechenspannungen.html>. Accessed 01/14 2017
37. Mehr zur Oberflächenspannung . <https://www.translatorscafe.com/unit-converter/DE/surface-tension/#39>. Accessed 04/15 2017
38. Marangoni C (1871) Ueber die Ausbreitung der Tropfen einer Flüssigkeit auf der Oberfläche einer anderen. Annalen der Physik. Doi:10.1002/andp.18712190702
39. Müller S (2013) \*\* Alkohol in Wasser, Oberflächenspannung.
40. Schlichting HJ (1992) Spiel mit den Elementen: Wasser und Luft in Freihandexperimenten. Praxis der Naturwissenschaften - Physik 41:1
41. Grundtechniken Filzen . <https://www.filzpackerl.at/filztechniken-allgemein>. Accessed 04/20 2017
42. Cartwright JHE, Piro O, Villacampa AI (2002) Pattern formation in solutal convection: vermiculated rolls and isolated cells. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)01080-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371(02)01080-4)
43. Rosato A, Strandburg KJ, Prinz F, Swendsen RH (1987) Why the Brazil nuts are on top: Size segregation of particulate matter by shaking. Phys Rev Lett 58:1038

44. Schlichting HJ, Nordmeier V, Jungmann D (1996) Die Großen landen immer oben - Phänomene der Selbstorganisation beim Schütteln von Kugeln. Physik in der Schule 34:191
45. Rentzsch W (1995) Experimente mit Spaß. Hölder-Pichler-Tempsky, Wien
46. (1999) Taschenbuch der Chemie. Fachbuchverl. Leipzig, München ; Wien
47. Ucke C, Schlichting H (2011) Spiel, Physik und Spaß; Physik zum Mitdenken und Nachmachen. Wiley-VCH, Weinheim
48. Versuch Nr.040 Bier - Experimente (Schaum-Rätsel) . <http://www.experimentalchemie.de/versuch-040.htm>. Accessed 02/04 2017
49. Coffey TS (2008) Diet Coke and Mentos: What is really behind this physical reaction? American Journal of Physics. Doi:10.1119/1.2888546
50. Coanda Effect: Understanding Why Wings Work (2004). [http://www.karmak.org/archive/2003/02/coanda\\_effect.html](http://www.karmak.org/archive/2003/02/coanda_effect.html). Accessed 05/21 2017
51. Zusammensetzung der Milch (2007). <http://www.chemieunterricht.de/dc2/milch/m-zustzg.htm>. Accessed 05/23 2017
52. Festigkeit von Glas . <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/materialeigenschaften/festigkeit-von-glas-159075>. Accessed 06/08 2017
53. Die Kunst des Sabrierens . <http://www.gourmet-magazin.de/trinken/champagner/646-die-kunst-des-sabrierens.html>. Accessed 06/08 2017
54. Champagnersäbel . <http://www.premium-champagner.de/wissenswertes/champagnersaebel/>. Accessed 06/08 2017
55. Johnson H (1999) Wein genießen mit Hugh Johnson. Hallwag AG, Bern
56. Versuch: Thermoschockverhalten von Glas . <http://www.bimbel.de/artikel/artikel-8.html>. Accessed 06/08 2017
57. Brandl H (1998) Trickkiste Chemie. Bayerischer Schulbuch-Verlag, München
58. Krane KS (2015) Atom-, Kern- und Teilchenphysik an den Grazer Universitäten. Wiley Custom
59. Erzeugung der Natrium - Linien / "Leuchtende Essiggurke" . [http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Lehrerfortbildung/Frey/14\\_natrium\\_d\\_linie.pdf](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Lehrerfortbildung/Frey/14_natrium_d_linie.pdf). Accessed 05/23 2017

60. Versuchsbeschreibungen - Würstchen mit Strom garen (2013). <http://physikshow.uni-bonn.de/index.php?job=Versuche&versuch=Wurst>. Accessed 05/31 2017
61. Bockwurstleiter: Elektrischer Leiter . [http://www.physik.uni-regensburg.de/infra/vorl-vorb/VorlVorb/Versuche/VK\\_22\\_4\\_d.htm](http://www.physik.uni-regensburg.de/infra/vorl-vorb/VorlVorb/Versuche/VK_22_4_d.htm). Accessed 05/31 2017
62. Elektrische Leitfähigkeit - Versuche mit Wasser und Kochsalz . <http://www.kids-and-science.de/experimente-fuer-kinder/detailansicht/datum/2009/08/10/elektrische-leitfaehigkeit-versuche-mit-wasser-und-kochsalz.html>. Accessed 06/03 2017
63. Properties of ionic compounds . <http://www.dynamicscience.com.au/tester/solutions1/chemistry/bonding/bonding5.htm>. Accessed 06/03 2017
64. Elektrische Leitfähigkeit . [http://www.chemie.de/lexikon/Elektrische\\_Leitfaehigkeit.html](http://www.chemie.de/lexikon/Elektrische_Leitfaehigkeit.html). Accessed 06/10 2017
65. Hurrell R, Bothwell T, Cook JD, Dary O, Davidsson L, Fairweather-Tait S, Hallberg L, Lynch S, Rosado J, Walter T, Whittaker P (2002) The Usefulness of Elemental Iron for Cereal Flour Fortification: A SUSTAIN Task Force Report. Nutr Rev. Doi:10.1301/002966402320964061
66. BGVV (2002) Frühstückscerealien unter Zusatz von Eisen.
67. Eisen in Frühstücksflocken (2016). <http://illumina-chemie.de/eisen-in-fruehstuecksflo-cken-t4163.html>. Accessed 06/15
68. Warnzeichen für Eisenmangel . [http://www.t-online.de/gesund-heit/id\\_65338816/warnzeichen-fuer-eisenmangel.html](http://www.t-online.de/gesund-heit/id_65338816/warnzeichen-fuer-eisenmangel.html). Accessed 05/26 2017
69. Re: Why do grapes spark in the microwave?(1997). <http://www.madsci.org/posts/archives/dec97/882909591.Ph.r.html>. Accessed 02/04 2017
70. Crawford FS (1982) The hot chocolate effect. American Journal of Physics
71. (2010) Gerthsen Physik. Springer, Berlin [u.a.]
72. Streuung und Absorption von Licht . <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/streuung-und-absorption-von-licht>. Accessed 06/02 2017
73. Tyndall Effekt . <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/tyndall/tyndall.htm>. Accessed 05/28 2017